



JEREB GÁBOR

**VITORLÁZÓ
REPÜLŐGÉPEK**

Jereb Gábor

Vitorlázó repülőgépek

Jereb Gábor

Vitorlázó repülőgépek

Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977

Lektorálták:

JÁNOVSZKY LÁSZLÓ
okl. gépészmérnök

RUBIK ERNŐ

Kossuth-díjas,
okl. gépészmérnök

© JEREB GÁBOR, 1977

ETO: 629.734.334

ISBN: 963 10 1711 7

Felelős kiadó: SOLT SÁNDOR igazgató

Felelős szerkesztő: NAGYNÉ BAKA GABRIELLA okl. gépészmérnök

Tartalomjegyzék

Előszó	9
Bevezetés	11
A motor nélküli repülőgép	12
A motor nélküli repülés lehetősége	14
Repülés függőleges légáramlatokban	20
Hogyan válik a motor nélküli repülőgép vitorlázó repülőgéppé?	21
A vitorlázó repülőgép és a vitorlázórepülés	26
1. A vitorlázó repülőgép története	31
1.1. 1920 előtt	32
1.2. 1920-tól a második világháborúig	38
1.2.1. Mai vitorlázó repülőgépeink ősei	49
1.2.2. A termikus távrepülés új igényeket támaszt	55
1.3. Merre tart a vitorlázó repülőgépek fejlődése?	69
2. A vitorlázó repülőgépek kialakításának elméleti alapjai.....	73
2.1. A vitorlázó repülőgép aerodinamikája	73
2.1.1. A folyadéksúrlódás és a határréteg	76
2.1.2. A testek ellenállása	77
2.1.3. A végtelen terjedtségűnek tekintett szárny körüli áramlás jelenségei	80
2.1.3.1. A szárnyra ható erők és nyomatékuk	80
2.1.3.2. A szárnyszelvények aerodinamikai tulajdonságai	85
2.1.3.3. A kormányfelületek aerodinamikája	91

2.1.4.	A véges terjedtségű szárny	94
2.1.4.1.	A felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása és az indukált ellenállás	94
2.1.5.	A repülőgép polárgörbéje	99
2.1.6.	A vitorlázó repülőgép jellemző teljesítményadatai	100
2.2.	A vitorlázó repülőgép repülési tulajdonságai	101
2.2.1.	A vitorlázó repülőgép stabilitása	102
2.2.1.1.	A statikus hossz-stabilitás	103
	A szárny nyomatóka. A vízszintes farokfelület szerepe	104
	A vízszintes farokfelület méretei, elhelyezése és beállítási szöge	106
	A hossz-stabilitás mértéke. Az egyensúlyi helyzet megváltoztatása	109
	A közepes aerodinamikai húr és az egyenértékű szárny	111
	A súlypontvándorlás megengedhető határai	112
2.2.1.2.	A dinamikus hossz-stabilitás	114
2.2.1.3.	A repülőgép iránystabilitása	116
	A szélzázsló-stabilitás. A függőleges farokfelület és a szárny V állásának szerepe	117
	A törzs alakjának szerepe a repülőgép iránystabilitásában. Mekkora legyen a függőle- ges farokfelület?	119
2.2.1.4.	A repülőgép oldalstabilitása	120
	A szárny csillapítása orsózó mozgásban	122
	A dinamikus oldalstabilitás problémái	123
2.2.2.	A vitorlázó repülőgép kormányzása és kormányozhatósága	124
2.2.2.1.	A kormányzás elve és hatásossága	125
	A magassági és az oldalkormány	125
	A pillangókormányban egyesített magassági és oldalkormány	127
	A repülőgép hossz tengely körüli kormányzása. A csűrőkormány	128
2.2.2.2.	A kormánysszerveken a kormányok kitérítésekor kifejtendő erők	131
	A csuklónyomaték	131
	A kormányerők összhangja és a kormányerők csökkentésének módjai	132
	Az elengedett kormányval mutatott stabilitás és a kormányerő összefüggései	134
2.2.3.	Két különleges repülési fázis: az átesés és a dugóhúzó	136
2.2.3.1.	A repülőgép repülési tulajdonságai kis sebességekkel. Az átesés	136
2.2.3.2.	A dugóhúzó	138
3.	A korszerű vitorlázó repülőgépek	141
3.1.	Teljesítmény-vitorlázógépek	141
3.1.1.	Az átlagsebesség mint teljesítménymérce	143

3.1.2.	A repülőgépezetők képességeinek és a termik emelkedési sebességének hatása az átlagsebességre	144
3.1.3.	A vitorlázó repülőgép jósági fokát meghatározó tényezők az átlagsebesség szemszögéből	145
3.1.4.	A szárny kialakításának szempontjai	147
3.1.4.1.	A felületi terhelés nagyságának hatása	147
3.1.4.2.	A korszerű szárnyszelvények jellegzetességei	148
3.1.4.3.	Az oldalviszony és a fesztávolság hatása	152
3.1.4.4.	A szárny alaprajzi alakja és az elcsavarás	153
3.1.4.5.	A szárnyvégek kialakítása és az ellenállás kapcsolata	155
3.1.4.6.	A szárnyfelület simaságának hatása a polárgörbe alakulására	156
3.1.4.7.	Felhajtóerőt növelő szerkezetek. Változtatható alakú szárnyak	159
3.1.5.	A törzs kialakítása	162
3.1.6.	A szárny és a törzs közötti átmenet kialakítása	167
3.1.7.	Féklapok	170
3.1.8.	Hogyan érvényesülnek a korszerű vitorlázórepülés elvei a teljesítmény-repülőgépek kialakításában?	171
3.1.8.1.	Az <i>M—30 Fergeteg</i>	171
3.1.8.2.	Az <i>OE—01</i>	173
3.1.8.3.	A <i>Beatty—Johl BJ—3</i> , egy különleges időjárési területre tervezett vitorlázó repülőgép	175
3.1.8.4.	A <i>Sigma I</i> kísérleti vitorlázó repülőgép	177
3.2.	Iskola-vitorlázógépek	179
3.3.	Különleges vitorlázó repülőgépek	183
3.3.1.	Farok nélküli és csupaszárny vitorlázó repülőgépek	183
3.3.1.1.	Az önmagában repülő szárny problémái	184
3.3.1.2.	Néhány megépült farok nélküli és csupaszárny vitorlázó repülőgép	191
3.3.2.	Kacsa-elrendezésű repülőgépek	194
4.	A vitorlázó repülőgépek szilárdsága	196
4.1.	A légerőkből származó terhelések	197
4.2.	A földi erőkből származó terhelések	205
4.3.	Egyéb terhelések	207
4.4.	A vitorlázó repülőgép terhe éseinek változása műrepülés közben	208
4.5.	A vitorlázó repülőgépek építésére és légialkalmasságának feltételeire vonatkozó előírások	211
4.6.	A vitorlázó repülőgépek részeinek szilárdsági igénybevételei	217
4.6.1.	A szárny szilárdsági igénybevételei	217
4.6.2.	A farokfelület szilárdsági igénybevételei	225

4.6.3.	A törzs szilárdsági igénybevételei	226
4.7.	A vitorlázó repülőgépek szerkezetének merevsége és rezgésmentessége	229
4.7.1.	Néhány szó a rezgőrendszerekről	234
4.7.2.	A vitorlázó repülőgép szerkezeti részei mint önálló rezgőrendszerek	235
4.7.2.1.	A szárny	235
4.7.2.2.	A törzs és a vitorlázó repülőgép egyéb részeinek rezgései	238
4.7.3.	A repülőgép általános rezgései	239
4.7.4.	A rezgéseket gerjesztő erőhatások	240
4.7.5.	A hajlító- és a csavarórezgések kapcsolódása	242
5.	A vitorlázó repülőgépek szerkezete	245
5.1.	A vitorlázó repülőgépek szerkezetének általános elrendezése és osztályozása	246
5.2.	Építési anyagok	250
5.2.1.	Faanyagok	250
5.2.2.	Fémek	253
5.2.3.	Műanyagok	254
5.3.	Faszerkezetű vitorlázó repülőgépek	256
5.4.	Két különleges szerkezetű vitorlázó repülőgép	259
5.5.	Fémépítésű vitorlázó repülőgépek	262
5.6.	Üvegszálerősítésű műanyagból készült vitorlázó repülőgépek	267
5.6.1.	Üvegszálerősítésű műanyag repülőgépszerkezetek szilárdsági problémái	267
5.6.2.	Az üvegszálerősítésű műanyag vitorlázó repülőgép szerkezete és gyártása	272
	Irodalom	277
	Név- és tárgymutató	279

Előszó

A repülés a huszadik században a közlekedés egyik fontos ága. A vitorlázórepülés a repülésnek olyan változata, amikor a repülőgép a beépített motor energiája helyett a légkörben rejlő energiákat kutatja fel és hasznosítja. Ezt három tényező összműködése teszi lehetővé: a légköri energiák természetének ismerete, a repülőgép célszerű kialakítása ezek kihasználására és a repülőgép vezetőjének szakismeretei és készsége.

Jereb Gábor „Vitorlázó repülőgépek” című könyve a vitorlázórepülés eszközeit mutatja be. Ismerteti a vitorlázó repülőgépet, a légköri energiák hasznosítására alkalmassá tevő célszerű kialakítás elveit és megoldásait, és ismerteti a magyar repülőgép-tervezők kiváló alkotásait is, amelyek a világ figyelmét nem egyszer hívták fel a magyar mérnök alkotó tudására.

Napjainkban a repülés szakembereinek képzése és szaktudásának állandó fokozása a technika egyre gyorsuló fejlődése miatt mind fontosabbá válik. A „Vitorlázó repülőgépek” hiányt pótló, jó könyv, amely ezeknek a célkitűzéseknek a valóraváltását saját szakterületén értékesen segíti elő. A Műszaki Könyvkiadó a hasonló szakkönyvek kiadásával hagyományainak megfelelő, jó szolgálatot tesz a repülés ügyének.

Kívánom, hogy e könyv sikerrel töltse be feladatát, és járuljon hozzá a repülés ezen érdekes ágának teljesebb megismeréséhez és továbbfejlődéséhez.

Budapest, 1976. április 9.

Rödönyi Károly
közlekedés és postaügyi
miniszter,
a MÁV repülőklub elnöke

Bevezetés

A Földünket körülvevő levegőréteg vastagsága nem határozható meg pontosan, mivel a világűr felé nem határolódik el élesen, hanem fokozatosan ritkulva szűnik meg. E ritkulás miatt tömegének 99,99%-a már a földfelszín feletti, mintegy 100 km vastag légburokban benne foglaltatik, s a maradék 0,01% a légkör további, 1500... 2000 km magasságig terjedő részében oszlik meg. A légkör földfelszín feletti, mintegy 7...11 km (7...8 km a sarkok felett, 11 km az egyenlítőn) vastagságú rétegét *troposzférának* nevezik (felette helyezkedik el a sztratoszféra), s az jellemző rá, hogy a különböző időjárási folyamatok benne zajlanak le. A Föld közelségének hatása e rétegben erősen érződik. A Föld forgása, a domborzati alakulása és a napsugárzás hatalmas energiákat hoznak működésbe, amelyek létrehozzák és alakítják a különböző időjárási folyamatokat.

A motoros repülőgép számára a légkör csupán közlekedési elem, amelynek szüntelenül változó képződményei céljának elérésében inkább gátolják, mint segítik. Éppen ezért a korszerű motoros repülőgépek igyekeznek az időjárástól függetleníteni magukat, s ha lehet, az időjárási változásoknak kitett réteg fölé emelkednek, hogy a benne kavargó energiáktól nem zavarva nyugodt levegőben folytathassák útjukat. A hőskor felhők között bujkáló pilótája még ellenfélként küzdött a köddel, a zivatarral, a ma utasszállítógepei ezzel szemben fölényes biztonsággal függetlenítik magukat a természet e jelenségeitől.

A repülésnek azonban van egy másik ága, amely — bár lehetősége a motoroséval azonos fizikai törvényeken alapszik — az időjárással közeli barátságban van. Ez a *vitorlázórepülés*, amely a levegőt nem csupán közlekedési közegnek tekinti, hanem annak minden mozgását, az időjárás minden jelenségét hasznosítani igyekszik.

A vitorlázórepülés eszköze motor nélküli repülőgép, amely vitorlázó repülőgéppé csak a légkör jelenségeinek *tudatos kihasználásával* válik.

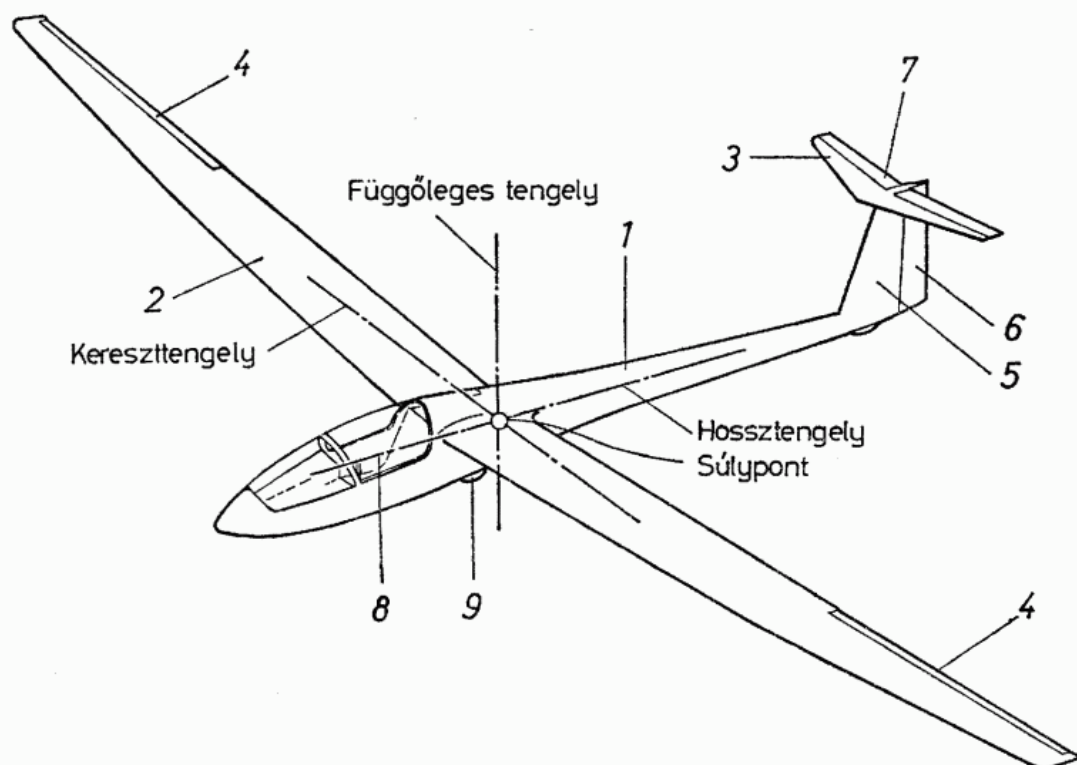
Minden mozgás energiaátalakulás révén jön létre. A motoros repülőgép mozgási energiáját az üzemanyagok kémiai energiájának átalakításával nyeri. A vitorlázó repülőgép viszont a légkörben rejlő energiákat hasznosítja. A motoros repülőgép sebességének fokozásában vagy a vele elérhető legnagyobb magasság és távolság növelésében fontos szerepe van a motornak és a felhasznált kémiai energiahordozó (üzemanyag) mennyiségének és minőségének. Ezek függetlenítik a motoros repülőgépet a légköri jelenségek zavaró hatásától.

A vitorlázó repülőgép ezzel szemben a repüléshez a levegőben, az időjárási képződményekben rejlő energiákat hasznosítja. Ezek az energiák a légkör törvényei szerint a mindenkori időjárási helyzet által adottak, és a repülőgéptől függetlenül alakulnak. A motor nélküli repülőgép vezetőjének tehát meg kell keresnie azokat a helyeket a levegőben, ahol a repüléséhez szükséges energia fellelhető, és ott úgy kell vezetnie repülőgépét, hogy az energiákat minél célszerűbben hasznosítsa. A hasznosítás jó hatásfoka azonban nem egyedül ügyességétől függ, hanem a repülőgép megfelelő kialakításától is, vagyis attól, hogy azt tervezésekor mennyire tették alkalmassá a légköri energiák kihasználására. A vitorlázórepülés ilyenformán a rendelkezésre álló légköri energiák kihasználhatóságának, a repülőgépvezető repülési tudásának és légkörtani (meteorológiai) ismereteinek, valamint a motor nélküli repülőgép kedvező kialakításának szoros egységeként jön létre.

E könyv célja annak ismertetése, hogy a motor nélküli repülőgépeket hogyan alakítják ki a légköri jelenségek, a légköri energiák kihasználására leginkább alkalmassá.

A motor nélküli repülőgép

Az 1. ábra egy korszerű vitorlázó repülőgépet szemléltet. Lényegében mindazokat a szerkezeti elemeket megtaláljuk rajta, amelyeket a motoros repülőgépeken megszoktunk, amelyek a repülés lehetőségét elősegítik, továbbá azokat a szerkezeti részeket, amelyek a repülőgép súlypontján átmenő (a tér három kiterjedésének megfelelő)



1. ábra. Vitorlázó repülőgép

1 törzs; 2 szárny; 3 vízszintes vezérsík; 4 csűrőlap; 5 függőleges vezérsík; 6 oldalkormány; 7 magassági kormány; 8 vezérlőlap; 9 futómű

képzeletbeli tengelyek körüli, azaz a repülőgépre jellemző térbeli mozgást lehetővé teszik.

A motor nélküli repülőgép külső kialakítását elsősorban *légerőtan* (aerodinamikai) szempontok alapján végzik. A repülőgépre ugyanis repülés közben az őt körüláramló levegő különféle erőhatásokat gyakorol. Ezek az erők részben nélkülözhetetlenek a repülés szempontjából (*felhajtóerő*), részben pedig károsan hatnak rá (*ellenállás*). A káros erők csökkentik a légköri energiák hasznosításának határfokát, ezért ezeknek a lehető legkisebbre való csökkentése növeli a motor nélküli repülőgép vitorlázórepülésre való alkalmasságát. A káros erők csökkentése az aerodinamikai kialakítás egyik legfontosabb feladata.

A motor nélküli repülőgép belső szerkezeteit azoknak az erőhatásoknak az elviselésére teszik alkalmassá, amelyek repülés, fel- és leszállás és a rendeltetése által pontosabban meghatározott működése közben érik.

Legfontosabb része a *szárny*. Ezen keletkezik a levegőben maradáshoz szükséges felhajtóerő. A vitorlázó repülőgép jóságát — általános meghatározás szerint teljesítményeit — leginkább a szárny átgondolt, a célnak legjobban megfelelő kialakítása befolyásolja. A szárnyon helyezkednek el a *csűrőlapok*, amelyek kormányzáskor (a botkormány jobbra, ill. balra döntésével) kiterítve a gép súlypontján átmenő képzeletbeli hossztengety körüli elforgását, más szóval orsózó mozgását vezérlik, valamint a *felhajtóerőt* növelő berendezések és a *féklapok*.

A *törzs* a repülőgép vezetőjét és a felszereléseket fogadja magába, ezenkívül az összekötőelem szerepét tölti be a repülőgép egyéb fő részei között. A repülőgépvezető általában a törzs mellső részében kialakított fülkében foglal helyet. Kétüléses gépeknél mellette vagy mögötte helyezkedik el a második pilóta vagy az utas. Általában mindkét ülés fel van szerelve a kormányzás szerveivel és a repülést ellenőrző műszerekkel.

A repülőgép fontos részét képezik az *irányfelületek*. Így nevezzük azokat a függőleges és vízszintes felületeket, amelyek a gép egyensúlyát biztosítják. Rendszerint a törzs végén helyezik el ezeket, és két részből állnak. A merev irányfelületeket *vezérsíknak*, mozgatható részüket pedig *kormányfelületnek* nevezzük. Az *oldalkormány* a repülőgép függőleges tengelye körüli elfordulását, azaz legyező mozgását vezérli. A repülőgép vezetője lábpedál segítségével téríti ki jobbra vagy balra. A *magassági kormány* a kereszttengety körüli bólintó mozgást vezérli, így a hosszdőlés megváltoztatására alkalmas. Kitéríteni a vezetőülésben levő botkormány előre vagy hátra mozdításával lehet.

A *futómű* a le- és felszállást, valamint a repülőgép földön való mozgatását könnyíti meg.

A pillanatnyi haladási irány a *repülési irány*. A szárnynak a repülési irány felé eső éle a *belépőél*, hátsó éle pedig a *kilépőél*. A szárnyak szimmetriásként párhuzamos azon metszeteit, amelyek legelső pontja a belépőél és leghátsó pontja a kilépőél, *szárnyszelvénynek*, *profilnak* nevezzük.

E könyv olvasása közben gyakran fogunk találkozni a vitorlázó repülőgépek jellemző méret- és súlyadataival. A szárnyak szárnyvégtől szárnyvégig mért mérete a *fesztávolság* vagy *szárny szélesség* (b , m). Másik fontos méret a *törzs hossza*. A szárny alaprajzi területe a *szárnyfelület* (F , m²), a *szárny mélység* (h , m) pedig a szárnyszelvény hossza.

A súlyadatok közül a következők ismerete fontos: *üres súly* (G_u , kp) a repülésre kész repülőgép szerkezetének súlya a repüléshez nélkülözhetetlen berendezésekkel, felszerelésekkel és műszerekkel együtt, de a repülőgépvezető és az ejtőernyő, valamint a repüléshez nem feltétlenül szükséges csomagok súlya nélkül. *Hasznos súly* (G_h , kp) a pilóta, az ejtőernyő és a csomagok súlya. Az üres és a hasznos súlyból tevődik össze

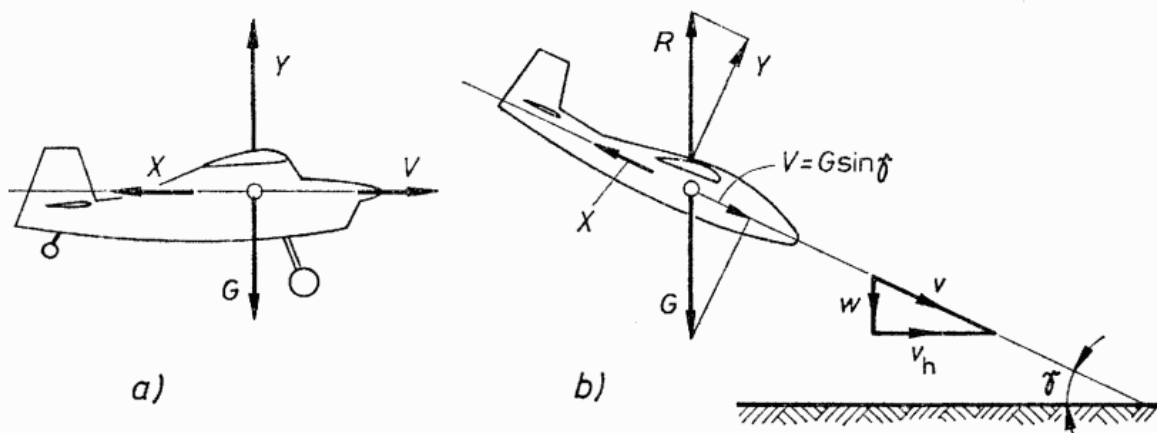
a repülő súly (G_{rep} , kp). Ezen általában azt a legnagyobb súlyt értjük (G_{max}), amelynél a felszerelésekkel ellátott repülőgép a benne helyetfoglaló vezető súlyával együtt nem lehet nehezebb.

Igen fontos jellemző a felületi terhelés is, amelyen a G/F (kp/m²) hányadost értjük.

A motor nélküli repülés lehetősége

A repülőgép szárnyán a levegőben maradáshoz szükséges Y felhajtóerőt a környező levegőhöz viszonyított v sebessége hozza létre. Amikor a motoros repülőgép egyenletes sebességgel vízszintes irányban repül, a sebességet a motor által forgatott légcsavar V vonóereje vagy a sugárhajtómű tolóereje hozza létre. A gép sebessége akkora, amekkorát az X légellenállás legyőzésére fordítandó vonó- (vagy toló-)erő lehetővé tesz. Egyenletes sebességű repülésben a két erő egymással egyensúlyban van (2a ábra):

$$X = V.$$



2. ábra. A repülés lehetőségének magyarázatához

a) motoros repülőgép; b) motor nélküli repülőgép

Ha a repülőgép vezetője vízszintes repülésben gépe sebességét meg akarja változtatni, akkor a motor fordulatszámának változtatásával a vonó- (ill. toló-)erő nagyságát változtatja meg, de közben gondoskodik arról is, hogy a felhajtóerő továbbra is egyensúlyban legyen a gép súlyával, azaz

$$Y = G$$

maradjon. A motor teljesítményfeleslege nemcsak a vízszintes repülést, hanem a saját erejéből való emelkedést is lehetővé teszi.

A motoros repülőgépekkel ellentétben a motor nélküli gépek huzamosabb ideig nem repülhetnek vízszintesen. Az ellenállás ezalatt felemésztené a gép mozgási energiáját és vele sebességét, így számára megszűnne a repülés lehetősége. A motor nélküli repülőgép ezért mindig a föld felé hajló ferde pályán siklik, és így a sebességét létrehozó vonóerő szerepét a G súly pályairányú vetülete: $V = G \sin \gamma$ tölti be (2b ábra). Mozgási energiáját így helyzeti energiájának folyamatos elvesztése révén tartja fenn. Az összefüggésben szereplő γ a siklási pálya vízszintessel bezárt szöge, másként *sikló-*

szög. A vonóerőt képező V erő most is a haladást gátló, pályairányú X légellenálláserő legyőzésére működik, és egyenletes sebességű siklásban azzal egyensúlyt tart. Az Y felhajtóerő az áramlástan törvényei szerint mindig az áramlás sebességére, vagyis a pillanatnyi siklás irányára merőlegesen ébred a szárnyon. A γ szögű ferde pályán sikló, motor nélküli gép G súlyával most az eredő légerő ($R = \sqrt{Y^2 + X^2}$) tart egyensúlyt, tehát az erők egyensúlya

$$\begin{array}{ll} \text{pályairányban} & V = X, \\ \text{függőlegesen} & G = R. \end{array}$$

Hogyan változtatja meg sebességét a motor nélküli repülőgép vezetője?

Meg kell változtatnia a *vonóerőt*, azaz a súlyerő pályairányú összetevőjének nagyságát. Ezt úgy éri el, hogy a magassági kormányval a hosszdőlés szögét változtatva gépét meredekebb vagy kevésbé meredek pályára kényszeríti. Minél inkább a Föld felé hajlik a pálya (minél nagyobb a γ siklőszög), annál jobban megközelíti a V súlyerő-összetevő a G súlyerő nagyságát, míg végül függőleges zuhanásban azonossá válik vele. A pályairányú v sebesség ekkor a legnagyobb.

Az előbb azt mondtuk, hogy a motor nélküli repülőgép nem repülhet huzamosabban vízszintesen. Most már tudjuk ennek magyarázatát: vízszintes repülésben a pályairányú súlyerő-összetevő teljesen eltűnne, tehát a sebességet létrehozó vonóerő megszűnne. Vonóerő nélkül nincs sebesség, és sebesség nélkül nem keletkezik a repülőgép szárnyán a repülést lehetővé tevő felhajtóerő.

Az eddigiekből a következők vonhatók le: a motor nélküli repülőgép *állandóan siklásban van a Föld felé hajló lejtős pályán*, tehát — a környező levegőhöz viszonyítva — állandóan magasságot veszít. Hosszú és meredek sikló- vagy zuhanórepülés után az elveszett magasság (helyzeti energia) révén szerzett mozgásienergia-többlet segítségével természetesen bizonyos ideig vízszintesen is repülhet, sőt a gép lendületének elenyészéséig még emelkedhet is. Ez azonban nem állandósult egyenletes mozgás, és ilyen módon a kiindulási magasságot sohasem nyerheti vissza teljesen.

A mai vitorlázó repülőgépek legkisebb pályairányú sebessége, amellyel még képesek a repülésre, mintegy 60...70 km/h. A hosszdőlés és ezen keresztül a siklőszög növelésével a sebesség viszonylag tág határok között változtatható. Függőleges zuhanásban legnagyobb értéke — az aerodinamikai kialakítás jóságától és a felületi terhelés nagyságától függően — elérhetné a $v_{\text{zuh}} = 600 \dots 800$ km/h-t is, de szilárdsági okokból ennél csak jóval kisebb, általában $v_{\text{max}} = 220 \dots 250$ km/h engedhető meg. Adott kialakítású és felületi terhelésű repülőgép esetében mondhatjuk, hogy a pályairányú sebesség a siklőszög függvénye, azaz $v = f(\gamma)$.

A siklási pálya ferdesége miatt a pályairányú sebesség vetületei is jelentkeznek. A $w = v \sin \gamma$ függőleges összetevő elnevezése *merülősebesség*. A v_h vízszintes összetevő szélcsendben a föld feletti sebességgel azonos. A két sebességösszetevő aránya

$$\varepsilon = v_h/w = \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma}$$

a *siklószám*, amelyre szintén mondható, hogy $\varepsilon = f(v)$, ill. $\varepsilon = f(\gamma)$. A 2b ábrán látható, hogy a v , v_h és w sebességek és az Y , X és R eredők vektorai hasonló háromszögeket alkotnak. Ezért tehát a siklószám ilyen alakban is kifejezhető:

$$\varepsilon = \frac{Y}{X}.$$

Mint később látni fogjuk, a siklószám a repülőgép aerodinamikai kialakításától függ, és a jóságára jellemző szám.

Az utóbbi mintegy két évtizedben egyre fontosabbá vált annak a sebességtartománynak a nagysága, amelyen belül a vitorlázó repülőgép jósága még elfogadható határokon belül marad. A *jóság* megítélésére alkalmas a *sebességi görbe* (3. ábra), amely ezenkívül a gyakorlatban is igen sokoldalúan használható, és a következő fontos repülési jellemzők olvashatók le róla:

- v_{\max} a legnagyobb sebesség;
- v_{opt} a legjobb siklószámhoz tartozó sebesség;
- v_{gazd} a legkisebb merülősebességhez tartozó siklási sebesség;
- v_{\min} a legkisebb pályairányú sebesség;
- w_{\min} a legkisebb merülősebesség;
- w valamely pályairányú sebességhez tartozó merülősebesség;
- ε_{\max} a legjobb siklószám
- ε valamely pályairányú sebességhez tartozó siklószám.

Az ε_{\max} legjobb siklószámhoz tartozó v_{opt} sebesség ismerete a motor nélküli repülésben igen fontos. Ennél kisebb vagy nagyobb sebességgel repülve — a görbe tanúsága szerint — a siklószám romlik, adott magasságból a legnagyobb távolság ε_{\max} -mal, ill. az ehhez tartozó v_{opt} sebességgel érhető el. Az optimális sebességet *utazósebességnek* is nevezik.

Hasonlóan fontos jellemző a w_{\min} legkisebb merülősebesség és az ehhez tartozó v_{gazd} gazdaságos sebesség. Ha e sebességnél gyorsabban vagy lassabban repülünk, a merülősebesség nő. Ha tehát a cél az, hogy minél hosszabb időt töltsünk a levegőben, akkor éppen v_{gazd} -sal kell repülni. A v_{\min} legkisebb sebességnél lassabban nem lehet repülni, mert akkor a sebesség már nem elegendő ahhoz, hogy a gép súlyával egyensúlyt tartó nagyságú felhajtóerő keletkezzen a szárnyon, ezért a repülés lehetősége megszűnik.*

Az ábráról a motor nélküli repülőgépek még egy érdekes tulajdonsága olvasható le. Ha ugyanis egy, az optimálisnál rosszabb siklószámú pályát vizsgálunk, azt tapasztaljuk, hogy a motor nélküli repülőgép ugyanazzal a siklószámmal két különböző siklási sebességgel repülhet, egy kisebb (az ábrán az *A* pont) és egy nagyobb (az ábrán a *B* pont) sebességgel. Ennek a gyakorlat szempontjából van jelentősége.

A motor nélküli repülőgép jóságára a felsorolt jellemzőkből következtethetünk. A leginkább kíváncsi a legjobb siklószám minél nagyobb értéke (ez a korszerű vitorlázó repülőgépek esetében $\varepsilon_{\max} = 30 \dots 45$), de emellett az is fontos, hogy a siklószám a megengedett sebességtartományon belül a nagyobb sebességek felé se csökkenjen túlzott mértékben. A legkisebb merülősebesség csekély értéke egyértelmű kíváncsi minden motor nélküli repülőgéppel szemben (a korszerű gépeknél $w_{\min} = 0,5 \dots 0,8$ m/s), de a repülőgéptervezők a v_{\min} legkisebb sebesség csökkentésére is felhasználnak minden lehetséges eszközt.

A repülőgép irányváltoztatását *fordulónak* nevezzük. Fordulóban a repülőgép körpályán halad, és attól függően, hogy befejezése után a repülés iránya hány fokkal

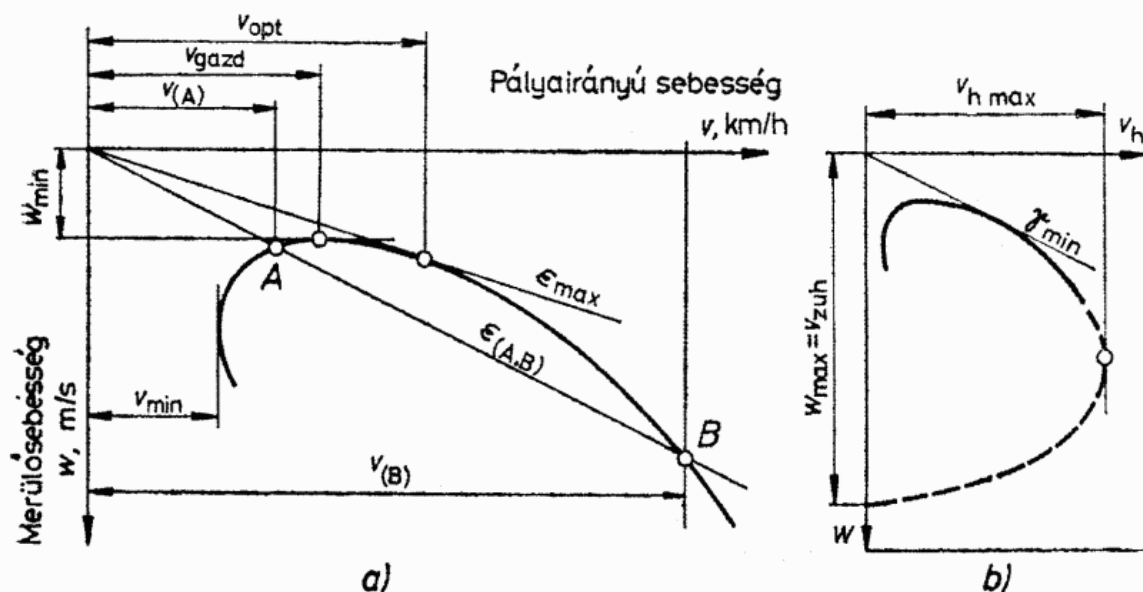
* Amikor a sebességi görbét az *a* ábrához hasonlóan visszük fel a diagramra, nem követünk el lényeges hibát. A vitorlázórepülésben szokásos kicsiny siklószögek mellett a v pályairányú sebesség v_h vízszintes vetületével jó közelítéssel egyenlőnek tekinthető. $v_{\text{opt}} = 72,5$ km/h esetén pl. $\gamma = 2^\circ 20'$ siklószámmal (ekkor $\varepsilon = 25,7$)

$$v_h = v \cos \gamma = 72,5 \cdot 0,9992 = 72,44 \text{ km/h,}$$

vagy $v = 140$ km/h esetén, amikor a siklószög $\gamma = 4^\circ 52'$:

$$v_h = 140 \cdot 0,9964 = 139,49 \text{ km/h.}$$

Az eltérés a gyakorlat számára jelentéktelen.



3. ábra. Sebességi görbe

a) a vitorlázórepülésben használatos része; b) a teljes sebességi görbe

tér el az eredetitől, a két irány által bezárt szöggel jellemezzük: így megkülönböztetünk pl. 90, 180 vagy 360°-os fordulót stb. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a repülőgép teljes kört ír le. A folyamatos körözést repülőnyelven — pontatlan, de elterjedt szóhasználat — *spirálózásnak* nevezik.

Az előzőekben a motor nélküli repülőgép jóságának főbb jellemzőit az egyenes irányú siklás esetére vizsgáltuk meg. A vitorlázó repülőgép repülési idejének jelentős részét tölti körözéssel, ezért igen fontos, hogy jósága körözés közben se változzon meg lényegesen, ill. jóságára a körözés közbeni tulajdonságok is jellemzők.

A repülőgép szárnya forduló közben nincs vízszintes helyzetben, hanem a forduló irányába van bedöntve. A szárny síkja és a vízszintes által bezárt szög a δ dőlésszög. A repülőgép jósága — mint később majd látjuk — fordulóban a vízszintes repüléshez viszonyítva a dőlésszög mértékében romlik.

Míg egyenes irányú siklás esetében a szimmetriasíkban vizsgálható erőkkel volt dolgunk, fordulóban térbeli erőrendszerrel találkozunk. A 4a ábrán fordulóban levő repülőgépet látunk a reá ható erőkkel együtt. A jobb áttekinthetőség érdekében azonban bontsuk fel az ábrát egy, a repülőgép keresztengelyén átmenő függőleges síkú (b), valamint a gép szimmetriasíkját szemléltető képre (c). Az ábrából megállapíthatjuk, hogy a fordulóban δ dőlésszögű szárnyakon

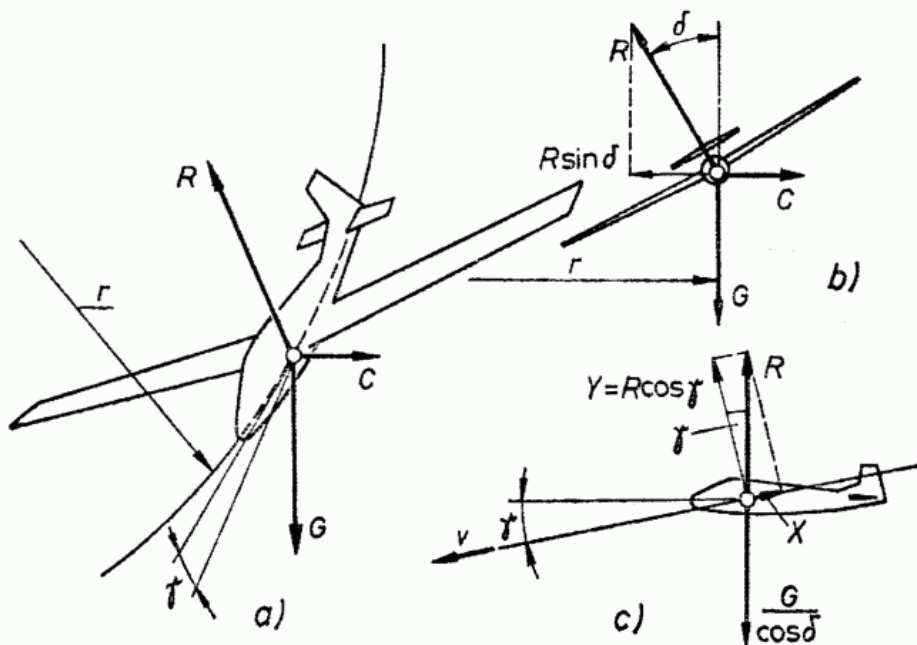
$$R = G / \cos \delta$$

nagyságú eredő légerőnek kell keletkeznie a G súly levegőben tartásához. Ez $1/\cos \delta$ -szorosa annak, amelyre 0° dőlésszög mellett egyenes repülésben szükség van. Rögtön azt is megállapíthatjuk, hogy a fordulóban nagyobb sebességre van szükség, és mivel a légerők a sebességgel négyzetes arányban változnak, könnyen levezethető, hogy

$$v_{\text{ford}} = v \frac{1}{\sqrt{\cos \delta}}$$

kell legyen, vagyis annál nagyobb, minél nagyobb a δ dőlésszög.

Az ábrával kapcsolatban a következő megállapításunk az lehet, hogy a szárnyak síkjára merőlegesen ébredő R eredő légerő most δ szöggel a forduló középpontja felé dől, tehát a repülőgépet körpályára kényszerítő centripetális erőt $R \sin \delta$ vetülete



4. ábra. A motor nélküli repülőgépre forduló közben ható erők

képezi. A körmozgás törvényei szerint ezzel $C = \frac{G}{g} \frac{v^2}{r}$ nagyságú centrifugális tömeg-erő tart egyensúlyt, ahol g a nehézségi gyorsulás, r pedig a *fordulósugár*. Mivel a centrifugális erő annál nagyobb, minél kisebb az r fordulósugár, nyilvánvalóvá válik a fordulósugár és a dőlésszög közötti összefüggés:

$$r = \frac{v^2}{g \sin \delta}.$$

Minél kisebb sugarú tehát a kör, annál nagyobb centripetális erőre van szükség, ezért ehhez $R \sin \delta$ nagyságát a δ dőlésszöggel kell növelni.

A merülősebesség változását az erők és sebességek függőleges síkban való vizsgálatával határozhatjuk meg. Fordulóban Y szerepét függőleges vetülete $Y \cos \delta$ veszi át. Az erő- és sebességvektorok háromszögeinek hasonlóságából következik, hogy

$$X/(Y \cos \delta) = w_{\text{ford}}/v_{\text{ford}},$$

ill.

$$w/(v \cos \delta) = w_{\text{ford}}/v_{\text{ford}}.$$

Ebből behelyettesítés és rendezés után

$$w_{\text{ford}} = w \sqrt{\frac{1}{\cos^3 \delta}}.$$

A merülősebesség tehát fordulóban $\sqrt{\frac{1}{\cos^3 \delta}}$ -szorosára növekedett annak, amelyet egyébként hasonló feltételek mellett, de vízszintes helyzetű szárnyakkal, egyenes siklásban ért volna el a repülőgép.

Ezek után akár a sebességek viszonyából, akár pedig a 4. ábra alapján a gép szimmetriasíkjában fenn álló egyensúlyi helyzetből, megkapjuk a siklószám változását:

$$Y = R \cos \gamma = (G/\cos \delta) \cos \gamma;$$

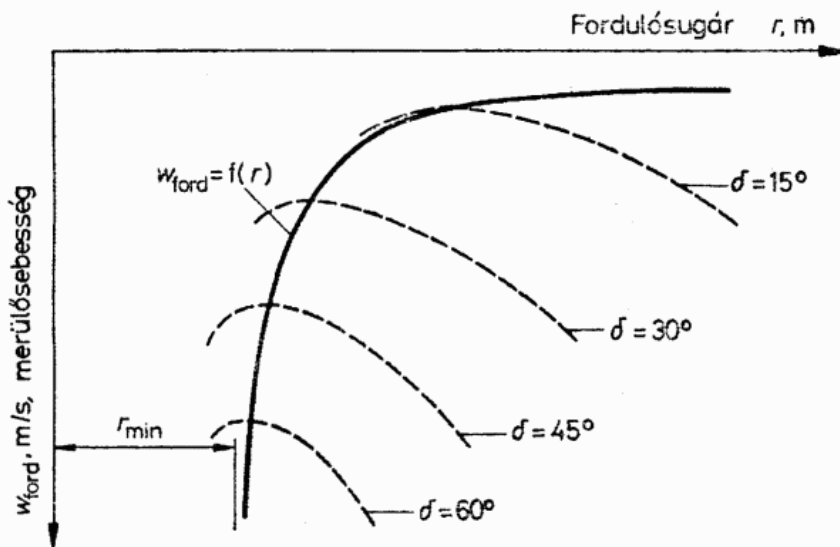
$$X = R \sin \gamma = (G/\cos \delta) \sin \gamma,$$

és ebből következik, hogy a δ dőlésszög miatt a siklószám értéke is $1/\cos \delta$ -szorosára csökken, azaz fordulóban

$$\varepsilon_{\text{ford}} = 1/(\text{tg } \gamma \cos \delta).$$

Azt láttuk tehát, hogy a dőlésszög nagysága jelentősen befolyásolja a motor nélküli repülőgép jóságának jellemzőit. Egyébként azonos feltételek mellett pl. 30° -os dőlésszöggel a sebesség csak mintegy 8% -kal nő meg, de a merülősebesség már ekkor is kb. 25% -kal. Ez a tendencia a dőlés további növelésével egyre fokozódik. Ilyen körülmények között természetesen az egyenes siklásra jellemző sebességi görbe többé nem érvényes, de ennek alapján és az előzőekben kapott összefüggésekkel különböző dőlésszögekre külön-külön is készíthetők ilyenek. A dőlésszög hatását ilyen módon figyelembe véve egy sereg görbét kapunk, de használatuk körülményes lenne.

A vitorlázórepülésben arra törekszenek, hogy a merülősebesség az adott helyzetben a lehető legkisebb legyen. Éppen ezért kevésbé fontos az, hogy a gép a különböző v_{ford} sebességekkel mennyit merül. Sokkal fontosabb az, hogy különböző sugarú körök repülésekor mekkora a w_{min} . A motor nélküli repülőgép körözésben mutatott jóságára tehát jellemzőbb a *fordulópolaris*. Ezen találhatók a különböző dőlésszögekre meghatározott sebességi görbék adatai, de most a w_{ford} merülősebesség változását az r fordulósugár függvényében ábrázolva. Minden dőlésszöghöz tartozó görbének van egy $w_{\text{ford min}}$ pontja. Ha ezeket a pontokat összekötjük, az *optimális fordulópolarist* (5. ábra) kapjuk, amely azt szemlélteti, hogy adott dőlésszög esetén mekkora



5. ábra. Fordulópolaris

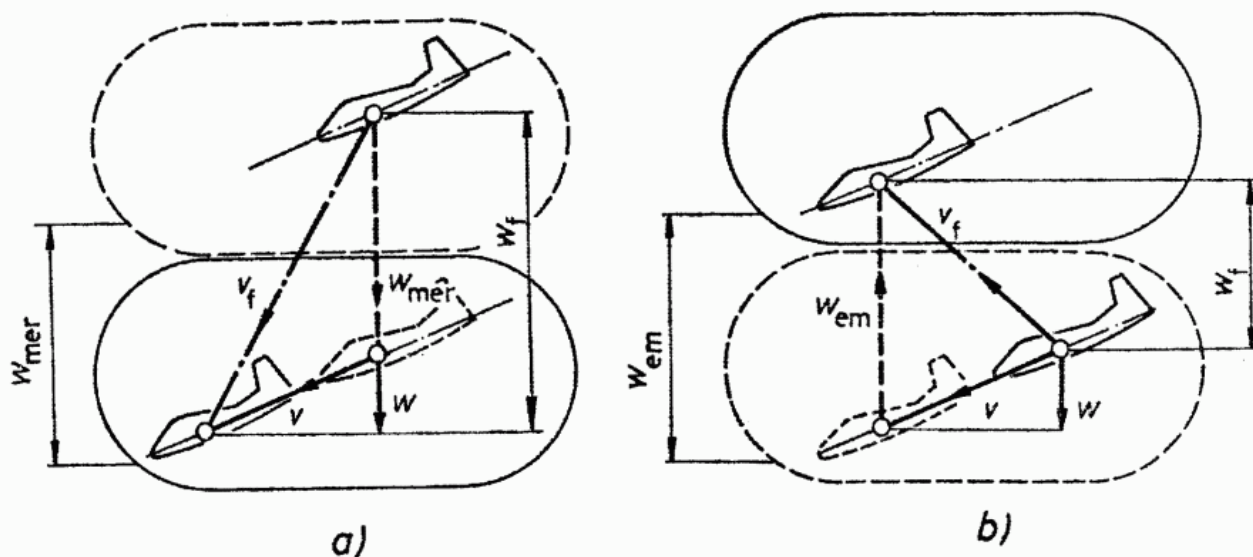
az elérhető legkisebb merülősebesség. Így $\delta = 0^\circ$ -hoz, vagyis tulajdonképpen egyenes sikláshoz tartozik a repülőgép legkisebb merülősebessége, $\delta = 90^\circ$ dőlésszög pedig a lehetséges legkisebb fordulósugár nagyságát adja. Ez azonban gyakorlatilag nem érhető el, mert ilyen dőlésszög mellett $R \cos \delta = 0$, tehát a repülés lehetősége megszűnik.

A későbbiekben még megindokolt okokból a gép jóságát az optimális fordulósugár kicsiny volta fokozza. Ugyanakkor azt is meg kell állapítanunk, hogy a vitorlázórepülés szempontjából — részben repülőgépvezetési okokból, részben pedig a merülősebesség túlzott növekedése miatt — csak a 0° -tól mintegy 60° -os dőlésszögig terjedő tartomány jön számításba.

Repülés függőleges légáramlatokban

Megállapítottuk, hogy a motor nélküli repülőgép a föld felé hajló ferde pályán siklik helyzeti energiáját folyamatosan mozgásivá alakítva, és így a mozdulatlan környező levegőhöz képest magasságából állandóan veszít. Ez azt jelenti, hogy nyugvó levegőben valamely magasságra felvontatva és ott megfelelő kezdősebességgel magára hagyva a merülősebessége által meghatározott idő eltelte után siklószáma által meghatározott távolságban földet ér. A levegő azonban csak a legritkább esetben van teljesen nyugodalomban. Sokkal gyakoribb az az eset, amikor benne vízszintes vagy függőleges irányú áramlatok működnek.

Hagyjuk figyelmen kívül most a vízszintes légmozgásokat, és csak a *függőleges áramlatok* hatását vizsgáljuk a vitorlázó repülőgép mozgására. A függőleges áramlat irányulhat felfelé vagy lefelé, és jelenléte a motor nélküli repülőgép *földhöz viszonyított teljesítményeit* jelentősen befolyásolhatja. Ha pl. w_{mer} sebességű merülőáramlatba jut, a süllyedő légtömeggel együtt a repülőgép a földhöz viszonyítva gyorsabban veszíti magasságát: merülősebességéhez hozzáadódik az áramlat merülősebessége, azaz $w_f = w + w_{mer}$ lesz (6a ábra). Ezzel a földhöz viszonyított $\varepsilon_f = v_h/w_f$ siklószám is rosszabb lesz, mint nyugvó levegőben.



6. ábra. Repülés függőleges áramlatban

a) merülőáramlat, b) emelőáramlat esetén

Az emelkedő áramlat függőleges sebessége csökkenti a repülőgép földhöz viszonyított merülősebességét:

$$w_f = w_{em} - w.$$

Bár a w_{em} emelkedési sebességű környező levegőtömeghez képest a motor nélküli repülőgép továbbra is w függőleges sebességgel merül, ha $w_{em} > w$, a földhöz viszonyítva emelkedni fog (6b ábra).

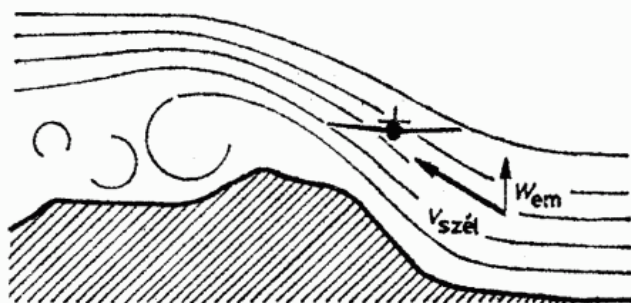
A földhöz viszonyított siklószám értéke emelkedő áramlatban repülve növekszik:

$$\varepsilon_f = v_h/w_{em} - w.$$

Hogyan válik a motor nélküli repülőgép vitorlázó repülőgéppé?

Mivel a motor nélküli repülőgép a levegőben maradáshoz szükséges sebességét helyzeti energiájának folyamatosan mozgási energiává való átalakításával éri el, a kiindulási magasság által meghatározottnál hosszabb ideig csak elveszített helyzeti energiájának újra és újra való visszanyerése vagy megnövelése által maradhat a levegőben. A magasság a legkisebb merülősebességgel repülve a levegőben töltött leghosszabb időre, a legjobb siklószámmal repülve pedig a legnagyobb távolságra alakítható át. Az ismételt emelkedések és siklások sorozatával pedig nagy távolságok válnak elérhetővé. A motor nélküli repülőgép tehát akkor válik vitorlázó repülőgéppé, amikor vezetője a levegőben működő energiák által létrehozott emelkedőáramlatokat felkeresi, azok céltudatos kihasználásával magasságot nyer, hogy ezáltal megnövelt repülési ideje alatt nagy távolságokat tehessen meg.

Az emelkedő áramlatok közül legismertebb a *lejtőszél*, amelyet a legrégebben használnak ki a vitorlázórepülés céljaira. Lejtőszél mindenütt keletkezik, ahol a vízszintes légáramlás útjába akadály — domb vagy hegy — kerül és a levegőt a magasba emelkedni kényszeríti (7. ábra). Az áramló légtömeg a csekély vízszintes ki-



7. ábra. A lejtővitorlázás

terjedésű, de magas akadályokat oldalt kerüli meg. Vitorlázórepülésre alkalmas lejtőszél nagyobb vízszintes kiterjedésű vonulatok előtt keletkezik, ahol a szél, mivel a hegyet oldalt nem tudja kikerülni, előtte kénytelen felemelkedni.

Az emelkedő áramlat vitorlázórepülésre való alkalmasságát nemcsak a szél sebessége, hanem a hegy magassága, alakja, a lejtő meredeksége, a talajt borító növényzet minősége, továbbá az előterep tagoltsága is befolyásolja. A legjobb vitorlázási viszonyok ott alakulnak ki, ahol egyenletes, domb nélküli síkságból tagolatlan, összefüggő hegyvonulat emelkedik ki. Az áramló levegő már viszonylag messze a lejtő előtt emelkedni kezd. A ferdén felfelé tartó légmozgás függőleges összetevője — azaz a mozgásnak az a része, amely a vitorlázó repülőgépet emeli — a lejtőhöz közeledve növekszik. Minél meredekebb a lejtő, annál nagyobb az áramlat emelkedési sebessége, ha azonos szélsébséget tételezünk fel. A legnagyobb emelkedési sebesség a lejtő közepe táján várható. A viszonylag zavartalan áramlás egy bizonyos magasságig a lejtő gerince fölé emelkedik, majd emelkedési sebessége csökken, végül teljesen megszűnik.

A vitorlázórepülő a lejtőszélet a hegyvonulat előtt ide-oda repülve, „nyolcasozva” használja ki (7. ábra). Megkeresi a lejtő azon helyeit, ahol a lejtőszél emelkedési sebessége a legnagyobb, és úgy helyezkedik, hogy minél hosszabb időt tölthessen ott. A lejtővitorlázásra alkalmas szél erőssége változó. A lejtő adta lehetőségeken kívül

függ a repülőgép jóságától, de a pilóta tudásától is. A lejtő minőségétől függően 5... 6 m/s erősségű szélben már lehet vitorlázni, de általában a 8...12 m/s sebességű tekinthető kedvezőnek. A kihasználható szélsébség felső határát a lejtővitorlázásra használt repülőgép szilárdsága határozza meg.

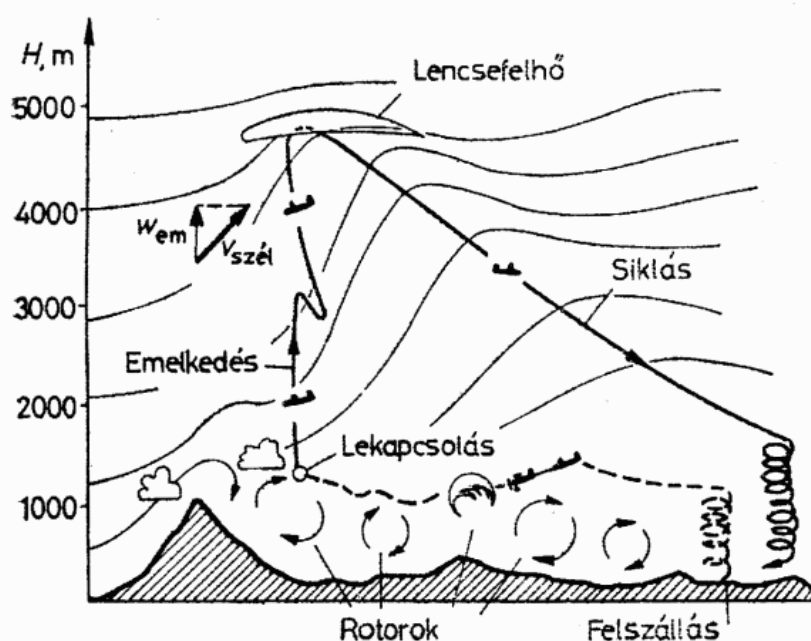
Lejtővitorlázásra a kis merülősebességű motor nélküli repülőgépek alkalmasak. Emellett olyan pályairányú sebességgel kell repüljenek, amellyel a széllel szemben, a talajhoz viszonyítva is 10...15 km/h sebességgel haladhatnak. A lejtővitorlázás szempontjából sem a nagy siklószám, sem pedig a nagy sebességek melletti kis merülősebesség nem feltétel.

A földfelszín egyenetlenségei a levegő áramlását részben eltérítik útjából, részben módosítják az áramlás jellegét. A hegyek hatása alkalmas körülmények között igen nagy magasságig terjed, és az akadályok felett áthaladó légáramlásban gyakran jelenik meg hullámmozgás.

A *légköri hullámmozgás* létrejöttének feltételei közé tartozik, hogy a szél sebessége a hullámot kiváltó hegycúcsnál egy minimális értéknél nagyobb legyen. Ez az érték egyes helyeken 8...15 m/s között van. Másik feltétel, hogy a szél sebessége a magassággal növekedjen, de legalábbis ne csökkenjen a sztratoszféra határáig. Igen fontos még, hogy a szél iránya a hegy gerincére merőleges legyen, továbbá, hogy a légkör alsó rétegeinek stabilitása nagyobb legyen, mint a felsőbb rétegeké.

Bár légköri hullámmozgásra — az arra alkalmas helyen — az év minden szakában lehet számítani, mégis ez az őszi—téli hónapokban a leggyakoribb.

A megfigyelések szerint a légköri hullámmozgás kialakulása nagyon függ annak az akadálynak — pl. hegynek — az alakjától, amely előtt a szél magasba emelkedni kényszerül, de különösen annak szélárnyékos oldalától, továbbá a hegy mögött elterülő terep jellegétől. A meredek hegyoldal a nagy sebességgel áramló levegőt útjából erőteljesen felfelé téríti ki. Mivel a légállapot stabil, az egyensúlyi szintjéből kikényszerített légtömeg csakhamar az egyensúlyi helyzet visszaállítására törekszik. Az emelkedést tehát leáramlás követi. A hegyvonulat a hozzá szakadatlanul áramló levegőtömegeket folyamatosan irányítja felfelé, így a leírt jelenség mindaddig fennáll, amíg a szél sebességében vagy irányában, továbbá a levegőtömegek egyensúlyi állapotában nem áll be változás. A hegyvonulat felett, ill. inkább mögötte tehát *állóhullám* alakul ki (8. ábra). A hullámmozgásban igen vastag légrétegek vesznek részt, és az állóhullám



8. ábra. A hullámvitorlázás

nem ritkán a sztratoszféra légtömegeit is mozgásba hozza. Rendszerint nemcsak egyetlen hullám alakul ki, hanem a hegyvonulat mögött a hullámok egész sora. A hullámhossz a hullámmozgást létrehozó tényezők szerint alakul, de — az állóhullám jelleget megtartva — időben csak csekély mértékben változik.

Ha a hullámmozgásban résztvevő légtömeg emelkedése közben eléri a kondenzációs szintet, jellegzetes, lencse alakú felhő (*altocumulus lenticularis*) keletkezik, amely a hullámmal együtt a nagy szélsébség ellenére is egy helyben marad a földhöz viszonyítva. Ennek oka, hogy a felhő a szél felőli oldalán az emelkedő áramlatban folyamatosan képződik, hátszéloldalán pedig a hullámmozgás leszálló szakaszán állandóan feloszlik. A lencsefelhő jól megmutatja az állóhullámok helyét.

A légköri hullámmozgás emelkedési sebessége sokféle tényezőtől függ, de nem ritka a $w_{em} = 5 \dots 10$ m/s sem. Az emelkedőágban a levegő nyugodt, turbulencia-mentes. A hegyvonulat mögött azonban a kialakult hullám alatt — részben a hegyvonulat mögötti turbulencia, részben a talaj közelsége miatti nagy sebességkülönbségek következtében — igen erősen örvénylő, vízszintes tengely körül forgó *rotorok* alakulnak ki.

Az állóhullámban a magasságnyerés viszonylag egyszerű. Az általában motoros repülőgéppel felvontatott vitorlázó repülőgép (vontatásos emelkedés közben a rotorokon való áthaladás nemcsak a pilóta képességeit teszi próbára, hanem a repülőgép számára is rendkívül nagy igénybevételt jelent) rendszerint nagyobb magasságban, 1000...5000 m magasan a hullám emelkedőágának elérésekor kapcsol le a vontatókötélről. Ettől kezdve a széllal szembefordulva, kissé a lejtővitorlázáshoz hasonló módon tapogatja ki a legnagyobb emelkedési sebesség helyét. A nagy magassággal egyre növekvő hideg, az oxigénhiány és a csökkenő légnyomás okoz csak problémát.

A hullámok emelőterében való emelkedés nem igényel aerodinamikailag tökéletes kialakítású motor nélküli repülőgépet. A hullámnak rendszerint nagy saját emelkedési sebessége miatt a repülőgép kis merülősebessége nem elengedhetetlen feltétel, és különösen jó siklószámra sincs szükség. A hullám emelőterének elérése előtt azonban a rotorokon való áthaladás miatt a repülőgépnek különösen szilárdnak és kellően stabilnak kell lennie.

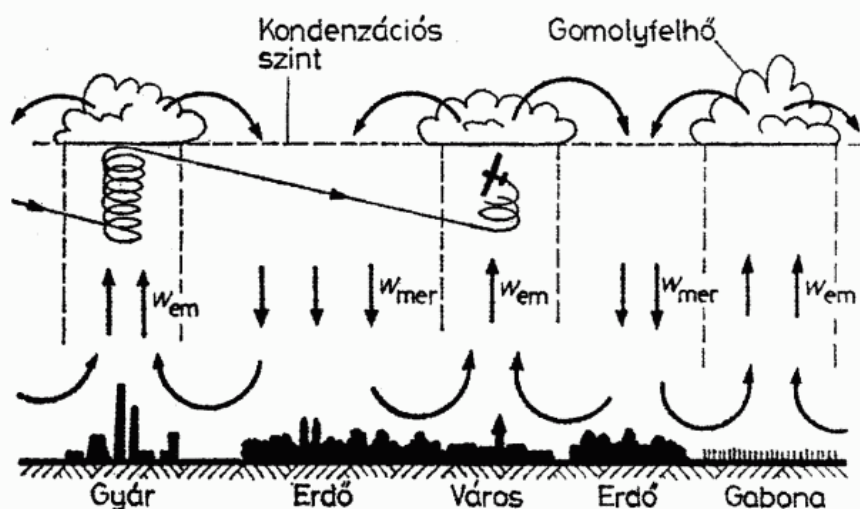
A vitorlázórepülés számára ma a légköri energiaforrások közül legfontosabb a *termikus feláramlás*, röviden a *termik*. A szelet és az időjárást termikus hatások — tehát végső soron a Nap sugárzása — alakítják. Az időjárást alakító folyamat mását kicsiben is megtaláljuk. A napsugárzás hatására a talaj — eltérő minősége szerint — különféleképpen hevül fel. A száraz, homokos felületek, az érő gabonaföldek, a városok köréngetegek, kőbányák stb. gyorsabban és erősebben felmelegszenek, mint az erdők, mocsaras területek vagy nyílt vízfelületek. Az augusztusi déli napsütéstől pl., ha a levegő hőmérséklete 18°C , a különböző minőségű talajfelületek a következő hőmérsékletekre melegsznek fel:

homokos terület	$23,2^{\circ}\text{C}$;	füves rét	$18,4^{\circ}\text{C}$;
lombos erdő	$13,9^{\circ}\text{C}$;	mocsaras erdő	$12,8^{\circ}\text{C}$.

Az erősen felmelegedett területek a hőt viaszasugározzák a felettük levő légtömegbe és így felmelegítik. Általában elegendő csupán néhány fokos hőmérsékletkülönbség a levegőben, hogy a melegebb légtömeg, amely a hidegebbekhez viszonyítva könnyebb lesz és kiterjeszkedik, felmelegedjék. A felmelegedő légtömeg tulajdonsága, hogy az emelkedés következtében kiterjeszkedik és lehűl. Hőmérséklete minden 100 m magasságnyerés után 1°C -kal csökken. (Ez a tulajdonság a gáz nyomása, hőmérséklete és térfogatváltozása közötti hőtani összefüggésből származik.)

A szabad légkör hőmérséklete a magassággal nem minden esetben csökken egyformán. A *függőleges hőmérsékleti gradiens* $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ értéknél lehet kisebb vagy nagyobb is. Ha ezt a termikus feláramlás $1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ hőmérsékletcsökkenésével egyeztetjük, a *légkör egyensúlyi állapota* indifferens, labilis vagy stabil lehet. A termikek keletkezésének leginkább a labilis egyensúlyi helyzet kedvez. A felfelé áramló meleg légtömeg ugyanis mindaddig emelkedik, amíg hőmérséklete a környező levegő hőmérsékletére le nem csökken. A felfelé áramló felmelegedett levegőtömegek helyét a környezetből utánatóduló hidegebb légtömegek pótolják, ezért a feláramlások mindig együttjárnak a nagyobb fajsúlyú, hidegebb légtömegek leáramlásával.

Ha a levegő a földfelszín közeléből kismegszakításokkal vagy folyamatosan áramlik felfelé, akkor az emelkedő levegőnek többé-kevésbé folyamatos oszlopa alakul ki. A termikben úgy áramlik felfelé a levegő, mint a füst a kéményben, ezért az ilyen emelkedő áramlatokat *termikkéménynek* nevezzük. A kémény típusú termikek a fel- és leszálló légmozgások cirkulációs rendszerét hozzák létre (9. ábra). Ezt a cirkulációt az jellemzi, hogy a felszállóág keresztmetszete jóval kisebb, mint a leszállóágé, viszont a felszálló áramlás w_{em} sebessége többszöröse a leszálló légmozgás w_{mer} sebességének.



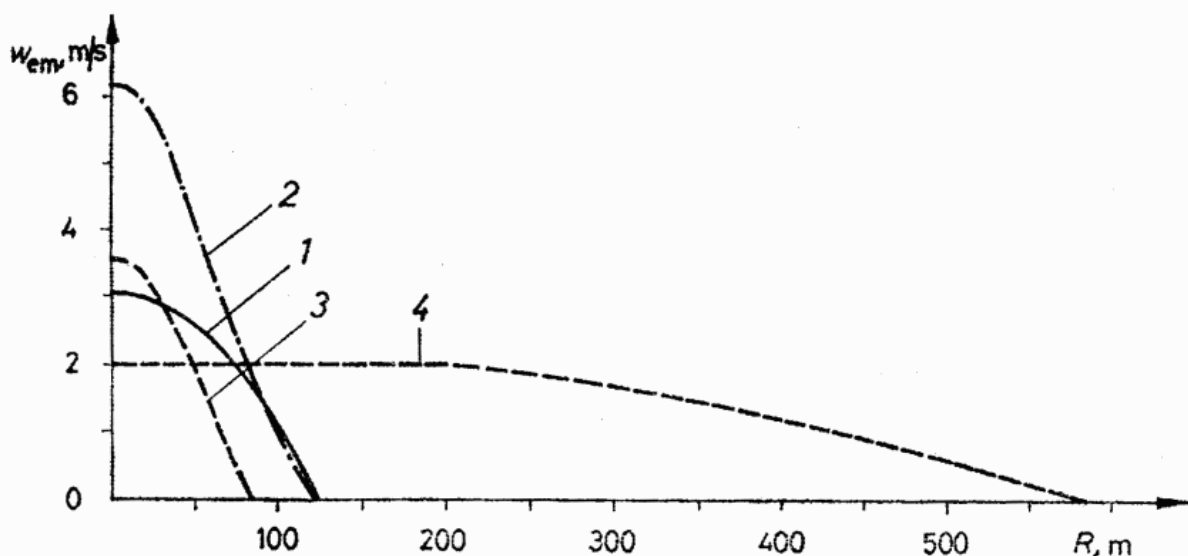
9. ábra. A termikus vitorlázás

A felszálló, párat is tartalmazó légáramlatból a vízgőz a kondenzációs szintet elérve kicsapódik, és a termikus időjárásokra jellemző gomolyfelhők keletkeznek (*cumulus*). Ezek a felhők mutatják, hogy kedvező időjárási körülmények között a termikek viszonylag sűrűn megtalálhatók. Bennük a levegő w_{em} feláramlási sebessége változó, és számos meteorológiai tényezőtől függ. Hazánkban az $1...3\text{ m/s}$ érték átlagosnak, az ennél nagyobb emelkedési sebesség azonban már ritkábbnak tekinthető. A termikek feláramlási sebessége, átmérője, gyakorisága és emelkedési magassága az általános időjárási helyzet függvénye, ezért — bár termikus feláramlás mindenütt, szinte minden időben található — keletkezésükhöz egyes földrajzi területeken különösen kedvezők a feltételek. Ilyen kedvező feltételek a nagy, kontinentális síkságokon alakulnak ki, mint pl. a Szovjetunió európai részének középső és déli területein, a dél-afrikai magasföldön vagy a texasi és az ausztráliai síkságokon. Ezeken a helyeken a termikek különösen nagy ($w_{em} = 7...10\text{ m/s}$) emelkedési sebességgel gyakran $3000...4000\text{ m}$ -es magasságig emelkednek, átmérőjük pedig egyes esetekben a több száz métert is elérheti.

A termikben a vitorlázó repülőgép *körözve* emelkedik. A termik emelkedési sebessége átmérője mentén is változó, és pedig a közepe táján általában nagyobb, a szélei felé pedig csökken. A vitorlázó repülőgépnek tehát olyan kis sugarú körön kell repülnie, amellyel a lehető legnagyobb emelkedési sebességű zónában tartózkodhat, mert — figyelembe véve a körözés közben megnövekedett saját merülősebségét is — így hasznosíthatja legeredményesebben a termiket emelkedésre. Ha most visszagondolunk a körözőrepüléssel kapcsolatban mondottakra, kitűnik, milyen fontos a repülőgép fordulópólárisának kedvező alakulása. Jó termikrepülőgép tehát az, amelyik az adott emelkedési sebességű és méretű termikből a legtöbbet hasznosítja, igen kis körön képes repülni, ezért siklási sebessége körözésben viszonylag kicsiny. Ez lehetővé teszi számára, hogy kisebb dőlésszöggel érje el a szükséges kis fordulósugarat, ami viszont azért előnyös, mert a dőlésszög növekedésével a w merülősebség gyorsan növekszik, és ezzel a termik emelkedési sebességéből hasznosítható $w_f = w_{em} - w$ földhöz viszonyított emelkedési sebesség is csökken. Ez egyrészt azt jelenti, hogy a vitorlázó repülőgép egy adott magasságot lassabban ér el, másrészt viszont az egyáltalán kihasználható termikek számát (ahol $w_{em} > w$) csökkenti.

A termikus feláramlások nem mindig a korábban leírt, idealizált formában kéményszerűen jelentkeznek. Megjelenési formáik igen változatosak, és létrejöttük is a vázoltnál lényegesen bonyolultabb feltételekhez van kötve. Az elméleti vizsgálódáshoz és a repülőgépek tervezéséhez azonban jó szolgálatot tesznek a mérések, a tapasztalati adatok alapján készített *termikprofilok*, amelyek egy-egy időjárási helyzetben leggyakrabban előforduló vagy valamely földrajzi egységre jellemző feláramlási sebességeloszlásokat szemléltetnek a kör keresztmetszetűnek képzelt termik átmérője mentén. Ilyen jellegzetes termikprofilokat láthatunk a 10. ábrán.

A lejtőszélen, az állóhullámon és a termiken kívül még számos feláramlási lehetőséget ismerünk a légkörben. Ilyenek pl. az időjárási hidegfrontok előtt felsikló légtömegekben keletkeznek, vagy más esetben az erre alkalmas tengeri eredetű, nagy sebességgel áramló légtömegek hoznak létre adott terület felett — az ott korábban uralkodó száraz, meleg időjárás helyére betörve — a szél és a termikus feláramlás kombinációjával vitorlázórepülésre alkalmas feltételeket stb. Valamennyi lehetséges változat ismertetése e könyvben lehetetlen, és a vitorlázó repülőgépek kialakítása szempontjából az itt tárgyaltakkal szemben újabb igényeket nem ébresztenek.



10. ábra. Az emelkedési sebesség jellegzetes eloszlásai a termikben

1 lengyel szabványtermik; 2 erős termik (Carmichael); 3 szűk termik (Csernov); 4 lapos termik (Csernov)

A vitorlázó repülőgép és a vitorlázórepülés

Nem lenne teljes a bevezetőben a vitorlázó repülőgépről és a vitorlázórepülésről alkotott kép, ha röviden nem ismertetnénk alkalmazási területüket és azt, hogy a légköri energiák kihasználásával milyen lehetőségek nyíltak meg az ember előtt.

Ötven évvel ezelőtt, a vitorlázórepülés kezdetén még nem látszott pontosan a feladat, és a cél sem rajzolódott ki élesen. Csak egy volt bizonyos. Az, hogy a motor nélküli repülőgépnek a lehető legjobban kell alkalmazkodnia a levegőben való mozgás törvényeihez és lehetőségeihez, mert — az akkor még csak kevéssé ismert légköri energiák kihasználásában — csak így érhető el jó hatások. Abban az időben a motoros repülőgépek tervezői előtt, így a vitorlázó repülőgépek nem egyszer előzték meg motoros társaikat az áramvonalazás, az aerodinamikai kialakítás, sőt a szerkezet új megoldásai, tökéletessége terén. Hosszú ideig hasonló volt a helyzet a meteorológiával, az időjárás tudományával is. Számos légköri jelenséget éppen a vitorlázórepülés céljai érdekében derítettek fel és vizsgáltak meg részletesen, hogy az általuk nyújtott energiaforrás a vitorlázó repülőgépekkel tervszerűen kihasználhatóvá váljék.

Napjainkban a helyzet már megváltozott, és a vitorlázó-, valamint a motoros repülés között alig húzható párhuzam. Alkalmazási területe szinte kizárólagosan a sport lett, jóllehet új szerkezeti anyagok kipróbálására vagy különleges kormányzási elvek kikísérletezésére, esetleg bizonyos aerodinamikai újításoknak a gyakorlatban való kipróbálására — szerkezetük viszonylagos olcsósága miatt — időről-időre szívesen használják a legnagyobb repülőgépgyárak is a vitorlázó repülőgépeket. Katonai célra is alkalmaztak nagy számban motor nélküli repülőgépeket a második világháborúban, ezeknek azonban semmi közük a vitorlázórepüléshez, így e könyv keretein kívül állnak.

Mi e könyvben a sportcélra szolgáló vitorlázó repülőgépek aerodinamikai és szerkezeti kialakításainak mértékével foglalkozunk. Az a célunk, hogy közérthető módon megmagyarázzuk, hogyan járul hozzá minden egyes szerkezeti részlet és elem célszerű kialakítása a teljesítőképesség növekedéséhez, a kormányzásnak és a stabilitásnak a repülőgépvezető számára már egyszerűnek tűnő, de elveiben és megoldásaiban mégis bonyolultan kifinomult megoldásához, a repülés közben jelentkező szilárdsági igénybevételek biztonságos elviseléséhez.

A mai vitorlázó repülőgépek alkalmazási területe tehát a *sport*, és lényegében két fő csoportra oszthatjuk őket. Ezek: a *kiképzés céljaira készült*, főként kétülékes és a tulajdonképpen *sportrepülésre használt egy- és kétülékes vitorlázó repülőgépek*. A szabad repülés megkezdéséhez szükséges kezdeti sebességet és helyzeti energiát mindkét csoport esetében csörlő- vagy repülőgépvontatással magasba vontatva közlik a géppel, amely a vontatókötelet az előbbi esetben mintegy 250...350 m magasságban, az utóbbinál pedig tetszés szerinti magasságban leoldva kezdi meg szabad repülését.

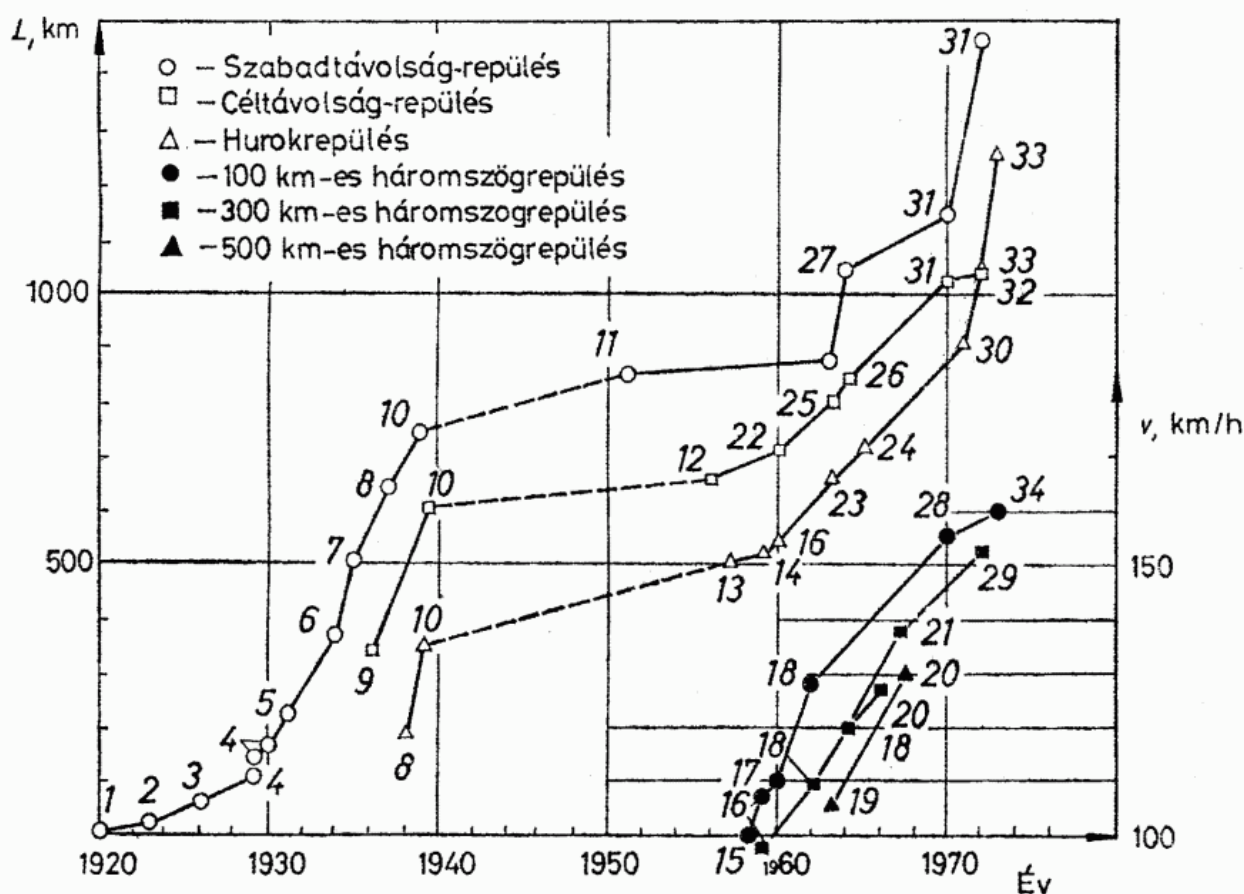
A lejtő menti emelőszelemben való vitorlázás a kezdeti évtizedekben igen kedvelt volt, és az időtartamrekordok 1952-ig 56 órára emelkedtek. Kimerültség miatt azonban számos halálos végű baleset történt, ezért ezt a rekordfajtát a repülők nemzetközi szövetsége, a FAI (*Federation Aeronautique Internationale*) törölte.

A légköri állóhullámok egyenletes emelkedési sebességű emelőtere nagy magasságok elérését teszi lehetővé. A motor nélküli repülőgéppel eddig ember által elért legnagyobb magasság már a sztratoszféra határán túl van. 1961. február 25.-én P.

Bikle 14 102 m tengerszint feletti abszolút magasságig emelkedett, és így a repülőgép-vontatásból való lekapcsolás után szabad repülésben is 12 894 m magasságot ért el. Hasonló magasságokat már az ötvenes években is érték el hullámemelésben, sőt 1952-ben *E. Küttner* T-3 típusú, kiszolgált második világháborús motor nélküli kiképzőgépével 3200 m magasságra való felvontatás után 11 000 m tengerszint feletti magasságba emelkedve távrepülésre indult. Négy óra alatt — hat további emelőteret is kihasználva — 600 km távolságot tett meg.

Ilyen nagy magasságban a repülést számos olyan nehézség kíséri, amely a gépet és vezetőjét egyaránt súlyosan próbára teszi. Ebben a magasságban a repülőgépből való kilátás a kabin átlátszó tetejére rakódott jég miatt korlátozott, ez egyaránt megnehezíti a repülőgépvezetést és a tájékozódást. A rendkívül alacsony hőmérséklet, amely egészen -80°C -ig süllyedhet, a repülőgép szerkezetében elváltozásokat okozhat. A vitorlázó repülőgép viszonylag szűk ülése pedig különös megpróbáltatást jelent a repülőgépvezető számára. Bármikor fellépő súlyos veszélyt jelent a *hullámtávrepülés* során hirtelen kialakuló légköri turbulencia, amely a rendkívüli hideggel párosulva a gép létfontosságú részeinek törését okozhatja. A repülőgépvezető személyes felszerelésének hibái pedig oxigénhiány vagy a kis légköri nyomás miatt bekövetkező magassági halált okozhatnak. *E. Küttner* szavait idézve: „A hullámtávrepülés rendkívüli élmény, de nem tréfadolog!”

A vitorlázó sportrepülés klasszikussá váló módja a *termikus távrepülés*, vagyis a távrepülésnek az a módja, amikor csörlő- vagy repülőgép-vontatásos indítással a magasba juttatott vitorlázó repülőgép termikus feláramlásban körözéssel nyer magas-



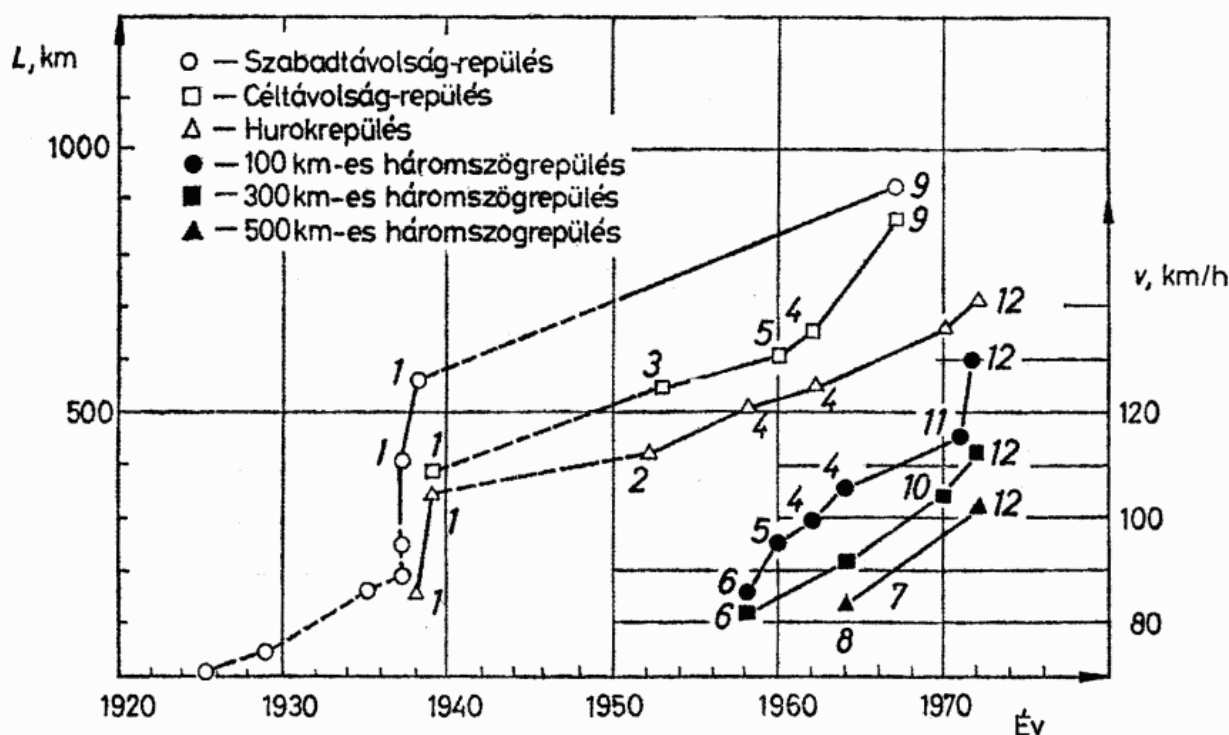
11. ábra. Vitorlázórepülő-világrekordok együléses gépekkel

1 *Schwarzer Teufel*; 2 *Konsul*; 3 *Pelikán*; 4 *Wien*; 5 *Fafnir*; 6 *Fafnir 2*; 7 *Condor*; 8 *G Nr. 7*; 9 *Nemere*; 10 *Rot Front 7*; 11 *Rj 5*; 12 *Breguet*; 13 *Demant*; 14 *Jaskolka*; 15 *Meteor*; 16 *HP*; 17 *A-15*; 18 *HP 8*; 19 *BJ-2*; 20 *BJ-3*; 21 *BS-1*; 22 *A-10*; 23 *Foka*; 24 *Dart*; 25 *Sisu 1*; 26 *Ka-6*; 27 *Sisu 1 A*; 28 *Kestrel 604*; 29 *Glasflügel 604*; 30 *ASW 15*; 31 *ASW 12*; 32 *LS-1c*; 33 *Libelle*; 34 *Nimbus 2*

ságot, majd ezt siklással távossággá alakítja át. Az egymás után talált termikekben megismétlődő emelkedések, majd siklások sorozatával ma már tekintélyes távolságokat érnek el. 1972. április 25.-én *H. W. Grosse* vitorlázó repülőgéppel egyenes vonalban 1460,8 km távolságot tett meg. Egy évvel később a céltávrepülés (felszállás előtt megadják a célt, amelyet elérni kívánnak) világrekordja is meghaladta az 1200 km-t. Ezeket a repüléseket különleges időjárási helyzetben, az alkalomra előre felkészülve, általában nagy szélesség mellett a szél irányában végzik, amikor tehát a szél sebessége is hozzásegít a távolság megnöveléséhez.

A szél hatását kiküszöböli a háromszögpálya felett való repülés, amikor is a kiindulási repülőtérre két előre megjelölt *fordulópont* megkerülése után térnek vissza. A távrepülésnek ezt a módját sebességi értékeléssel végzik. A háromszögpálya hossza 100, 300, 500 vagy 750 km, de egy-egy oldala nem lehet rövidebb a teljes távolság 28%-ánál. A vitorlázó repülőgépeknek a repülési követelményekhez, légkörtani feltételekhez és az aerodinamikai lehetőségekhez való idomulását leginkább a háromszögpályákon végzett sebességi repülésekkel lehet lemérni és e gépek kifinomultságát érzékelni. Két adat elég ehhez: a világrekord 750 km-es háromszögpályán e könyv írásakor 123,76 km/h volt, a 100 km-es háromszögpályán pedig ugyanakkor meghaladta a 160 km/h sebességet. Önmagukért beszélő számok!

Bennünket e könyv lapjain a vitorlázó repülőgép mint műszaki alkotás foglalkoztat, ezért a 11. és 12. ábrán, ahol a szabad távolságban, a céltávolságban, valamint az előre megadott fordulópont megkerülésével végrehajtott hurokrepülésben, továbbá a 100, 300 és 500 km-es háromszögpályán elért sebességi rekordokat tüntettük fel 1920-tól napjainkig. A rekordot elérő repülőgépvezető neve helyett a repülőgép típusát ismertettük. E repülőgéptípusokat a könyv további részeiben igyekszünk részletesebben is vizsgálni. Ahol erre elegendő ismeret és adat áll rendelkezésünkre, felhívjuk a figyelmet azokra a szerkezeti megoldásokra vagy kialakításokra, amelyeket



12. ábra. Vitorlázórepülő-világrekordok kétüléses géppel

1 Sztahanovec; 2 Kranich II; 3 Zuraw II; 4 Bocian; 5 A-10; 6 Ross R-6; 7 KAI-19; 8 Ka-7; 9 L-13 Blanik; 10 Schweizer 2-32; 11 Schweizer 2-32A; 12 Calif A-21

iránymutatónak vagy egyszerűen csak jellegzetesnek tartunk. Ezt a módszert igyekszünk követni az elvontabb tárgyalások során is, ahol megépült vitorlázó repülőgépek példákra hivatkozunk, ha ezt a szöveg könnyebb megértése szükségessé teszi. Ezzel a módszerrel a könyv teljes átolvasása után a példaként vett repülőgépekről részletes és részleteiben megindokolt kép alakul ki bennünk. E képet azzal tesszük teljesebbé, hogy ahol csak lehet, röviden — de semmi esetre sem típuskönyvi módszerrel — ismertetjük azokat a fontosabb vitorlázó repülőgépeket is, amelyek részletesebb ismertetése e könyv terjedelmében lehetetlen lenne.

1. A vitorlázó repülőgép története

A vitorlázó repülőgép története nem választható el a vitorlázórepülés történetétől, mint ahogyan a vitorlázórepülés fejlődésének története sem választható el a légköri energiák kihasználhatóságában szerzett tapasztalatoktól és a tapasztalatok megszerzését lehetővé tevő pilótatudás fejlődésétől sem.

Ha a vitorlázó repülőgépek fejlődése során létrehozott, szinte megszámlálhatatlan változatú típusok sokaságára tekintünk, nehéz eldöntenünk, hogy ezek közül melyek a megemlézésre méltó, útmutató alkotások, és hogy egy-egy, a fejlődést előrevivő gondolat, alapvető elrendezés vagy szerkezeti megoldás hol is született meg először. A 11. és 12. ábrán az egy- és kétüléses vitorlázó repülőgépek kategóriáiban tüntettük fel a világrekordokat, ahol az egyes pontokat a rekordot elért vitorlázógép típusával jelöltük meg. Úgy tűnik, hogy a megítélésnek ez az eszköze a legcélravezetőbb. De vajon a rekordokat — mivel a vitorlázórepülés a technika, a légköri energiák és a pilótatudás egysége, tehát az alkalomnak is függvénye — mindig a legtökéletesebb műszaki megoldással éri el? Éppen a legutóbbi évek eredményei igazolják, hogy ma már (elsősorban sebességi) csúcseredményt csak az időjárási szempontból különleges helyzetű területeken (szovjet síkság, Dél-Afrika, Texas, Ausztrália) lehet elérni. Másrészt, mint minden emberi alkotás, a vitorlázórepülés is az ismeretek megszámlálhatatlan apró mozaikjából épül fel, és így egy-egy gondolat, megoldás, bár a gép a tényezők kedvező összejártsága hiányában talán sohasem ér el jelentős eredményeket, hatása mégis döntő jelentőségű lehet az általános fejlődés egy későbbi pontján.

A következőkben e megfontolások alapján kíséreljük meg a vitorlázó repülőgép fejlődésének mérföldköveit sorra venni. A fejlődés mintegy 70—75 évét valamiféle korszakokra bontani értelmetlenség, bár a megvalósulás időrendisége készen kínálja a siklórepülés és a lejtővitorlázás (kb. a kezdettől 1925-ig), a termikrepülés (kb. 1925—1950-ig) és a sebességi repülés (kb. 1950-től) korszakaira való felosztást. Nyilvánvaló, hogy e korszakok jellegzetességei a repülőgépek tervezési elveiben, kialakításában is tükröződnek, a dolgok egészét tekintve e korszakok egymásba olvadnak, és jellemzőik gyakran már a kezdet kezdetén is ismereteseek, és legalábbis elérendő célként kitűzöttek voltak. A korszerű vitorlázó repülőgépek nem egy, a felületes szemlélő előtt forradalmi újításnak tűnő megoldása már a harmincas évek elején feltűnt, majd — mint számos más, korát megelőző, még nem időszerű gondolat — átmenetileg ismét feledésbe merült.

Hasonlóan az egy- és kétüléses gépek fejlődésének ismertetését sem tartjuk szükségesnek különválasztani, mert nyilvánvaló, hogy ezek — néhány szemponttól eltekintve — lényegében a fejlődés azonos fokát képviselik minden időben.

A csupán az áttekinthetőség kedvéért alkalmazott felosztást a következő jelenség indokolja: a vitorlázórepülés történetének kezdete az emberi repülés megvalósulásának kezdetével esik egybe. Kb. az 1920-as évek elejéig a repülés nagy problémája mellett a még újdonságszámba menő motoros repülés árnyékában mintegy lappangott csak a vitorlázórepülés. A cél még főleg a motoros repülés volt, de e korszak siklórepülőgépei nem maradtak hatástalanok a vitorlázórepülés későbbi fejlődésére. Mi tehát ezt az időszakot tekintjük az első történeti korszaknak. A második korszak az 1920-as évek kezdetén csaknem egyidejűleg és egyforma módon indult meg a Szovjetunióban, Európa egyéb részein (főként Németországban és Lengyelországban), majd az Egyesült Államokban és a világ más tájain, hogy a második világháború után íveljen felfelé a mai színvonal felé. Ez az utolsó szakasz azonban már a jelen, amelynek vitorlázó repülőgépeivel könyvünk egyéb részeiben foglalkozunk részletesen.

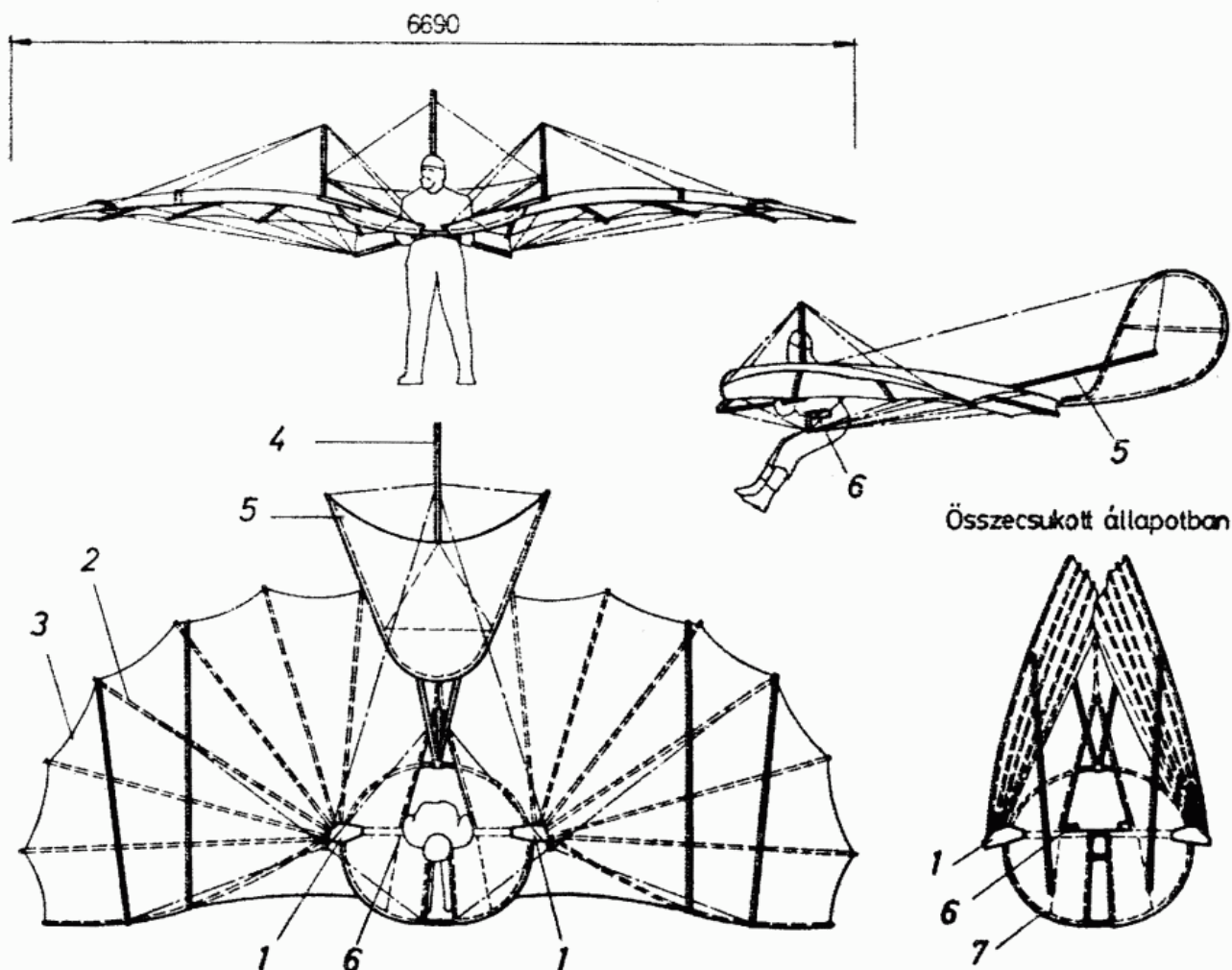
1.1. 1920 előtt

Az első vitorlázórepülőnek *O. Lilienthal* kell tekintenünk, aki 1891-ben első 15 m-es siklásával egyúttal az első ember volt, aki a levegőnél nehezebb szerkezettel sikerrel repült. Első repüléseit megelőzte 1889-ben megjelent könyve: „A madár repülése mint a repülés művészetének alapja” [10]. Ez a munka nem is annyira a madarak repülését vizsgálta, mint inkább vezérfonal az emberi repülés megvalósításához. Több fontos gondolat mellett kiemeli az ívelt szárnyszelvények előnyeit, és harminc pontból álló programot ad a repülőgépek szerkesztésére és kipróbálására. A repülés úttörőinek nagy része évszázadokon át a madarakat utánzó csapkodószárnyú szerkezetekben kereste a megoldást. *Lilienthal* könyvében így ír: „... a vitorlázórepülés nem a madár monopóliuma, s legalábbis megvan annak a lehetősége, hogy az ember mesterséges úton elsajátítsa ezt a repülési módot, amely nem követeli a szárnyak erőteljes mozgatását, hanem csak ügyes kormányzást igényel.”

Lilienthal kezdetben egy 15 m magas, kúp alakú dombról végezte repülőkísérleteit, mert így bármilyen szélirány mellett széllal szemben indulhatott. Rövidesen olyan gyakorlatot szerzett a siklásban, hogy 300 m távolságra is képes volt elsiklani, sőt a repülés irányát tetszése szerint változtatta.

Egyik 1893-ban készült siklórepülőgépét a 77916 sz. német szabadalmi leírás alapján a 13. ábra szemlélteti. A szárnyat az 1 pontokba befutó ívelt, de vászonnal csak felül beborított, sugarasan elhelyezkedő, fából készült 2 bordák képezték. A szárnybordák külső végeinél a 3 zsinór futott körbe, biztosítva a bordák egymáshoz viszonyított megfelelő távolságát. A szárnyak mögé az ugyancsak fából és vászonból készült 5 vízszintes és 4 függőleges felületek nyúltak. Feladatuk a stabilitás növelése volt. *Lilienthal* a szárny közepén levő, gyűrű alakú 7 tartószerkezetben foglalt helyet olyképpen, hogy alsókarjait a párnázott 6 tartókra fektetve a szerkezet alá függeszkedett repülés közben. A fel- és leszállást így saját lábain futva végezte.

A siklórepülőgépet a súlypont szükség szerinti eltolásával testsúlyának megfelelő áthelyezésével kormányozta. Felszálláskor nekifutás közben a szárnyak elejét („be-

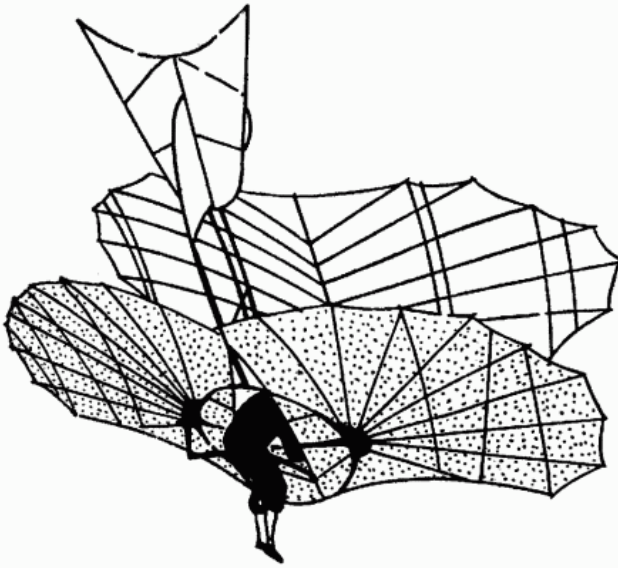


13. ábra. Lilienthal siklógépe 1893-ból

lépőélet”) kissé megemelve tartotta, majd elemelkedés után lábait összezárva kissé előrenyújtotta. Ez a tartás tette lehetővé a siklőhelyzet felvételét. A szerkezet siklőszöge kb. 4° volt. A gépet lábainak még előbbre nyújtásával gyorsította (a siklópálya meredekebbé tétele), lassításkor kissé hátrább húzta őket. Forduláskor a siklógépet testsúlyának oldalirányba való áthelyezésével döntötte be a forduló irányába, ezért ilyenkor mindkét lábát a forduló oldalára nyújtotta ki. A széllekéseket hasonló módon egyensúlyozta. Kevéssel leszállás előtt testét hátrahúzta, hogy a gépet ilyen módon lelassítsa.

A viszonylag kisméretű szerkezet a testsúly áthelyezésével meglehetősen biztonságosan volt kormányozható, a kormányzás hatékonysága még nőtt, amikor Lilienthal 1895-ben kétszárnyú repülőgépek építésére tért át. Ezek fesztávolsága — azonos szárnyfelülettel — az egyszárnyúnak csak a fele. Ezzel a 18 m^2 szárnyfelületű típussal (14. ábra) első ízben sikerült $6 \dots 7 \text{ m/s}$ erősségű, időnként 10 m/s -ra felerősödő szélben (ezt már mondhatjuk nyugodtan lejtőszélnek) rövid vitorlázórepülést végeznie: „... Fokozódó szélben a repülési pályám gyakran erősen felfelé ível, és ilyenkor az is előfordul, hogy kiindulási helyemnél magasabb pontra jutok el. Ilyen alkalmakkor határozottan érzem, hogy még tovább is levegőben tudnék maradni, ha oldalt fordulva kört írnék le, és a felszálló áramlatokkal folytatnám utamat...” [9].

Lilienthal egy későbbi, 1896-ban elkezdett siklógépét olyan vastag és ívelt szárny-szerkezettel építette, amelynek felső és alsó oldala is borítva volt. Különféle kormányfelületeket is szerkesztett. Ezek között olyan mozgatható magassági és oldalkormányra



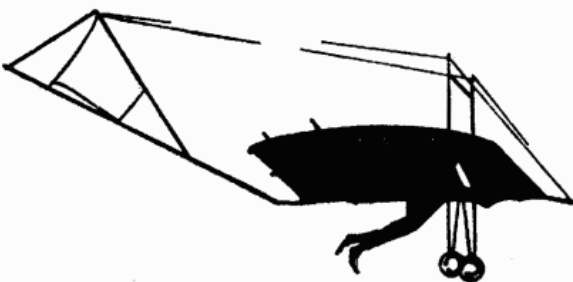
gondolt, amelyeket a szárny közepén függeszkedő pilóta fejéhez és csípőjéhez kötve működtetett volna. „Ezenkívül minden egyes szárnyvégre egy felületet szerkesztettem, amelyet zsinórral kimozdíthatok, hogy ezáltal az előresiető szárnyat visszatarthassam”.

Siklógépeivel *Lilienthal* több mint 2000 felszállást végzett, és repülési összideje meghaladta az 5 órát. Gépeit számos országba exportálta, és mindenütt repültek is velük. *N. J. Zsukovszkij* orosz aerodinamikai tudós szerint „a repülés területén az utóbbi esztendő legfontosabb találmánya *Otto Lilienthal* mérnök repülő szerkezete.”

Lilienthal kortársai és követőinek egy része kísérletezett még siklórepülőgépekkel, de céljuk a repülés problémájának megoldásán túl általában a vitorlázórepülés, a légköri energiák kihasználása felé nem terjedt ki. E korból (1891—93) a lengyel *Cz. Tanski* és a svájci *C. Steiger* siklási kísérletei figyelemreméltóak.

Az angol *P. S. Pilcher* 1895 szeptemberében újfajta indítási módot eszelt ki. Terelőgörgő segítségével hosszú kötéllel vontatta fel gépét a levegőbe, és így 60 m magasságot is elért. *Gull* nevű 30 m² szárnyfelületű siklógépe túlságosan nagy, hogy uralmát csupán testsúlyáthelyezéssel kormányozva meg tudja felette őrizni. Leghíresebb gépe a *Hawk*, lényegében *Lilienthal* egyszárnyú gépének mása. Fesztávolsága 8,63 m, szárnyfelülete 16,7 m². A szerkezet önsúlya csupán 22,6 kp, ami az ilyen szerkezeteknél nemcsak szokásos, de kívánatos is volt, hiszen nagyobb súlyút fel- és leszálláskor aligha lehetett volna kezelni. A *Hawk* bambuszrudakból, vászonból és zongorahúrokból készült. Érdekes újítás a kétkerekű futószerkezet, amely megkíméli a pilótát attól, hogy leszálláskor saját lábain érjen földet (15. ábra).

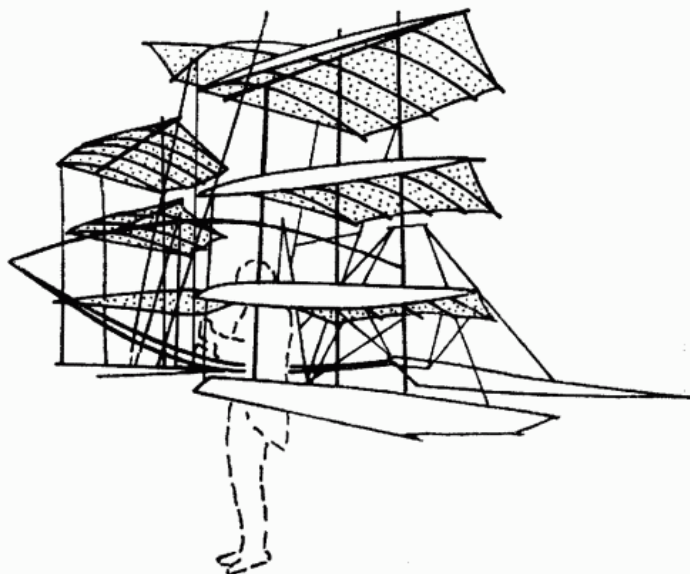
Az amerikai *O. Chanute* a *Lilienthaltól* vásárolt egyszárnyú gépet nem találta megfelelőnek, mert kormányozása túlságosan nagy figyelmet követelt. Szerinte a repülőgépnek önstabilnak kell lennie. Ezt a célt igyekezett többszárnyú gépével elérni



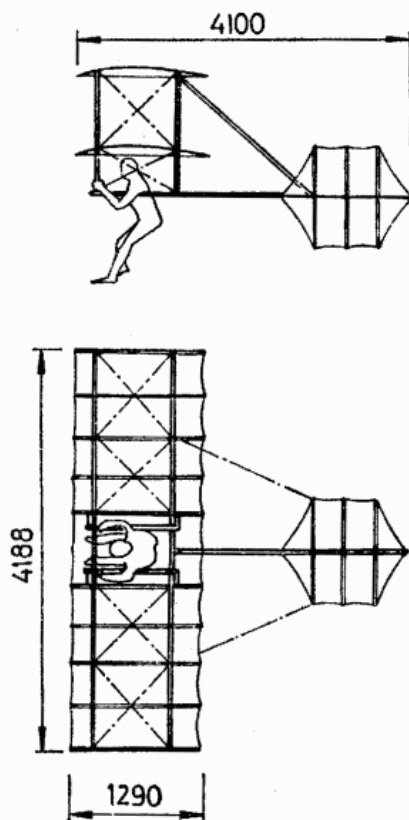
15. ábra. *Pilcher* kerekkel látta el *Hawk* nevű gépét

(16. ábra). A „függősiklógépként” kiképzett szerkezet négy szárnyfelülete felett még egy ötödik is volt a repülés irányával párhuzamosan elhelyezve. A farokfelület alakja és mérete a szárny egy elemével egyezett meg. E szerkezettel több mint 300 sikeres repülést végeztek. Siklőszöge kb. 12° volt, tehát *Lilienthalénál* lényegesen kedvezőtlenebb.

Később *Chanute* is áttért a kétszárnyú szerkezetekre, amelyek kis súlyuk mellett az újszerű átlós huzalmerevítéssel igen szilárdak voltak. A 17. ábrán látható 1897-ben épült kétszárnyú szerkezet súlya mindössze 11 kp volt. Több mint 700 felszállást végeztek vele. Lebegési sebessége kb. 10 m/s, siklőszöge $7 \dots 10^\circ$ volt.



16. ábra. *Chanute* többszárnyú siklógépe

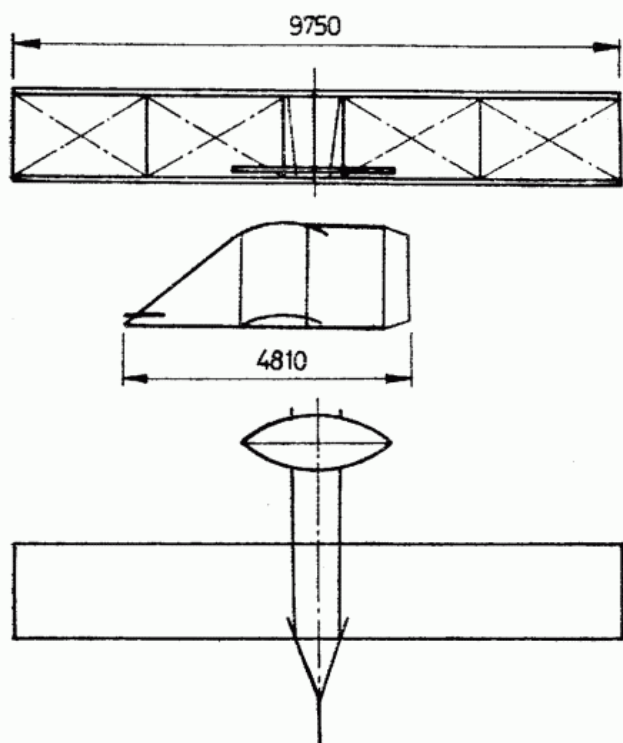


17. ábra. *Chanute* újabb, testsúlyáthelyezéssel kormányzott kétszárnyúja

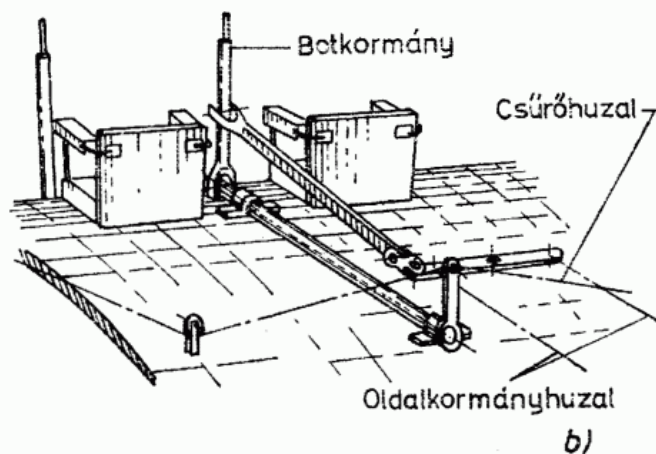
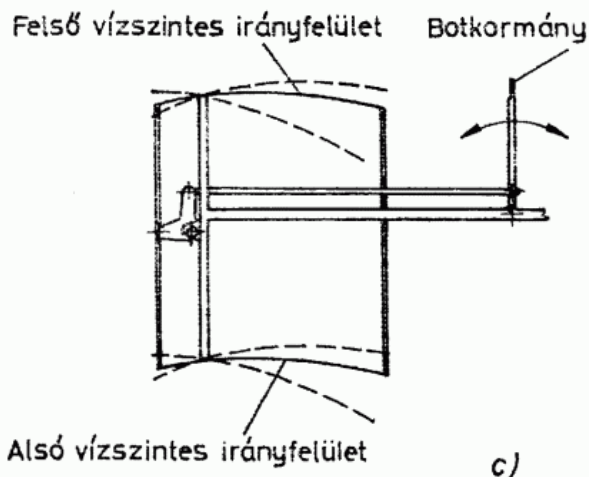
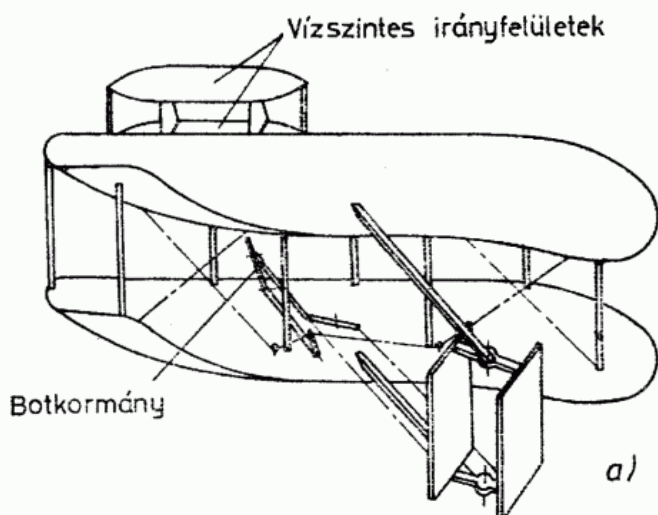
Lilienthal sikereitől felbuzdulva, de *Chanute* kísérleteiről mit sem tudva kezdte meg siklórepülő-kísérleteit az amerikai testvérpár, *W.* és *O. Wright*. Már első siklórepülőgépük megtervezésekor ötletességükről tettek tanúbizonyságot. Míg addig a testsúlyáthelyezéssel való kormányzás szinte általános volt, addig a *Wright* testvérek a hosszirányú stabilitás elérésére a kettős szárny előtt ún. kacsaelrendezésben vízszintes kormányfelületet alkalmaztak (18. ábra). Rövidesen megoldották az oldalirányú stabilitás eddig oly nyomasztó problémáját is, a szárnyfelületek hajlékonyra kiképzett hátsó élének repülés közben — a most első ízben alkalmazott botkormány — egymáshoz képest húzalokkal való elcsavarását. „Az ölyvek... ferde helyzetüket... szárnyvégük elcsavarásával nyerik vissza. Ha jobb szárnyuk hátsó végét felfelé, bal szárnyukét pedig lefelé fordítják, a fejüktől a farkukig húzódó (képzelt) tengelyük körül fordulnak el (jobbra)” — írja erről *W. Wright* *Chanute*hoz szóló levelében [12]. Ezzel tulajdonképpen a csűrőkormányt találták fel, vagy jobban mondva lesték el a természettől.

A megoldás azonban olyan hátránnyal járt együtt, amelyet már *Wrighték* is felismertek. A szárny ilyen elcsavarása nemcsak a keletkező felhajtóerő eloszlását tette a repülőgépnek a kívánt oldalra való bedöntése érdekében aszimmetrikussá, hanem az elcsavarás következtében a szárnyak ellenállása is megváltozott úgy, hogy a dőlés

következtében felfelé haladó szárnyat lefékezte, a lefelé haladót pedig gyorsította. Ezzel a szárnyak bedöntésekor a megkezdett forduló végrehajtása ellen ható hatás jött létre. Csak kevesen tudják ma már, hogy *Wrighték* ezt az *ellentétes fordulónyoma-*



18. ábra. A *Wright* testvérek gépei kacsá-elrendezésűek voltak (1902)



19. ábra. 1902-ben készült *Wright*-féle siklógép kormányainak mozgatószerkezete

a) a csűrő és az oldalkormány együttesen tért ki; b) a kormányokat a ma is használatos botkormánnyal működtették; c) magassági kormány

téket a szárnyelcsavarás és az oldalkormány-mozgatás mechanizmusának összekötésével oly módon oldották meg, hogy a csűrő kitérítésekor automatikusan velejárt az oldalkormány megfelelő irányú kitérése is (19. ábra), amely kiegyenlítette az ellentétes fordulónyomatékokat. A vitorlázó repülőgépeken ezt a megoldást még húsz évvel később is alkalmazták.

Ugyancsak a 19. ábrán látható *Wrighték* magasságikormány-megoldása is. Ők a vízszintes farokfelületek rugalmas be-, ill. kilépőélét torzították el kormányzáskor és ezzel lényegében a mai magassági kormányhoz hasonló megoldást alkalmazták. A kormányokat a siklógépeken a kisebb ellenállás kedvéért fekvő pilóta kezével és lábával kezelte.

A *Wright* testvérek 1900 és 1903 között négy siklógépet építettek (1. táblázat).

1. táblázat

A *Wright*-testvérek 1900—1903 között épült siklógépei

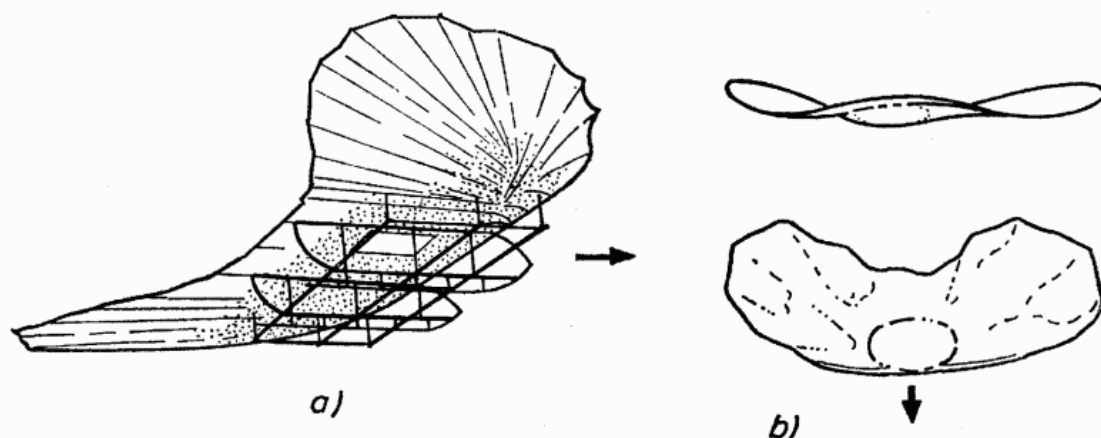
Sor-szám	Fesztávolság m	A szárny		Üres súly kp	Repülősúly kp	Felületi terhelés kp/m ²
		húrhossza m	felülete m ²			
1	5,64	1,52	15,6	21,8	102	6,55
2	6,07	2,13	21,0	45,4	126	6,00
3	9,75	1,52	28,4	53,0	133	4,68
4	12,25	1,52	48,0	53,0	—	—

A táblázatból kitűnik, hamar rájöttek arra, hogy a keskeny, nagyobb fesztávolságú szárnyak a kisebb oldalviszonyúaknál előnyösebbek. Gépeik felső szárnyának íveltsége a *Lilienthal*-féle szárnyakhoz hasonlóan 1 : 12, az alsóké ennél valamivel kevesebb, 1 : 19 volt. 1901-ben végzett repüléseik során a *Wright* testvérek megtanulták gépeiket mindhárom tengelye körül kormányozni. 1902-ben épített (3. számú) gépükkel (18. ábra) csaknem 1000 siklást végeztek. Még 15 m/s erősségű szélben is, sőt a következő években lejtő menti szélben is repültek, és eközben 2 percig fenn is maradtak a levegőben.

A századfordulót követő években a siklórepüléssel foglalkozók lényegében *Lilienthal* vagy a *Wright* testvérek útját választották, számos apró részlettel gazdagítva a repülést.

Még 1897-ben jelent meg Prof. *Ahlborn* „Repülőgépek stabilitásáról” c. munkája [2]. Ebben egy trópusi növény, a *zania macrocarpa* szárnyas magjának meglepően stabil repüléséről ír: „A zaniamag egyenletes repülése lenyűgöző látvány. Csodálatos, hogy egyensúlyát milyen biztosan szerzi vissza, bármilyen helyzetből bocsátjuk is útra”. Erre az érdekes jelenségre *Ahlborn* felhívta *Lilienthal* figyelmét is, és ajánlotta, hogy a szárnyfelület íveltségét a kilépőél felé felhúzza, a zaniamaghoz hasonlóan S alakban alakítsa ki, a felhajtóerő emiatt bekövetkező csökkenését pedig a felület megnövelésével ellensúlyozza. *Lilienthal* nem tudta magát erre elhatározni, de ha a tanácsot megfogadja, 1896. aug. 9-én bekövetkezett halálos végű balesetét talán elkerülhette volna. (Feltételezések szerint túl erős szellőkés következtében előbb túl húzott helyzetbe került, majd dugóhúzóba. A testsúlyáthelyezéssel kormányzás hatékonysága a veszélyes helyzet megszüntetésére már nem volt elegendő.)

Ahlborn felfedezése alapján az osztrák *I. Etrich* és *F. Wels* csupaszárny sikló-repülőgépeket szerkesztett. Ezeknél a különben szokásos stabilizáló farokfelületeket elhagyták, és a magában repülő szárny (20. ábra) stabilitását a zanoniához hasonló különleges szárnyforma és az S alakban ívelt metszetek tették lehetővé. Honfi-



20. ábra. a) *I. Etrich* és *F. Wels* gépe (1910 körül); b) a *zanonia macrocarpa* magja

társuk, *R. Nimführ*, aki *Lilienthal* egyik gépének örököse volt, és akit a dugóhúzó problémája erősen foglalkoztatott, erről így ír: „A szárny sajátos ívelése, az erősen felhúzott szárnyvégek és a súlypont megfelelő helyzete következtében a szerkezet teljesen önműködően stabil volt. Az ilyen szárnyak repülésük közben nem képesek felborulni”.

Ezt az érdekes és rendkívül fontos megoldást azután (a farokfelületeket is használva) motoros repülőgépeken is alkalmazták. A *Taube* gépek arról voltak híresek, hogy „még a bolond is tud velük repülni”, szinte lehetetlen őket túlhúzni és dugóhúzóba vinni.

A *Wright* testvérek tevékenységével megjelent a repülésben a motor. Ezzel lehetővé vált, hogy a repülőgép a levegőben rejlő energiáktól többé-kevésbé függetlenné válva emelkedjék a magasba, és a motor nélküli repülés csaknem két évtizedre homályba merült. *Wrighték* ugyan 1911-ben még egyszer visszatértek a Kitty—Hawk melletti dombokra, ahol lejtőszélben még sokszor vitorláztak. Leghosszabb repült idejük 11 perc volt. E sikereiket azonban a vitorlázórepülés érdekében már nem aknázták ki.

1.2. 1920-tól a második világháborúig

E korszakot a vitorlázórepülés megvalósulása, a légkörben rejlő energiák kihasználási módjainak kutatása, és az ebben elért egyre növekvő sikerek jellemzik.

A húszas évek elején új életre támadt a vitorlázórepülés. A motoros repülés ekkor már messze túljutott a kezdeti próbálkozásokon, s az első világháború katonai jellegű fejlődése után már az óceánrepülések voltak soron. Az egyre fejlődő aerodinamikai ismereteket és számos szerkezeti megoldást a motoros repülés már készen kínálta. Hasonlóképpen a meteorológia is egyre inkább a repülés szolgálatába szegődött: lassan megérett a helyzet a légiforgalom kibontakozására. Ebben a helyzetben a kora-

beli vitorlázó repülőgépek egyszerűsége és a földet kezdetben alig elhagyó ugrásaik kicsinysége — a mai olvasó számára — érthetetlennek tűnhet. A motoros repülőgépekhez viszonyítható „kezdetlegesség” oka nem az aerodinamikai vagy szilárdsági ismeretek, az ötletes szerkezetek tervezésére való készség hiánya volt, hanem a repülés lehetőségének olyan utakon való keresése, amelyhez részben az energiaforrások pontos ismerete, részben pedig ezek kihasználásának ismerete is teljesen hiányzott.

A lejtővitorlázás lehetőségét már *Lilienthal* és különösen a *Wright* testvérek repülései bebizonyították. A légköri emelőáramlatok természetéről *Pénaud* (1850—1880) világos megállapításokat tett, és azt is bebizonyította, hogy azok a függőleges áramlatok, amelyekben a madarak köröznek, konvekció következtében jönnek létre. Sőt a termikus feláramlás szerkezetére vonatkozó elképzelését is mai ismereteinkkel jól egyező módon ábrázolta. Megfigyeléseit századunk első évtizedeiben *Hankin*, *P. Idrac*, *Mouillard* megfigyelései egészítették ki.

Nyilvánvaló, hogy a vitorlázórepülés csak kis merülősebességű szerkezetekkel lehetséges. Kérdéses volt azonban a módszer, amellyel ezek a gépek a légköri energiák kihasználására alkalmazhatókká válnak.

E korszakban figyelmesen tanulmányozták a madarak repülését, hogy a szárnycsapás nélküli vitorlázás titkát ellessék. Repülésük számos olyan mozzanatát vették észre, amely a vitorlázó repülőgépek fejlődése folyamán előbb vagy utóbb megjelent. Felfedezték, hogy a termikus emelőáramlatban köröző keselyű teljes felületében kiterjesztett szárnyával a felületi terhelést és vele a merülősebességet csökkenti. Rájöttek, hogy az albatrosz rendkívül karcsú szárnyai a siklás szempontjából felülmúlják a rosszabb oldalviszonyúakat. Megfigyelték, hogy egyes madarak szárnyformájuk alakításával, a szárnytagok előre- vagy hátrahúzásával magassági kormányzást végeznek, mivel ilyenkor a szárnyon keletkező felhajtóerő eredőjének támadási pontját a súlypont elé vagy mögé viszik. Ezek a megfigyelések igen jól egyeztek az elméleti elképzelésekkel. Különösen fontos volt az a megfigyelés, amely a szárnyfelület nagyságának a különböző szélsőségekhez való igazítására vonatkozott (2. táblázat). Az egyenletes, vízszintes szél a motor nélküli repülés számára nem hasznosítható.

2. táblázat

Madarak repülésének néhány jellemző adata

Madárfaj	Súly kg	A szárny felülete m ² -ben, ha a szélsőségek		
		0 m/s	10 m/s	20 m/s
Pelikán	6,625	0,9986	0,9260	0,7789
Folyami sas	1,270	0,3292	0,2792	—
Sirály	0,89	0,3343	—	0,2067

Meglehetősen elterjedt volt azonban az a nézet, hogy a madár szárnyainak felhajtóerejét széllelés esetén állásszögének megnövelésével fokozhatja és így szárnycsapás nélkül is képes magasságnyerésre. A szél irányában és sebességében beálló változások így tehát magasságnyerésre volnának felhasználhatók, a széllelések elegendő energiát szolgáltatnának a vitorlázórepüléshez. Úgy vélték, hogy a széllelés következtében megnövekedett felhajtóerőt a madár magasságszerzésre használja fel. Eközben azonban ellenállásának megnövekedése miatt sebessége lecsökken, és csakhamar ismét siklásba kell átmennie, hogy kellő sebességét visszanyerje. A következő

széllökéskor ez a folyamat ismétlődik, így hullámozó pályán, lejtőszél nélkül, sík terep felett is képes megfelelő erősségű és lökésességű szélben vitorlázni.

Az angol aerodinamikus *Lanchaster*től származnak a következő sorok: „A nagy madarak által űzött vitorlázásnak legalábbis egyik fajtája az, amikor a szél változásából vonnak el energiát, vagyis ilyenkor a madár a repüléshez szükséges energiát a szél turbulenciájából szerzi”. Majd ugyancsak ő másutt: „A röppálya láthatóan lágy hullámvonalhoz hasonló. A madarak ... elliptikus pályán mozognak, melyek nagytengelye hátrafelé lejt, és mintegy 2...3 m hosszú [8]. Természetesen ez az elmélet feltételezi azt, hogy a siklórepülés alatti magasságvesztés kisebb, mint a széllökéskor szerzett magasság. A jelenséget alátámasztani látszik az ún. *Knoller—Betz*-hatás, amely szerint azokon a szárnyakon, amelyek váltakozó irányból kapják a megfűvást, nagyobb felhajtóerő keletkezik. Ez volt az alapja az ún. *dinamikus vitorlázás* elméletének, amely a húszas évek elején erősen foglalkoztatta a vitorlázórepülőket, és bár segítségével komolyabb eredményeket nem értek el, még a harmincas évek elején is vissza-visszatért.

A vitorlázórepülés fellendülését elsősorban az segítette elő, hogy számos országban évente rendszeresen ismétlődő versenyeket rendeztek a vitorlázórepülők számára. Így a Szovjetunióban a Krímben levő Feodoszija melletti Koktyebelben, Németországban pedig a Rhön hegységben levő Wasserkuppe csúcson, Franciaországban Clermont-Ferrand-ban stb. A versenyek kinyilvánított célja a vitorlázórepülés megvalósítása, a vitorlázó repülőgépek fejlesztésének ösztönzése, a légköri energiák kihasználási lehetőségeinek kutatása és repülőteljesítmények elérése volt, bár kezdetben tulajdonképpen nem is voltak a szó szoros értelmében vehető versenyek. Versenyzők helyett lelkesedők jöttek össze ki-ki saját konstrukciójával. Tudósok és fantaszták cserélték ki elképzeléseiket, s mindannyian örültek, ha egy-egy gép a levegőbe emelkedett.

Már a legelső versenyeken olyan nevekkel találkozunk, amelyek a vitorlázó repülőgépek történetében még számos alkalommal visszatértek. A Krímben: *K. Arceulov, A. Jakovlev, B. Cseranovszkij, P. N. Seremetyev, V. K. Gribovszkij, V. Püsnov, A. V. Jumasev, Sz. Koroljev* és még sokan mások. A Wasserkuppén: *A. Lippisch, H. Muttray, A. Pröll, Hetzen, Martens, G. Madelung, O. Klemperer, A. Fokker*. A siklógépek tervezését a különböző tudományos intézetek, műszaki egyetemek messzemenően támogatták: így elsősorban a CAGI (Centralnűj Aero-Gidrodinamiceszkij Institut), valamint a hannoveri, stuttgarti, drezdai műszaki főiskolák stb.

Az első versenyeken megjelent motor nélküli szerkezeteket három csoportra oszthatjuk:

1. testsúlyáthelyezéssel kormányzott szerkezetek (függősiklók);
2. kormányfelületek kitérítésével kormányzott szerkezetek;
3. a szárny állásszögének változtatásával kormányzott (szárnykormányzású) szerkezetek.

1. A korábban már *függősiklónak* nevezett szerkezeteket a *Lilienthali* elvek alapján kormányozták. Felszálláskor a szerkezetet szembefordították a szélllel, a pilóta megragadta a szárnyat a farokkal összekötő rudazatot és az enyhén lejtő domboldalon nekifutott. Ha a szükséges sebességet elérte — ez a felületi terhelés nagyságától és a szélsébsébségtől függött —, kissé növelte az állásszöget. A szerkezet most magától felemelkedett. Rögtön ezután előrelökte lábait, hogy a megfelelő sebességű siklőhelyzetet felvegye. A pilóta megfelelő testhelyzetével, kicsiny felületi terheléssel (általában nem volt több, mint 5...8 kp/m²) és valamelyes gyakorlattal a start könnyű volt, de gyorsaságot és bizonyos ügyességet igényelt. A függősikló gép kormányoz-

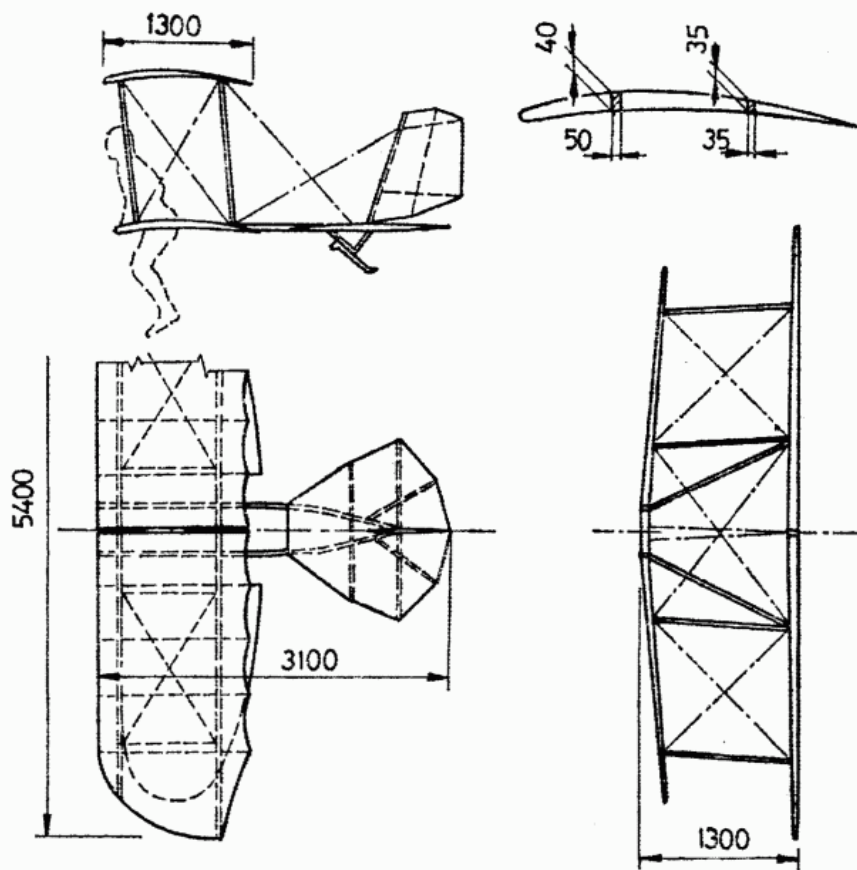
hatósága nagyságától függött. Ugyanis minél kisebb a fesztávolság, annál engedelmesebben reagál a szerkezet a súlypontáthelyezésre. A függősiklógéppel való repülés gyenge szélben viszonylag egyszerű volt. A lábat a „csúréshez” oldalra vagy a magassági kormányzáshoz előre vagy hátra kellett nyújtani. A mélyen fekvő súlypont miatt általában kis mozdulatok is elegendők voltak. Erős, 6...8 m/s-ot meghaladó sebességű szélben azonban ez a kormányzási mód nem volt kielégítő.

A leszállás ismét nagy ügyességet kívánt a függősiklógéppel, mivel a 30...35 km/h-s repülési sebességgel nem érhetek földet. Közvetlenül földet érés előtt tehát a pilóta hátrahúzta lábát, hogy ezzel az állásszöget növelje és a sebességet csökkentse, majd a földet éréssel járó ütődés csökkentésére ismét előrenyújtotta őket.

Mint mondtuk, a lejtő menti vitorlázáshoz csekély felületi terhelésre volt szükség. A szerkezetnek olyan könnyűnek kellett lennie, ahogyan ezt a kellő szilárdsággal össze lehetett egyeztetni.

A 21. ábrán *Pelzner* függősiklógépet láthatjuk 1920-ból. Szárnyai kétfőtartósak voltak, fenyőfából körisfa övlécekkel. Méreteik az ábrán láthatók. Az alsó szárny enyhén V állású volt. A felületeket szállításhoz négy csavar megbontása után szét lehetett szerelni. A két törzstartó egymástól való távolsága 40 cm, hogy a pilóta közöttük kényelmesen elférjen. Az oldalkormány görgőn átvezetett huzalját a jobb kéz kezelte. A vezérsíkok mindkét oldala, a szárnyak azonban — a kor hiányos aerodinamikai szemléletmódjára jellemzően — csak alulról voltak borítva. A szerkezet siklószáma kb. 6 volt. *Pelzner* legjobb teljesítménye e géppel 52 s, ill. 452 m távolság volt.

A függősiklógépet a legerényebb eszközökkel és minimális konstrukciós igény-nyel el lehetett készíteni. Ennek ellenére a vitorlázórepülés további fejlődését nem befolyásolta. Már 1925-ben így ír róla *Gymnich*: „Előnye könnyű szerelhetőségében



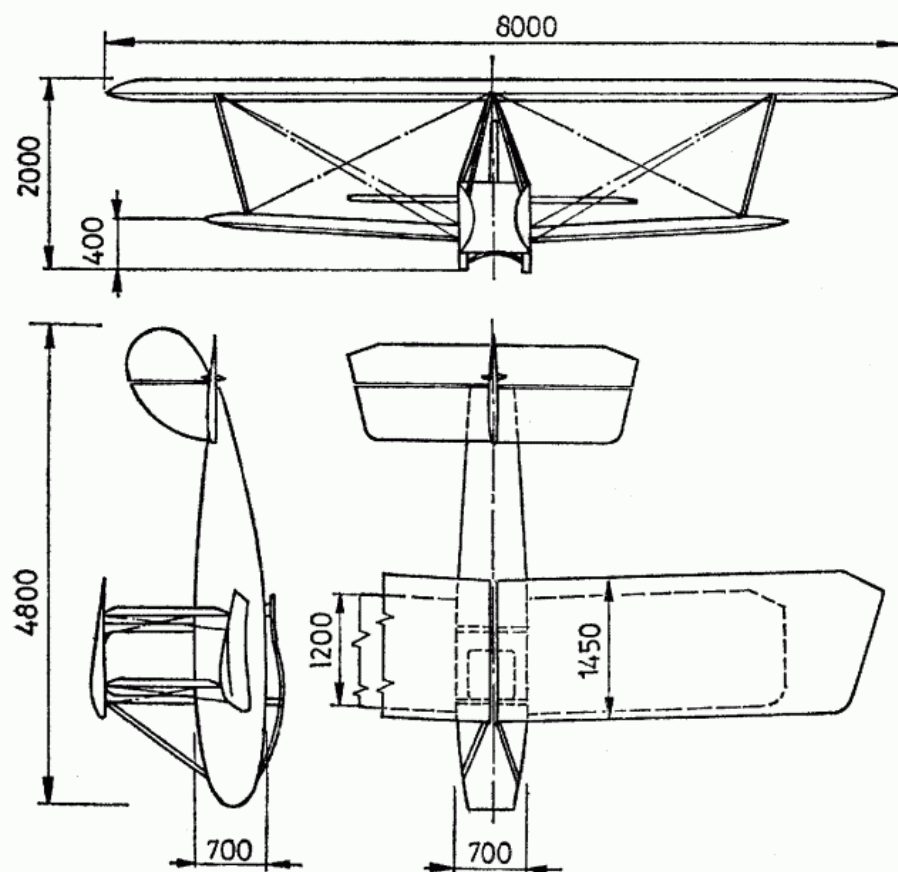
21. ábra. *Pelzner* 1920-ban épült függősiklógépe

és tárolhatóságában, valamint csekély súlyában rejlik. A kezdő (repülő) azonban repülési kísérleteit inkább siklórepülőgéppel kezdje meg, amelyben teljes figyelmét a kormánymozdulatokra fordíthatja” [6].

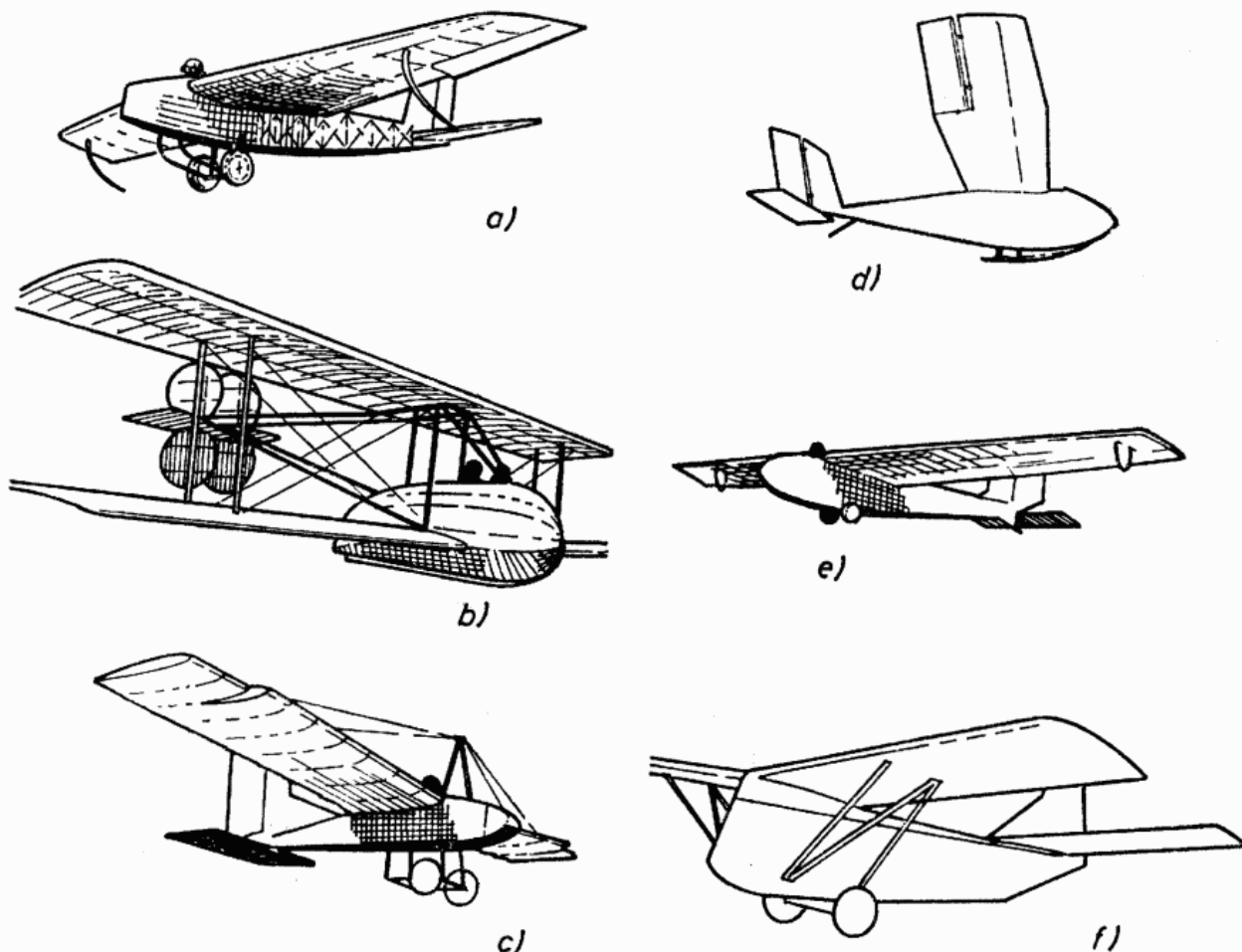
2. A mozgatható felületekkel való kormányzást a vitorlázórepülés készen kapta a motoros repülőgéptől. Az ülő pilóta nemcsak kényelmesebben, de a kezével és lábával vezérelt kormányszervek segítségével különösebb erőfeszítés nélkül, érzékenyebben és pontosabban vezetheti gépét, így azután az emelőáramlatokat is jobban kihasználhatja. Mivel a lejtő menti vitorlázás természeténél fogva kevesebbet kívánt az emelőáramlatok kihasználásában a gép jó tulajdonságaitól, mint a repülőgépvezető ügyességétől, a függővitorlázó-repülőgépek már a húszas évek legelején kiszorultak.

Ebben az időben az volt az általános vélemény, hogy a vitorlázó repülőgépnek elsősorban kis merülősebességűnek kell lennie. A merülősebesség csökkentését a megfelelő szárnyszelvények alkalmazásától eltekintve a felületi terhelés csökkentésével, vagy emellett még az egész gép ellenállásának csökkentésével lehet elérni. Az előbbi lehetőséget választották azok, akik vitorlázó repülőgépeiket két szárnyal építették meg. Az egymáshoz dúcokkal kimerevített szárnyfelületek huzalos diagonál merevítéseikkel statikailag határozott szerkezetet képeztek. Így a gépek viszonylag kicsiny felületi terhelés mellett is elfogadható szilárdságúak voltak, természetesen a lejtő menti repülés korabeli követelményeinek megfelelően.

A 22. ábrán látható, 1921-ből származó iskolagépet *H. Muttray* tervezte. Ezzel a rendkívül egyszerű szerkezettel több száz felszállást végeztek, és a leghosszabb repülési idő 10 perc volt. Az alsó szárny állásszöge a felsőénél valamivel nagyobb volt. Mindkét szárny két-két dobozos szerkezetű főtartóval készült. Méretük 6×4 , ill. 9×4 cm. A belépőél a simább és szilárdabb szerkezet kedvéért két egymásra nyvezett furnérlemez réteggel volt borítva. A szárnyak és a törzs összekötése vasalások nélkül



22. ábra. *H. Muttray* két-szárnyú siklógépe (1921)



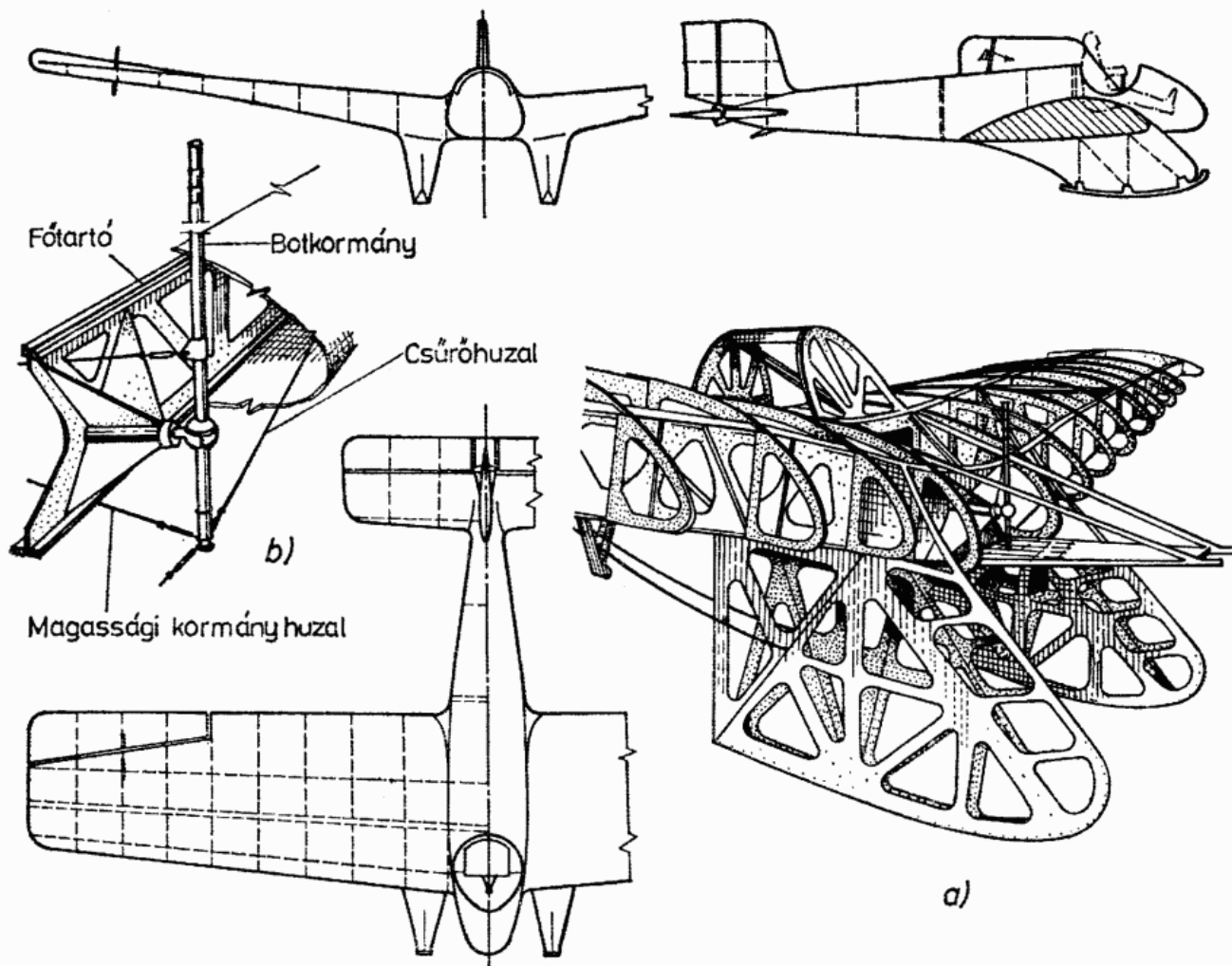
23. ábra. Néhány motor nélküli gép a huszas évek kezdetéről

a) Levasseur – Abrial (1922); b) Fokker-féle kétüléses (1921); c) Arceulov (1923); d) Schlegel und Eisen (1924); e) Krasznoj Presznja (1925); f) Peyret tandemszárnyúja (1923)

volt megoldva. A 70×70 cm keresztmetszetű törzs teljes borítása vászon. A kormányokat huzalokkal mozgatták. Csűrészhez a szárnyvégek rugalmas kilépőjét csavarták el. Futóműve két, egymás melletti csúszótálpból állt. A gép üres súlya 70 kp, így felületi terhelése 70 kp súlyú pilótával 8 kp/m^2 volt.

Még kisebb volt a holland A. Fokker 1922-es kétszárnyú gépének (ez volt az első kétüléses vitorlázógép) felületi terhelése: mindössze $4,6 \text{ kp/m}^2$ (23b ábra).

A kétszárnyú repülőgépeknél nélkülözhetetlennek tartott huzalos és dúcos merevítés tulajdonképpen felesleges ellenállást jelentett. Bár az egyszárnyúak súlya — a szilárdságot növelő merevítések elmaradása miatt — a kétszárnyúakénál szükségszerűen nagyobb valamivel, kisebb ellenállásuk a nagyobb felületi terhelés ellenére is kisebb merülősebességű gépek létrejöttéhez vezetett. Ezek közül leginkább említésre méltó az aacheni repüléstudományi egyesület *Schwarzer Teufel* nevű gépe (24. ábra), amellyel Klemperer 1920-ban $15 \dots 18 \text{ m/s}$ sebességű szélben első ízben emelkedett a kiindulási magasság fölé. Repülésének ideje $2' 15''$, és a megtett távolság 220 m volt. A gép tervezésekor — amelyet a később világhírűvé vált magyar származású tudós, Kármán Tódor is szorgalmazott — a kis felületi terhelésnél fontosabbnak tartották a jó siklószám elérését. A szárny szelvénye szokatlanul vastag volt: töben 42 cm, ami kb. a húrhosszúság 23%-ának felel meg. Súlya mai szemmel nézve rendkívül kicsiny volt, és ez elsősorban a szárny kialakításának volt köszönhető. Néhány súlyadat: a szárny teljes súlya 24 kp, ebből a bordák 3,74 kp; egy-egy csűrőfelület $0,87 \text{ kp}$;



24. ábra. Schwarzzer Teufel (1921)

a) a törzselőrész és a futómű váza; b) botkormánymegoldás

a kormánysszervek 0,33 kp; a vízszintes farokfelület 1,4 kp; a teljes farokrész 11 kp; a gép teljes üres súlya 62 kp, repülsúlya 137 kp, felületi terhelése pedig a pilóta súlyától függően 8,5...9 kp/m² volt.

A három főtartós szárnyat 90 p/m² súlyú, fekete színű vászonnal borították. Innen származik a gép neve.

Felszállás előtt a vitorlázó repülőgépeket a krími és a rhöni versenyeken egyaránt alapos műszaki vizsgálatnak vetették alá. Megvizsgálták szerkezeti kialakításukat, stabilitásukat, kormányozhatóságukat, és — bár erre akkoriban még semmiféle előírás nem létezett — szilárdságukat is. Repülni csak a megfelelőnek tartott gépeket engedte a műszaki ellenőrző bizottság. A siklórepülés és a lejtő menti vitorlázás azonban még nem igényelte a mai gépekkel szemben támasztott igények teljesülését, különösen ami az aerodinamikai kialakítást és a teljesítményeket illette. A megfelelő terepen és kellő erősségű szélben minden jól kiegyensúlyozott, kormányozható motor nélküli vagy motoros repülőgép alkalmas lehetett vitorlázórepülésre, tekintet nélkül aerodinamikai kialakítására és silószögére. Így pl. az angol Gray egy első világháborús Fokker D VII vadászgép szárnyaiból és egy Bristol gép törzéből összeépített, 225 kp súlyú, motor nélküli gépével 1 óra 4 percre maradt a levegőben, a francia Maneyrol pedig Peyret-tandem gépével (23. ábra) 1922. októberében 3 óra 21 perccel repült világrekordot az angliai Itford Hill lejtőin.

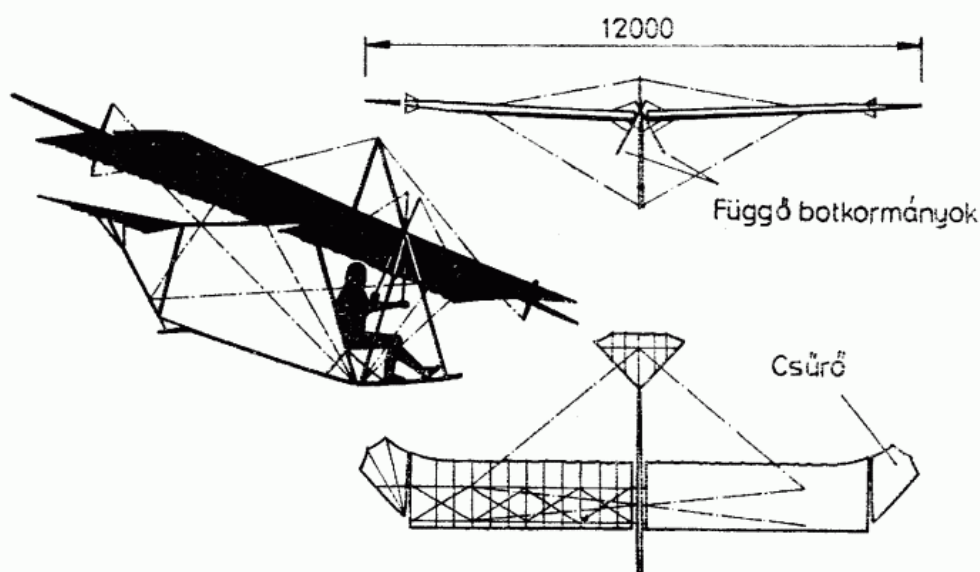
A 23. ábrán látható *Arceulov* régi motoros gépekre emlékeztető A—5-öse is, amellyel 1923—1925 között órákat vitorlázott lejtőszélben Krím hegyei között. Hasonlóan egyszerű és még inkább a motoros repülőgépekhez hasonlít *Levasseur* gépe (1922) és a *Krasznaja Presznja* (1925) is. Mindkettő a 23. ábrán látható [21].

1923. januárjában ismét egy francia, *H. Thoret* ért el kimagasló eredményt. Hanriot típusú motoros iskolarepülőgépének 80 LE-s motorját leállítva hét óra hosszat tartózkodott az algériai Biskra közelében a sivatagból meredeken kiemelkedő, mintegy 400 m magas lejtő felett [1].

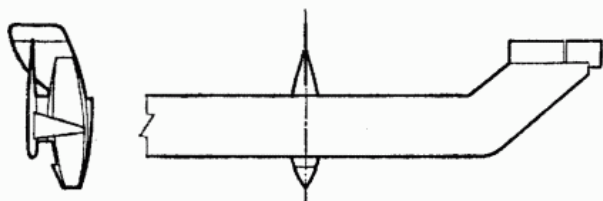
Rendkívül egyszerű szerkezetű volt *F. Schulz F. S. 3.* jelű gépe (25. ábra), amelyet a rhöni műszaki bizottság nem minősített repülésre alkalmasnak. Ennek ellenére *Schulz* a „seprűnyéllel” 8 óra 42 perces rekordot repült 1924 májusában a Keleti-tenger partján. A huzalokkal merevített szárnyú szerkezet csűrőfelületei érdekes módon nem a kilépőélnél foglaltak helyet, hanem a szárnyvégekhez tengelyekkel csatlakozó segédcsárnyakként voltak kialakítva. A gépen függőleges irányfelület vagy oldalkormány nem volt. A csűrőket és a magassági kormányt két, a szárnyról függő botkormány vezérelte.

A korabeli elképzelések szerinti dinamikus vitorlázórepülés megvalósításához, a szellőkések kihasználására csak igen kis tehetetlenségű szerkezet jöhetett szóba. A repülőgépvezetőnek nem állott rendelkezésére olyan műszer, amellyel a szellőkés közeledtét még a gép elérése előtt észlelhette volna. Így csupán érzékeire támaszkodva kellett a magassági kormány gyors kitérítésével a gépet nagyobb állásszögre állítania abban a pillanatban, amint a kormányfelületeken vagy a szárnyon a szellőkés jelentkezését tapasztalta. Természetesen így sem irányát, sem nagyságát nem ismerhette fel előre. A magassági kormány kitérítéséhez és az így előidézett hosszdőlés-, ill. állásszögváltozás bekövetkezéséhez bizonyos időre volt szükség, és ezalatt a szellőkés javarésze kihasználatlanul veszendőbe ment. A magassági kormány hatásosságát ezért kezdetben rövidebb törzs alkalmazásával próbálták megnövelni. A rövidebb törzs viszont nagyobb farokfelületeket kívánt meg, s ez az ellenállás növekedését jelentette. Más utat kellett tehát keresni.

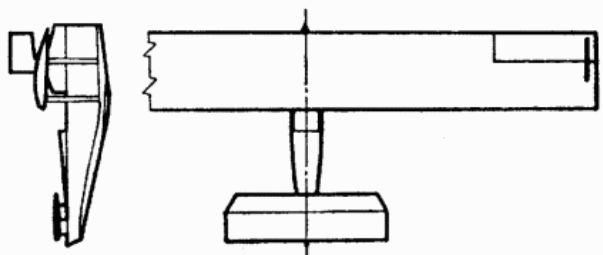
Új megoldást szemléltet a 26. ábrán látható *Charlotte*. Ezt a farok nélküli repülőgépet a szárnyak hátranyúló végei mögé felfüggesztett kormányfelületekkel lehetett



25. ábra. Az *F. S. 3.*



26. ábra. A farok nélküli *Charlotte*



27. ábra. Az *Ente* kacsagép

kellő érzékenyen kormányozni. Egy másik megoldás azt az elrendezést választotta, amelyet a hossz-stabilitás megoldására már a *Wright* testvérek is alkalmaztak. A 27. ábrán látható *Ente* farokfelületeinek kacsá-elrendezését a széllekedések idejében, a szárnyhoz való megérkezése előtt való észlelhetősége érdekében alakították ki. Így a repülőgépvezető a magassági kormányval kellő időben hajthatta végre a szükséges mozdulatokat, de ez többé-kevésbé önműködően is beállt a széllekedések hatására a legkedvezőbb helyzetbe.

A szárnykormányzásos rendszerű gépekkel is a dinamikus vitorlázás problémáját igyekeztek megoldani. A megoldást kétféleképpen közelítették meg.

A gépek egyik csoportja a kilépőél előtt teljes hosszában rugalmasan kialakított szárnyal készült. A szárnyprofilat tehát a magassági kormányval működtetett huzalokkal úgy el lehetett torzítani, hogy a széllekedés kihasználása érdekében íveltsége és állásszöge megnőtt. Csúréskor a kormányhuzalok a szárnyvégeket egymással ellentétes irányban csavarták el.

A gépek másik csoportjának szárnyai a törzshöz keresztirányú tengely körül elforgathatóan csatlakoztak. A két félszárnyat tehát a magassági kormányzáshoz megfelelő rudazatokkal együttesen, ill. csúréshez egymással ellentétes irányban lehetett elforgatni. Példaként *H. Muttray* és *R. Seifert* 1922-ben épült gépét szemléltetjük a 28. ábrán. A göttingeni *Gö 441* szelvényű szárny kétoldalt dúcokkal is ki volt merevítve a törzshöz. Az állásszög változtathatósága érdekében a dúcok szárnyhoz csatlakozó végei is csuklókkal voltak ellátva. A két félszárnyat a repülőgépvezető két külön botkormányval állítórudazat közvetítésével vezérelte. A forgástengely helyét a szárny súlyvonalának és az aerodinamikai tengely helyének figyelembevételével úgy határozták meg, hogy normál repülésben a botkormányokkal nem kellett erőt kifejteni.

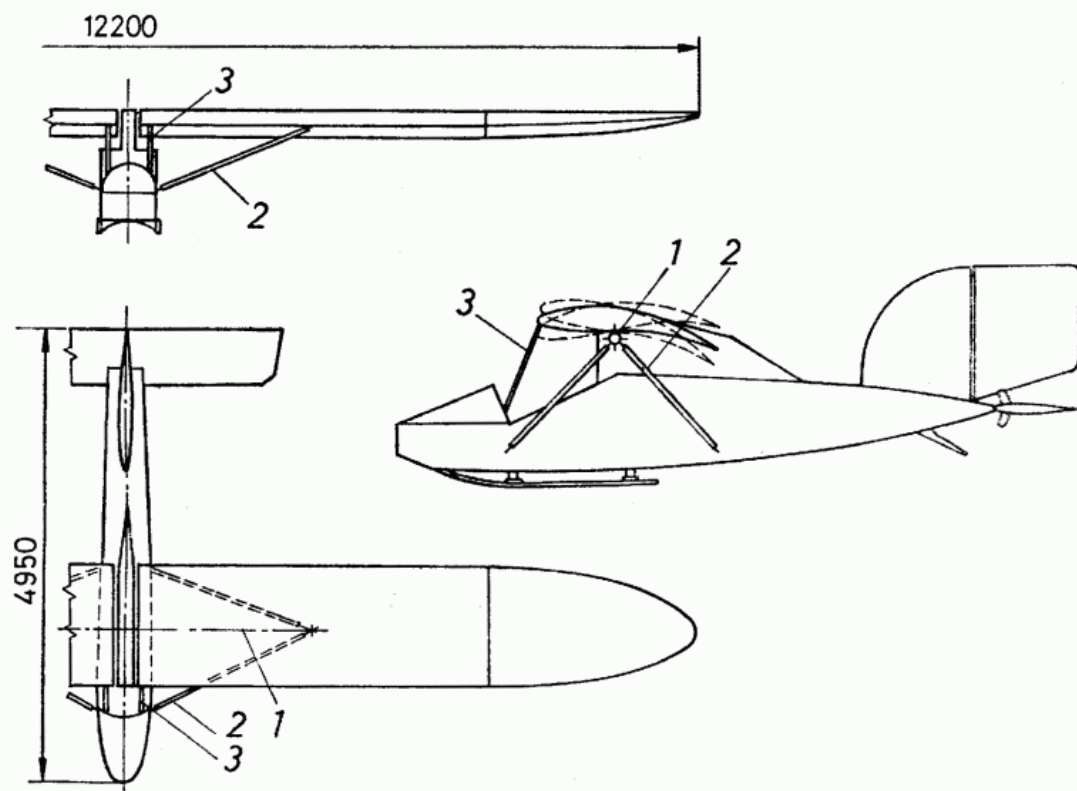
A súlykiegyenlítésű balansz magassági irányfelületet külön botkormányval vezérelték a vezetőülésből. A magassági kormány és a szárny vezérlését később rudazat segítségével úgy kötötték össze, hogy az állásszög megváltoztatásakor a magassági kormány önműködően ellenkező irányba állítódott el. Ezzel igen erőteljes kormányhatást értek el, de ezt a széllekedések kihasználhatósága érdekében kívánatosnak is tartották. A szárnyak alaphelyzetben való megtartására a túlkormányzás elkerülését is elősegítő rugókat és gumiköteleket alkalmaztak.

Szárnykormányzásos vitorlázó repülőgéppel még 1932-ben is találkozunk. A *Thermikus* megoldása eltérő volt elődjeitől. A kétfőtartós szárny csak a dúcok csatlakozási pontjaitól a szárnyvégek felé volt csavarásra merevvé kialakítva, de a dúcbekötések

és a törzs között meglehetősen rugalmas volt. A dúcok és a szárny csatlakozásánál keresztirányú forgástengely volt kialakítva. Így a csavarásra merev szerkezetű külső szárnyrészek e pont körül — a dúcok mögött a törzsből kinyúló rudazatok segítségével — csűrőkormányzás és együttes állásszögváltoztatás céljából elcsavarhatók voltak (29. ábra).

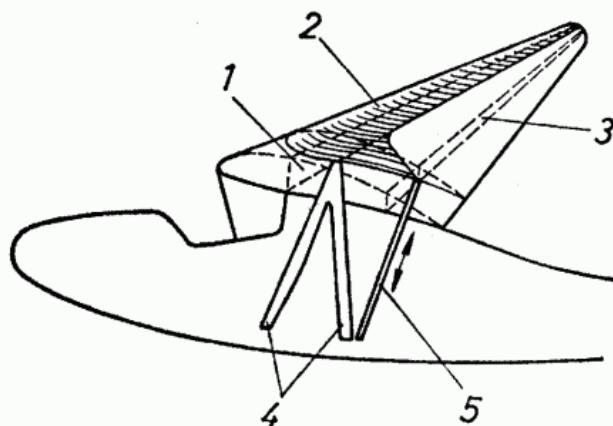
A szárnykormányzásos vitorlázó repülőgépekkel számos súlyos baleset történt. Ezért, és mivel a termikben való magasságyerés módjának elsajátítása a dinamikus repülés gondolatát csakhamar elhomályosította, a szárnykormányzásos gépek a harmincas években már teljesen eltűntek a vitorlázórepülésből.

E korai sikló-, ill. vitorlázó repülőgépeket — különösen, ha súlyuk csekély volt — általában igen egyszerűen indították. Ketten-hárman megragadták és széllel szemben a lejtőn lefelé futottak velük. A gép már néhány lépés után magától a levegőbe emelkedett a legkisebb szélben is.



28. ábra. H. Muttray és R. Seifert szárnykormányzásos gépe (1922)

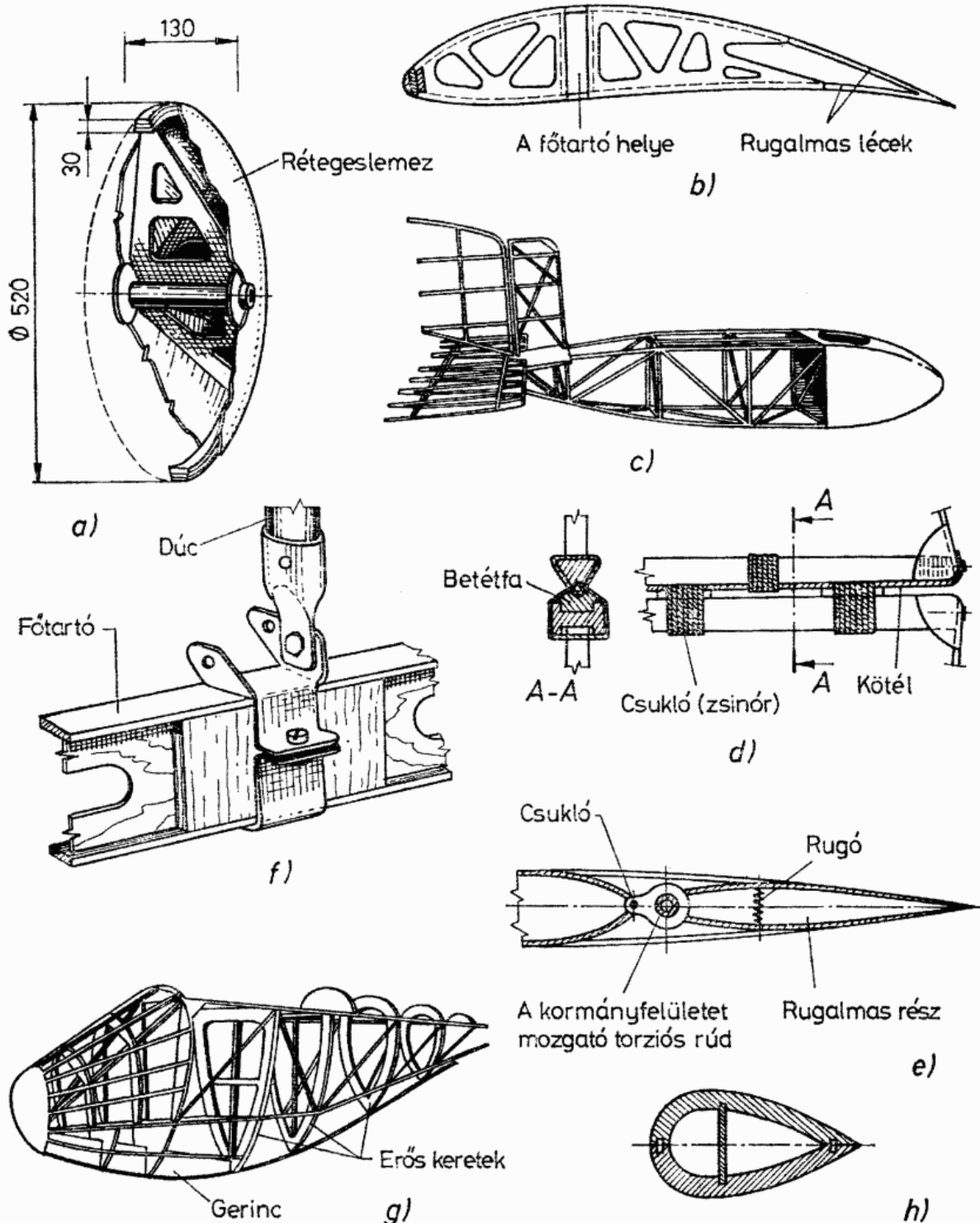
1 a szárny forgástengelye; 2 szárnydúc; 3 szárnymozgató rudazat



29. ábra. A Thermikus szárnykormányzás-megoldása

1 főtartó; 2 csavarómerev orr; 3 hátsó főtartó; 4 szárnydúc; 5 kormányzórudazat

Az igen könnyű szárnykormányzású gépekkel segítség nélkül is a levegőbe lehetett emelkedni. Ezeket egyszerűen szembeállították a széllel és a szárnyakkal egyensúlyozva erősebb szellőkésre vártak. Ennek megérkeztekor kis húzás a magassági kormányon az állásszög növelése érdekében, és máris a levegőben volt, majd a kormányt rögtön előretolva, vagyis a szárnyat kis állásszögre állítva engedelmesen siklóhelyzetet vett fel és a gép megkezdte repülését.



30. ábra. Szerkezeti részletek 1920—24-ből

a) kerékmegoldás; b) szárnyborda; c) vászonbevonatú törzs váza; d) a Schlegel und Eisen csűrőcsuklója; e) kormányzáshoz rugalmasan kialakított szárnyborda; f) szárnydúc bekötésének megoldása; g) a Schlegel und Eisen törzsváza (borítása rétegeslemez volt); h) áramvonalazott rúd metszete

A súlyosabb motor nélküli repülőgépeket a hegyvidéki repülőtereken néhol még ma is használatos, gumiköteles indítással juttatták a levegőbe.

Nem haladhatunk tovább a vitorlázó repülőgépek történetében anélkül, hogy egy pillantást ne vetnénk szerkezeti megoldásaikra. A húszas évek elején, amikor még elsősorban a repülőképeség volt az elérendő cél, igen egyszerű megoldásokat alkalmaztak. A 30. ábrán *Gymnich* korabeli, a sikló- és a vitorlázó repülőgépek építésével foglalkozó könyve [6] alapján ismertettünk néhány jellemző részletet. Az építési anyag szinte kizárólag *fa* és *vászon* volt, bár elvétve találkozunk vékonyfalú acélcsövekből összeállított egyszerű törzsekkel is. A törzs rendszerint négy- vagy hatszög keresztmetszetű volt, vezetőülése pedig mindenféle — a mai korszerű vitorlázó repülőgépeken már megszokott — kényelmet nélkülözött. A részletek aerodinamikai kidolgozására általában még nem fordítottak nagy gondot. Ezt bizonyítja pl. a 23. ábrán látható *Schlegel und Eisen* nevű 1924-ből származó gép csűrőjének igen nagy része is. Az egyszerűség mellett azonban egyes gépek szerkezetében már olyan megoldások ösgondolatával is találkoztunk, amelyek majd csak később, a fejlődés megfelelő fokán válthatják be maradéktalanul a hozzájuk fűzött reményeket. Ilyen pl. a 30. ábrán látható, rugalmas kilépőélű szárny szerkezete, amivel az 50-es években a HKS gépen találkozunk ismét.

A futómű rendszerint egy vagy két csúszótalp volt a törzs közepe alatt, de előfordult a teljesen fából készült futókerék is (30a ábra). Szebb megoldás látható a 24a ábrán, ahol a *Schwarzer Teufel* áramvonalazott kettős csúszótalpból álló futóművét a törzselőrszék szerkezetével együtt borítás nélkül láthatjuk.

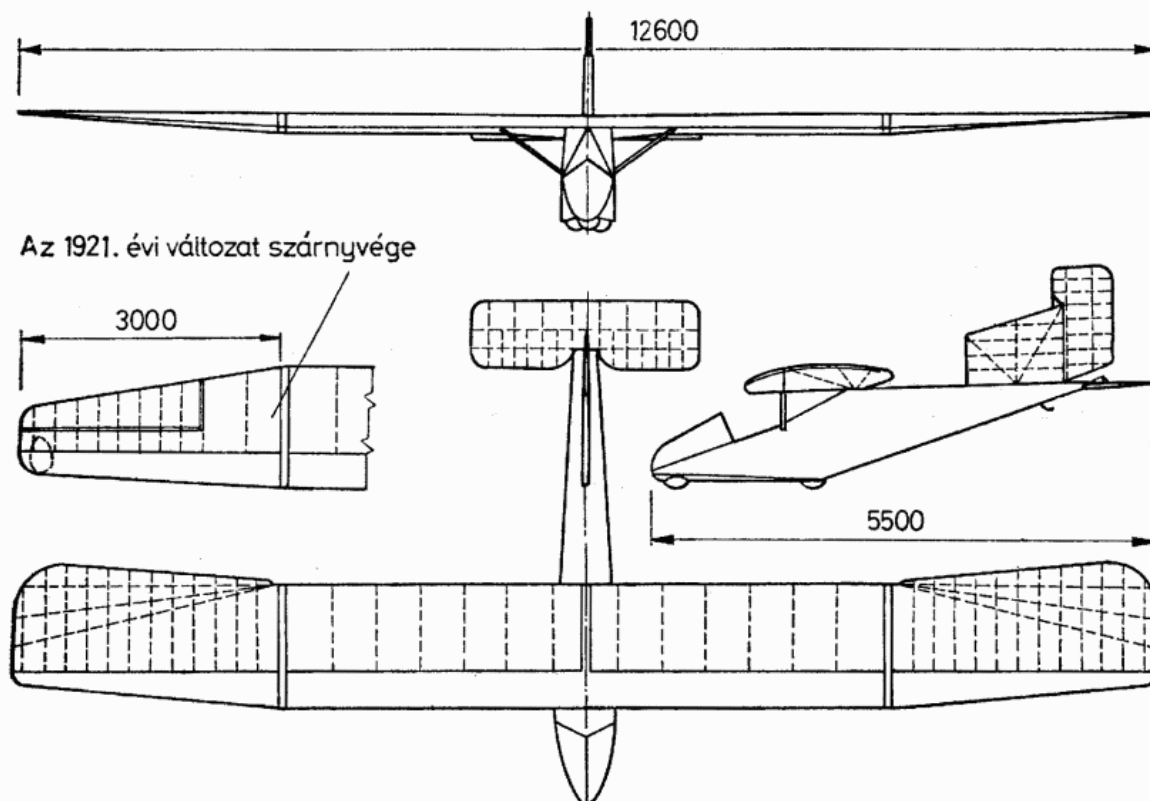
1.2.1. Mai vitorlázó repülőgépeink ősei

Ennyi, főként történeti jelentőségű érdekesség után térjünk vissza az 1921-es évhez. Ebben az időben, mint láttuk, elsőrendű célnak a *minél kisebb merülősebesség* elérését tekintették, és ezt kétféleképpen igyekeztek elérni:

- a felületi terhelés csökkentésével;
- az ellenállás csökkentésével.

E két lehetőség a későbbiekben két irányzat kialakulásához vezetett. A *felületi terhelés csökkentésére* irányuló törekvéssel már a kétszárnyú motor nélküli gépekkel kapcsolatosan találkoztunk. Az *ellenállás csökkentését* pedig ebben az időben a legkézenfekvőbb módon, elsősorban a szárny oldalviszonyának növelésével igyekeztek elérni. Ezzel ugyanis a kis sebességek mellett az összellenállás jelentős részét képező indukált ellenállás csökkenthető. Az oldalviszony növelése azonban a fesztávolság növekedését vonta maga után különösen akkor, ha még a kis felületi terhelést is elérendő célként tűzték ki a tervezők.

Sokan a *Vampyr*t tekintik a korszerű vitorlázó repülőgépek prototípusának, mert rajta ezeknek szinte valamennyi jellegzetessége felfedezhető. A gép kialakításának koncepcióját *G. Madelung* dolgozta ki, amelyet azután *Blume*, *Martens* és *Hentzen* valósított meg (31. ábra). Szárnyának oldalviszonya ma már nem tekinthető nagynak, abban az időben mégis a legkedvezőbbek közé tartozott. A *Göttingen 441* jelű szelvény a szárny középrészén 25 cm magas, így egyetlen főtartó alkalmazását tette lehetővé. Ez a rétegeslemez-borítással csavarásra merevvé tett orr-résszel együtt most első ízben alkalmazott szerkezet ezután — legalábbis a teljesítmény-vitorlázógépek



31. ábra. *Vampyr* (1921)

között — szinte kizárólagosan terjedt el, és a motoros repülőgépek szerkezetéhez is a vitorlázó repülőgépektől kölcsönözték. A szárny aerodinamikai tengelyében húzódó főtartó fenyőfaövekkel és rétegeslemez-gerinccel készült, vagyis olyan megoldással, amelyet mai, fából épült vitorlázógépeinken is általánosan alkalmaznak. A szárny és a törzs három ponton volt összekötve úgy, hogy a csapszegek kihúzása után egymáshoz képest hosszirányban eltolhatók voltak, ezzel a súlyponthelyzet kisebb hibáit korrigálni lehetett. A szárny legelső változata trapéz alakú külső részekkel és csűrőlapokkal felszerelve készült. Ezt 1922-ben állandó mélységűre cserélték ki, amelyen nem volt külön csűrőkormány, hanem a rugalmas szárnyvég torziós rúd és tolorudak segítségével való elcsavarása helyettesítette. A csűrő és a szárny közötti rés így elmaradt, hozzájárulva a felhajtóerő növeléséhez és az ellenállás csökkentéséhez.

A *Vampyr* sík lapokkal határolt törzse az egyszerűnek látszó külalak ellenére jól átgondolt volt. Alja a vezető ülése mögött magasra fel volt húzva, hogy leszálláskor a gép nagy állásszöggel legyen kilebegtethető. Orr-része a jó kilátás érdekében csapott volt, és kezdetben ívelve, majd a pilóta fejét szabadon hagyó bőr borítólemezen keresztül élben futott a mellső szárnybekötésig. Súlya mindössze 25 kp volt. Az oldal-kormányt és a vezérsík nélküli balansz magassági kormányt az általánossá vált bot-kormányból és lábpedálból álló kezelőszervekkel vezérelték. A futómű három futball-szerű labdából állott, és kezdetben még egy-egy a szárnyvéget is védte a talajjal való érintkezéskor. A *Vampyr* legkisebb siklási sebessége $v_{\min} = 39$ km/h, merülősebsége $w_{\min} = 0,7$ m/s, siklószáma $\varepsilon_{\text{opt}} = 22$ volt. Sebességi polárgörbét, amelyet később a göttingeni szélcsatornában mértek be, az 51. ábrán láthatjuk.

A vitorlázórepülők csakhamar függetlenítették magukat a már jól ismert hegy-oldalaktól, és — kezdetben lejtőről-lejtőre repülve, majd a felhők emelését és a vihar-frontokat kihasználva — az elérhető távolság növelésére törekedtek. Ezért a kis

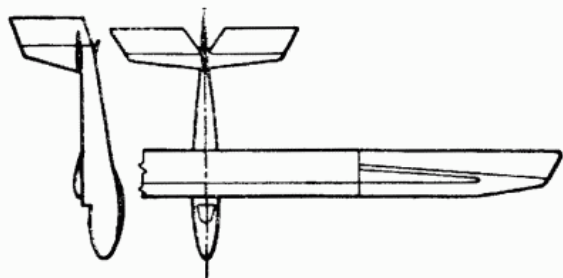
merülősebességre való törekvés (hogy minél tovább maradhassanak a levegőben) és a siklószám növelésének követelménye (hogy az elért magasságból minél nagyobb távolságra jussanak) parancsolóan írta elő a fejlődés irányát: a nagy oldalviszonyú szárnyak alkalmazását, amivel szükségszerűen velejárt a nagy fesztávolság is.

Az 1923-ban épült *Konsul* (32. ábra) oldalviszonya 18 volt, és mivel felületi terhelését a kis merülősebesség elérése érdekében kis értéken ($9,1 \text{ kp/m}^2$) akarták tartani, fesztávolsága 18,7 m-re adódott. Az addig szokatlanul nagyméretű szárny kormányzási problémákat okozhatott, mert a csűrő- és az oldalkormány között igen érdekes kapcsolatot alakítottak ki. Amikor ugyanis az oldalkormány egyik irányba sem volt kitérítve, a csűrő a szokásos módon működött. Ha azonban a két kormányt egyidejűleg térítették ki, a közöttük levő kapcsolat miatt az oldalkormány kitérésének irányába eső csűrőfelület kimozdulása nagyobbá, a másik oldalon pedig kisebbé vált ahhoz viszonyítva, amikor a botkormányt ugyanolyan mértékben, de az oldalkormányt alaphelyzetben tartva térítették ki. A csűrőkitérés differenciálásának ezt a módszerét később még más gépeken is alkalmazták a kormányzás megkönnyítésére.

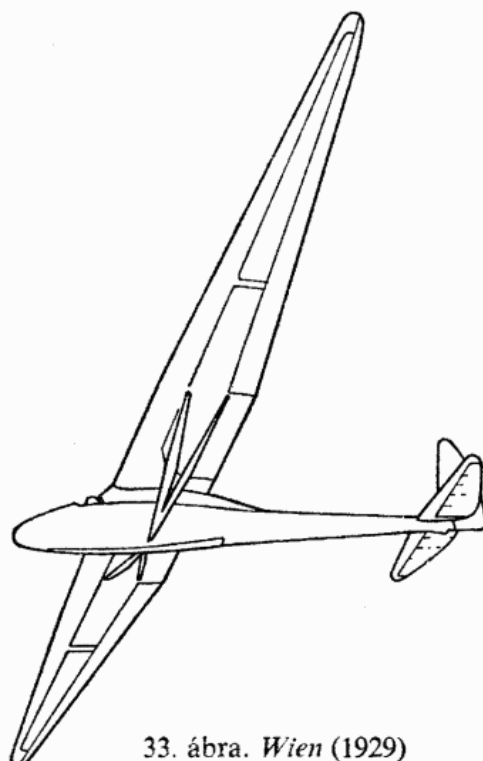
Az új irányzat képviselői közül még a *Professort* (1926) és a *Wient* (1929) kell megemlítenünk. Mindkettő *A. Lippisch* tervezése.

A *Wien* méreteiben a *Konsult* is meghaladta. Fesztávolsága 19,1 m, oldalviszonya pedig 20 volt. Az osztrák *R. Kronfeld* ezzel a géppel számos 100 km feletti távolságot repült; első ízben lejtőszélben, majd ezt viharfrontok emelőterét kihasználva újabb és újabb 100 km feletti repülések követték. E géppel került sor a La Manche csatorna átrepülésére is 1931 júliusában.

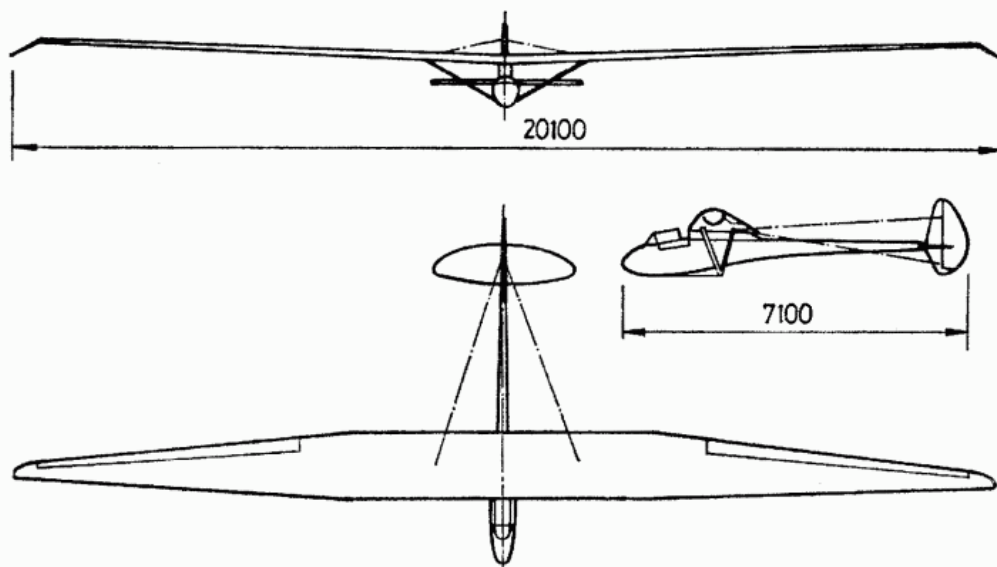
A *Wien* elrendezése a 33. ábrán látható. A középrészén téglalap alaprajzú szárny végei felé elkeskenyedő trapézra alakult át, és V alakú, áramvonalas keresztmetszetű dúcokkal támasztották alá. A törzs keresztmetszete csaknem pontosan kör alakú és igen kicsiny volt, a vezetőülést ugyanis a kis növesű *Kronfeld* testére méretezték. Csupán a vezető feje emelkedett ki belőle, belesimulva a törzs fölé emelkedő áramvonalazott



32. ábra. *Konsul* (1923)



33. ábra. *Wien* (1929)



34. ábra. O. K. Antonov OKA—13 jelű gépe 1932-ből

szárnytartó szerkezetbe. A szárny és a törzs közötti átmenet ilyen kialakítása hozzájárult ahhoz, hogy a *Wien* ellenállása viszonylag kicsi volt. A gép eredményességét szárnyszelvényének jó megválasztása is lehetővé tette: *Lippisch* e gépéhez a *Gö 549* jelű szelvényt alkalmazta kissé módosítva. Azt a szelvényt tehát, amely azóta számos repülőgéptípuson bizonyította be kitűnő tulajdonságait (Magyarországon többek között a *Vöcsök*, a *Futár*, a *Koma* és a *Góbé* készült ezzel a szelvénnel.)

O. K. Antonov 1923-ban kezdte meg repülőgéptervezői munkásságát. OKA jelű vitorlázógépei csakhamar ismertekké váltak. Ezek közül OKA—13 jelű gépét 1932-ben építette meg, és lényegében a *Wien* által is képviselt irányzathoz tartozott: fesztávolsága 20,1 m, és oldalviszonya 20,1 volt (34. ábra). Felületi terhelése — akár a *Wiené* — 13,8 kp/m². Szárnyszelvénye *Gö 549*.

Antonov az ellenállás csökkentésében sokkal tovább ment az eddig felsorolt megoldásoknál. A gép tervezésekor vezető szempontként a káros ellenállást növelő részek sűrűlő felületének — így elsősorban a törzs felszínének — csökkentését tekintette. A vezetőülés környékén még ellipszis keresztmetszetű törzs a szárnybekötéstől hátrafelé kis átmérőjű, rétegeslemez borítású csővé vákonyodik. Középvonala a törzsor felé lefelé hajlik, hogy az áramlás irányát jobban követve ellenállása — legalábbis a legjobb siklószámhoz tartozó sebességgel — a lehető legkisebbé váljék. Olyan törzsalak ez, amelyet több mint harminc évvel később, a legújabb, műanyagból készült vitorlázógépeknél látunk viszont. Antonov e törzsalakhoz mindvégig hí maradt. Az egyetlen A—15 típus kivételével (1960) valamennyi vitorlázó repülőgépén felismerhető a kis ellenállásra való törekvésnek ez az útja. Sajnos e kialakítás hatását lerontotta, hogy a korabeli technológiai hiányosságok miatt nem kellő csavarószilárdságú törzset ki kellett merevíteni két-két huzallal a szárnyhoz. Ez azonban semmiben sem csökkenti az aerodinamikailag úttörő kialakítás kiválóságát.

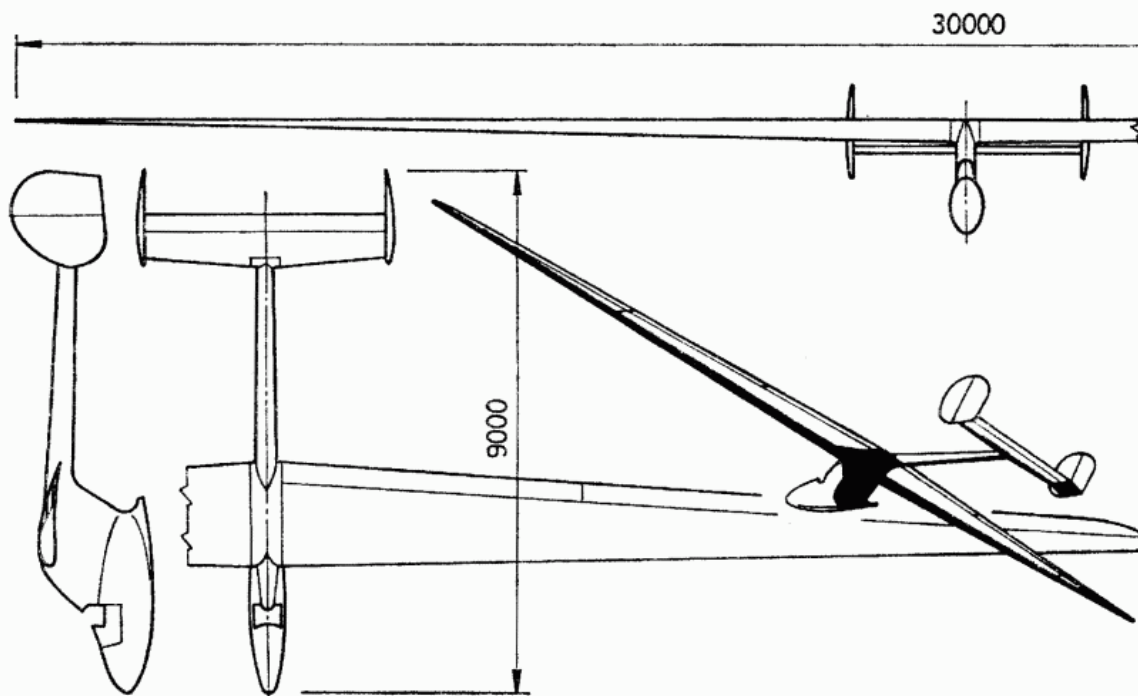
Az A. Kupper által 1930—32-ben tervezett Ku—4 *Austria* nevéhez nem fűződik semmiféle kiváló repülőteljesítmény. Kettős oka van, hogy itt mégis megemlítjük. Az egyik, hogy a kis felületi terhelésű és nagy oldalviszonyú, nagy fesztávolságú gépek irányzatát 30 m fesztávolságával és 25,7 oldalviszonyával a legszélsőségesebben képviseli, és a mai napig a legnagyobb megépült vitorlázó repülőgép. A 30 m-es fesztávolságtól a tervező különösen jó siklószámot és kicsiny merülősebességet remélt,

de anélkül, hogy akár fordulási tulajdonságaira, akár pedig szállíthatóságára gondot fordított volna. $13,8 \text{ kp/m}^2$ felületi terhelésével pontosan illeszkedett a kor követelményeihez. A gép igen keveset repült, ezért repülőteljesítményeit nem sikerült kitalasztalni, és csakhamar tönkrement. 1932. július 22-én *Kronfeld* repülőgépvontatás után egy felhőbe emelkedett be vele. Rövidesen tompa dörrenést hallott: mindkét külső szárny letört. Korabeli tudósítás szerint: „... a gép előrebukfencbe kezdett. Pilótája a bukfenc mélypontján, vagyis háton helyzetben ejtőernyővel ugrott ki, mire a gép még egy bukfencet vetett, majd a földre csapódva darabokra törött.”

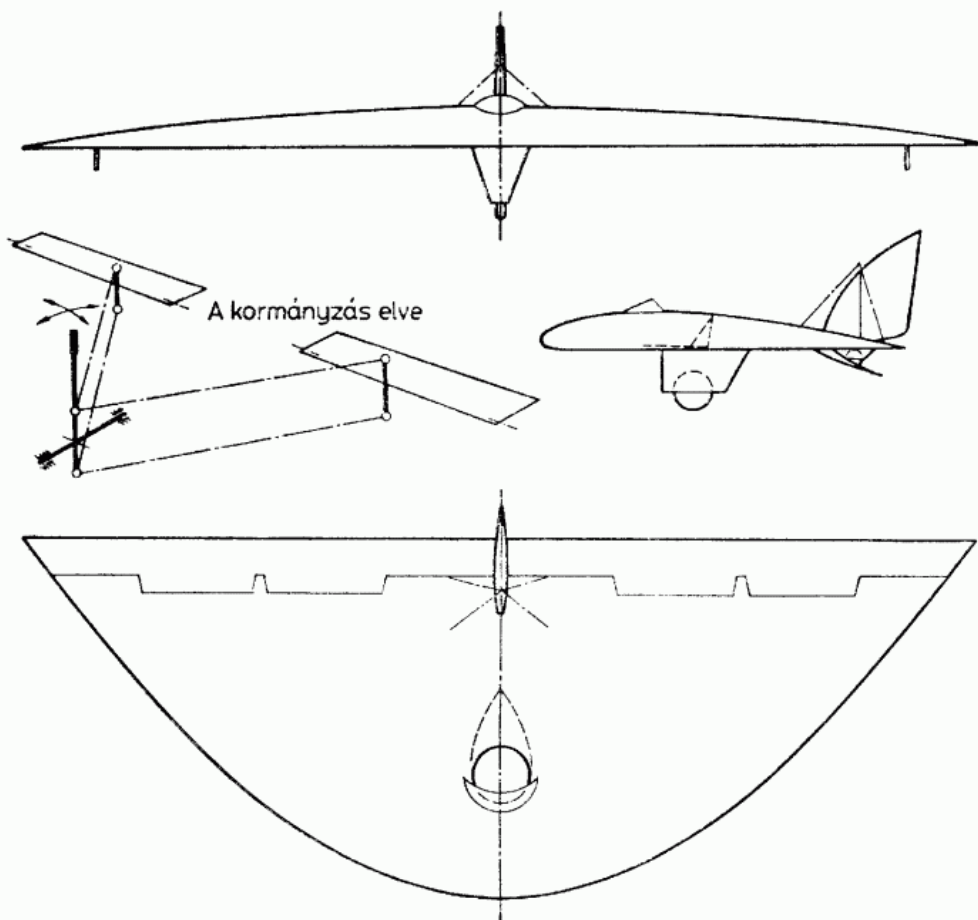
Az *Austria* e helyen való megemlékezésének oka konstrukciós érdekessége is. Elrendezési rajza a 35. ábrán látható. A hatalmas szárny négy részre volt osztható. Kilépőéle teljes hosszúságában hat részből álló csűrőfelület húzódott. Ezek a magassági kormányval is össze voltak kötve, és tetszés szerint állíthatók voltak. Együttes állításukkal a szárny felhajtóerő- és ellenállásviszonyait megváltoztató ívelőlapokként voltak használhatók. Ezt a megoldást a vitorlázó repülőgépek történetében az *Austrián* alkalmazták először. Működtetni a botkormány mellett elhelyezett külön karral lehetett. A botkormányon egyébként a csűrők működtetésére kormánykerék volt felszerelve.

Jellegzetes volt az *Austria* törzsének alakja is, amelyet a szárnybekötések mögött a kis ellenállás érdekében kör keresztmetszetű csőtartóvá keskenyítettek el. A repülőgépvezető a mindössze 55 cm széles csónakban foglalt helyet. A törzs és a szárny közötti átmenetet a *Wienéhez* hasonlóan alakították ki. A függőleges farokfelületeket megosztva a vízszintes felület két végén helyezték el.

A fesztávolságnak és az oldalviszony növelésének az *Austria* gépben kicsúcsosodó irányzata szinte teljesen figyelmen kívül hagyta a repülési tulajdonságok jószágának fontosságát, pedig a könnyen vezethető repülőgép igénye egyre inkább előtérbe került. A repülőgépvezetőnek ugyanis felhő- és távrepülés közben igen sok feladata



35. ábra. A 30 m fesztávolságú *Ku—4 Austria* volt eddig a legnagyobb megépült vitorlázó repülőgép (1930—1932)



36. ábra. Az első csupaszárny repülőgép *B. I. Cseranovszkij Parabolája* volt (1925)

van. Ha tehát a repülőgép vezetése nehéz, figyelmét túlságosan meg kell osztania, és ez igen fárasztó lehet. A vitorlázó repülőgépek legnagyobb része ebben az időben vezérsík nélküli, balansz magassági kormányval volt felszerelve. Így a gépek hiányos keresztstabilitása, a túlhúzott kis sebességű helyzetekben gyakran tapasztalható rosszindulatú tulajdonságok és a magassági kormány túlzott érzékenysége rendkívül figyelmes gépvezetést igényelt. Ezek olyan nehézségek, amelyek a repülési eredmények további fejlődésének útját állták. A vitorlázó repülőgépek repülési tulajdonságainak felülvizsgálata az egyre inkább terjedő termikrepülés miatt is szükségszerűvé vált, de ugyanakkor a teljesítményekkel kapcsolatos igényeket is újra kellett fogalmazni. Mielőtt azonban ezt az utat tovább vizsgálnánk, pillantsunk vissza még egyszer az 1924–25-ös évekre.

Az ellenállás csökkentésének az eddig leírtakon kívül más lehetőségei is vannak. A repülőgép ellenállást keltő részei közül egyedül a szárny nélkülözhetetlen, a törzs és a farokfelületek — bár a hagyományos kialakításban szerepük nélkülözhetetlen — a felhajtóerő termelésében nem vesznek részt, rajtuk csak káros légellenállás keletkezik. Ha azonban a törzset és a farokfelületeket elhagyjuk, és a repülőgépvezetőt a szárnyban helyezük el, az ellenállás tovább csökkenthető, és egyúttal a szerkezet is egyszerűsödik, olcsóbbá válik. 1924–25-ben a krími versenyek egyik szenzációja *B. I. Cseranovszkij Parabola* elnevezésű gépe (*A. Lippisch* [11] szerint a világon az első megépült csupaszárny repülőgép) volt. A név egyúttal a szárny alakját is jellemezte. Ez az alak tette lehetővé, hogy a repülőgépvezető a mintegy 40 cm magasságú szárnyközéprészen levő ülésében szinte alig volt kitéve a légáramlásnak. A gépnek

nem volt különleges szárnyszelvénye, hossz-stabilitása mégis kielégítő volt. Ugyanez valószínűleg nem volt elmondható oldal- és iránystabilitásáról, mert ebben az időben a csupaszárny gépek e tulajdonságait még nem ismerték kellőképpen.

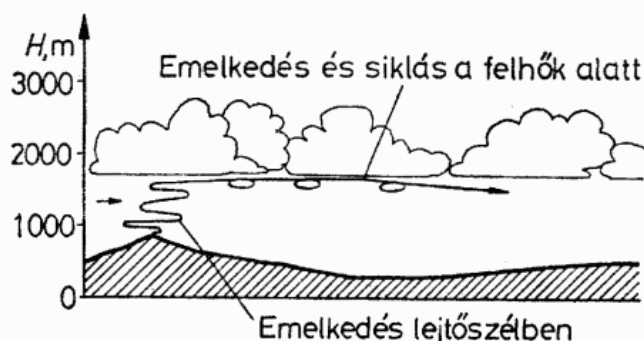
Az érdekes gép kormányzásának elvét az általános elrendezés mellett a 36. ábrán látjuk. A szokványos oldalkormányon kívül a jobb, ill. a bal szárnyon csak egy-egy kormányfelület látható, amelyet egyaránt használt a gép vezetője csűrőként és magassági kormányként. Az alig 10 m fesztávolságú gép szárnyfelülete 20 m^2 volt. Ez olyan könnyű szerkezeti megoldást tett lehetővé, amellyel az egész gép üres súlya az 50 kp-ot nem haladta meg.

A *Parabolával* kapcsolatban meg kell említenünk még valamit. Nevezetesen azt, hogy *Sz. P. Koroljov*, a Vosztok űrhajók indítórakétájának későbbi konstruktöre ezzel a vitorlázó repülőgéppel próbálta ki 1929-ben első rakétáját. *Koroljov* ebben az időben maga is vitorlázórepülő és vitorlázórepülőgép-tervező volt. Egyik érdekes, *Koktyebel* elnevezésű gépével később még találkozunk.

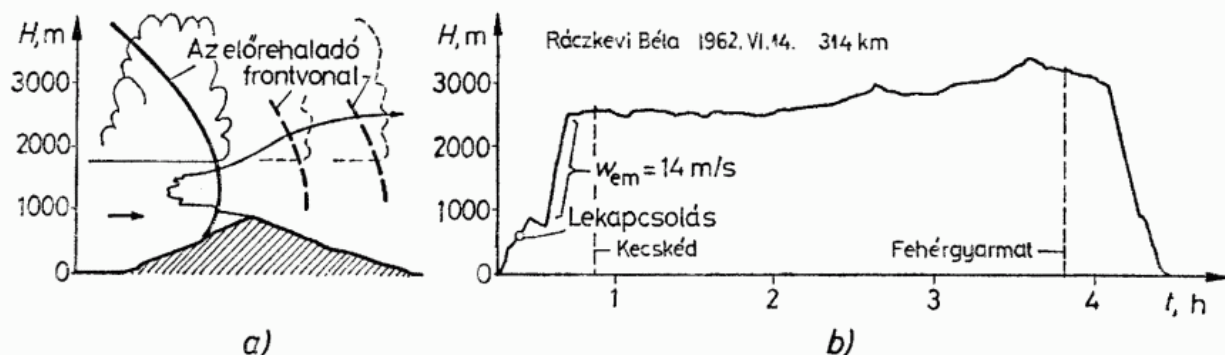
1.2.2. A termikus távrepülés új igényeket támaszt

Az 1920-as években a távrepülés sikere rendszerint szerencse dolga volt. *Kronfeld* még egy 1930-ban tartott előadásán is a lejtőszélben végrehajtott távrepülésről beszél: „... de mivel a lejtő mentén végzett távrepülés adott kiindulási helyről csak egyetlen irányban lehetséges, ezt félhátszélirányban választottam meg. A talajhoz viszonyított sebességem ezáltal nagyobb volt, így a völgyeken és a merülőáramlatokon gyorsabban jutottam át ... A lejtők mellett végzett távrepülés közben igen fontos a termik jelenléte is. Segítségével a déli és a kora délutáni órákban gyakran sikerül az egymástól távolabb álló hegyek közötti távolságot is áthidalni magasságvesztés nélkül. Ilyenkor az ember úgy érzi, mintha a lejtők közötti völgy termikkel lenne telezsúfolva” [7] (37. ábra).

A távrepülés másik lehetőségének a hidegfrontok előtti repülést említi *Kronfeld*, amikor „... a repülőgép a zivatarfelhő előtt nyolcasozva sodortatja magát a szél irányában tovább. A felhőben való vakrepülés műszerek nélkül a vitorlázórepülés legnehezebb feladatai közé tartozik. ... A zivatarfelhő előtt repülve a legfontosabb feladat a magasságyerés. A megtehető távolság attól függ, milyen sebességgel és mekkora távolságot tesz meg a front. Magasságunkat eközben a felhő megközelítésével vagy attól való eltávolodással szabályozhatjuk.” (A 38. ábra a viharfront előtti repülés elvét szemlélteti egy tipikus, 1962-ből származó barogrammal együtt.)



37. ábra. Elszakadás a lejtőtől. Az első távrepüléseket a felhők emelőáramlatainak kihasználásával végezték



38. ábra. a) Repülés hidegfront előtt; b) Egy jellegzetes barogram

Kronfeld ezután még kijelenti: „Bizonyos, hogy a jövő távrepülése a *meteorológiai vitorlázórepüléssel* folyik majd, amely kezdetét már előrejelzi.” Ez a kijelentés a termikus távrepülések lehetőségére utal, amely azóta a vitorlázórepülésnek szinte kizárólagos területévé vált.

A kis kiterjedésű termikus emelőáramlatokban azonban teljesen új repülési technikát kell alkalmazni. A vitorlázó repülőgépnek minél kisebb átmérőjű körön kell tudnia folyamatosan „spiráloznia”, mert így tud a termik emelkedési sebességéből többet hasznosítani. Ekkor nemcsak arra van szükség, hogy körözésben is kielégítő stabilitást mutasson és a turbulenciából származó széllekedéseket lehetőleg kormánymozdulatok nélkül, önmagától is ellensúlyozza, hanem emellett egyszerűen és a kormányon kifejtendő minél kisebb erővel legyen vezethető. A gépet könnyen és gyorsan lehessen fordulóba vinni a termik „megfogásakor”, körözés közben a termik emelkedési sebességének változásait érzékenyen lehessen követni a kör szűkítésével vagy tágításával, és ha ez szükséges, a körözés irányát a lehető leggyorsabban lehessen megváltoztatni. Ezeket a követelményeket röviden a *jó repülőtulajdonságok* fogalomban lehet összefoglalni. A vitorlázó repülőgépek ilyen tulajdonságaival a könyv további részeiben még igen részletesen foglalkozunk. Nézzük azonban, mit kíván a termikus távrepülés a vitorlázógép teljesítményeit illetően?

Kezdetben elegendőnek tartották, ha a minél kisebb minimális merülősebesség a lehető legjobb siklószámmal párosult. Mivel kezdetben a távrepüléseket hátszélben és meghatározott végcél nélkül végezték, az optimális sebesség nagyságára még nem fordítottak különösebb figyelmet. Az új követelmények az előző korszak vitorlázó repülőgépeitől némiképpen eltérő konstrukciókat hoztak létre. Az óriási fesztávolság általában tarthatatlanná vált, és a jó oldalviszony követelményét a most már csak 16...18 m fesztávolságú szárny felületének csökkentésével érték el. Így valamelyest nőtt a felületi terhelés is. Az oldalviszony korlátozott volta miatt pedig újabb eszközkhöz kellett nyúlni az ellenállás csökkentése érdekében. Minden felesleges ellenállást csökkenteni kellett, főként a törzs ellenállását. Ennek külső jelei: a vezetőülés teljes beburkolása, a törzs alakjának olyan kialakítása, hogy a szárny által eltérített áramlásba jól beilleszkedjék és a szárny—törzs átmenet egyre átgondoltabb megoldása az interferenciaellenállás csökkentésére. Mindemellett egyre inkább kezdtek áttérni az erősen ívelt szárnyszelvényekről a kisebb íveltségű, jó felhajtóerő/ellenállás viszonyú szelvényekre (pl. a korábban elterjedt *Zyukovszkij* és *Gö 535* szelvényekről a nemrég „divatba jött” *Gö 549*-re stb.).

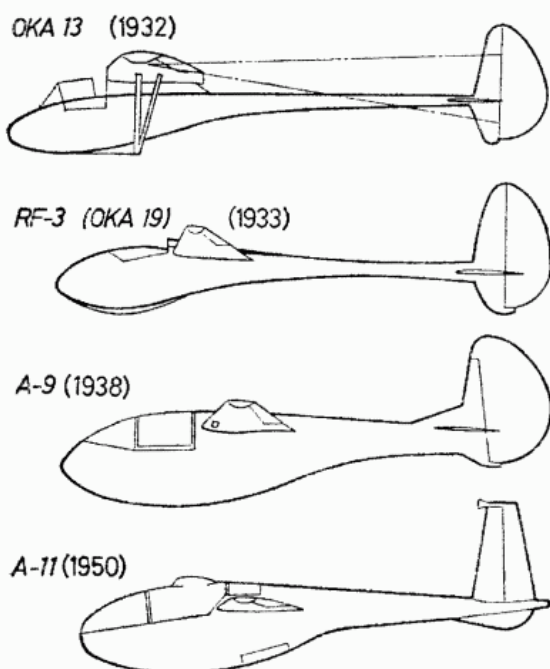
A repülőtulajdonságok javításával kapcsolatban a balansz magassági kormány helyett egyre jobban tért hódított a kevésbé érzékeny, vezérsíkra és kormánylapra osztott megoldás, a csűrők pedig igen nagy felületűek voltak. Nem egyszer a fél fesztávolságon végighúzódtak, mélységük pedig a húr hossz 25...35%-át is elérte.

Lassan megjelentek a vitorlázórepülésben a látás melletti repülés, sőt csakhamar a vakrepülés alaplászerei is.

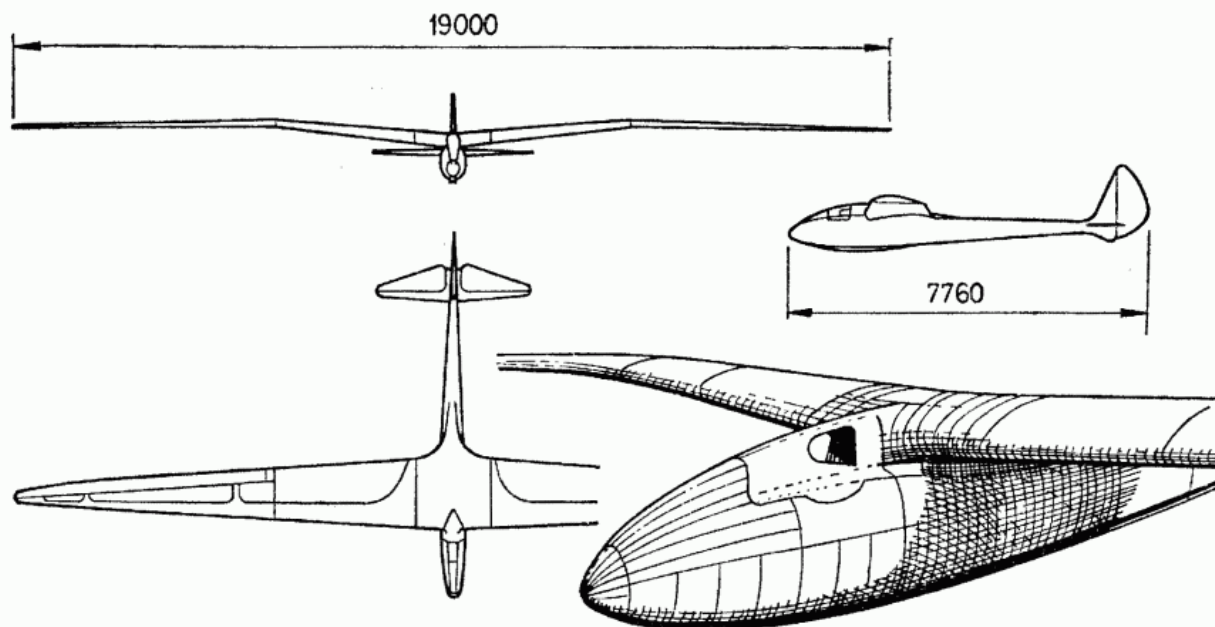
A termikrepüléssel természetsszerűleg kapcsolódó felhőrepülés és az 1930-as évek elején lassanként elterjedő repülőgépvontatásos indítás követelményei (1933-ban történt, hogy *Jugyin* Orenburgból kiindulva Moszkván át a Krímig, csupán néhány közbelső leszállással 3550 km-es távvontatást hajtott végre) a vitorlázó repülőgépek szilárdságának kérdését is napirendre tűzték. Megszülettek az első építési előírások, amelyek a fokozott követelményeknek is megfelelő gépek építését lehetővé tették.

E korszakba az átmenet fokozatos volt. Tulajdonképpen már *O. K. Antonov OKA*, majd a *Rot Front* szavak rövidítéséből származó *RF*, végül *A* jelű gépei is ez újabb irányvonalat követték, ill. annak kibontakozásához fokozatosan idomultak, az utat közben nem egyszer előre jelezve. E sorozatból való néhány gépének oldalnézeti sziluettjét a 39. ábrán láthatjuk.

A. Lippisch új gépe a *Fafnir* (amelyet eredetileg a viharfrontokban való repülésre szántak) 1930—1934. között két változatban jelent meg, és szép példája az áramlástani kialakítás tökéletességére való törekvésnek (40. ábra). Mindkét változat 19 m fesztávolságú, ún. *sírályszárnyal* készült. Ez a megoldás a gépnek jó iránystabilitást kölcsönzött, és emellett a szárnyvégek le- és felszálláskor a talajtól elegendő biztonsági távolságban maradtak. Szelvényének íveltsége a tőben alkalmazott *Gö 652*-től a középrész *Gö 535*-ös profilján át fokozatosan csökkent a végeken alkalmazott *Clark-Y*-ig. A jobb és a bal szárny három-három csapszeggel csatlakozott a törzzsel egybeépített 1,6 m szélességű középrészhez. A tojás (lent szélesebb, mint a fej környékén) keresztmetszetű kabinban, amely ebben a korban eléggé elterjedt, a vezető teljesen burkolva ült. A burkolat kialakítása aerodinamikailag indokoltnak látszott, akkoriban azonban könnyű alakíthatóságával térbeli görbületek megvalósítására is alkalmas szerves üveganyagok még nem álltak rendelkezésre, így teljesen rétegeslemezből készült. A kilátás számára csak oldalt maradt szabadon egy-egy lekerekített nyílás (40. ábra). A megoldás azonban nem vált be, a szárny—törzs csatlakozáshoz való rossz idomulása miatt az áramlás korai leválását okozta. Ezt a hibát a gép második



39. ábra. *Antonov* gépeit az aerodinamikailag következetesen célszerű kialakítású törzs jellemezte

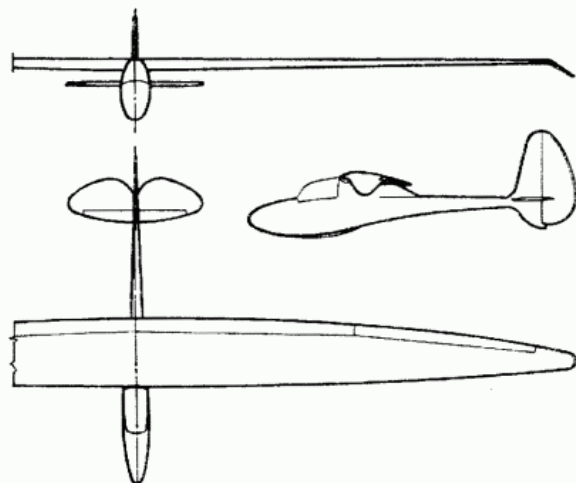


40. ábra. A *Fafnir* aerodinamikai kialakítása példamutató volt, de ennek ára a korabeli (1930) technológiával az igen aprólékos műhelymunka volt

változatánál megszüntették, de a kilátás — különösen előre — továbbra is rendkívül rossz maradt.

Legnagyobb teljesítménye 272 km-es távrepülése volt (1931), amit azonban a FAI nem hitelesített világrekordként, mert a repülőgépvontatásos indítást akkor még nem fogadták el.

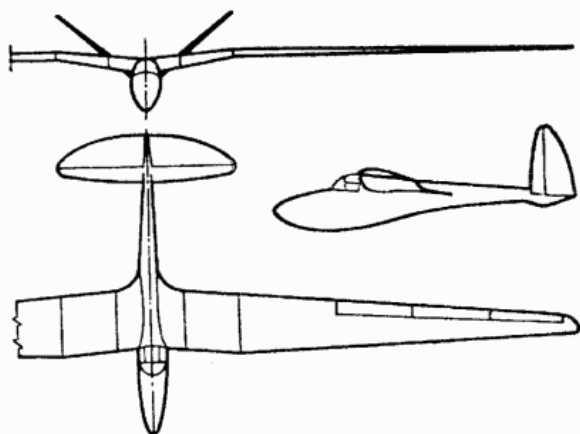
Általában *W. Hirthnek* tulajdonítják a gondolatot, hogy a felületi terhelés növelése a termikus távrepülés lehetőségeit tovább fokozza, továbbá, hogy ezt a gondolatát a *Moazagottl*, majd *Minimoa* gépével első ízben valósította meg. E nézetnek ellentmond az a tény, hogy *O. K. Antonov Rot Front* típusorozatának már első gépei is addig szokatlanul nagy felületi terheléssel készültek. Ezek közé tartozik az *RF-3* vagy *OKA-19* jelű (l. 39. ábra) és az *RF-4* (41. ábra) is, amelyet nagy trapézviszonyú szárny és a vezetőülés mögött a többi *Antonov* géphez hasonló, elvékonyodó vonalú törzs, továbbá vállszárnyas elrendezés jellemez. Az oldalviszony a 16 m fesztávolság ellenére ugyancsak szokatlanul nagy: 23,4. A felületi terhelés így a 116 kp-os üres súly mellett is 17,7 kp/m²-re adódik (repülő súlya ekkor 190 kp). Az *Antonovra* jellemző törzsalak



41. ábra. Az *RF-4*

mellett feltűnő még a szovjet gépeken egyébként is szívesen alkalmazott lefelé tört szárnyvég, amely a talajjal való érintkezés káros következményeit hivatott elhárítani, és szárnyvégcúszóként használatos.

Hasonló felületi terhelésű ($17,9 \text{ kp/m}^2$) volt, de emellett számos egyéb újítást is hozott a *Vrjagov—Iljin* által szintén 1933-ban tervezett *CAGI-1* vitorlázó repülőgép. A 42. ábrán látható elrendezési rajzára pillantva azonnal feltűnik a szokásostól

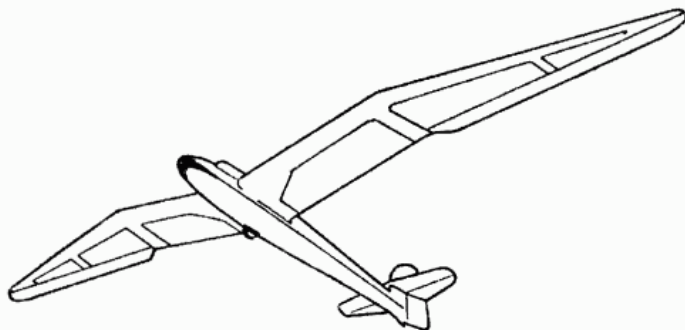


42. ábra. A *CAGI-1* pillangófarokkal készült

eltérő V farokfelület, más néven *pillangófarok*. Ezt az ellenálláscsökkentés érdekében alkalmazott megoldást most először láthatjuk vitorlázó repülőgépen. Az így kialakított farokfelület szükségtelenné teszi külön-külön a magassági és az oldal-kormányt, mert a V állás miatt e kormányfelületek egyidejűleg mindkét feladatot betöltik. A 19 m fesztávolságú, 21,4 oldalviszonyú szárny alaprajza feltűnő: középső része kissé előre van nyilazva. Magyarázata: a vezető jó kilátása és a gép súlypontjának helyzete ilyen módon volt összeegyeztethető. Az enyhe sirálytörés a körözési tulajdonságokat javította.

W. Hirth említett *Gö-3 Minimoája* (1935) néhány évvel korábbi, 20 m fesztávolságú *Moazagotl* nevű gépének 17 m-re kicsinyített, módosított változata. Innen a név is, miniatűr *Moazagotl*. A *Moazagotl* valóban fel volt szerelve — a vitorlázó repülőgép történetében először — egy 50 l térfogatú víztartállyal, amelynek feltöltése után $13,5 \text{ kp/m}^2$ felületi terhelése $15,5 \text{ kp/m}^2$ -re növekedett. A vízballaszt a merülősebséget csak jelentéktelenül növelte, a siklási sebességet azonban kedvezően befolyásolta. A víz a tartályból leereszthető volt, így a kisebb merülősebséget az emelőáramlatok alakulásának megfelelően bármikor visszaállíthatták. Olyan megoldás ez, amelyet napjainkban a teljesítmény-vitorlázógépeken elterjedten alkalmaznak.

Előlnézetben mindkét gép szárnya megtört középrészű volt a fordulóban való jó fekvés, valamint a kielégítő irány- és hossz-stabilitás érdekében. Erre elsősorban a felhőkben való vakrepülés miatt volt szükség, de a fordulóba való bevitel éppen ezért nehézkes lett volna. Ennek ellensúlyozására *Hirth* igen nagy, a szárny körvonalából hátrafelé kiugró csűrőket alkalmazott, amelyek hatásosságát a szárnyvégek elkeskenyedése és az ott szimmetrikussá váló szelvények elcsavarása fokozta. A *Minimoán* néhány év alatt több módosítást hajtottak végre. Kezdetben válszárnyas volt balansz magassági kormányval és a szokásostól eltérően a szárnytőből lefelé függő botkormányval. Később a szárny lejjebb került, és a vízszintes farokfelület is osztottá vált. Kialakult a 43. ábrán látható jellegzetesen szép vonalú elrendezés, amelynek még a súlypont előtt elhelyezett fékezhető futókerék is az újdonsága volt. Repülő súlya viszonylag nagy, 350 kp volt. Ezzel felületi terhelése $18,42 \text{ kp/m}^2$. Legkisebb siklási



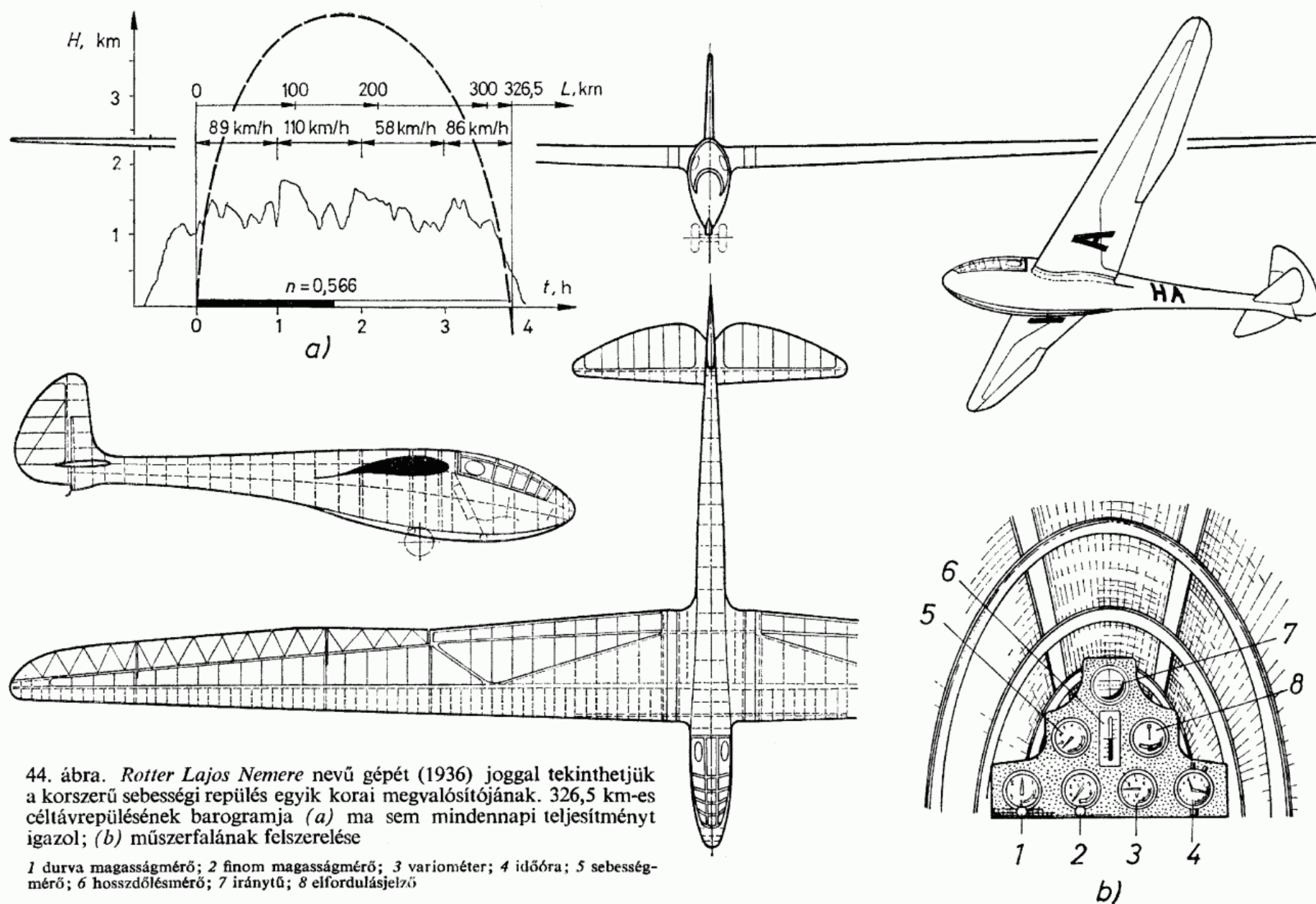
43. ábra. W. Hirth Minimója 1935-ből

sebessége 60 km/h, a legnagyobb pedig 220 km/h volt, ami a nagyobb siklási sebességek előirányzását jelentette. Siklási teljesítményei azonban a szárny nem kielégítő csavarómerevsége miatt nagyon romlottak. Legnagyobb repülései: 523 km távolság és 6687 m magasság.

Az új gépekkel és a távrepülésekkel ismét újabb problémák jelentkeztek. Ekkor már nem az volt a probléma, hogyan maradjon fenn a repülőgép a levegőben, hanem sokkal inkább az, *hogyan szálljon le*. A lejtővitorlázás korának még legnagyobb gépeinél sem okozott ez gondot, mert kicsiny leszállósebességük és a lejtővitorlázást lehetővé tevő nagy szélesség megkönnyítette a leszállást. A repülőgépvezetők is állandóan a hegyoldalak közelében repültek, így a föld közelsége nem volt szokatlan számukra a leszálláskor alacsonyan végzett manőverek közben. Távrepüléskor ismeretlen terepen gyakran igen kicsiny mezőre kell leszállni ott, ahol az emelőáramlatok elfogyása után erre éppen alkalom kínálkozik. Az ilyen leszállások megkönnyítésére alkalmazott Hirth első ízben a *Minimó*a szárnyfelületére merőlegesen kiengedhető sík felületekből álló féklapokat, amelyek ezenkívül a zuhanási sebességet is szilárd-ságilag elviselhető nagyságúra korlátozták. Ez a vakrepülésben fokozta a gépnek és vezetőjének biztonságát.

Rotter Lajos *Nemere* nevű vitorlázó repülőgépe (1936) a nagy fesztávolság, az aerodinamikailag példamutató kialakítás és a nagy felületi terhelés előnyeit egyesíti magába. Saját szavait idézve: „A tervezés alapgondolata egy olyan vitorlázó repülőgép létrehozása volt, amely nagyobb siklási sebességekkel is jó siklásszámokat ér el, a merülősebesség pedig kicsi. A csűrők ehhez repülés közben állíthatóvá vannak kiképezve úgy, hogy tetszés szerint lehet a gyenge feláramlásokban a szárny ívelésének növelése céljából az alaphelyzettől lefelé vagy a jó siklásszámú, gyors sikláshoz az íveltség csökkentésére felfelé állítani. A repülőgépvezető kabinjának különösen tágasnak és kényelmesnek kell lennie, hogy hosszú és nehéz repülések alatt is jó kondícióban maradjon, továbbá azért, hogy elegendő tere legyen a térképek és a navigációs eszközök kezelésére. E feltételek miatt a szárny fesztávolságát nagyra választottam. Ez a gép súlyának megnövekedését eredményezte. A felületi terhelés ezzel a gyors repülésnek megfelelő értékre nőtt. A szárny szelvényét magam terveztem, sem ezt, sem a repülőgép egészének modelljét nem volt alkalmam szélcsatornában megvizsgáltatni” [15].

Rotter a *Nemere*t a Magyar Aero Szövetség megbízásából az olimpiai játékok idején rendezett vitorlázórepülő versenyen való részvételre tervezte. 1936. július 25-én repült először, és már két nappal később berepülés nélkül útnak indították Berlinbe. Ott csakhamar feltűnést keltett szép vonalaival és méreteivel, de a feltűnést általános elismerés követte, amikor Rotter augusztus 19-én a még szinte teljesen ismeretlen géppel a Berlin—Kiel útvonalon 3 óra 55 perc alatt 326 km-es távolságot repült.



Ez nem csupán a céltávrepülésben jelentett akkor (a FAI által sajnos még nem regisztrált) világrekordot, hanem egyben az év legnagyobb távrepülése is volt.

A repülésnek a 44a ábrán látható barogramja a gép kiváló siklási tulajdonságait bizonyítja. Eszerint a 83 km/h átlagsebességű repülés egyes szakaszait 110 km/h föld feletti sebességgel tette meg a *Nemere*. A távrepülés hatásfoka, vagyis a siklásban és az emelkedésben összesen eltöltött idők aránya 0,566, ami ilyen távolságon napjainkban sem mindennapos érték.

A *Nemere* jelentősége minden szempontból nagy volt. Ez nemcsak a vele elért eredményekből tűnik ki, nemcsak alakja és szerkezeti felépítése volt példamutató, de repülőtulajdonságai is meglepően jók voltak. Legkisebb merülősebessége kb. 0,6...0,65 m/s volt, de 140 km/h siklási sebességgel sem nőtt 2 m/s fölé. Siklószáma tehát ekkor még 19 körüli. Korukat megelőző jó értékek ezek.

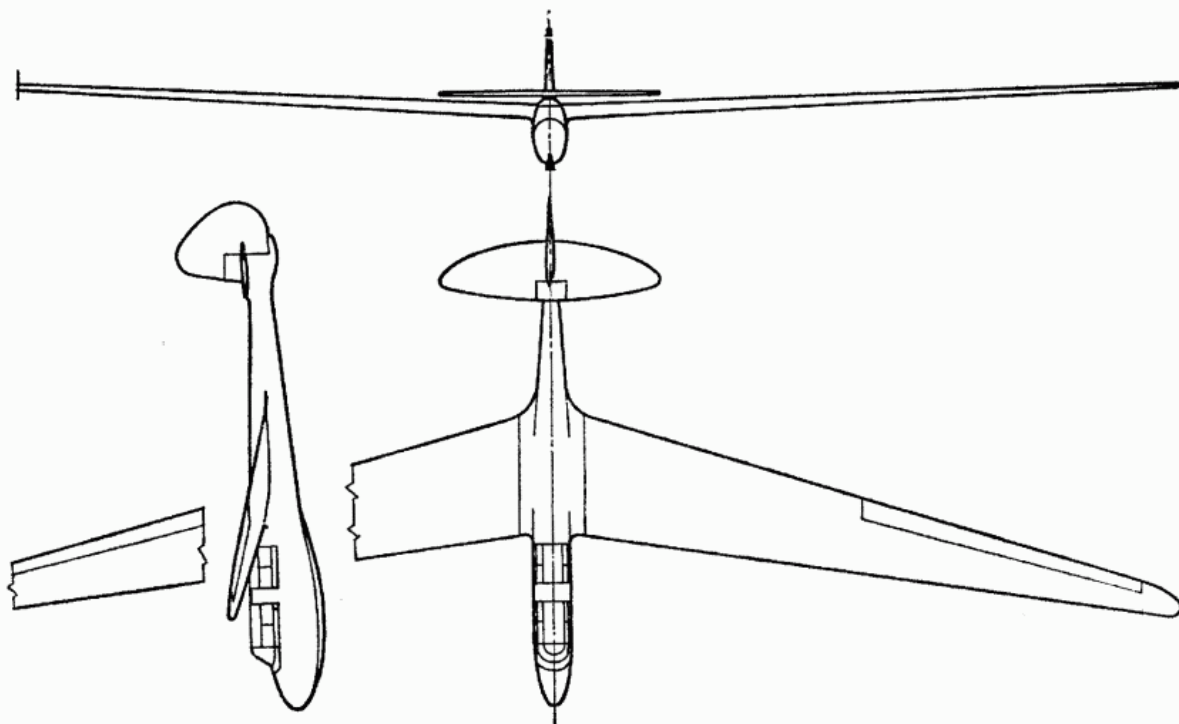
Még néhány szót a 20 m fesztávolságú és 23 m² szárnyfelületű, tehát több mint 19 kp/m² felületi terhelésű gép kialakításáról. Általános elrendezési rajzán (44b ábra) megfigyelhető, hogy tervezője alaposan átgondolta minden kis részletét, és az áramlástanilag legkedvezőbb alak elérésére törekedett. A törzs keresztmetszete ezért a vezető ülésétől kezdve hátrafelé erősen lecsökkent, az átmenet azonban olyan, hogy káros leválások sehol sem keletkezhettek. A kabintető törés és kiugrás nélkül simult a törzs vonalába, amelynek középvonala a gép orra felé lejtett. Ez az alak kissé hasonlít az *Antonov* gépeknél vagy a *Fafnir* esetében látottakhoz. Példaszerű volt a szárny—törzs átmenet kialakítása is. A szabadonhordó, 12-szeres biztonsággal méretezett szárnyfelületek kétüléssel törzs hordására is alkalmasak voltak, bár ilyen átalakításra sohasem került sor.

A gép üres súlya 340 kp, repülőszúlya pedig 440 kp volt. A földön ezért meglehetősen nehezen lehetett volna mozgatni a súlypont előtt elhelyezett, kettőskerekű, felszállás után ledobható futómű nélkül.

Térjünk most vissza a fejlődés általános vonalához. A vitorlázórepülésben elért legnagyobb távolság egyre emelkedett. 1935-ben elérte az 504 km-t. Nagyobb távolságokat az időjárás napi menete által megszabott időtartamon belül már nem lehetett elérni. A kisebb sebességű gépekkel elérhető legnagyobb távolságnak határt szabott az is, hogy a sok órás repülésben kimerült repülőgépvezetők nemegyszer életük kockáztatásával igyekeztek a megtett távolságot tovább növelni. A gyorsabb vitorlázó repülőgépek számára tehát megérett a helyzet. A *Nemerét* ilyenformán egy új korszak bevezetőjének, vagy ha úgy tetszik, a korszerű *sebességi vitorlázó repülőgépek előfutárjának* tekinthetjük.

Kétüléssel vitorlázó repülőgépeket a legkorábbi időktől kezdve építettek. Ezeket időtartam- és gyakorlórepülésekre használták. A vitorlázó repülőgépek általános fejlődésére alig gyakoroltak hatást. A teljesítményrepülésben való alkalmazásukkal azonban elháríthatónak látszott a távrepülések elé a repülőgépvezető kimerülése által állított korlát, ezért most ezek teljesítményének fejlesztésével kezdtek foglalkozni.

A legkiemelkedőbb kétüléssel konstrukció ebből az időből kétségtelenül a *Sztahanov*, *Jemeljanov* 1936-ban épült gépe (45. ábra). Főbb adatai *Rotter* gépéhez hasonlóak: fesztávolsága 20,2 m, szárnyfelülete 23 m², repülőszúlya 435 kp, és felületi terhelése 19 kp/m². Legjobb siklószámát 75 km/h sebességgel érte el, és legkisebb merülősebessége kb. 0,6 m/s volt. Elrendezése azonban szokatlan. Szárnya előrenyilazott alaprajzú, aminek az a következménye, hogy aerodinamikai középpontja viszonylag előre került. Így az egymás mögött elhelyezett két ülés a szárnyak belépőéle elé került, a kilátás ezért a hátsó ülésből is igen jó volt minden irányban. A szárny előrenyilazásának egy másik következménye pedig az, hogy az előrenyúló szárnyvégeket nem kell a trapézsárnyaknál szükséges módon elcsavarni. Az előrenyilazás szögét ugyanis



45. ábra. Jemeljanov Sztahanovec nevű kétüléses gépéhez számos világrekord fűződik

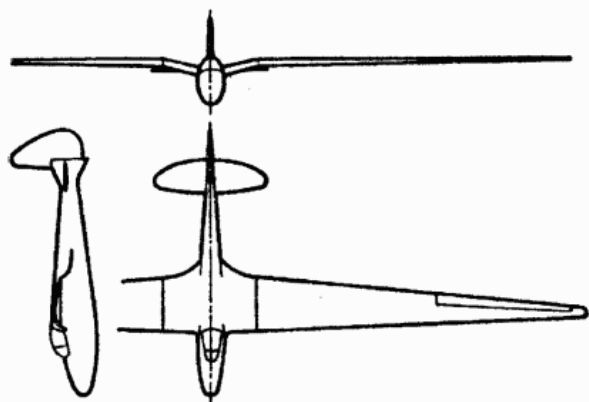
úgy lehet megválasztani, hogy a szükséges elcsavarás nagysága éppen 0° legyen. Ez a teljesítmények alakulása szempontjából igen lényeges.

Szárnyszerkezete a szokásossá vált egyfőtartós rendszer csavarásra merevvé tett orr-résszel. A törzs ellipszis keresztmetszetű héjszerkezet, balansz magassági kormányval felszerelve. A kabinban rövidhullámú, közepes hatótávolságú rádió adó-vevőt helyeztek el, ennek segítségével a távrepülés folyamán az indulási hellyel lehet tartani a kapcsolatot, ill. közölni lehet a leszállás helyét.

A rendkívül szilárd felépítésű és a kort tekintve meglehetősen nagy felületi terhelésű gép a kontinentális éghajlat időjárási lehetőségeire készült. Ezt a lehetőséget, mint az *RF-3* géppel láttuk, már idejekorán felismerték. A Szovjetunió európai részének kontinentális éghajlata ugyanis a nagy felületi terhelésű, gyors gépek használatát különösen elősegíti. Ha tudvalevőleg itt a felszállás helyén kedvező az idő, akkor csaknem bizonyos, hogy ez a légköri állapot több száz kilométeres repülés számára is lehetőséget nyújt. Ilyen körülmények között a repülőgép körözési tulajdonságai sem olyan fontosak, mint egyebükt. A felismerés helyességét az bizonyítja, hogy a *Sztahanovec* nevét 1937–39 között öt világrekord fémjelzi. Ezek közül a legnagyobb távolság — két személlyel — 555 km.

A harmincas évek vége felé a felületi terhelés további növekedését két újabb szovjet vitorlázógép rekordjai igazolják. Ezek közül elegendő adat hiányában *Antonov Rot Front 7*-jét, amellyel *O. Klepikova* 12 éven át tartotta 749 km-es távrepülésével (1939) az abszolút világrekordot, sajnos itt nem tudjuk bemutatni.

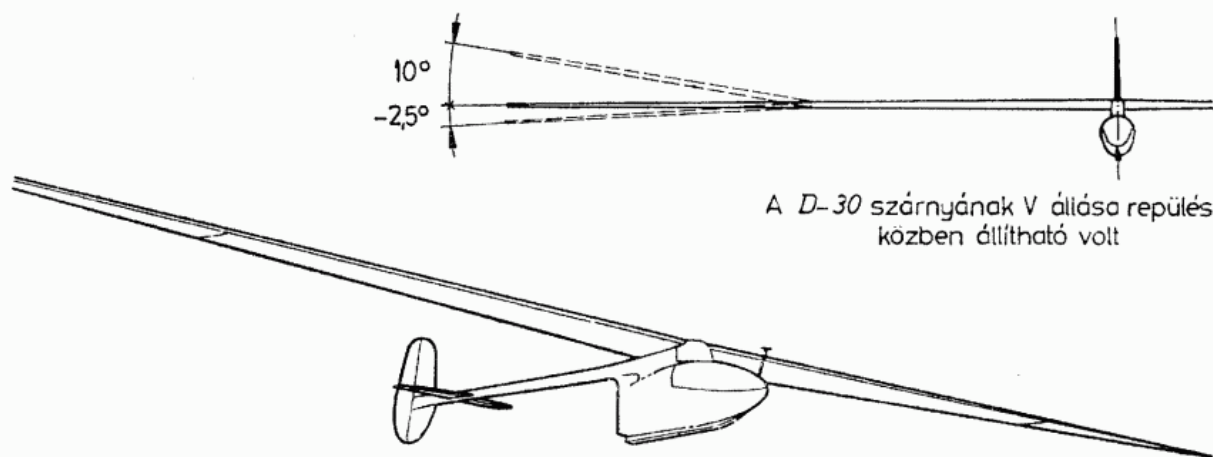
A *G Nr. 7* típusjelű másik gép, amelynek legnagyobb teljesítménye 1938-ban egy 660 km-es távrepülés volt, *Groszev* tervezése még 1936-ból (46. ábra). Ez a gép az orosz éghajlati adottságok figyelembevételével épült. 290 kp repülő súlyával 16,8 m fesztávolságú és 12,8 m² felületű szárnyának felületi terhelése 22,6 kp/m². Irányadó szempont tehát a *siklási sebesség fokozása* volt, ill. a lehető legnagyobb siklásszámok elérése nagy sebességek esetében is. A szilárdsági követelmények teljesítésére éppen



46. ábra. A G Nr. 7

ezért különös gondot fordítottak e gépnél. Biztos terhelési többszöröse 10. Felépítésében inkább válszárnyú, mint középszárnyú. Szárnyszelvénye módosított Gő 549. Törzse rövid, magassági kormányja pedig vezérsík nélküli, a gép vezetése tehát látás mellett is gyakorlatot igényel. A vakrepülés kíváncsi ez esetben nem jutottak szerephez, mert az adott éghajlati körülmények mellett az amúgy is ritkán jön számításba.

Nem lenne teljes a harmincas évek irányzatairól alkotott képünk, ha nem beszél-nénk még két érdekes megoldásról. Elsőnek a csupaszárny vitorlázógépek újbóli megjelenését említjük meg, ezekkel azonban külön fejezetben még bővebben foglal-kozzunk. A másik érdekes megoldást a D—30 Cirrus, a darmstadti egyetem repülő-csoportjának gépe hozta (47. ábra). Tervezése tulajdonképpen már 1933-ban el-



A D-30 szárnyának V állása repülés közben állítható volt

47. ábra. A D—30 Cirrus

kezdődött, de számos kísérlet és főként az új építési anyaggal kapcsolatos kivitelezési próbálkozások után csak 1936—38-ban valósult meg.

Egyetlen példányban megépített kísérleti vitorlázó repülőgépről van szó, amely-nek célja a fejlesztési és építési költségekre való tekintet nélkül a siklási tulajdonságok és a legkisebb merülősebesség bármi eszközzel való javítása, továbbá a könnyűfém építési anyag alkalmazásának kikísérletezése volt.

A D—30 külsejében az *Austriához* hasonlított: szabadonhordó, magasan elhelye-zett szárny, kilépőle mögött erősen elvékonyodó, szegecselt elektronból készült faroktartós törzzsel. A kísérleti és műhelymunka nagy részét a szárnyfőtartó ki-vitelezésére fordították. A konstrukciós nehézségekre jellemző, hogy ez a rendkívül karcsú, 10 m hosszúságú konzolt képező szárny tőben 15 cm magas volt. A hajlító-

nyomatékok befogását ilyen szerkezeti magassággal kellett tehát megoldani. Szerkezete az általános gyakorlattól eltérően háromgerincű, durából készült, dobozos főtartót foglalt magába, amely a hajlítást és a csavarást egyaránt elviselte. A főtartó és a belépőél közötti szakasznak a teherviselésben alárendelt szerepe volt, és csak alaktartó bordákból és rétegeslemez-borításból állott a szárny főtartó mögötti részéhez hasonlóan.

A szárny teljes kilépőéle mentén csűrő- és ívelőlapok húzódtak, amelyeket leszálláshoz és lassú repüléshez lefelé lehetett állítani. A leszállás biztonságát elősegítette a szárny felső részén alkalmazott féklap is. A szárny külső részei repülés közben felfelé $+10^\circ$ -ig, lefelé pedig $-2,5^\circ$ -ig állíthatók voltak. Ezt a megoldást stabilitási és csűrőhatásossági kísérletek végzése céljából, továbbá a rugalmas szárny végeinek leszállás közben a talajon való elakadása ellen alkalmazták.

A *Cirrus* törzse a rétegeslemez-borítású, faszerkezetű mellső részhez csatlakozó elektroncső faroktartóból állt. A farokfelületek fából készültek, és a magassági kormány kitérítésekor a vízszintes vezérsík is kitért annak fele mértékével.

A *Cirrus* néhány fontosabb adata: szárnyfelülete 12 m^2 ; felületi terhelése $22,9 \text{ kp/m}^2$; legkisebb sebessége 53 km/h , legnagyobb siklási sebessége pedig 300 km/h volt. Kiváló siklási teljesítményeire jellemző legjobb siklószámának $37,6$ értéke, legkisebb merülősebessége pedig $0,55 \text{ m/s}$ volt. Teljesítményeit a repülőkísérletek során pontosan bemérték, ezek alapján készült sebességi görbéje az 50. ábrán látható. Távrepülései közül 406 km -es teljesítménye említésre méltó.

A *D-30 Cirrus*hoz hasonló feladatú kísérleti vitorlázógép a legújabb időkben a *Sigma 1*, amelyről egy későbbi fejezetben még lesz szó.

Az előzőekben megkíséreltük vázolni a vitorlázó repülőgépek fejlődését a kezdetől a második világháborút megelőző évekig. Korlátozott lehetőségeink csak az irányzatokat legjobban illusztráló néhány példa kiragadását tették lehetővé. Foglalkoznunk kell azonban ezek mellett a „hétköznapi” vitorlázó repülőgépekkel is, vagyis azokkal, amelyeket ugyan nem a legnagyobb repülőteljesítmények elérésére készítettek, de amelyek a vitorlázórepülés elterjedésében és fejlődésében éppúgy közreműködtek, mint a mindenkor „szuperorchideák”.

A vitorlázó repülőgépeket kezdetben mindenütt egyéni vállalkozásként vagy egyesületek, repülőcsoportok társadalmi munkájával készítették. Bármiféle anyagi támogatással jöttek is létre, hosszú ideig egy-egy típus csak egyetlen vagy legfeljebb igen kis számban épült meg. A harmincas években ez a helyzet lassanként megváltozott, és kialakult a vitorlázó repülőgépeket gyártó ipar. Ezek mellett kutatóintézetek is foglalkoztak — a kísérletek folytatásához szükséges anyagi háttér megteremtésére — vitorlázó repülőgépek kisebb-nagyobb sorozatban való gyártásával.

A rendelkezésre álló források szerint az első, nagyobb darabszámban készített vitorlázó repülőgépnek *V. Nyevdacsin* konstrukcióját, a *Burevestnyiket* kell tekintelnünk, amelynek rajzait az 1923-as krími verseny után sokszorosították, és a Szovjetunió különböző helyein számos példányban megépítették. Ugyancsak nagy darabszámban épültek meg a húszas és a harmincas évek folyamán *B. Seremetyev* közepes teljesítményű és kiképzésre is alkalmas vitorlázó repülőgépei. Ezek közül a nevezetesebbek az *S-3*, *Temp*, *S-5*, *S-7*, *S-10* és *S-11* voltak. Többségük a 48. ábrán látható *S-5* típuséhoz hasonló, jellegzetes alakú, egyszerű szerkezetű törzzsel épült.

Az igen termékeny konstruktóri munkát folytató *O. K. Antonov* típusai közül az *US-5 (OKA-32)* kétüléssel kiképzésre használták. A géppel mint *A-2*-vel is találkozunk.

A legnagyobb darabszámban a *Schneider* és *Hirth* által (1932) tervezett *Grunau Baby* különböző változatai épültek. Németországban, Hollandiában, Spanyolország-

ban, Romániában, Bulgáriában és Svédországban összesen mintegy 5000 készült el [4]. Szerkezete igen egyszerű és olcsó, súlya kicsiny, karbantartása egyszerű volt. Ezekkel párosultak a jó vezethetőség és a kellemes repülési tulajdonságok, így nem tekinthető véletlennek, hogy két időtartamrekord is fűződik e géphez: 36 óra 36 perccel és 40 óra 55 perccel.

H. Jacobs, aki 1927 óta A. Lippisch mellett a Rhön-Rositten Gesellschaft e.V.-nél tevékenykedett és 1932-ben a Magyarországon is kedvelt 17,4 m fesztávolságú, kis sebességekkel rendkívül kellemes repülőtulajdonságú *Rhönadlert* tervezte. *Rhönbus-sard* és *Rhönspërber* gépei után a DFS (Deutsche Forschungsinstitut für Segelflug) intézetben tervezte legsikeresebb alkotásait. Ezek közül elsőként a *Rhönspërber* két-üléssel továbbfejlesztéseként létrehozott *Kranichot* (1935) említjük. Ez a 18 m fesztávolságú, enyhén nyílazott sirálysárnyú kétüléssel egyaránt alkalmas volt termik-repülésre és különösen vakrepülő-kiképzésre. A hátsó ülés a gép súlypontjában volt elhelyezve, így egy és két személlyel egyaránt repülhető volt. A *Kranich* nevéhez számos rekord fűződik.

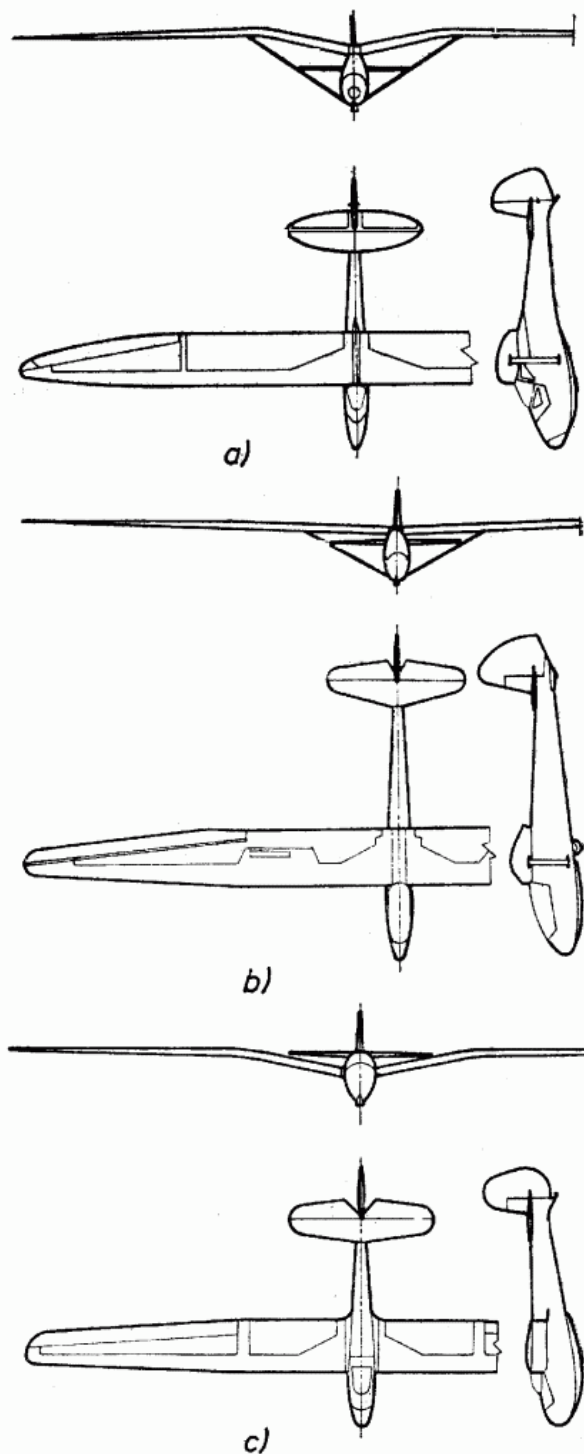
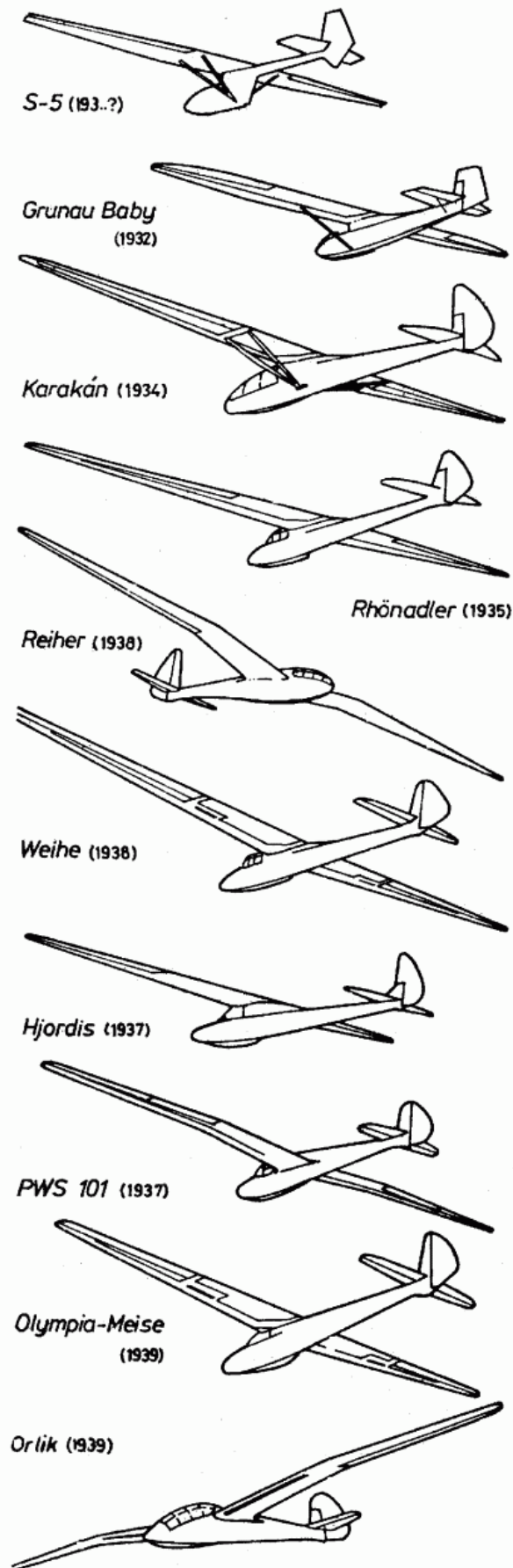
Jacobs legszebb vonalú repülőgépe a *Reiher* (1937) volt, amelyet az igen kedvezőnek tartott Gö 549/676 szelvénypárosítással, a káros ellenállások minimálisra csökkentésével hozott létre. Ez utóbbihoz a külső felületek igen gondos simára munkálása, valamint az is hozzátartozott, hogy a kormányfelületek mozgatókarjait a szárny, ill. a vezérsíkok szelvényeinek körvonalain belül helyezték el, kiálló részek nélkül. Ez a megoldás az ellenálláscsökkentés szempontjából jónak bizonyult, de igen nagy kormányerők keletkezésével járt együtt, ami a gép vezetési tulajdonságainak rovására ment. A 19 m fesztávolságú és 16,44 kp/m² felületi terhelésű gép legjobb siklószáma 33 körül volt.

A Rhön-sorozat gépeivel, és különösen a *Reiherrel* szerzett tapasztalatok alapján Jacobs 1938-ban a 18 m fesztávolságú *Weihevel* olyan kiváló repülőtulajdonságú vitorlázógépet hozott létre, amelyet szintén 300 feletti darabszámban építettek meg, és még húsz év múlva is kiváló eredményeket ért el világbajnokságokon. Szárny-szelvénye a már jól bevált Gö 549/676 kombináció volt, ami 18,4 kp/m² felületi terhelés mellett 45 km/h minimális sebesség elérését tette lehetővé. A merülősebesség ezzel még mindig csak mintegy 0,65 m/s nagyságú volt. A legjobb siklószám 70 km/h sebességgel kb. 28 volt. Teljesítményeit tekintve tehát „minden időben” repülő gép volt a *Weihe*, és a leggyengébb termikviszonyok kihasználását is lehetővé tette.

A legyen *PWS—101* gép típusjele a Polska Wytwornia Samolotow gyár nevének kezdőbetűiből állt össze, és azt a W. Czerwinski által tervezett, 19 m fesztávolságú, sirálysárnyú vitorlázó repülőgépet jelezte, amellyel T. Góra 1938-ban 579 km-es nagyszerű távrepülést végzett. A gép érdekessége dinamikus kiegyensúlyozott, kétrészes csűrőmegoldása, amelynek külső felületei felfelé többet tértek ki, mint a belsők, és ezzel a nagy fesztávolsághoz viszonyítva igen jó fordulékonyt adtak a gépnek.

A közepes teljesítményű, általános használatra szánt vitorlázó repülőgépek fejlesztése terén Angliában F. Slingsby nevéhez fűződik a legtöbb érdem. A Slingsby Sailplanes 1931-ben épült *Falconját* egymás után követték a Kirby sorozat gépei: a *Kirby Kite* 14,1 m-es kis teljesítménygép, a *Kirby Kadet* gyakorlógép, a *King Kite* a *Hjordis I* és *Hjordis II*, majd a *Petrel* és a *Gull* változatai. Ezeket a gépeket a sajátos angliai időjárásviszonyokra tervezték 14...16 kp/m²-t meg nem haladó felületi terheléssel és kis sebességekkel, a kornak megfelelő átlagos teljesítményekkel.

Rubik Ernő sajátos, de igen szerencsés konstruktóri felfogása a magyarországi vitorlázórepülés fejlődésére jó irányban és döntő mértékben hatott. A vitorlázórepülés anyagi alapjaival hazánkban mindig szűken álltak, így a csúcsteljesítményeket



49. ábra. Magyarországon Rubik Ernő gépeivel terjedt el a vitorlázórepülés

a) R-04 Szittya III; b) R-12 Kevély;
c) az M-22 Szokolay és Jancsó tervezése volt

48. ábra. Néhány vitorlázó repülőgép az 1930–1939 közötti évekből

is nyújtani tudó, 18...20 m fesztávolságú gépek építéséről szó sem lehetett. A kisebb méretű gépek megépítéséhez kevesebb anyag kellett, továbbá a gyártáshoz szükséges munkaidő is rövidebb, így e gépek olcsóbbak. A kis méret miatt rosszabb ugyan az oldalviszony, tehát ha merülősebségben nem is sokkal, de siklóteljesítményekben már jobban elmaradnak a nagy fesztávolságú gépek mögött. Ezt részben ellensúlyozza az, hogy a kisebb fesztávolságú gépek mindig fordulékonyabbak, így a kis átmérőjű termikeket is ki tudják használni. Rubik a gazdasági és aerodinamikai megfontolások mellett a gépkezelési szempontokat is figyelembe vette. A nagy fesztávolságú gépek hangározása nagyobb hangárt, nagyobb létszámú mozgató személyzetet igényel, és távrepülés után a visszaszállításhoz is nagyobb szállítóköcsi kell. Bár az anyagmegtakarítás, amit a fesztávolság csökkentésével el lehet érni, önmagában vitatható érv, az előbbiekhöz fűzve azonban elegendő érvet alkot a 15 m körüli fesztávolságú gépek létjogosultságának igazolásához. Nyilvánvaló volt, hogy az ilyen méretű gépek sebességi polárgörbéinek alakulása nem lesz olyan kedvező, mint a 18...20 m-eseké, azonban ezek az átlagszínvonal emelésére alkalmasak lehetnek. Viszonylagos olcsóságuk folytán több példányban építhetők, tehát több repülő számára nyújtanak gyakorlási alkalmat.

Rubik Ernő első teljesítménygépével, az *R—04 Szittyával* (49. ábra) ezt az elvet vezette be vitorlázógép-építésünkbe (1937). E típushoz nem fűződik országos vagy nemzetközi rekord, jelentősége mégis nagy. Előtanulmányt jelentett az *R—08 Pilishez* és változataihoz, amellyel sorozatgépként messze felülmúlták a legjobb hasonló kategóriájú külföldieket.

1938-ban Rubik Ernő vezetésével megalakult az Aero-Ever kft. repülőgépkészítő üzem, s ezzel megszületett a magyar sportrepülőgép ipar. Az eddigi egyedi építések helyébe a kissorozatok gyártása lépett. Megkezdődött az R gépek hosszú sora, amely a hatvanas évek közepéig 1400 darabig jutott el.

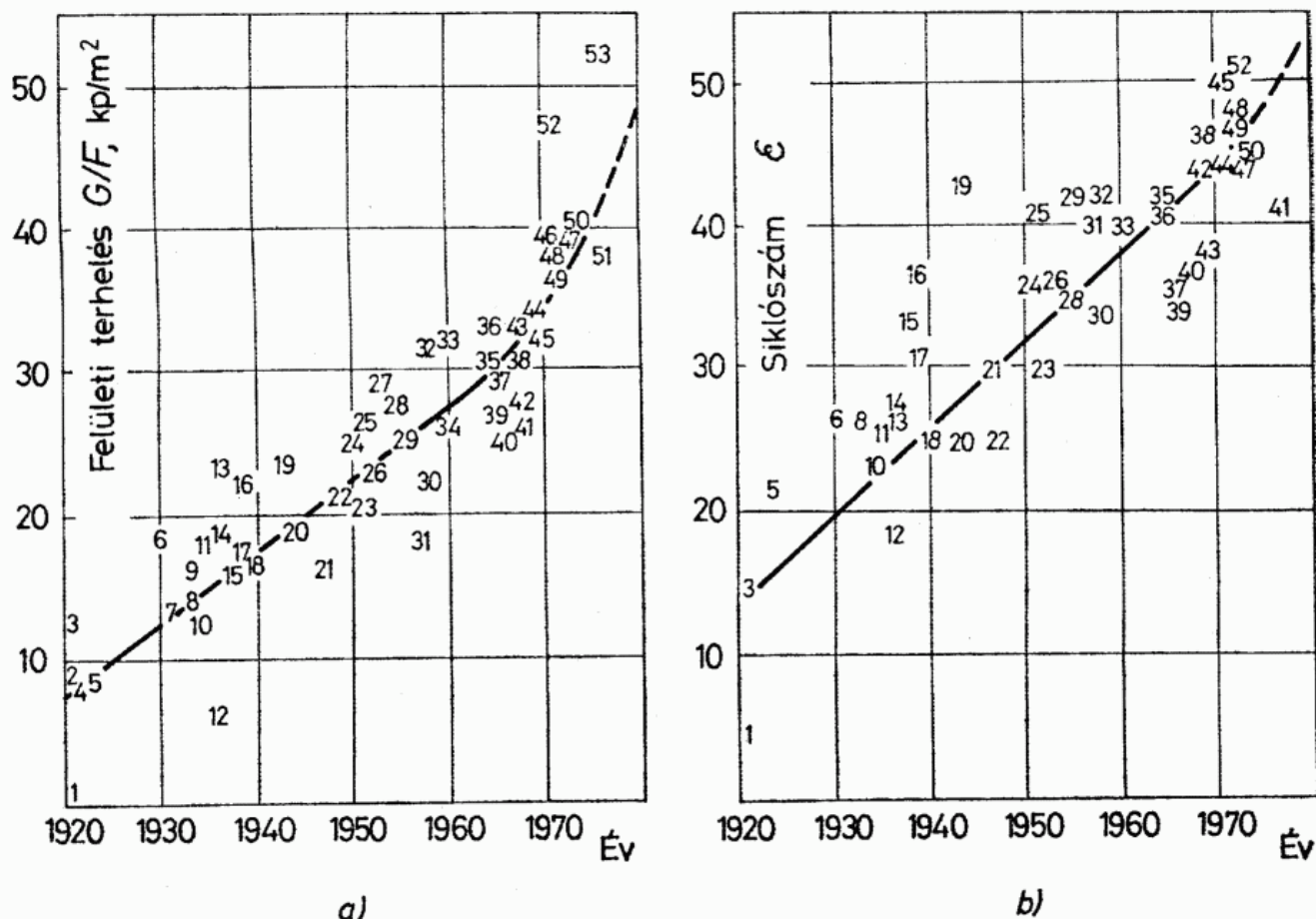
A tárgyalt időszakból az *R—12 Kevélyt* kell még megemlítenünk. A 18 m fesztávolságú *Kevély* szárnyszelvénye az abban az időben jól bevált és Rubik egyéb gépein is alkalmazott *Gö 549* jelű volt. Ezzel optimális körözési sebessége 60 km/h körül volt, egyenes siklásban pedig 60...65 km/h sebességgel 22...24 siklószámot ért el. A felhőrepülések folyamán tűnt ki egy igen szerencsés tulajdonsága. Ha vezetője a térbeli helyzetét illetően elvesztette tájékozódását, a gépet könnyen dugóhúzóba tudta vinni. Forgása ekkor lassú volt, sebessége nem haladta meg az 55 km/h-t. Az oldalkormány középre állításával és a magassági kormány lassú középhelyzetbe állításával a gép a dugóhúzó forgásirányával azonos értelmű körözésbe ment át. Eközben a magasságvesztés általában nem volt nagyobb 150 m-nél. Minthogy ezt a folyamatot felhőben látás nélkül is el lehetett végezni, a géppel a vakrepülés gyakorlása is veszélytelené vált.

Az Aero-Ever kft. munkája mellett igen fontos feladatot töltött be ebben az időben a Műegyetemi Sportrepülő Egyesület tervezőirodája és műhelye. Első két vitorlázórepülőgép-típusuk az *EMESE B (R—01)* és *C* gyakorlógép (1937) volt, amit Rubik vezetésével szerkesztettek. A hazai vitorlázórepülés szempontjából sokkal fontosabb volt azonban ezeknél a kezdetben ugyancsak Rubik Ernő irányításával működő Jancsó Endre és Szokolay András által tervezett *M—22* teljesítmény-vitorlázógép. Ez is a 15 m-es kategóriába tartozott, azonban használhatósági köre merőben új volt. Ebben az időben a tervezők már egyre inkább a nagy sebességű gépek megalkotását tekintették feladatuknak azzal az indoklással, hogy a termikek szempontjából figyelembe vehető 5...7 órás időtartam alatt csak gyors gépekkel lehet nagy távolságokat elérni. Az 1937-ben tervezett *M—22* ezt az elgondolást valósította meg. *Gö 535* szelvényű szárnyán a csűrők — akár a *Nemerén* — felfelé és lefelé több foko-

zatban állíthatók voltak a nagy sebességű siklás teljesítményadatainak javítására. A szárny szerkezete igen erős volt; az egész gép méretezése még a 350 km/h sebességű repülést is biztonsággal lehetővé tette. Az a műrepülés — a földközeli vezetett orsót is beleértve —, amit számos repülőnapon éveken át végeztek e géppel, nemcsak szilárdságát, de kitűnő kormányozhatóságát is bizonyította.

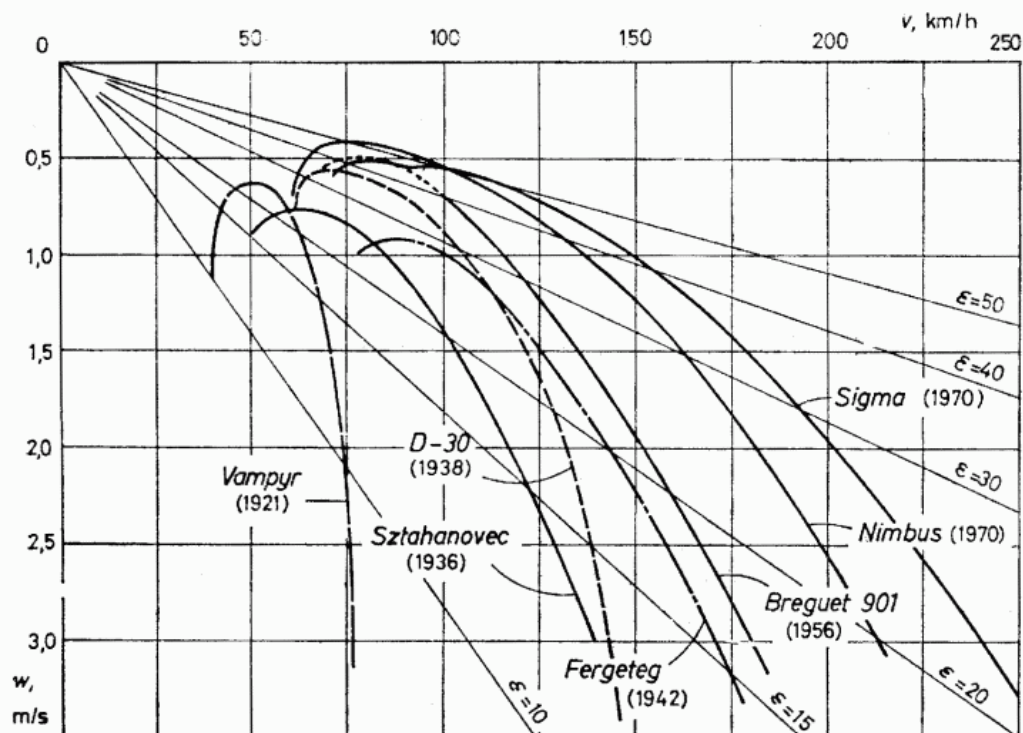
1.3. Merre tart a vitorlázó repülőgépek fejlődése?

A vitorlázó repülőgépek történetét az 1930-as évek végéig követtük nyomon. Különösen a kezdeti évek lassan a feledés homályába merülő emlékeit idéztük fel részletesebben, a legutóbbi három évtizedet pedig a jelennek tekintjük, amelynek részletes tárgyalása e könyv további fejezeteinek feladata.



50. ábra. a) A felületi terhelés változása 1921—1975 között; b) a legjobb siklószám változása

1 Pelzner; 2 Schwarzer Teufel; 3 Vampyr; 4 F. S. 3; 5 Konsul; 6 Fafnir; 7 Austria; 8 OKA-13; 9 RF-3; 10 Windspiel; 11 Minimoa; 12 Horten IV; 13 G Nr. 7; 14 Sztahanovec; 15 Reiher; 16 D-30; 17 Weihe; 18 Meise; 19 Horten VI; 20 R-22 Futár; 21 Schweizer 1-23; 22 WLM 1; 23 Moswey 4; 24 Oráo IIc; 25 RJ 5; 26 Skylark; 27 HKS 1; 28 Breguet 901; 29 Meteor; 30 Ka-6E; 31 Phönix; 32 Sisu 1A; 33 A-15; 34 SHK; 35 Diamant 18; 36 Zefir 3; 37 Foka; 38 ASW 12; 39 Slingsby Dart; 40 Elfe S3; 41 ASW 15; 42 Cirrus; 43 Cobra 15; 44 Kestrel 17; 45 Nimbus 2; 46 Calif A-15; 47 HP 15; 48 ASW 17; 49 Jantar 1; 50 AN 66C; 51 PIK 20; 52 Sigma; 53 FS-29



51. ábra. A fejlődés irányát az 1921—1970 közötti időszakban épült vitorlázó repülőgépek sebességi görbéi jellemzik

Ez utóbbi időszakot a *sebességi vitorlázórepülés* korszakának is nevezhetjük, mert bár a vitorlázó repülőgéppel elért legnagyobb távolság e könyv írásakor már az 1400 km-t is meghaladta, a repülőgéptervezők és repülőgépvezetők számára ma egyaránt meghatározott távolságok minél nagyobb átlagsebességgel való megtétele a legfőbb cél. Kialakítások és szerkezetek részletezése helyett — ezt a korrall kapcsolatban könyvünk további részeiben tesszük meg — csupán a felületi terhelés és a siklószám értékekre utalunk. Ha ezek változásait az 1921—75 közötti időszak függvényeként vizsgáljuk, mindkettő állandó növekedését tapasztaljuk (50. ábra). E tendenciának igen fontos következményei vannak.

Tekintsünk az 51. ábrára, ahol a *Vampyr*tól kezdve az 1970-es évek felfogását tükröző *Nimbus* és *Sigma 1* gépekig bezárólag látjuk a sebességi polárgörbék alakulásában az idők folyamán bekövetkezett változásokat. Megállapíthatjuk, hogy jóllehet a legjobb siklószám is az 50-es értékig, tehát az 1921-es kétszeresére emelkedett a legjobb gépek esetében, sokkal nagyobb azonban a változás a polárgörbék alakjában. Ez abban nyilvánul meg, hogy valamely merülősebességhez napjaink legjobb gépei esetében a *Vampyr* hasonló merülősebesség értékéhez tartozó siklási sebesség többszöröse tartozik. Így pl. az 1 m/s merülősebesség esetében a siklási sebesség növekedése kb. 2,3-szeres, 2 m/s-nél 2,75-szoros, 3 m/s merülősebesség esetében pedig 3,3-szeres a *Sigma* esetében, vagyis az arány a nagyobb merülősebesség esetében nagyobb, mint a kisebbeknél. Ha a változást a siklószámok szemszögéből vizsgáljuk, azt látjuk, hogy míg a *Vampyr* kb. $\epsilon = 25$ legjobb siklószámát $v_{opt} = 54$ km/h sebességgel érte el, ugyanezt a siklószámot a *D-30 Cirrus* 118 km/h, a *Nimbus* pedig 180 km/h, végül a *Sigma* 215 km/h sebességgel éri el. A növekedés tehát 2,20-szoros, 3,30-szoros, ill. 4,16-szoros. A különféle gépek legkisebb merülősebességéhez tartozó v_{gazd} siklási

sebességeiben nem tapasztalható ilyen mértékű változás. A növekedés a 20...40%-ot nem haladja meg, és a szélsőséget képviselő *Sigma 1* esetében sem több kb. 50%-nál.

A sebességi polárgörbék ilyen átalakulása azt jelenti, hogy a korszerű vitorlázó repülőgépek napjainkban — az előző korszakokhoz viszonyítva — lényegesen nagyobb sebességgel képesek termiktől termikig siklani, közben azonos magasságvesztést tételezve fel. Mivel siklőszámuk legjobb értéke és a nagyobb siklási sebességekhez tartozó értéke egyaránt nagyobb a korábbi időszakok gépeinél, a nagyobb siklási sebességgel egyúttal nagyobb távolságokat is megtehetnek közbeni emelkedés kényszere nélkül. Mivel a legkisebb merülősebesség az utóbbi időben még csökkent, és a hozzátartozó sebesség, tehát a körözési tulajdonságok nem változtak jelentősen, az utóbbi megállapítást úgy is megfogalmazhatjuk, hogy a korszerű vitorlázó repülőgépek vezetője nem kényszerül minden útba eső emelőáramlat kihasználására. Az adott időjárás lehetőségeitől függően válogathat, és a földhöz viszonyított legnagyobb átlagsebesség elérése érdekében csak esetenként meghatározott emelkedési sebességűnél kedvezőbb termikekben kell körözéssel emelkednie.

A fejlődés új iránya az új célok mellett új repülési taktikát is létrehozott. Az optimális átlagsebesség elérésének elméleti és gyakorlati módszereit *M. Z. Olenski* [14], *W. Späte* [16] és még sokak munkája után *P. B. McCready* [13] dolgozta ki. Az új taktika lényege: *távrepülés közben a siklási sebességet mindig az adott időjárási helyzet figyelembevételével a talált és a várható emelkedési sebességek alapján számított értékre kell beállítani.* Ez a sebesség csak a legkritikább esetben egyezik meg a legkisebb merülősebességhez vagy a legjobb siklőszámhoz tartozóval, és azoknál szinte mindig sokkal nagyobb. A siklási taktika eredményességéhez hozzátartozik a körözéssel kihasznált termikek erősségének helyes megválasztása és a leggyorsabb emelkedési képesség is. A korszerű vitorlázó repülőgépekkel szemben támasztott igény tehát így hangzik:

— Legkisebb merülősebessége legyen kicsiny a hozzátartozó siklási sebességgel együtt.

— A legjobb siklőszám nagy legyen, és lehetőség szerint minél nagyobb siklási sebességgel legyen elérhető.

— A siklőszám a szilárdságilag megengedhető legnagyobb siklási sebességek mellett se romoljon túlságosan. Kedvező, ha ekkor még 20 felett marad.

— A gép — különösen körözésben — legyen mozgékony és jól vezethető.

Ezeket a feltételeket igen nehéz egy-egy gépben teljesíteni, mert gyakran egymásnak ellentmondók, és mindenáron való megoldásuk csak a költségekre való tekintet nélkül lehetséges.

Szélsőségként említjük meg, hogy míg a *Sailplane and Gliding* 1933. novemberi száma a *Slingsby* gyakorlógépeket 45 fontért hirdeti, ugyanez a lap 1975. márciusi számában a korszerű gépekre a következő árakat jelöli meg: *Kestrel 22* 8250 font, *Jantar 1* 5700 font, *Calif A—21* 10 500 font stb. Ezek mellett az általános használatú vitorlázógépek ára mérsékeltebb: *Pirat* 2982 font, *Bocian* 2662 font, *Blanik* 3350 font, az élvonalbeli gépek árának tehát 25...40%-a, de még mindig hatvan-szorosa az 1933-as — természetesen jóval kezdetlegesebb gépek — árának.

A konstruktőröknek ezért — sokkal inkább, mint eddig bármikor — el kell választaniuk egymástól az általános használatra, és ezért sorozatgyártásra szánt vitorlázó repülőgépeket a csúcsteljesítményekre tervezettektől.

Már 1929-ben felmerült a gondolat, hogy a különféle méretű és kialakítású vitorlázó repülőgépeket *kategóriákba* kellene sorolni. Erre legkézenfekvőbb lehetőségnek a fesztávolság szerinti osztályozás látszott. Az első tényleges kísérletre a vitorlázó repülőgépek kategóriába sorolása terén azonban csak 1939-ben került sor, amikor is komoly erőfeszítéseket tettek a vitorlázórepülésnek az olimpiai sportok közé való

felvételére. Az ISTUS ezért 1939-ben pályázatot írt ki olyan 15 m-nél nem nagyobb fesztávolságú vitorlázó repülőgépekre (szerkezetük egyszerű, kerék- és ívelőlapmentes, repülőtulajdonságaik pedig kifogástalanok legyenek), amelyek az olimpiai játékokon egységes típusként alkalmazhatók lennének. A szezei (Olaszország) válogatáshoz Magyarországról *Rotter Lajost* és *Rubik Ernőt* hívták meg. A pályázó gépek között a verseny végül a lengyel *Orlik* és a német *Olympia—Meise* között ez utóbbi javára dőlt el.

A vitorlázórepülést mindezek ellenére sem vették fel a mai napig az olimpiai játékok sorába. Az egységes típus bevezetése is 1960-ig váratott magára, amikor is a régi gondolatot az OSTIV (Organisation Scientifique Internationale du Vol à Voile) valósította meg a *szabad* és a *standard osztály* bevezetésével. (Az előbbiek korlátozatlan fesztávolsággal és tetszőleges kialakításban, az utóbbiak 15 m-nél nem nagyobb fesztávolsággal és különböző műszaki korlátozásokkal készülhetnek.) A kategóriák körülhatárolása azóta több ízben is változott, de az egyszerű és olcsó „klub” vitorlázó repülőgép iránti igény egyre inkább fokozódik.

2. A vitorlázó repülőgépek kialakításának elméleti alapjai

2.1. A vitorlázó repülőgép aerodinamikája

A repülés lehetősége a repülőgép levegőben való mozgásának eredménye. A környező levegőhöz viszonyított mozgása következtében olyan erőhatások ébrednek rajta, amelyek a repülést lehetővé teszik.

A repülés lehetősége és a vitorlázó repülőgép jósága *áramlástani kialakításától* függ. Ez határozza meg ugyanis, hogy a repülőgép körül a levegőben létrejövő jelenségek és erők a repülést elősegítik-e vagy gátolják. Az áramlástan a fizikának az az ága, amely a folyadékok áramlásával, az áramlásba helyezett testeken keletkező erőhatásokkal foglalkozik. A levegő áramlástanát *aerodinamikának* is nevezik. A levegő áramlási tulajdonságai — amíg a vitorlázórepülésben is szokásos kis sebességekről van szó — igen hasonlítanak a folyadékok áramlási tulajdonságaihoz.

A levegőben mozgó testekre a tengerszint feletti magassággal csökkenő nagyságú p_{stat} statikus nyomás hat. Ha a test a levegőhöz viszonyítva mozgásban van, akkor a nyomás körülötte — sebességétől és alakjától függően — megváltozik. Ott, ahol a levegő a test előtt kitérve gyorsulni kényszerül és sebessége megnő, a nyomás csökken, ahol pedig a sebesség a testtől nagyobb távolságban levőhöz viszonyítva csökken, a nyomás viszonylag nő. *Bernoulli* törvényének megfelelően az áramlás sebességéből

származó $q = \frac{\rho}{2} v^2$ torlónyomás és a p_{stat} nyomás összege, vagyis $q + p_{\text{stat}} = p_{\text{össz}}$

az áramlás egyes pontjaiban nem változhat. Ha tehát q (vagyis végső soron a v sebesség) nő, akkor p_{stat} -nak csökkennie kell, és ez megfordítva is érvényes.

Az áramlásban beálló nyomásváltozások eredményeképpen a test felületére merőleges erők keletkeznek. Ezek eredője lehet az áramlás irányával párhuzamos (ez az áramlás irányával párhuzamosan elhelyezett szimmetrikus testeken fordul elő), vagy azzal szöget zár be (ez az áramlás irányát tekintve aszimmetrikus testek esetében áll elő).

A repülőgépre ható és a repülést elősegítő vagy hátráltató erők is a levegőben körülötte bekövetkező nyomásváltozások eredményeképpen jönnek létre. Az *aerodinamikai kialakítás* feladata a repülőgép alakjának tervszerű formálása, hogy körülötte éppen a célnak megfelelő és a lehető legjobb hatásfok elérését lehetővé tevő nyomáseloszlás jöjjön létre. A repülést elősegítő erők tehát nagyok, a hátráltatók pedig a lehetőség szerint csökkentettek legyenek.

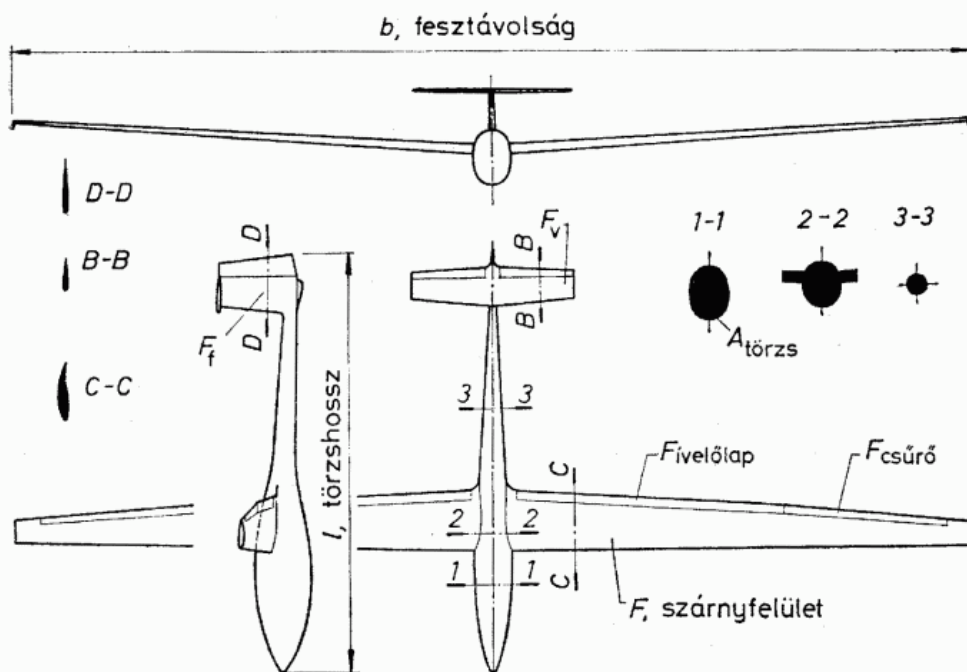
A testek áramlástani tulajdonságait kezdetben a repülőgép tervezője vagy a

repüléssel kísérletező tapasztalta ki. Ma már e tudományág fejlettsége folytán igen sok szélcsatornában végzett kísérlet eredménye áll rendelkezésre, de vannak olyan számítási módszerek is, amelyekkel matematikai úton előre meghatározható valamely test körül adott sebességű áramlásban mutakozó nyomáseloszlás és a keletkező erők. Sőt a kívánt erők elérésére felvett nyomáseloszláshoz is lehet számítással megfelelő alakú testet tervezni. Amíg tehát régen a tervezés egyúttal próbálkozás is volt, az idők folyamán a kísérleti eredmények felhasználásával konkrétabbá vált, ma pedig már szinte teljes pontossággal számíthatók előre a repülőgépek aerodinamikai és repülési tulajdonságai.

A célszerű aerodinamikai kialakítással nem csak a repülőképesség vagy a megfelelő hatásfok biztosítható. A megfelelő kialakítás által tudatosan létrehozott erőkkel és az erők tudatosan szabályozott eloszlásával a repülőgép repülésének stabilitása is előidézhető, továbbá a kormányozhatóság és a repülési tulajdonságok kellemes vagy kellemetlen volta szabályozható.

A helyes aerodinamikai kialakítás tehát a repülőgép tervezésének egyik legfontosabb része. A tervező ezt a repülőgép körvonalainak és különféle (hossz- és kereszt-) metszeteinek célszerű alakításával, a felületek egymáshoz viszonyított arányainak helyes megválasztásával és elhelyezésével éri el.

Az 52. ábrán egy teljesítmény-vitorlázógép három nézetét látjuk a főbb méretekkel, felületekkel és jellegzetes metszetekkel. A törzs felülnézetben az áramlás irányára normál repülésben mindig szimmetrikus. Ekkor rendszerint számottevő mértékben csak ellenállás keletkezik rajta. A farokfelületek szelvényei szimmetrikusak, ezért a kormányfelületek alapállása mellett rajtuk a normál repülés viszonyait tekintve általában szintén csak elhanyagolható nagyságú, főként ellenálláserők keletkeznek. A kormányfelület kitérítésekor ez az állapot megváltozik, és mivel ezzel a farokfelületek már aszimmetrikussá változtak, rajtuk oldalirányú erő is keletkezik.



52. ábra. A vitorlázó repülőgép aerodinamikai kialakítására jellemző fontosabb méretek, felületek és metszetek

A *szárnyak szelvénye* (profilja) vitorlázó repülőgépek esetében mindig aszimmetrikus. Alakjukat *szélcsatornában* kísérletezik ki, és a rájuk ható erőket és nyomatékot az állásszög függvényében állapítják meg. A kikísérletezett szelvények geometriai és légerőtani jellemzőit időről-időre közzé teszik. Azonosításukra betűkből és számokból álló jelölések vannak, amelyekben általában a kísérletező aerodinamikai intézet neve vagy nevének rövidítése is megtalálható. Így beszélünk a szovjet CAGI (Centralnij Aero-Gidrodinamiceszkij Institut), az amerikai NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), a német Gö (Aerodynamische Versuchsanstalt, Göttingen) stb. profilokról. Az utóbbi, mintegy másfél évtizedben jelentkezett *W. Pfenninger*, majd *R. Eppler* és *F. X. Wortmann* számítással készített lamináris profiljaival, ill. profilcsaládjával. Célul a legkedvezőbb nyomásviszonyok létrehozását tűzték ki.

A légerők nagyságát a repülés mechanikájában, tehát a repülőgép repülésével foglalkozó tudományban valóságos nagyságuk szerint *kp*-ban adják meg. Az aerodinamikai vizsgálatokban ez körülményességhez vezetne és felesleges. Itt *dimenzió nélküli erőtenyezőkkal* dolgozunk. Ezek általános összefüggése a légerőkkel:

$$c = \frac{P}{qF},$$

ahol *P* a légerő, *kp*;

$$q = \frac{\rho}{2} v^2 \text{ a torlónyomás;}$$

F a test valamely egyezményes felületének nagysága (felhajtóerő esetén a felhajtóerőt létrehozó testnek az áramlás síkjában vett alaprajzi felülete, ellenállás esetén pedig arra merőleges keresztmetszeti felület).

Az összefüggésből a légerők tulajdonságaira vonatkozólag igen fontos megállapítást tehetünk. Mivel a *q* torlónyomásban a *v* áramlási sebesség négyzete szerepel, mondhatjuk, hogy a légerők nagysága a sebesség négyzetével arányosan változik.

A kísérleti úton kialakított szelvények szélcsatornában megállapított erőtenyezőit azonban nem lehet minden további nélkül a repülőgép esetére is alkalmazni. Az alkalmazhatóság feltétele a *tökéletes geometriai hasonlóság mellett az áramlástani hasonlóság* is, vagyis az, hogy a végleges kivitel körül is ugyanolyan áramkép alakuljon ki, mint a kísérlet folyamán a mintául vett szelvény körül volt. Ezt a feltételt a *Reynolds-számok* hasonlóságával teljesíthetik, vagyis

$$Re_{\text{kisminta}} = Re_{\text{nagy gép}}$$

kell legyen. A következő

$$Re = \frac{lv}{\nu}$$

összefüggésben

l a vizsgált testnek valamely, az áramlás irányával párhuzamosan mérhető mérete (pl. a test hossza);

v az áramlás sebessége;

$\nu = 1438 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ a levegő kinematikai viszkozitása 15 °C hőmérséklet és 760 Hgmm légnyomás esetén.

Az összefüggés az átszámítás módjára ad útbaigazítást, de arra is felhívja a figyelmet, hogy repülés közben a *v* sebesség változásával a *Reynolds-szám* is állandóan

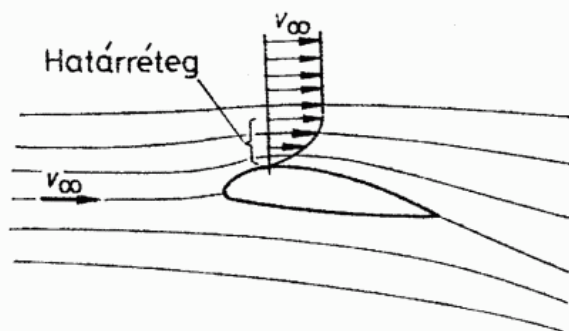
változik, és a vitorlázó repülőgép különböző sebességeken mutatott jóságának alakulására is hatással van. Ez az áramlásba helyezett test körül nemcsak mennyiségi, hanem minőségi változást is létrehoz.

A továbbiak megértése szempontjából kissé alaposabban bele kell mélyednünk az aerodinamika néhány alapvető jelenségébe. Különösen az ellenállást létrehozó és a felhajtóerő nagyságát befolyásoló tényezőkre kell kitérnünk.

2.1.1. A folyadéksúrlódás és a határréteg

A klasszikus áramlástan szerint ideális, azaz súrlódás- és örvénymentes áramlásba helyezett szimmetrikus testeken semmiféle erő nem keletkezik, mivel az áramló folyadékban a test környezetében beálló nyomásváltozás eloszlása szimmetrikus, így a test átellenes felületein párosával egyenlő, de egymással ellenkező értelmű erők keletkeznek. Ez azonban csak ideális áramlási viszonyokra vonatkozik. A levegő távolról sem nevezhető ideális tulajdonságú közegnek, hanem mint minden valóságos folyadékokra és gázokra, rá is jellemző belső súrlódása, viszkozitása. Ez a levegő áramlási jelenségeit döntően befolyásolja.

Amikor egyik szilárd test a másikon elmozdul, közöttük *súrlódás* jön létre. A felépő súrlódóerőt *külső súrlódásnak* nevezzük. A folyadékokban és gázokban súrlódás akkor keletkezik, amikor azok rétegei egymáshoz viszonyítva elmozdulnak. Ezt *belső súrlódásnak* nevezzük. A belső súrlódóerők szabad légáramlatban csekélyek, így maguktól nem hoznak létre örvényeket és ezzel ellenállást. Egy áramlásba helyezett test közvetlen közelében ezzel szemben a viszkozitásnak fontos szerepe van. Amikor a levegő a testet körüláramolja, azok a levegőrészecskék, amelyek vele közvetlenül érintkezésbe kerülnek, nem siklanak végig felületén, hanem rátapadnak és így burokként veszik körül. Az áramlás ezáltal közvetlenül a test felületén lefékeződik, sebessége itt tehát 0, és a szabad áramlás v_∞ sebességére egy viszonylag vékony rétegben gyorsul fel. Azt a réteget, amely a belső súrlódóerők hatása alatt áll, *határrétegnek* nevezzük (53. ábra).



53. ábra. A határréteg

A határréteg jelenlétét kísérletek során állapították meg. Bebizonyosodott, hogy a súrlódás következtében a test felületére tapadó levegőburok a test mozgását követi. Ha pl. egy test a nyugvó levegőben halad, akkor a levegő közvetlen közelében átveszi sebességét, vagyis a test a levegőt mozgásra kényszeríti, magával ragadja. Hasonlóan: ha a levegő áramlik az álló testhez viszonyítva, a testhez tapadó levegőrészecskék lefékeződnének, míg távolabb az áramlás sebessége zavartalan marad. Az áramló levegő mozgási energiájának jelentékeny része fordítódik ilyenkor a belső súrlódóerők legyőzésére.

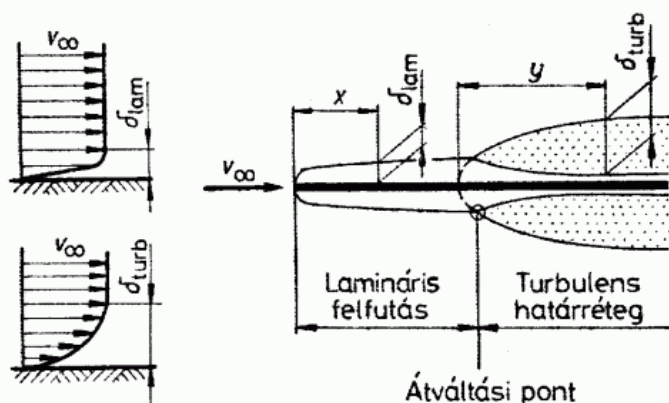
A test körüli áramlás tehát két részre osztható: a test közvetlen közelében a viszkozitás hatása alatt álló *határrétegre* és a *határrétegen kívüli*, gyakorlatilag *súrlódásmentes részre*. A test körüli nyomáseloszlást egyedül ez utóbbi határozza meg, mert a határrétegben a nyomásváltozás akadálytalanul érvényesül.

2.1.2. A testek ellenállása

Az áramlásba helyezett testre ható ellenálláserők két részből tevődnek össze:

- a súrlódási és
- a nyomási vagy alak ellenállásból.

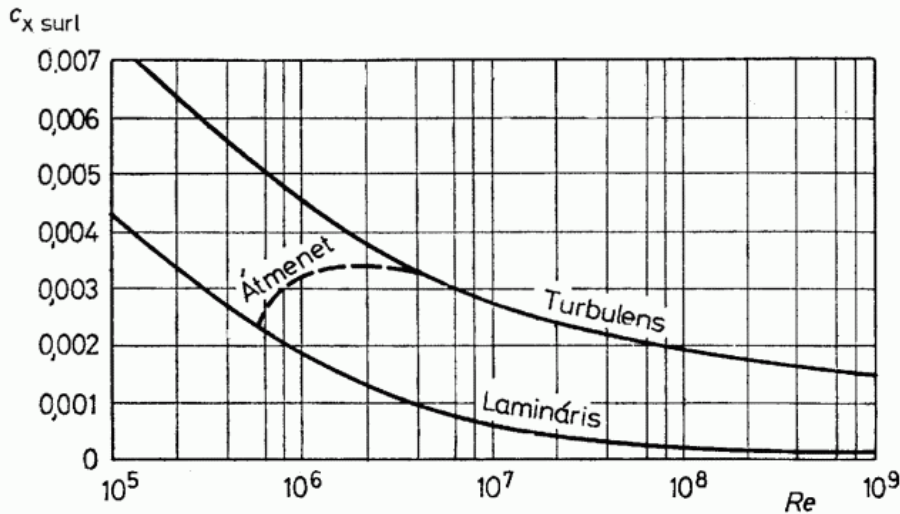
A határrétegben keletkező *súrlódási ellenállás* nagysága a határréteg áramlásának jellegétől függ. Ez lehet lamináris vagy turbulens. A *lamináris* vagy *réteges áramlás* folyadékrészecskéi rendezett áramban haladnak egymás mellett. *Turbulens* vagy *gomolygó áramlásban* azonban az áramlás fő irányára merőlegesen is mozognak. A test orrpontjából kiinduló határréteg minden esetben lamináris, majd az ún. kritikus *Reynolds*-szám elérésekor turbulensbe vált át. A test felületének azt a pontját, amely felett a határréteg áramlása lamináris jellegből turbulensbe vált át, *átváltási pontnak* nevezzük (54. ábra). A test súrlódási ellenállásának nagyságára igen nagy



54. ábra. Lamináris és turbulens határréteg

hatással van az átváltási pont helye és a határréteg jellege. A lamináris határréteg ellenállása kisebb a turbulensénél, viszont alakulását több tényező befolyásolja: nem utolsósorban a test felületének minősége, ugyanis a durvább, szemcsésebb felület ebből a szempontból kedvezőtlen. Növekvő *Reynolds*-szám esetén az átváltási pont a test orrpontja felé vándorol előre, és a turbulens határréteg terjeszkedése a súrlódási ellenállás megnövekedéséhez vezet.

Az 55. ábrán lamináris és turbulens áramlásra síklap $c_{x\text{súrl}}$ súrlódási ellenállástényezőjét ábrázoltuk a *Reynolds*-szám függvényében. Az ábrából kitűnik, hogy különösen kis *Reynolds*-számok környezetében milyen döntő hatású a határréteg jellege a súrlódási ellenállás nagyságára. A *Reynolds*-szám növekedésével a $c_{x\text{súrl}}$ tényező csökken. Ennek magyarázata, hogy a határréteg — akármilyen jellegű is benne az áramlás — a test mentén az áramlás irányába nézve vastagszik. Legvékonyabb a test orrpontján, és az innen kiinduló lamináris határréteg az átváltási pontban a legvastagabb. A határréteg jellege innen kezdve turbulens, az tehát itt a legvékonyabb, és vastagsága hátrafelé egyre fokozódik. Minél vastagabb azonban a határréteg, annál kisebb lesz a helyenként keletkező súrlódóerő.



55. ábra. Sík lap súrlódási ellenállástényezőjének változása a *Reynolds*-szám függvényében

A *Reynolds*-szám ismert összefüggésében l a testnek egy vonatkozási hossza, amit most tekintsünk a test teljes hosszának. Azonos áramlási sebességeket véve figyelembe, a Re -szám csak akkor lehet nagyobb, ha a vizsgált test l hossza is nagyobb. Az áramlás irányában hosszabb méretű testnek tehát kisebb lesz a súrlódási ellenállástényezője, mint az ugyanolyan alakú, de rövidebb testé.

A határréteg általában igen vékony. Egy szárny esetében a szárnyszelvény húr-hosszának rendszerint csak néhány századrészét éri el: 1...1,5 m hosszúság esetén tehát legfeljebb néhány cm vastagságú. A *lamináris határréteg vastagsága* a test orr-pontjától x m távolságban (54. ábra):

$$\delta_{\text{lam}} = 5,83 \sqrt{\frac{\nu x}{v}} \text{ m.}$$

A *turbulens határrétegé* az átváltási pont mögött y m távolságban:

$$\delta_{\text{turb}} = 0,37 \sqrt[5]{\frac{\nu y^4}{v}} \text{ m.}$$

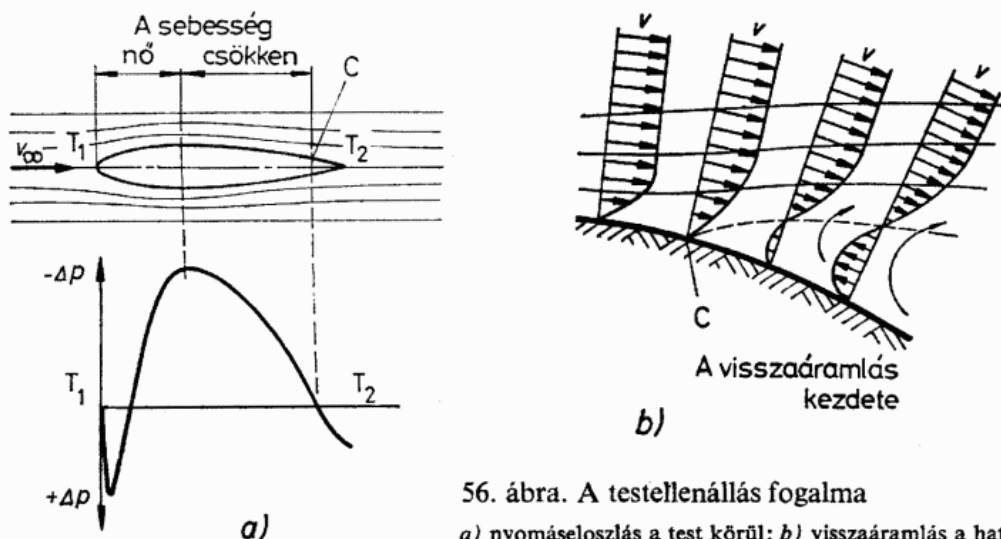
A súrlódási ellenállástényező lamináris határrétegre:

$$c_{x \text{ súrl}} = \frac{1,328}{\sqrt{Re}},$$

ill. turbulens határrétegre:

$$c_{x \text{ súrl}} = \frac{0,455}{\lg Re^{2,58}}.$$

A határrétegnek igen fontos szerepe van a *nyomási* vagy *alaki ellenállás* keletkezésében is. Ívelt felületű test, pl. szimmetrikus, áramvonalas szelvény (56a ábra) körül az áramlás gyorsuló és lassuló szakaszát különböztetjük meg. A sebességek ismeretében a *Bernoulli-tétel* segítségével a nyomáseloszlást is követhetjük a test fala mentén. A szimmetriatengelyben futó áramvonal a test legelső pontjánál szétválk és kétoldalt kitér. E pontban az áramlásnak a testhez viszonyított sebessége $v = 0$. A nyomás



56. ábra. A testellenállás fogalma

a) nyomáeloszlás a test körül; b) visszaáramlás a határrétegben

ezért itt a legnagyobb: $p = p_{\text{össz}}$. A szimmetriatengely két oldalán haladó részecskék sebessége csökken, így a test elő részén nagynyomású rész keletkezik, amelynek közép-pontjában a T_1 torlópont van.

A két oldalon kitérő részecskék sebessége a test görbülete mentén haladva a legnagyobb vastagságáig nő, ahol a p_{stat} nyomás a legkisebb. Ettől kezdve a sebesség állandóan csökken, a nyomás pedig növekszik. Ezen a részen tehát a test közelében futó áramvonalaknak a nyomásnövekedéssel szemben kell haladniuk. Az áramlás mozgási energiája — erős lefékeződése miatt — már a hátsó T_2 torlópont elérése előtt, a C pontban kisebb annál, mint amekkorára a növekvő statikus nyomás legyőzéséhez szükség lenne. Így a folyadék részecskék sebessége csakhamar lecsökken, majd a folyadék részecskék megállnak és a test fala mentén visszafelé kezdenek haladni (56b ábra). A visszaáramlást azonban újabb és újabb részecskék érkezése akadályozza meg, így az áramlás leválik a test felszínéről. A leválási hely mögött örvény keletkezik, amely egyre növekedve marad el a test mögött.

Míg az örvény leválása után a test után elmaradó levegő igyekszik helyreállítani az eredeti, ideális sebesség- és nyomáeloszlást, a határrétegben újabb visszaáramlás és örvényleválás következik be. A test haladása közben így hátsó végének két oldaláról váltakozva maradnak el egymással ellentétesen forgó örvények a határrétegből, hogy a test mögött húzódó örvénysort alkossanak. Az örvénysor keletkezéséhez szükséges és az áramlás mozgási energiájából elvont energia alaki ellenállásként érvényesül, amely annál kisebb, mennél keskenyebb sávban húzódik az örvénysor a test mögött. Minél közelebb helyezkedik el a leválási pont a test orrpontjához, annál szélesebb lesz az örvénylő rész. Hogy az alaki ellenállás csekély legyen, a testeknek lehetőleg áramvonalas alakot adnak, amely a legnagyobb vastagsága mögött minél hosszabb szakaszon keskenyedik el.

A lamináris határréteggel ellentétben a turbulens határréteg a külső áramlásból is képes mozgási energia felvételére (ugyanis a részecskék ennél az áramlási formánál a haladás fő irányára merőlegesen is mozognak, tehát az áramlás keveredik). Az így megnövekedett energiájú határréteg továbbhaladhat a nyomásnövekedéssel szemben, mint a lamináris. A leválási pont ezért ilyenkor hátrább tolódik.

Valamely test ellenállása a súrlódási és az alaki ellenállásból tevődik össze:

$$X_{\text{test}} = X_{\text{súrl}} + X_{\text{alaki}},$$

vagy az áramlástanban szokásos módon egyedül a test alakjától függő erőtenyezővel

kifejezve az ellenállástényező:

$$c_{x \text{ test}} = c_{x \text{ súrl}} + c_{x \text{ alaki}}.$$

A test alakjától függő ellenállástényezőt úgy is értelmezhetjük, hogy az 1 m^2 keresztmetszeti felületű testnek 1 kp/m^2 nagyságú torlónyomás esetén $c_{x \text{ test}}$ kp ellenállása van.

Bármely test kp-ban kifejezett ellenállása ezután:

$$X_{\text{test}} = c_{x \text{ test}} q F,$$

ahol q a torlónyomás;

F általában a testnek az áramlás irányára merőleges keresztmetszeti felülete.

Láttuk, hogy a testek ellenállása döntő módon függ a határréteg jellegétől és alakulásától. A súrlódási ellenállás a lamináris, az alaki ellenállás pedig a turbulens határréteg esetében kisebb. Bár a turbulens határréteg nagyobb súrlódási ellenállással jár együtt, a később bekövetkező leválás miatt a test ellenállása — amelyet repülőgépszárnyak esetében *profilellenállásnak* is nevezünk (és $c_{x \text{ pr}}$ -rel jelölünk) — végeredményben kisebb lehet.

2.1.3. A végtelen terjedtségűnek tekintett szárny körüli áramlás jelenségei

2.1.3.1. A szárnyra ható erők és nyomatékuk

A repülőgép szárnyfelületeként alkalmazott, az áramlás irányában aszimmetrikus metszetű testek közös jellemzője, hogy a rajtuk keletkező légerők eredője nem párhuzamos az áramlás irányával, hanem ferdén hátrafelé mutat. Így tehát nemcsak az áramlás irányával párhuzamos X ellenállás összetevőjével kell számolnunk, hanem az arra merőlegessel is.

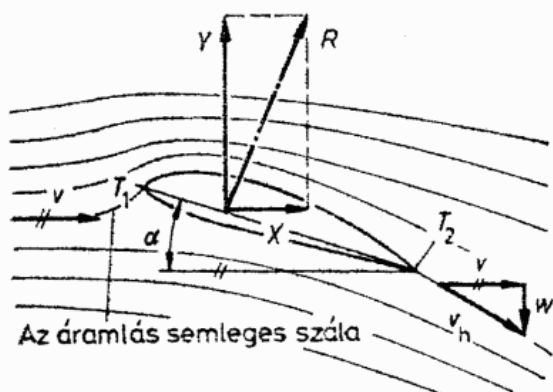
A merőleges Y összetevő nagysága általában az ellenállásának többszöröse, ezért a repülésben felhajtóerőként hasznosítjuk. A szárny metszetei (szelvényei) körül az áramlásban létrejövő változásokat tehát a végtelennek tekintett szárny esetében kizárólag a síkbeli szelvények alakja és az áramláshoz viszonyított helyzete hozza létre. Az egyszerűség kedvéért egyelőre tekintsük a szárnyat végtelen hosszúságúnak. Ezzel azt érjük el, hogy az áramlás a szárny minden egyes metszete körül teljesen egyformán megy végbe, és a szárny egymás melletti szakaszai semmiben sem befolyásolják egymást.

Az áramlásra merőleges erő keletkezését a *Bernoulli-tétel* alapján magyarázhatjuk. Az áramlási sebességben a szárny alatt és felett — annak aszimmetrikus volta miatt — előálló különbségek folytán a levegő nyomása a szárny körül nem oszlik meg többé egyenletesen, hanem felette — a nagyobb távolságban zavartalan áramláshoz viszonyítva — nyomáscsökkenés, alatta pedig, mint pl. az 57. ábrán látható esetben, nyomásnövekedés keletkezik. Ez az aszimmetrikus nyomáseloszlás eredményezi, hogy az R eredő erő az áramlás irányával 90° -hoz közelítő szöget zár be.

A nyomáseloszlás eredményeképpen keletkező R eredő légerőt felbonthatjuk az áramlás irányára merőleges Y felhajtóerő-összetevőre, és az áramlás irányával párhuzamos X ellenállásösszetevőre. Az összetevők és eredőjük közötti összefüggés a következő:

$$R = \sqrt{Y^2 + X^2},$$

57. ábra. A felhajtóerő létrejötte



ill. az egységnyi torlónyomásra és felületre vonatkoztatott erőtenyezőkkel:

$$c_r = \sqrt{c_y^2 + c_x^2}.$$

A kilopondokban kifejezhető felhajtóerő ezzel:

$$Y = c_y q F,$$

az ellenállás pedig

$$X = c_x q F.$$

Az utóbbi két összefüggésben F a szárny alaprajzi területe.

Az R légerő irányának és nagyságának — tehát a felhajtóerőnek és az ellenállásnak — alakulása számos tényezőtől függ. Ezeket a következőkben részletesen sorra vesszük. Az egyik legfontosabb közülük a szárnynak az áramlás irányához viszonyított helyzetét jellemző α állásszög. Az állásszög fogalmát az 57. ábra alapján értelmezhetjük.

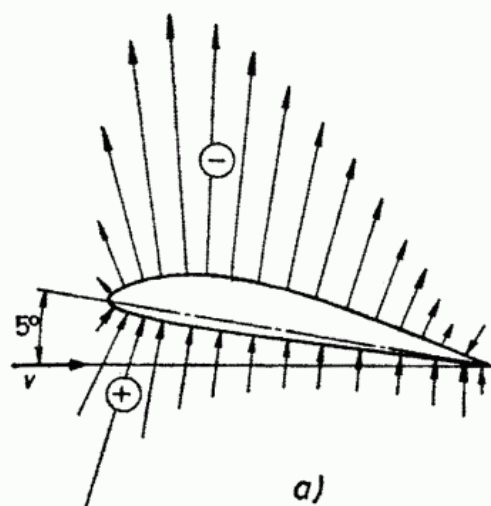
Az R légerőt előidéző nyomáskülönbségeket kísérleti úton vagy számítással határozzák meg, majd az eredményt diagramban ábrázolják. Az abszcisszára a szelvény hosszát, ordinátákként pedig a szelvény hosszának egyes helyeihez megállapított nyomásértékeket vagy ezeknek a torlónyomáshoz viszonyított $\Delta p/q$ arányát ábrázolják. E diagramok segítségével bármely állásszögre megismerhetjük a nyomáseloszlás képét. A nyomáseloszlást ábrázoló görbék által határolt területek nagysága a keletkező felhajtóerő nagyságával arányos.

Az 58a ábrán a Gö 549 szelvény körül létrejövő nyomáseloszlást ábrázoltuk olyan módon, hogy a szelvény hosszának különböző helyein mért $\Delta p/q$ relatív nyomásértékeket a szelvény körvonalára merőleges vektorokként rajzoltuk fel. Az ábra további részein (b és e) a különböző állásszögek esetében megállapított nyomáseloszlások diagramjait is ábrázoltuk. Feltűnő, hogy a nyomásváltozás nagyobb rész (mintegy kétharmad részében) a szárny feletti csökkenésből, és csak kisebb részben az alatta bekövetkező nyomás növekedéséből tevődik össze.

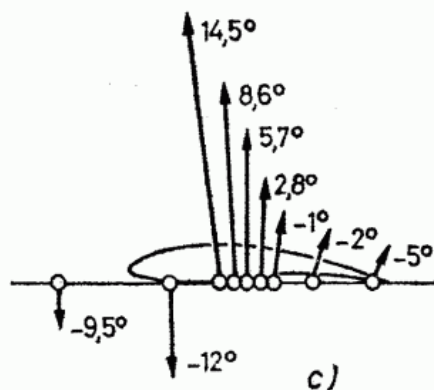
Változó állásszög esetén a nyomáseloszlási görbéknek nemcsak a területe, hanem az alakja is változik. A görbék csúcspontja növekvő állásszöggel egyre közelebb kerül a szelvény orrpontjához. Ennek az az oka, hogy a T_1 torlópon (l. az 57. ábrán) nagyobb állásszögekkel a szelvény orrpontja alá tolódik el, ezért a *semleges szál* felett haladó áramvonalaknak erősen fel kell gyorsulniuk az orr-rész megkerüléséhez. Ez azzal jár, hogy a nyomáseloszlásból keletkező légerő eredője sem mindig a szelvényhossz azonos helyén ébred, hanem az állásszögtől függően előre-hátra vándorol. Támadási pontját a *szelvény nyomásközéppontjának* nevezzük. A nyomásközéppont különböző állás-

szögek esetén elfoglalt helyzetét az 58c ábrán láthatjuk, és feltűnő, hogy az eredő hatásvonala a szárnyon kívül is lehet. Mi ennek a magyarázata?

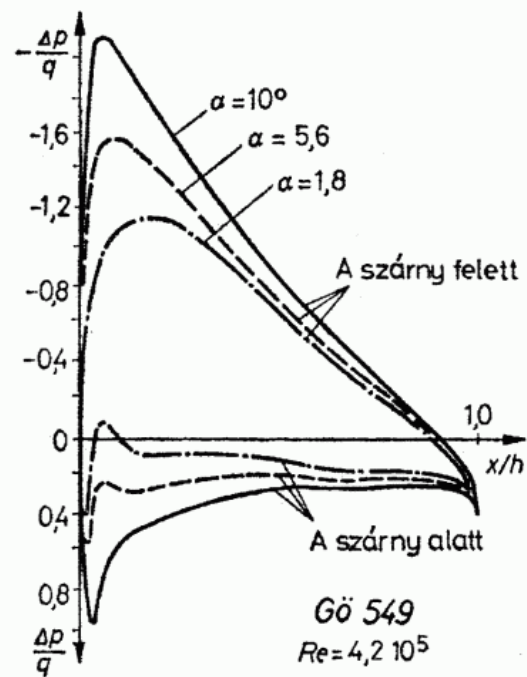
Az eredő a már említett ok miatt az állásszög növekedésekor a szárny belépőjele felé vándorol, és ezért a nyomásváltozásban növekszik a nyomáscsökkenés részará-



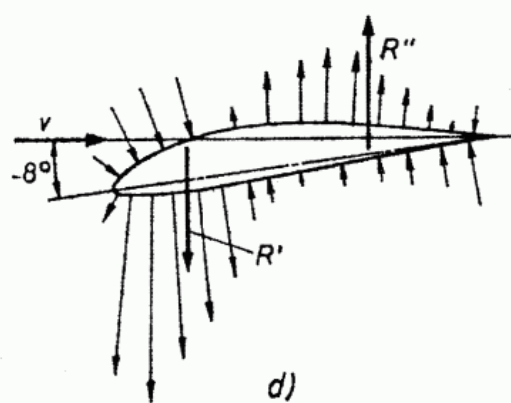
a)



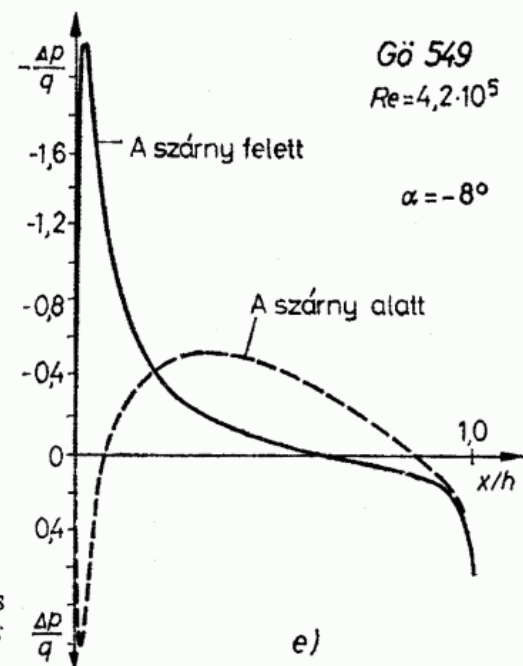
c)



b)



d)



e)

58. ábra. A szárnyszelvény körüli nyomáeloszlás alakulása különböző állásszögekkel (a, b, d, e): a nyomásközéppont vándorlása (c)

nya. Ha az állásszög csökken, a nyomáskülönbségek a kilépőél felé növekednek, az orr-részen pedig csökkennek, az eredő pedig a kilépőél felé vándorol. Bizonyos negatív állásszög elérésekor az állásszög változásait követő T_1 torlópont már az orr-rész felett található, az orr-részt lefelé megkerülő áramlás ezért a belépőél alatt is nyomáscsökkenést okoz. Akkor, amikor a szárny feletti nyomáseloszlás az alatta bekövetkezővel egyenlővé válik, vagyis $\Sigma p_{\text{felül}} - \Sigma p_{\text{alul}} = 0$, akkor a felhajtóerő megszűnik. (Ez az eset a repülőgép függőleges zuhanásának felel meg.) Ha azonban a szárny feletti és alatti nyomáseloszlások eredőjét külön-külön képezzük, *erőpárt* kapunk (58d ábra). Az erőpár eredője — mechanikai értelmezése szerint — a végtelenben van, ezért jelen esetben az egész szárny körül nyomáseloszlás eredőjének hatásvonala kívül esik a szárnyon.

Az 58c és d ábrán látható, hogy bizonyos negatív állásszögekkel a szelvény elő-részen lefelé, a kilépőél előtti részen pedig felfelé ható erők egymással ellentétes irányúak, de egyenlő nagyságúak, így a felhajtóerő szempontjából hatásuk megsemmisíti egymást. Emellett azonban erőpárként olyan nyomatékot hoznak létre, amely a szelvényt orra buktatni igyekszik. Még nagyobb negatív állásszögek mellett az eredő (most már ismét 0-tól eltérő nagysággal, de negatív, vagyis lefelé mutató értelemmel) a belépőél előtt jelenik meg, és fokozatosan közeledik a szárnyhoz, míg ismét eléri azt. Ez az eset a háton repülésnek felel meg.

A legtöbb szárnyszelvénynek van egy, a repülés szempontjából szerencsésnek nevezhető tulajdonsága. Az ugyanis, hogy a nyomásközéppont a repülésben használatos állásszögek tartományának jelentős és egyben legfontosabb részében csak igen kevésbé vándorol, és a szelvény hosszának az orrpont mögött levő 25%-a körül ingadozik. Ezt a pontot a szárnyszelvény *aerodinamikai középpontjának* nevezik, és *AC* betűkkel jelölik. A légerők által kifejtett, és az állásszöggel a leírt módon változó nyomatékot célszerűen az aerodinamikai középpontra vonatkoztathatjuk. Ha emellett a nyomatékot létrehozó légerő nagyságát a c_y felhajtóerő-tényezővel jellemezzük, hatásvonalának *AC*-től vett távolságát pedig s -sel jelöljük, akkor a nyomaték nagyságát az

$$M = Ys = c_y q F s$$

alakban fejezhetjük ki. Ha az eredőnek az *AC*-től vett távolságát — használhatóbb módon — a szelvény h hosszának százalékában, $s' = \frac{s}{h}$ alakban fejezzük ki, akkor az

$$M = c_y q F \frac{s}{h} h$$

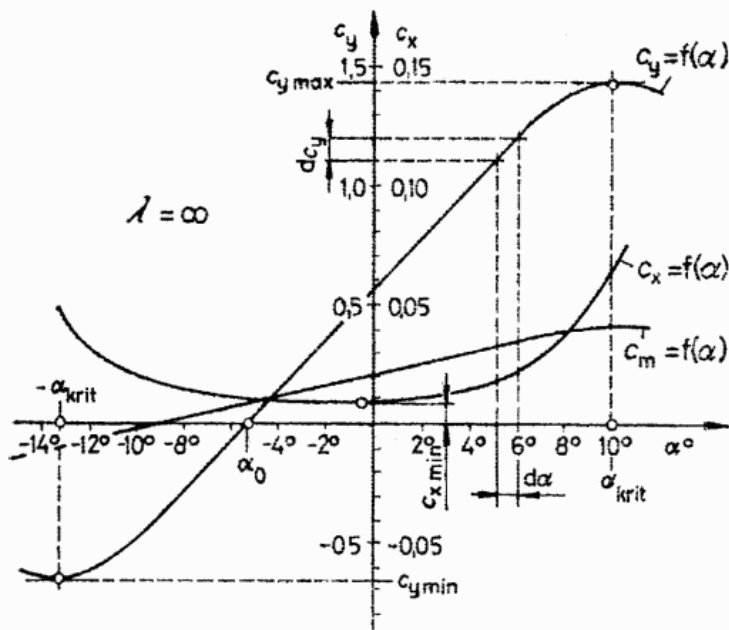
kifejezést kapjuk. Az itt előforduló $c_y \frac{s}{h} = c_m$ szorzat a dimenzió nélküli *nyomatéki tényező*. Ezt az előző képletbe helyettesítve:

$$M = c_m q F h.$$

A c_m nyomatéki tényező a szárnyszelvény egyéb aerodinamikai jellemzői között szerepel, és az állásszöggel változó nagyságú.

A szárnyszelvények aerodinamikai tulajdonságait jellemző c_y , c_x és c_m tényezőket szemléletesen az állásszög függvényében ábrázolhatjuk (59. ábra). Ebből az ábrázolásból a szárnyszelvények tulajdonságaira nézve fontos megállapításokat tehetünk.

Legelőször is azt látjuk, hogy a c_y felhajtóerő-tényező kis állásszögek mellett az állásszöggel lineárisan változik. Nagy állásszögek esetén azonban ettől némiképpen eltér, és a lineáris növekedés esetében várhatónál valamivel alacsonyabb értékeket



59. ábra. A légerőtani jellemzők ábrázolása az állásszög függvényében

mutat. Ennek oka a szelvény szívott oldalán a nagy állásszögek miatt bekövetkező áramlásleválás. Nagy negatív állásszögek környezetében a görbe hasonlóan alakul. Az állásszöget tovább növelve a felhajtóerő-tényező egy $c_{y\max}$ értéknél nem növekszik tovább. Az áramlás e kritikus állásszög (α_{krit}) elérésekor leszakad a szárny szívott oldaláról, a felhajtóerő rohamosan csökken, és a repülés lehetősége ezzel megszűnik. A jelenség neve *átetés*, mivel ilyenkor a repülőgép csak magasságvesztés árán képes ismét α_{krit} alá csökkenteni szárnya állásszögét.

A görbéből a szárnyszelvény geometriai kialakítására is következtethetünk. Szimmetrikus profil esetén a c_y görbe átmegy a koordinátarendszer kezdőpontján, ez a szelvény ugyanis $\alpha = 0^\circ$ -os állásszög esetén nem ad felhajtóerőt. (A vitorlázó repülőgépen ezeket ezért a farokfelületekhez alkalmazzák.) Minél íveltebb a szelvény, annál kisebb állásszögekkel éri el ugyanazt a felhajtóerő-tényezőt. Ezért, ha az íveltséget növeljük, a $c_y = f(\alpha)$ görbe egyre inkább balra tolódik el a koordinátarendszerben. A szelvény ún. *nullafelhajtóerő irányát* (α_0), ami nem más, mint a $c_y = 0$ értékhez tartozó állásszög, a görbe és az állásszögtengely metszéspontja adja. Ez tehát az az állásszög, amellyel a szelvényen nem képződik felhajtóerő. Ívelt szelvényeknél α_0 mindig negatív szög.

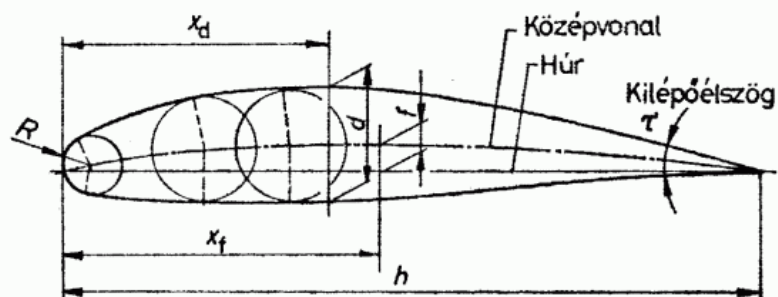
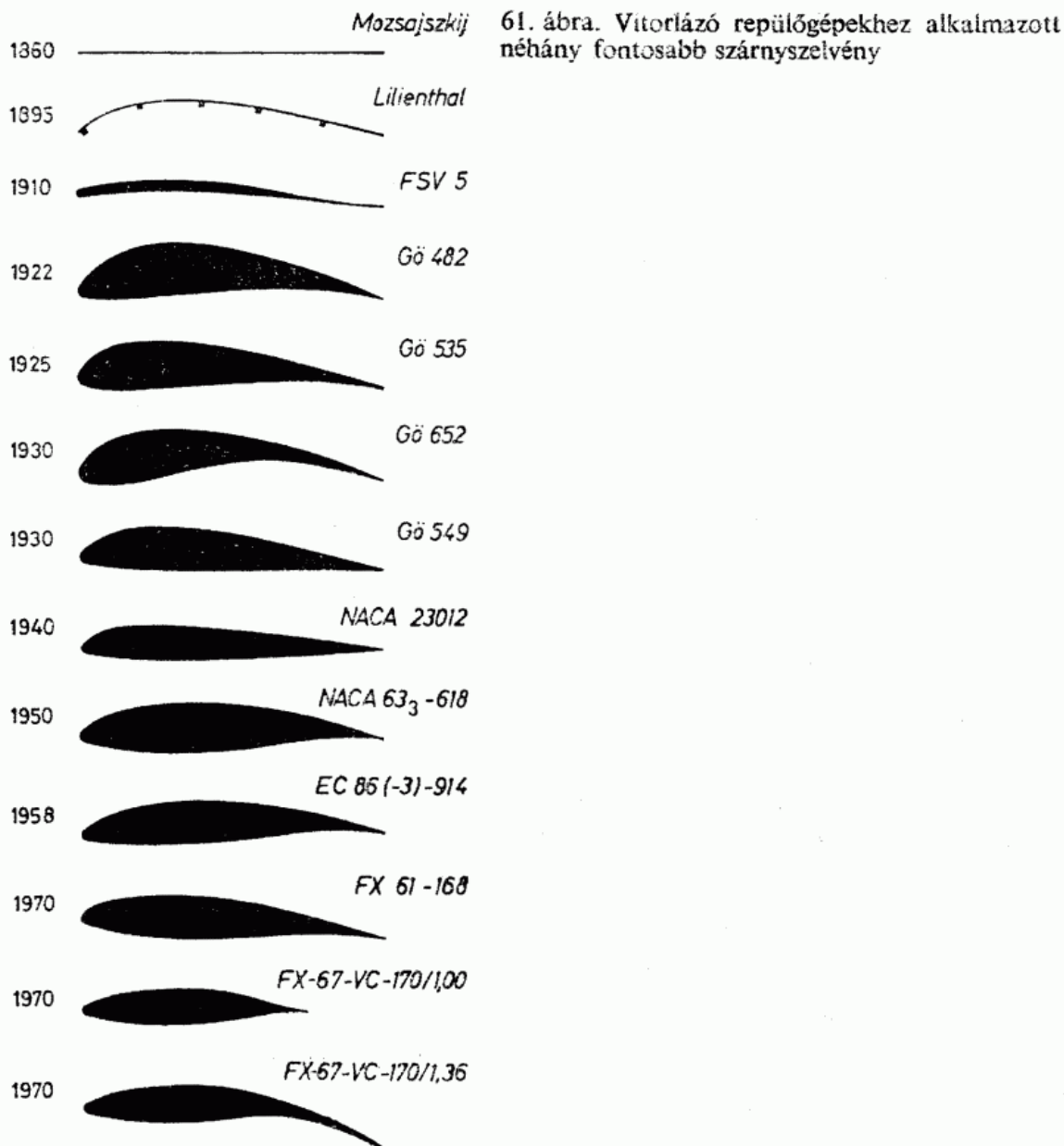
A $c_y = f(\alpha)$ görbe meredeksége azt szemlélteti, hogy az állásszög változásakor milyen mértékben változik a felhajtóerő-tényező. Ha az

$$a = dc_y/d\alpha$$

hányados értéke nagy, már viszonylag kis állásszögváltozásra is nagy a felhajtóerő-tényező-változás.

Az ellenállástényező kis állásszögek esetében nem tér el jelentősen $c_{x\min}$ -től. Az állásszög növelésekor azonban ($-\alpha$ és $+\alpha$ esetén egyaránt) nőni kezd, majd amikor a szelvény szívott oldaláról a $c_{y\max}$ elérése előtti leválás megindulnak, c_x rohamosan nő.

A c_y , c_x és c_m tényezőket igen áttekinthetően ábrázolhatjuk a *Lilienthal*-féle polárdiagramban is. Ez tulajdonképpen két görbét tartalmaz: a $c_y = f(c_x)$ és a $c_m = f(c_y)$ függvényét. A két görbéből a szelvény valamennyi lényeges, jellemző tulaj-



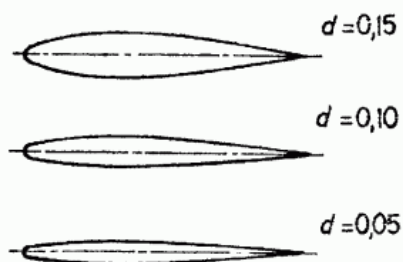
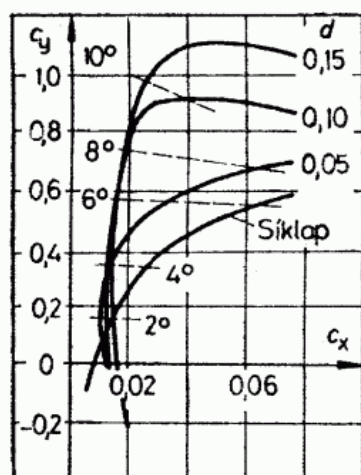
62. ábra. A szárnyszelvény geometriai jellemzői

A szárnyszelvények aerodinamikai tulajdonságai elsősorban geometriai kialakításuktól függenek. Ezek közé tartozik a szelvény legnagyobb d vastagsága, az f ívelttség, x_d a legnagyobb vastagság és x_f az ívelttség helye a szelvény orrpontjától mérve, végül R az orrgörbület sugara (62. ábra). Az általánosíthatóság érdekében ezeket az adatokat a h húrhossz százalékaként adják meg.

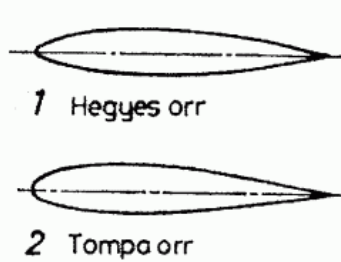
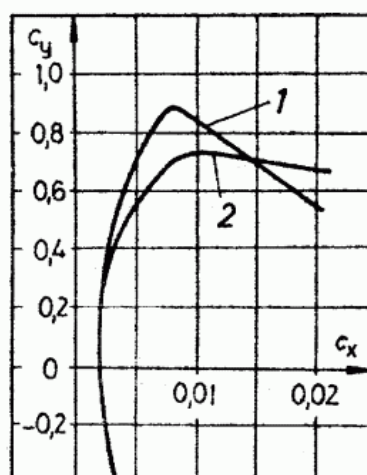
A szárnyszelvényeket két csoportra oszthatjuk: *hagyományos* és *lamináris szelvényekre*. Mindkét csoportba tartozók egyformán alkalmasak a vitorlázó repülőgépekhez. A régebbi vitorlázó repülőgépek hagyományos szárnyszelvénnel készültek, a korszerű teljesítmény-vitorlázógépek azonban szinte kivétel nélkül lamináris profillal. Ezekről később még bővebben lesz szó. Itt most a szelvények legfontosabb tulajdonságait a hagyományos kialakításúak példáján világítjuk meg, de az itt tett megállapítások a lamináris szelvényekre is érvényesek.

Mindenekelőtt vizsgáljuk meg, hogyan befolyásolja a c_y és c_x tényezők alakulását a d szelvényvastagság.

A határrétegről és az ellenállásról elmondottak alapján könnyen beláthatjuk, hogy a vékonyabb szelvények ellenállása kisebb a vastagabbakénál (l. a 63a ábrát, ahol különböző d vastagságú szimmetrikus szelvények polárgörbéit hasonlítjuk össze egymással). A vastagság növekedésével azonban az ellenállással együtt a szelvény $c_{y \max}$ legnagyobb felhajtóerő-tényezője is nő. Ennek oka, hogy a vastagabb szelvény orrának lekerekítési sugara általában nagyobb a vékonyabbakénál, és ez elsősorban α_{krit} környékén érezteti hatását. Ha ugyanis az orrgörbület kicsi, azaz a sugár nagy, $c_{y \max}$ megközelítésekor az áramlás nem válik le hirtelen a szelvény egész felső oldaláról, hanem csak fokozatosan halad előre az orr felé. A hegyesorrú, tehát általában a vékonyabb szelvényeken az áramlás sokáig zavartalanul simulhat a szárny felületére, de a leválás hirtelen következik be, és az egész szárnymélységre kiterjed. A 63b ábrán két szimmetrikus szelvényt ebből a szempontból hasonlítottunk össze. Vastagságuk és a legnagyobb vastagság helye azonos. A hegyesebb orrú szelvény polárgörbéjén az

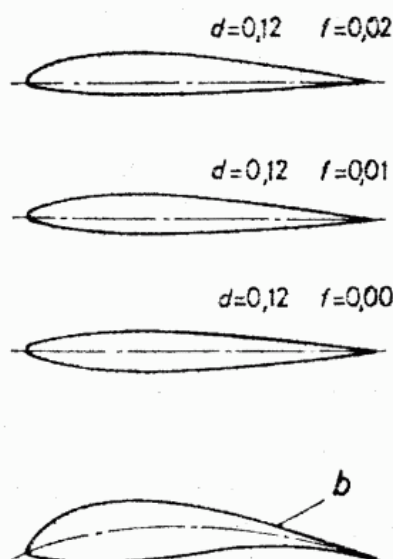
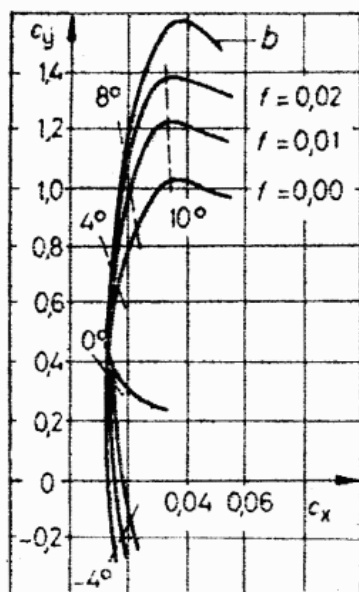


a)



b)

63. ábra. a) Különböző vastagságú szimmetrikus szelvények polárgörbéi; b) a szelvény orrkiképzésének hatása a polárgörbe alakulására



64. ábra. Különböző íveltségű, de azonos vastagságú szelvények polárgörbéi

áramlás hirtelen leválását $c_{y \max}$ elérése után a görbe éles letörése jelzi. Az ilyen szelvényű repülőgép átesése hirtelen és kellemetlen. A nagyobb sugárral lekerekített tompa orrú szelvényeken a leválás sokkal fokozatosabb, az átesés ezért enyhébben következik be. A két szelvény tulajdonságai között kis állásszögek esetén nincs eltérés.

Szimmetrikus szelvényekkel viszonylag kicsi $c_{y \max}$ érhető el, ezért ezeket vitorlázó repülőgépeken csak a farokfelületekhez alkalmazzák. Az elérhető maximális felhajtóerő-tényezőt a középvonal ívelése az ívelés mértékével arányosan növeli meg (64. ábra). Ugyanakkor az ellenállástényező kisebb, mint a szimmetrikus szelvények esetében. Ebből az a tanulság vonható le, hogy a felhajtóerőt eredményesebben növelhetjük a középvonal ívelésével, mint a vastagság fokozásával. Az íveltség és a vastagság egymáshoz való viszonyának van egy optimális értéke, a tulajdonságok romlása nélkül ugyanis egyik sem növelhető korlátlanul. Ez az optimális viszony kb. $d = 12\%$ vastagság és $f = 2\%$ íveltség esetében áll fenn. Régebben, a lejtőrepülés időszakában a kis merülősebességű, de lassú vitorlázó repülőgépekhez ezeknél vastagabb és íveltebb szelvényeket is alkalmaztak (a 64. ábrán b -vel jelölt szelvény és polárgörbe). Az erősen ívelt szelvényeknek azonban hátrányuk, hogy nyomásközéppont-vándorlásuk nagy.

A szimmetrikus szelvények polárgörbéinek c_x tengely alatti és feletti része egymásnak tükörképe. Ez azt jelenti, hogy ezek a szelvények a negatív és a pozitív állásszögek tartományában egyformán viselkednek. A vastagság növelése a görbét a c_y tengely mindkét irányában megnyújtja, az íveltség fokozása pedig a pozitív felhajtóerő-tényezők felé tolja el az egész polárgörbét. Ez utóbbi megállapítás egyben azt is jelenti, hogy az íveltebb szelvények legkisebb ellenállástényezője ($c_{x \min}$) nagyobb c_y értékekhez tartozik, mint a kevésbé ívelteké. Az ívelt szelvények legnagyobb negatív felhajtóerő-tényezője is kisebb, mint a pozitív értéke. Műrepülőgépek számára tehát a kevésbé ívelt szelvények az alkalmasabbak, mert tulajdonságaik háton repülésben sem különböznek lényegesen a normál repülési helyzetben megszokottaktól.

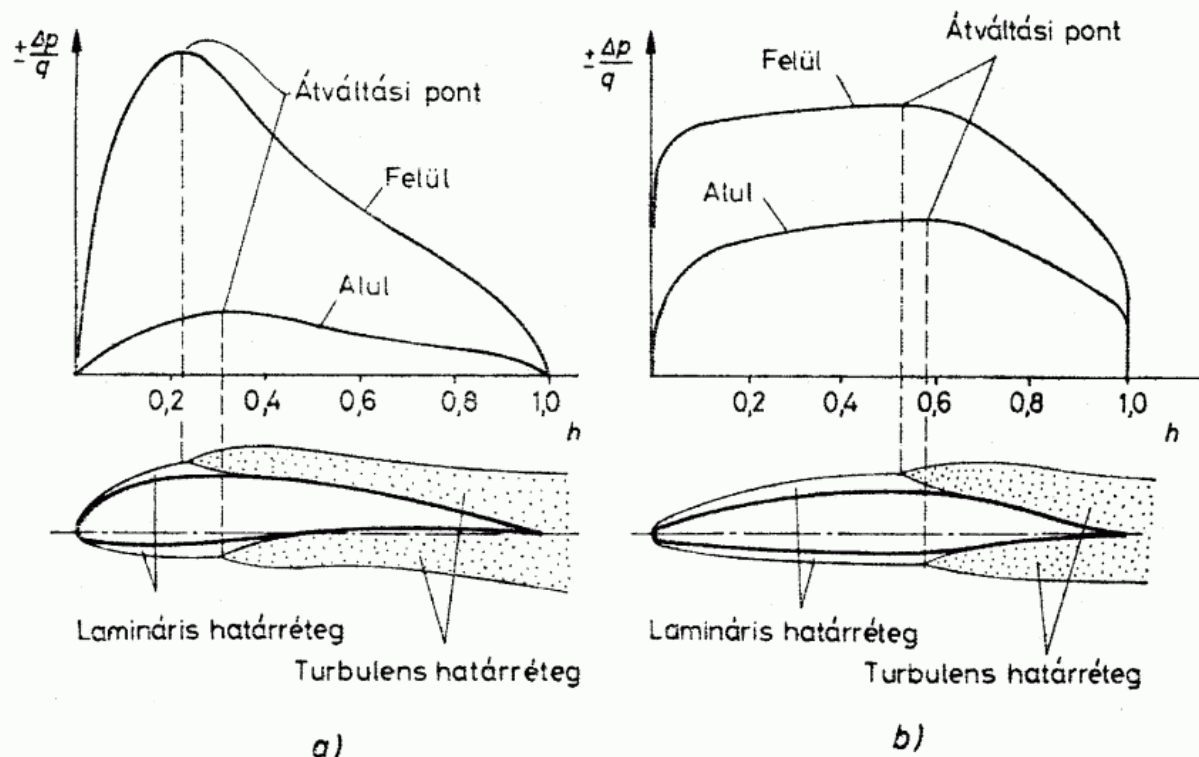
Arra a kérdésre, hogy az ívelt középvonal x_f helyének mi az optimális értéke, nem lehet ilyen egyszerűen válaszolni. Elsősorban attól függ, milyen tulajdonságokat várunk a szelvénytől, de éppen ezért a vastagságtól és a középvonal alakjától is függ. Ha a szelvénytől nagy $c_{y \max}/c_{x \min}$ viszonyt várunk, és vastagsága a húrhossz 30% -ában van, akkor az íveltség legkedvezőbb helye kb. a húrhossz 40% -a. Ha azonban

a legnagyobb vastagság helye $x_d = 0,5$, azaz a húrhossz 50%-a, akkor a legkedvezőbb, ha $x_f = 0,45 \dots 0,5$. Ezzel el is értünk a korszerű szárnyszelvények egyik legfontosabb jellemzőjéhez, a *legnagyobb vastagság* x_d helyéhez.

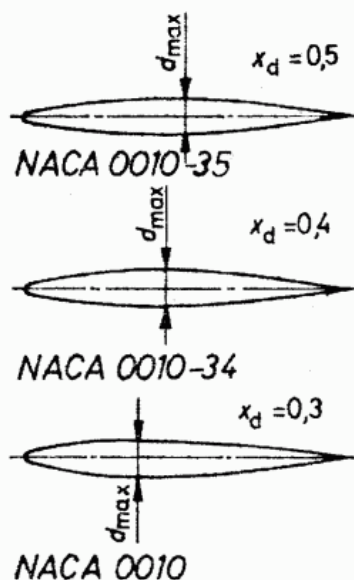
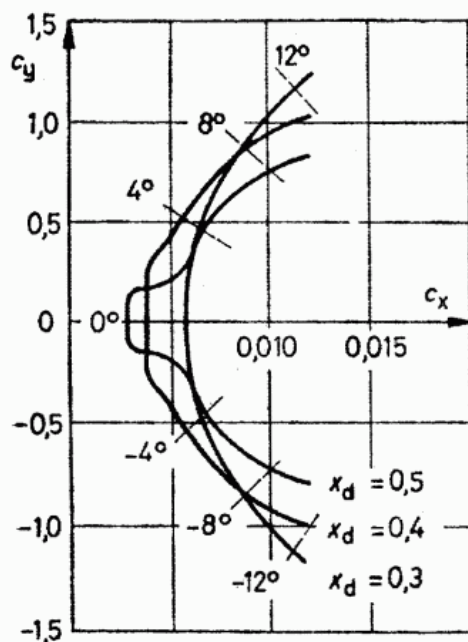
Az első használható szárnyszelvények legnagyobb vastagsága mindig kb. a húr-hossz 30%-ában volt, és erősen ívelték őket. Profilellenállásuk kis c_y értékeknél fő-ként a sűrűdési ellenállásból állt. A sűrűdési ellenálláshoz viszonyítva az alaki ellenállás kicsiny. Ha tehát a profilellenállást csökkenteni akarjuk, nyilvánvalónak tűnik, hogy elsősorban a határréteg sűrűdési ellenállását kell csökkentenünk. Mint korábban láttuk, a legkisebb sűrűdési ellenállást a lamináris határréteg okozza. Célszerű tehát arra törekedni, hogy a szelvény körül a határréteg lamináris szakasza minél hosszabban fennmaradjon. Más szavakkal, az átváltási pontot — amennyire csak lehet — a kilépőél irányába kell eltolni.

A lamináris határréteg létrejöttének fontos feltétele, hogy a nyomás a szelvény húr-hossza mentén minél hosszabb szakaszon legyen csökkenő jellegű. Ez akkor lehet-séges, ha ezen a szakaszon az áramlás sebessége állandóan növekszik. Ahol a nyomás-változás jellege megváltozik, tehát ahol az addig fennálló nyomáscsökkenés nyomás-növekedésbe megy át, ott a lamináris határréteg turbulensbe vált át. A legnagyobb nyomáscsökkenés a szelvény legnagyobb vastagságának helyén van. Ebből az követ-kezik, hogy a lamináris határréteg a szárnymélység hosszú szakaszán fenntartható a legnagyobb vastagság helyének a kilépőél irányába való eltolásával. Mivel a leg-nagyobb vastagság mögött az áramlásnak még örvénymentesen kell a szelvényről lefolynia, a d vastagság lehetséges leghátsó helyének éppen a vastagság értéke szab határt.

Azokat a szárnyszelvényeket, amelyek körül a határréteg a húr-hossz 40...60%-áig lamináris marad, lamináris szelvényeknek nevezzük. (A hagyományos szelvények határ-rétege legjobb esetben 20...30% húr-hosszig marad lamináris.) A 65. ábrán, ahol



65. ábra. Hagyományos (a) és lamináris szárnyszelvény (b) határrétege és nyomáeloszlása. A határ-réteg vastagsága erősen nagyított



66. ábra. Lamináris szelvények jellegzetességei

a hagyományos és a lamináris szelvények határretegviszonyait hasonlítjuk össze, jól látható, hogy az utóbbiak alsó körvonala általában kevésbé ívelt, a nyomásváltozás ezért ott viszonylag kisebb mértékű, de tovább tart, mint a felső körvonal felett. A szárny alsó részén ezért az átváltási pont közelebb kerül a kilépőélhez, mint a szárny felett. A határreteg lamináris volta tehát alul tovább fenntartható, mint a szárny felett. Figyeljük meg még az ábrán a kétféle szárnyszelvény nyomáseloszlási görbének alakját, és figyeljünk fel a lamináris szelvény körül hosszú szakaszon csak csekély mértékben változó voltukra. Később látni fogjuk, milyen kényesen reagálnak ezek a határreteg megzavarásaira és a szelvény körvonalának pontatlanságaira.

A 66. ábrán három 10% vastagságú, szimmetrikus *NACA* szelvényt ábrázoltunk, amelyek legnagyobb vastagsága a húrhossz 30, 40 és 50%-ában van. A *NACA 0010* szelvények polárgörbéje a már ismert módon alakul, a *NACA 0010-34* szelvényé azonban már eltér a szokásostól. Feltűnik a görbének egy olyan szakasza, ahol az ellenállástényező a c_y tényező változása ellenére gyakorlatilag változatlan marad. Ez eddigi ismereteinkkel szemben merőben új jelenség, és nyilvánvalóan annak a következménye, hogy e szakasza által jellemzett állásszögtartományban a határreteg a szelvény húrhosszának jelentős részén lamináris. A görbe a legkisebb ellenállástényezőket jellemző szakaszon kívül — pozitív és negatív felhajtóerő-tényezőknél egyaránt — az ellenállástényező hirtelen megnövekedését mutatja, az átváltási pont gyors előrevándorlása miatt előbb az átmeneti, majd a teljesen turbulens határreteget jelezve. A *NACA 0010-35* szelvény c_x tényezője a lamináris szakaszon még kisebb, mint az előzőé volt, de a lamináris szakasz most kisebb állásszögtartományra terjed ki.

A szárnyszelvények jellemző tulajdonságairól összefoglalóul a következőket mondhatjuk:

— A szimmetrikus szelvények ellenállása viszonylag kicsiny. Felhajtóerő-tényezőjük (amely $\alpha = 0^\circ$ esetén $c_y = 0$) elsősorban az állásszög nagyságától függ, és adott állásszöggel a különféle vastagságú szimmetrikus szelvények közel azonos c_y értéket érnek el. $c_{y \max}$ tényezőjük az egyéb kialakítású szelvényekéhez viszonyítva csekély.

— Az ívelt aszimmetrikus szelvények $c_{y \max}$ értéke adott vastagság esetén az íveltség fokozásával egy, a körvonalától függő határig növekszik. Ennél erősebb ívelés a

legnagyobb felhajtóerő-tényezőt újra csökkenti. Minél nagyobb az ívelés, annál kisebb állásszöggel éri el a szelvény ugyanazt a c_y tényezőt.

— A legnagyobb szelvényvastagság helyének a kilépőél irányában való eltolásával a határréteg — viszonylag kicsiny állásszögtartományban — a húrhossz jelentős részén laminárisra tehető. Ebben a kicsiny állásszögtartományban az ellenállástényező — egyéb kialakítású szelvényekhez viszonyítva — igen kicsiny, és az állásszög, ill. a felhajtóerő-tényező változásával csak jelentéktelen mértékben változik meg. A legkisebb ellenállástényező értéke a legnagyobb vastagság helyének függvénye, és x_d növelésével csökken. Ezzel azonban az állásszögtartomány is csökken, amelyben a határréteg lamináris jellegű, de ezenkívül az elérhető $c_{y\max}$ is csökken.

2.1.3.3. A kormányfelületek aerodinamikája

A szárnyszelvények tulajdonságaival kapcsolatban kell foglalkoznunk a kormányfelületek aerodinamikájával, jobban mondva azokkal a szárnyszelvényekkel, amelyeket a repülőgép kormányzása céljából mozgatható kormányfelülettel képeznek ki.

A repülőgép irányfelületeinek feladata — mint ezt a következő fejezetben látni fogjuk — kettős: a repülőgép *stabilizálása* és *kormányzása*. Az irányfelületek általában két részből állnak. Egy merev részből, amelyet a vízszintes és a függőleges irányfelület esetében *vezérsíknak* nevezünk, és egy mozgatható részből, a *kormányfelületből* (magassági-, oldal- és csűrőkormány-felületből). A kormány kitérítése a repülőgép kormányzását szolgálja, és pedig a magassági kormány a keresztengely, az oldalkormány és a csűrőkormány pedig a függőleges és a hosszengely körül.

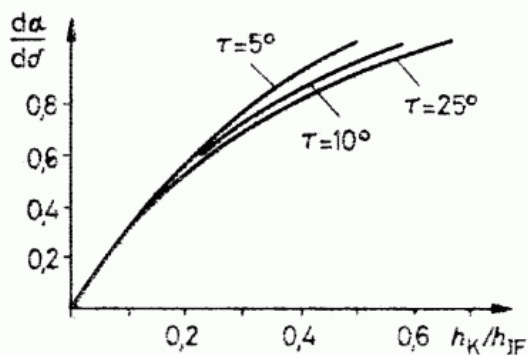
A kormányfelületek aerodinamikai hatása abban áll, hogy kitérítésükkor az irányfelületen vagy a szárnyon keletkező felhajtóerő eloszlása, ill. nagysága megváltozik. Ez utóbbival részletesebben később fogunk foglalkozni, itt most csak a *kormányfelületek kitérítésekor változó aerodinamikai jellemzőkkel* foglalkozunk.

A legegyszerűbb kormányfelület az aerodinamikai jelenségeket tekintve úgy jön létre, ha az áramlás irányára merőleges tengely körül a teljes irányfelületet elmozdítva szereljük. Az így kialakított, ún. *balanszkormány* c_y és c_x aerodinamikai jellemzői ugyanúgy alakulnak, mint azt a szárnyprofilokkal és a szárnyal kapcsolatban láttuk. Az ott elmondottak ezekre minden további nélkül alkalmazhatók.

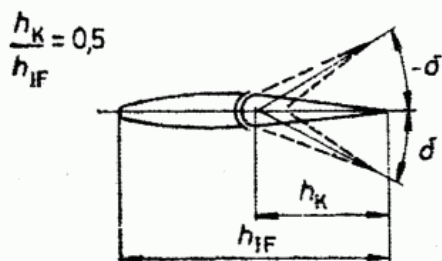
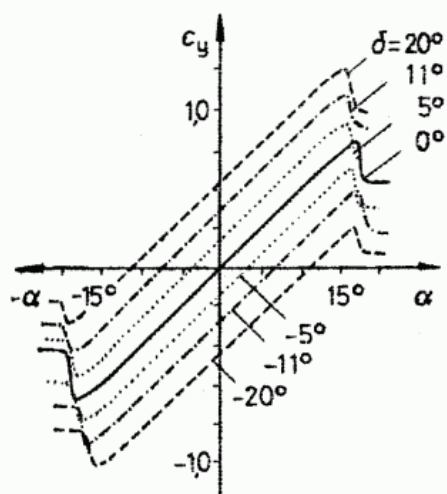
A vízszintes és függőleges irányfelületek legtöbbször megosztva készülnek. Ilyenkor a kormányfelület δ szögű kitérítésének hatása olyan, mintha az egész irányfelületet a δ szögnél kisebb, $\Delta\alpha = \frac{d\alpha}{d\delta} \delta$ szöggel térítettük volna ki. Az irányfelületen keletkező felhajtóerő-tényező tehát a következő lesz:

$$c_{yIF} = a_{IF} \left(\alpha + \frac{d\alpha}{d\delta} \delta \right),$$

ahol az IF index az irányfelületet jelzi. Ez tehát nagyobb annál, mint amely a kitérítés nélkül δ szögbe állított irányfelületen keletkezne (mivel a kormánykitérítés egyúttal a szelvény íveltségének változását is előidézte), de kisebb annál, mint amekkora az α állásszögbe állított, kitérítetlen kormánylapú irányfelületen jönne létre. A kormányfelület hatásossága annál nagyobb, minél nagyobb a h_K/h_{IF} arány, azaz az irányfelületnek minél nagyobb részét teszi ki a kormánylap, más szóval minél jobban közelelt a kialakítás az előzőekben említett balanszkormányhoz (67. ábra). Összehasonlítva az osztott és osztatlan felületű kormányokat, megállapítható, hogy — azonos profilo-



67. ábra. A kormányfelület hatásossága



68. ábra. A c_y tényező változása az állásszög függvényében különböző kormánykitéritési szögekkel

zás, kitéritési szög és egyéb jellemzők mellett — az osztatlan kormányfelület bizonyul hatásosabbnak.

A kormányfelület hatásosságát kismértékben a kilépőélszög nagysága is befolyásolja (l. az ábrát).

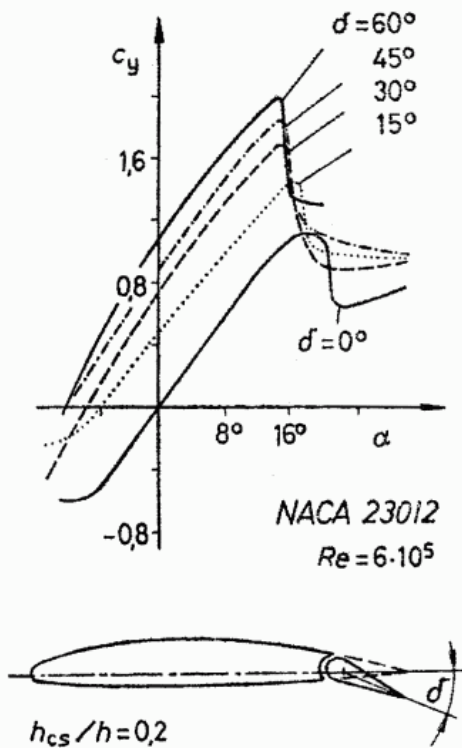
Mint később látni fogjuk, a kormányfelületek kitéritésekor állásszögük nemcsak a most leírt módon változik meg, hanem — mivel a kormánykitérités hatására rendszerint a repülőgép megfelelő tengelye körül is elfordul — az áramlás iránya is változik. Éppen ezért a felhajtóerő-tényező változásának ismerete abban az esetben is fontos, amikor az irányfelületet δ szögben kitéritett kormányval, de változó α állásszöggel éri az áramlás. A 68. ábra $h_K/h_{IF} = 0,5$ arányban osztott, szimmetrikus szelvényű irányfelület felhajtóerő-tényező-változását adja meg az α állásszög függvényében különféle δ kormánykitéritési szögekre. Az ábrán látható, hogy a pozitív és negatív kritikus állásszögek között a változás jó közelítéssel lineárisnak tekinthető.

Míg a függőleges és vízszintes irányfelületekhez főként szimmetrikus szelvényeket használnak, igen ritka kivételtől eltekintve (pl. 25. ábra) osztatlan kormányfelületet

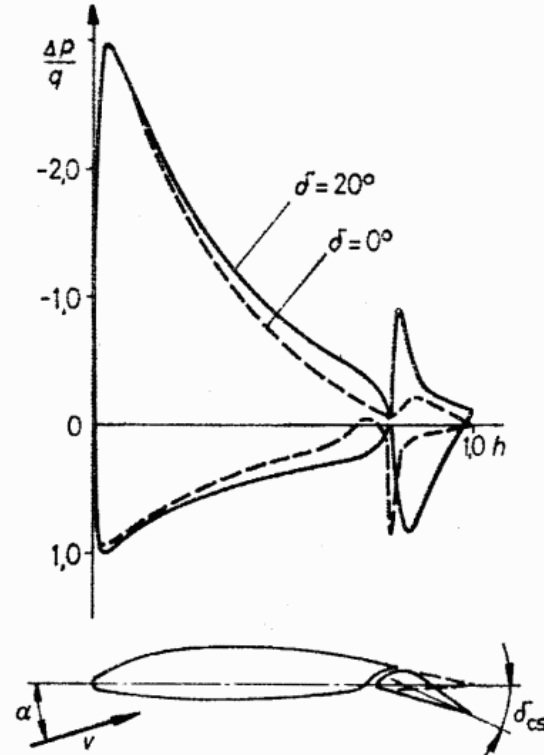
nem alkalmaznak csűrőként, hanem az ívelt szárnyszelvény kilépőél előtti részét képezik ki kormányfelületként.

A *csűrőkormányra* lényegében érvényesek a kormánykitéréssel kapcsolatban az előzőekben elmondottak. A h_{cs}/h arány (h_{cs} a csűrő húrhosszát jelzi) itt viszonylag kisebb, bár rendszerint a szárnyvég felé növekszik. A felhajtóerő-tényezőnek a kormánykitérésre bekövetkező változását a 69. ábra a *NACA 23012* szelvény esetében $h_{cs}/h = 0,2$ húrhosszra, és különféle δ kitérési szögekre szemlélteti. Látható, hogy $c_{y \max}$ értéke a δ kitérési szög növelésével együtt nő, és a csűrőkitéréssel a teljes $c_y = f(\alpha)$ görbe mintegy önmagával párhuzamosan a nagyobb felhajtóerő-tényező felé tolódik el. A kritikus állásszög a kormánykitéréssel nem változik lényegesen, de ez a csűrő csekély húrhosszának a következménye.

A teljesítmény-repülőgépeken a siklasi, ill. a körözési sebesség csökkentésére alkalmazott *ívelőlapok* lényegében ugyanezt a hatást hasznosítják, az ívelőlap kitérése útján elsősorban $c_{y \max}$ növelésével. A csűrő- és ívelőlapok gondos kialakításának szükségességére hívja fel a figyelmet a 70. ábra, ahol a mintegy 0,2 húrhosszviszonyú csűrővel ellátott szárnyszelvény körüli nyomáseloszlást látjuk kitérítetlen (szaggatott vonal), ill. $\delta = 20^\circ$ -ra kitérített (folyamatos vonal) kormányfelület esetében. Ha ezt az ábrát a kormánylap nélküli szárnyszelvény nyomáseloszlásával (58b ábra) összehasonlítjuk, azonnal feltűnik $\Delta p/q$ csaknem nullára csökkenése a csűrő kezdete környékén. Ez a csűrő és a szárny között a kormánylap elmozdíthatósága érdekében kialakított keskeny résnek a hatása, ugyanis ezen keresztül a szárny szívott és nyomott oldala közötti nyomáskülönbségnek módjában áll kiegyenlítődni. A kiegyenlítődség lehetősége a rés nagyságától függ, és az elérhető felhajtóerő-tényező nagyságának csökkenéséhez vezet. Érdekes a nyomáseloszlás alakulása tovább, a réstől a kilépőél felé.



69. ábra. A csűrő-, ill. ívelőlap kitéréseinek hatása a c_y tényező alakulására



70. ábra. A nyomáseloszlás változása a szelvény körül kormánykitérés hatására

Mintha az előző kép megismétlődését látnánk ezúttal kisebb méretekben. Ez a kormányfelület körül alakul ki, és húrirányú eloszlásából következtethetünk a kormányfelületen keletkező légerő eredőjének helyére.

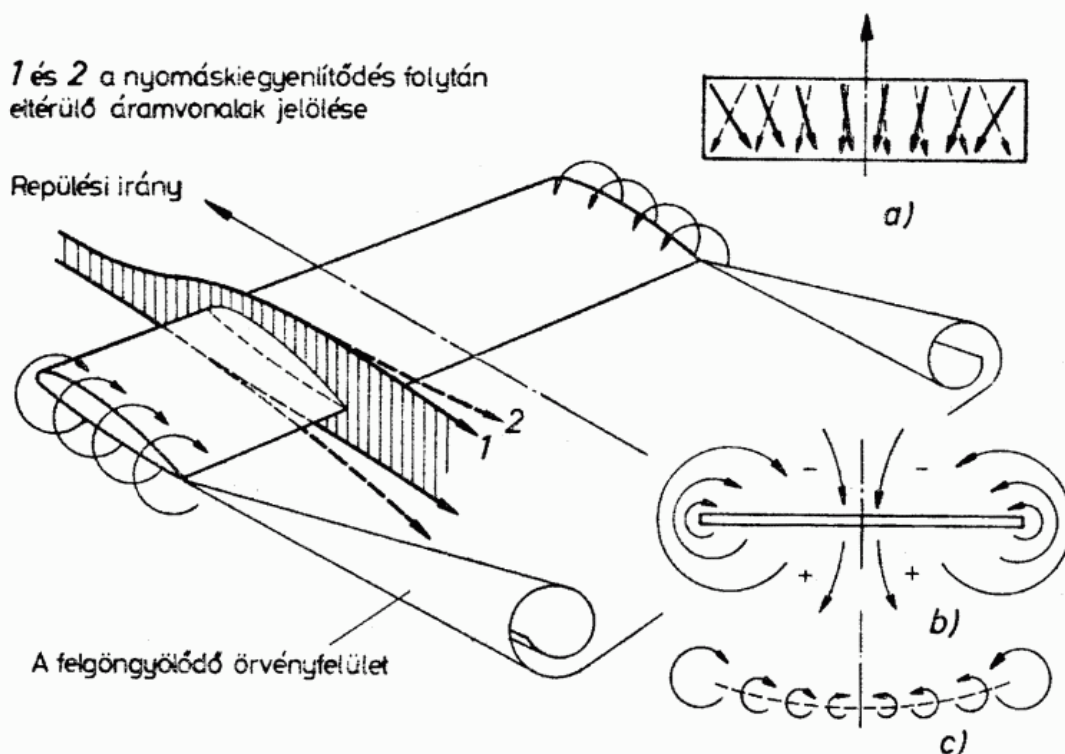
2.1.4. A véges terjedtségű szárny

2.1.4.1. A felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása és az indukált ellenállás

A szárnyszelvények tulajdonságainak vizsgálatakor figyelmen kívül hagyunk egy igen fontos tényezőt. Azt ugyanis, hogy a repülőgépek szárnyának *fesztávolsága véges nagyságú*. Úgy tekintettük, mintha a szárny körüli áramlás csak a szelvények síkjában folyna le, tehát a szárny végtelen fesztávolságú volna. Ezzel a viszonyokat egyszerűbben áttekinthetővé tettük, de a szelvények tulajdonságaival kapcsolatban tett megállapításaink a véges fesztávolságú szárnyak esetében is érvényesek maradnak.

A valóságban minden repülőgép szárnya véges terjedtségű, emiatt az áramlás a fesztávolság mentén metszetről-metszetre változik. Térbeli áramlással van tehát dolgunk, és ezt az állásszög, a felhajtóerő, és különösen az ellenállás szempontjából semmiképpen sem hagyhatjuk figyelmen kívül.

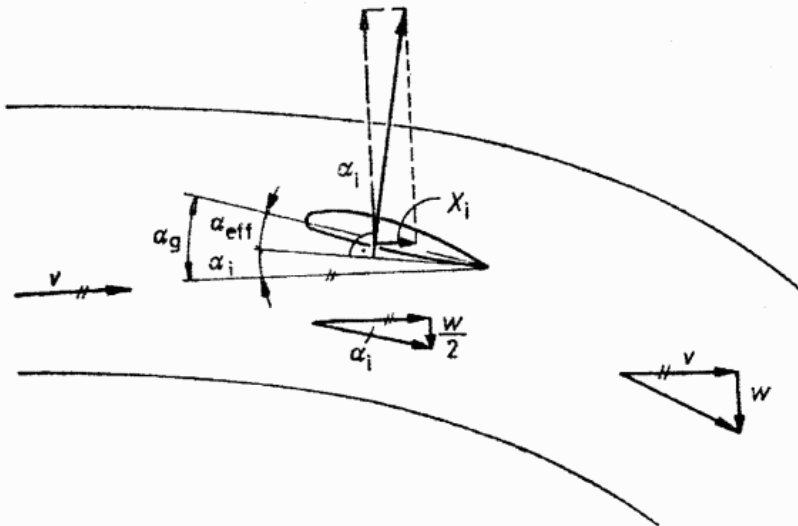
A valóságos, véges terjedtségű szárnyak körül azért alakul ki térbeli áramlás, mert az alsó és a felső oldal közötti nyomáskülönbség a szárnyvégek körül kiegyenlítődik. Erre a végtelen kiterjedésűnek képzelt szárny esetében nem volt lehetőség, ezért felülről nézve ott az áramvonalak egymással párhuzamosan futottak. A véges terjedtségű szárnyak körül az áramvonalak a nyomáskiegyenlítés hatására alul a szárnyvégek felé, felül pedig a szárny szimmetriasíkja felé irányulnak (71. ábra).



71. ábra. A véges terjedtségű szárny körül térbeli áramlás alakul ki

a) az áramlás a szárny felett befelé, alatta kifelé térül el; b) a szárnyvég körül nyomáskiegyenlítés jön létre; c) a szárny mögött örvényfelület alakul ki

72. ábra. Az indukált ellenállás keletkezése



A kilépőél mögött összetalálkozó áramlás nyomása már egyenlő, azonban a szárny felső és alsó oldala felől érkező részecskék sebességének iránya különböző. A különbség a szárnyvégek felé a legnagyobb, és a szimmetriasík felé fokozatosan csökken. A különböző irányú áramlások egyesülésekor a kilépőél mögött örvények keletkeznek. Ott tehát örvénylő felület húzódik a szárny mögött, ahol az egyes örvények forgástengelye az áramlás irányával párhuzamos. Különösen erőteljes örvények keletkeznek a szárnyvégek körül. Az örvénysík azonban a szárny tovahaladása után nem marad fenn huzamosabban a levegőben, hanem az ábrán látható módon a két szárnyvég mögött húzódó örvényekké göngyölődik fel. Ezeket *indukált örvényeknek* nevezzük. Folyamatos keletkezésük állandó energiafogyasztást jelent, ezért létrejöttüket az *indukált ellenállás* kíséri. Az indukált ellenállás szorosan a felhajtóerő keletkezéséhez kötött jelenség, és alakulása annak nagyságától függ.

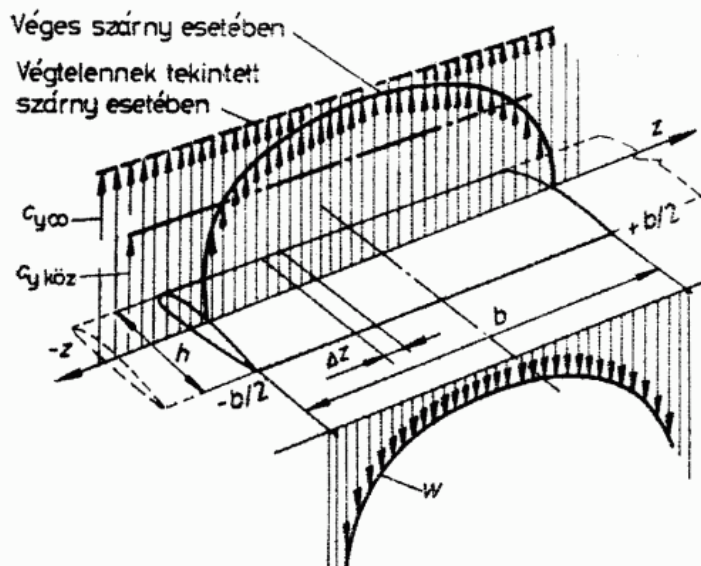
Az indukált örvények hatására az áramlás iránya megváltozik a szárny körül, és a zavartalan áramlás irányától az α_i indukált állásszöggel lefelé térül el. Az áramlás eltérülése már a szárny előtt megkezdődik, de legnagyobb értékét csak a kilépőél mögött éri el (72. ábra). A zavartalan áramláshoz α_g geometriai állásszöggel beállított szárnyat az áramlás a valóságban csak az

$$\alpha_{\text{eff}} = \alpha_g - \alpha_i$$

effektív állásszög alatt éri.

Míg a végtelennek tekintett fesztávolság esetében az effektív állásszög a geometriaival azonos, vagyis a szárnyon akkora felhajtóerő keletkezik, amekkorát a zavartalan áramlás sebességéhez viszonyított α_g geometriai állásszög idéz elő, a véges terjedtségnek az a következménye, hogy ugyanakkora felhajtóerő eléréséhez nagyobb α_g állásszögre van szükség.

Mivel a felhajtóerő iránya a valóságos áramlási irányra mindig merőleges, azért véges terjedtség esetén a zavartalan áramlás v irányához viszonyítva α_i szöggel hátrahajlik. Ennek következtében keletkezik az $X_i = Y \tan \alpha_i$ indukált ellenállás összetevője. (Az indukált ellenállás — mint minden légerő — az adott felület nagyságától és a torlónyomástól elvonatkoztatott, általánosított erőtenyezős alakjával is meghatározható: $c_{xi} = \frac{X_i}{qF}$.) Ez a szárny terjedtsége mentén nem állandó nagyságú.



73. ábra. A felhajtóerő-tényező és a leáramlási sebesség fesz távolság menti eloszlása

Például a teljes b fesz távolság mentén azonos profilozású és h húr hosszú, valamint α_g állásszögű szárny mögötti w leáramlási sebesség a szimmetriasíktól a szárnyvégek felé a 73. ábra szerinti módon nő. A leáramlási sebességhez hasonló módon oszlik el tehát az effektív állásszög és az indukált ellenállás is a fesz távolság mentén. Ennek egy további következménye, hogy a véges terjedtségű szárnyon a felhajtóerő a fesz távolság mentén nem végig azonos nagyságú, hanem a szárnyvégek felé rohamosan nullára csökken. A rajta keletkező felhajtóerő nagysága tehát nem azonos a vele különben mindenben hasonló kialakítású, de végtelen fesz távolságúnak tekintett szárny egy b hosszúságú, azaz $F = bh$ területű darabján keletkező $Y_\infty = qc_y F$ felhajtóerővel, hanem annál kisebb. Ha az F terület és a q torlónyomás azonos, ez csak egy módon lehetséges: ha a véges szárnyon — a fesz távolságtól eltekintve — a teljes geometriai azonosság ellenére a végtelen fesz távolságún keletkező c_{y_∞} felhajtóerő-tényezőnél kisebb $c_{y_{köz}}$ közepes értékű felhajtóerő-tényező jön létre. A példának vett véges szárny felhajtóereje így: $Y = qc_{y_{köz}} F$, ahol $F = bh$ (l. a 73. ábrát).

A $c_{y_{köz}}$ közepes felhajtóerő-tényező nagyságát véges terjedtségű szárnyon sokféle tényező befolyásolja. Ezért az előző, túlságosan általános összefüggést többféleképpen használható más alakban fejezzük ki. Ha arra gondolunk, hogy a szárny felülete nem más, mint elemi Δz szélességű és h hosszúságú területszakaszok összege, azaz $F = bh = \sum \Delta zh$, továbbá, hogy az elemi területszakaszokon $qc_y \Delta zh$ nagyságú felhajtóerő keletkezik (ahol c_y az α_{eff} effektív állásszög helyi értékétől függően változó), akkor a kifejezés

$$Y = q \int_{-b/2}^{+b/2} (c_y h) dz$$

alakban is írható, vagyis a teljes felhajtóerő nem más, mint a Δz szélességű és h hosszúságú elemi területszakaszokon keletkező elemi felhajtóerők összessége. Ez a kifejezés már alkalmas tetszőleges alaprajzú és profilozású, valamint tetszőleges állásszög-eloszlású szárnyak felhajtóerejének meghatározására is.

Mint láttuk, a véges fesz távolság egyik következménye, hogy a felhajtóerő a fesz távolság mentén nem állandó nagyságban oszlik meg. Pontos eloszlásának ismerete a repülőgéptervező számára igen fontos. Célszerű, ha az elemi Δz szélességű felület-

szakaszokon ébredő $(c_y h)$ felhajtóerő fesztávolság menti eloszlását ábrázoljuk, a 74. ábrához hasonlóan.

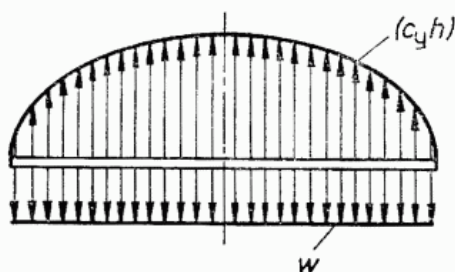
Térjünk most vissza az indukált ellenállás fogalmához. Megállapították, hogy abban az esetben, amikor a $(c_y h)$ felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása egy olyan ellipszishez hasonló, amelynek nagytengelye maga a fesztávolság (vagyis a felhajtóerő a szárny szimmetriasíkjában mutatott legnagyobb értékéről a szárnyvégekig az ellipszis körvonala szerint változva csökken nullára), a w leáramlási sebesség szárnyvégtől-sárnyvépig állandó nagyságú (74. ábra). Az indukált ellenállási tényező ekkor a legkisebb:

$$c_{xi} = \frac{c_y^2}{\pi \lambda}.$$

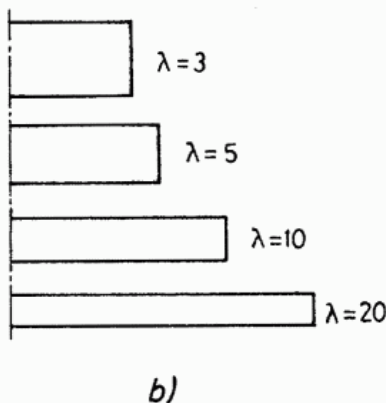
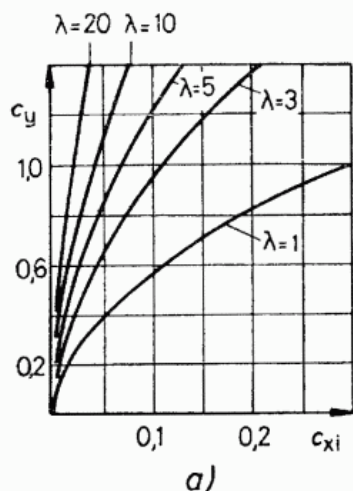
Ez az összefüggés szigorúan véve csak elliptikus felhajtóerő-eloszlásra érvényes, attól eltérő esetekben kissé módosul, de lényege nem változik: az indukált ellenállás annál kisebb, minél nagyobb a szárny oldalviszonya, ill. minél kisebb a felhajtóerő-tényező. A 75. ábrán ezt az összefüggést különböző oldalviszonyokra szemléltetjük. Látható, hogy $c_y = 0$ esetén c_{xi} is nulla minden esetben. A $c_y = f(c_{xi})$ görbék növekvő oldalvissonnyal egyre meredekebbé válnak, azt jelezve, hogy adott állásszögváltozásra a nagyobb oldalviszonyú szárnyakon az indukált ellenállás kisebb változása következik be, mint a kisebb oldalviszonyúakon, de ugyanakkor abszolút értéke is kisebb.

A véges terjedtségű szárny ellenállása két részből áll tehát: a *profilellenállásból* és az *indukált ellenállásból*. Erőtényező alakban kifejezve:

$$c_{x \text{ szárny}} = c_{x \text{ pr}} + c_{xi}.$$



74. ábra. A felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása elliptikus alaprajzú szárny esetén



75. ábra. a) Az oldalviszony hatása az indukált ellenállás alakulására; b) különböző oldalviszonyú, téglalap alaprajzú szárnyak

A 76. ábrán Gö 549 szelvényű, $\lambda = 5$ oldalviszonyú szárny polárgörbét látjuk. Mint látható, az indukált ellenállás főként a nagy c_y tényezők, azaz nagy állásszögek esetén lényeges, kicsiny állásszögek esetében viszont a **profilellenállás** jut túlsúlyba.

Még valamire fel kell figyelniünk. Arra, hogy mivel a szárny ellenállástényezőjében az indukált ellenállási tényező van túlsúlyban, $c_{x \text{ szárny}}$ változása az indukált ellenállás változásához közelít. Ez azt eredményezi, hogy az azonos szelvényű, de különféle oldalviszonyú szárnyakon ugyanolyan felhajtóerő-tényező eltérő állásszögek mellett jön létre, éspedig minél nagyobb az oldalviszony, annál kisebb állásszög mellett. A kísérleti intézetek a szárnyszelvények adatait polárdiagrammal vagy táblázatban összefoglalva adják meg, de általában nem egységes oldalviszonyra. Ahhoz, hogy ezeket adott repülőgépre alkalmazhassuk, át kell számítanunk annak tényleges oldalviszonyára. Az átszámítás az

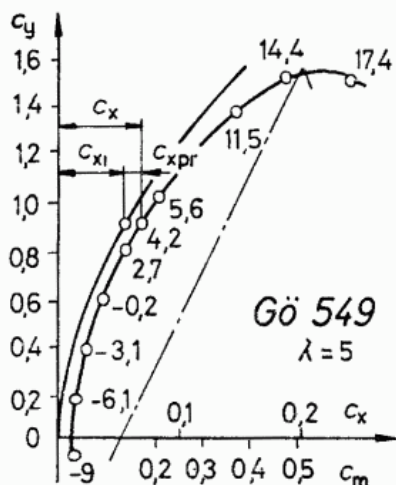
$$\alpha_2 = \alpha_1 + \frac{c_y}{\pi} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)$$

összefüggéssel végezhető.

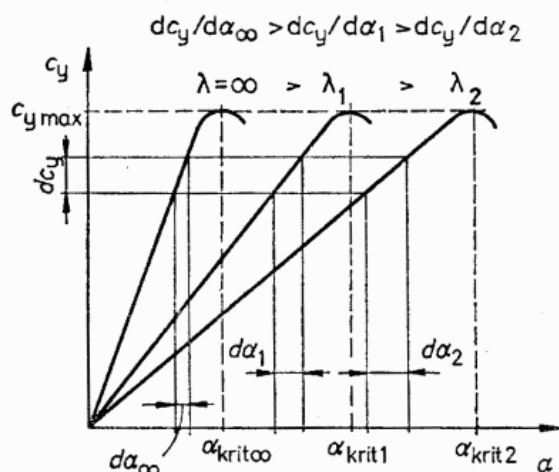
Az oldalviszony változásával a c_y görbe meredeksége, vagyis $a = dc_y/d\alpha$ értéke is változik, mégpedig λ növekedésével a értéke is nő, vagyis a görbe meredekebb lesz: kisebb állásszögváltozásra jut ugyanakkora felhajtóerőtényező-változás (77. ábra). Elliptikus felhajtóerő-eloszlás esetén pl. $\lambda = \infty$ oldalviszonyú szárnyhoz viszonyítva:

$$a = \frac{a_\infty}{1 + \frac{\alpha_i}{\alpha_{\text{eff}}}} = \frac{a_\infty}{1 + \frac{a_\infty}{\pi \lambda}}$$

Mivel az oldalviszonytól $c_{y \text{ max}}$ értéke nemigen függ, az összefüggés szerint a kisebb oldalviszonyú szárny α_{krit} kritikus állásszöge nagyobb.



76. ábra. A véges terjedtségű szárny polárgörbéje



77. ábra. Az oldalviszony hatása a $dc_y/d\alpha$ hányados nagyságára

2.1.5. A repülőgép polárgörbéje

Eddig csak az egyedülálló szárny körül kialakuló áramlást és erőket vizsgáltuk. A repülőgép polárgörbéjének meghatározásához azonban a gép egyéb részein (törzs, farokfelület stb.) keletkező felhajtóerőt és légellenállást is figyelembe kell venni. Általában jó közelítéssel feltételezhető, hogy az egész felhajtóerő a szárnyon keletkezik, és a többi részen csak ellenállás ébred. Ezek összegét *káros ellenállásnak* (c_{xk}) nevezzük.

A vízszintes farokfelületen keletkező felhajtóerő elhanyagolására az ad lehetőséget, hogy a tervezés alapjául vett siklási sebesség mellett a „jól kiegyensúlyozott” vitorlázó repülőgép (l. a 2.2.1.1. pontot) magassági kormányra kitérítetlen, így a farokfelületen nem keletkezik felhajtóerő.

Bár különösen a korszerű teljesítmény-vitorlázógépek erősen ívelt orr-részen keletkezik bizonyos nagyságú felhajtóerő, ennek elhanyagolását az ellensúlyozza, hogy a felhajtóerőt a szárny teljes, névleges felületére vonatkoztatjuk, azaz nem vonjuk le belőle a törzs által elfoglalt részt.

Káros ellenállás a törzsön, a vezérsíkokon, a merevítődúcokon, a szabadon vezetett huzalokon, a futókeréken és a csúszótalpon, a szárny felületéből kiálló kormányozható füleken és a műszerek kiálló érzékelőfejen stb. keletkezik. Mint a lég-erők általában, a káros ellenállás is felírható az ismert módon:

$$X_k = q c_{xj} A_j.$$

A képletben a c_{xj} ellenállástényező, ill. az A_j vonatkozási felület aszerint alakul, ahogyan jól vagy kevésbé áramvonalazott alkatrészből van szó. Jól áramvonalazott alkatrészek (pl. törzs, farokfelületek) esetében c_{xj} a súrlódási ellenállástényező, A_j pedig az áramlás által súrolt felület nagysága. Kevésbé vagy nem áramvonalazott alkatrészekre (pl. behúzható futókerék kibocsátott állapotban, kibocsátott féklap stb.) c_{xj} az alaki ellenállástényező, A_j pedig az alkatrésznek az áramlás irányára merőleges, legnagyobb keresztmetszeti felülete: a *homlokfelülete*.

A repülőgép polárgörbéjére a káros ellenállást csak a szárny ellenállásával össze-mérhető módon vezethetjük rá, ezért a felhajtóerőt nem keltő részek káros ellenállását a szárny felületére vonatkoztatjuk. Így kapjuk a *káros ellenállási tényezőt*:

$$c_{xk} = \frac{\Sigma(c_{xj} A_j)}{F}.$$

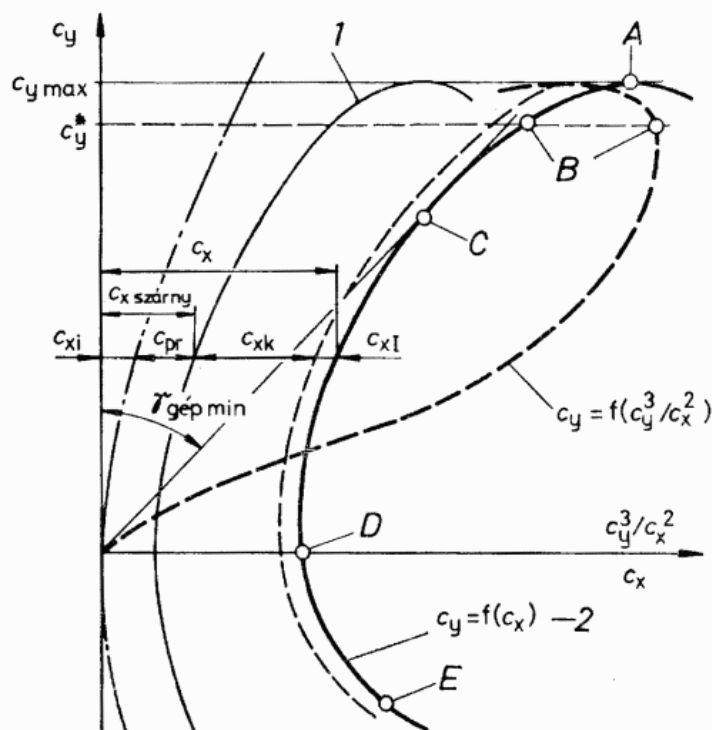
A repülőgép ellenállástényezője tehát:

$$c_x = c_{xpr} + c_{xk} + c_{xi} + c_{xl} = c_{x0} + \frac{c_y^2}{\pi \lambda},$$

ahol $c_{x0} = c_{xpr} + c_{xk} + c_{xl}$, a testellenállás-tényező.

A káros ellenállások közé tartozik az interferencia-ellenállás (c_{xl}) is, amely az egymás közelében elhelyezkedő repülőgéprészek (törzs—szárny, törzs—vezérsíkok) körül kialakuló áramlások egymásra hatásából származik. Kedvezőtlen esetben a káros ellenállási tényező 30%-át is elérheti, így figyelmen kívül hagyása nagy hibára vezetne (l. a 3. fejezetben részletesebben).

Amint láttuk, a repülőgép polárgörbéje nem azonos a szárnyéval, annak ellenállásához a felhajtóerőt nem termelő részek káros és interferencia-ellenállása is hozzáadódik. Az utóbbiak az állásszög változásakor is állandó nagyságúnak tekinthetők, ezért a repülőgép polárgörbéje a 78. ábrán láthatóhoz hasonlóan alakul.



Ha a szárny és a repülőgép polárgörbáját összehasonlítjuk, azt látjuk, hogy a járulékos ellenállások a polárgörbe egyes pontjaihoz tartozó siklószögeket lényegesen megnövelik, tehát a repülőgép siklószáma az önmagában tekintett szárnyéhoz viszonyítva nagyon lecsökken.

A szárny polárgörbéjéhez hasonlóan a repülőgép polárgörbéjén is megkülönböztethetünk néhány jellegzetes pontot. A $c_{y \max}$ -nak megfelelő A ponthoz a repülőgép legkisebb siklási sebessége tartozik. A vitorlázó repülőgép ezzel a sebességgel száll le. A B pont a legkisebb merülősebességhez tartozó c_y és c_x értékeket jelzi. A $\gamma_{\text{gép min}}$ legjobb siklószöget a már ismert módon a C pontban kapjuk, míg a $c_y = 0$ -nak megfelelő D pont a zuhanórepülést és a hozzátartozó állásszöget jelzi. A görbe c_x tengely alatti része a háton repülés tartományát képviseli. Az E pont: siklás háton repülésben.

2.1.6. A vitorlázó repülőgép jellemző teljesítményadatai

A vitorlázó repülőgép aerodinamikai jellemzőiből levezethetők jellemző teljesítményadatai. Ezek változásai szorosan összefüggnék a felhajtóerő, ill. az ellenállástényező váltoásaival, végső soron tehát az állásszög függvényei.

A siklási sebesség abból a megfontolásból kiindulva vezethető le a felhajtóerő korábban megismert összefüggéséből, hogy az R légerő a repülőgép súlyával tart egyensúlyt, azaz $R = G$. A siklási sebesség így:

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{G}{F} \frac{1}{c_r}} \quad \text{m/s.}$$

A legkisebb siklási sebességet azzal az állásszöggel kapjuk, amellyel c_T értéke maximá-

lis, vagyis a vele csaknem azonos $c_{y \max}$ értékkel, tehát:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{G}{F} \frac{1}{c_{y \max}}}.$$

A legkisebb vízszintes sebesség egyúttal a repülőgép leszállási sebessége is. A lehetséges, legnagyobb sebességet zuhanásban kapjuk, amikor c_r értéke a legkisebb. Mivel ilyenkor $c_y = 0$, azért $c_{r \min} = c_{x0}$ és ezért a *zuhanósebesség*:

$$v_{\text{zuh}} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{G}{F} \frac{1}{c_{x0}}}.$$

A Bevezetésben láttuk, hogy a siklási sebesség mellett annak függőleges összetevője, azaz a merülősebesség is fontos jellemzője a vitorlázó repülőgépeknek. Ezt a $w = v \sin \gamma$ megállapításból azzal a feltételezéssel vezethetjük le, hogy a vitorlázó-repülésben szokásos kis siklőszögek mellett $c_r \approx c_y$, továbbá ilyenkor $\sin \gamma \approx \tan \gamma \approx \frac{c_x}{c_y}$.

A *merülősebesség* tehát:

$$w = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{G}{F} \frac{1}{c_y^3/c_x^2}}.$$

Ebben az összefüggésben a c_y^3/c_x^2 hányados az ún. *emelkedési szám* (mert a motoros repülőgépek emelkedési sebességével is kapcsolatos), c_y -nal való változását a 78. ábra szemlélteti. Látható, hogy a legnagyobb felhajtóerő-tényezőt megközelítő értékénél maximumot mutat. Ehhez az értékhez tartozik a vitorlázó repülőgép legkisebb merülősebessége:

$$w_{\min} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{G}{F} \frac{1}{(c_y^3/c_x^2)_{\max}}}.$$

Mindegyik összefüggésben megtaláljuk a G/F felületi terhelést és a levegő ρ sűrűségét. A siklási és merülősebesség értékét e tényezők változásai ellentétesen befolyásolják. A nagyobb felületi terhelés ugyanis mindkettőt növeli, és hasonló a hatása a levegősűrűség csökkenésének is.

2.2. A vitorlázó repülőgép repülési tulajdonságai

A repülőgép kitérítetlen kormányokkal nyugodt vagy mozgó levegőben mutatott tulajdonságait, a kormánykitérítéseknek való engedelmeskedési hajlamát és fürgeségét, a kormányok kitérítéséhez szükséges erők nagyságát és jellegét, továbbá a súlypontján átmenő képzeletbeli tengelyek körüli kiegyensúlyozottságát, valamint statikus és dinamikus stabilitását a *repülési tulajdonságok* fogalomban foglaljuk össze.

A kedvező repülési tulajdonságok két okból is fontosak. Egyrészt: az ilyen repülőgépekkel biztonságosabb a repülés, másrészt vezetésük könnyebb, és kevésbé

fárasztó a repülőgépvezető számára. A repülőgéptervező feladata tehát, hogy olyan repülőgépet tervezzen, amely semmilyen repülési mozzanatban vagy fel- és leszállás közben ne kerülhessen kormányozhatatlan helyzetbe, az átlagos tudású repülőgépvezető különleges ügyesség vagy képzettség nélkül is mindig ura tudjon maradni gépének. Emellett azonban arra is kell törekedni, hogy a könnyen vezethető repülőgép kormányai kitérítésükkor egymással kellemes összhangban legyenek. A repülőgépvezetők főként e tulajdonságok alapján ítélik meg a repülőgép jóságát, és ezek hiányát vagy fogyatékoságait a legjobb siklási teljesítmények sem feledtetik.

Bár a repülési tulajdonságok számszerűen kifejezhető mértékkel jellemezhetők, ezek a repülőgépvezetők számára általában nehezen kezelhetők, így ítéletüket szubjektív észrevételeik alapján alkotják meg. Mivel aligha található két repülőgépvezető, aki egy és ugyanazon repülőgépről azonos szubjektív véleményt alkotna, és korábbi megszokásaik is torzítóan jelentkeznek véleményalakításukban, a repülési tulajdonságok kedvező voltának megállapítása csakis a repülőgép *berepülése* során a különféle jellemző adatok műszeres mérésével lehetséges.

A repülőgép legfontosabb részei: a szárny, a törzs és az irányfelületek. A repülőgépen általában egy-egy vízszintes és függőleges irányfelület, valamint két csűrőkormány található. A szárny aerodinamikai kialakításával e fejezet előző pontjaiban, valamint a 3. fejezetben foglalkozunk, itt az irány- és kormányfelületek szerepéről és működéséről lesz szó. A kormányfelületek szerepét a bevezetőben már vázlatosan tisztáztuk. Az irányfelületek feladata a repülőgép stabilitásának létrehozása. A súlyponton átmenő, képzeletbeli keresztirányú tengely körüli elforgást korábban bólintó mozgásnak neveztük, és megállapítottuk, hogy a magassági kormány vezérli. A kereszt-tengely körüli *hossz-stabilitást* a vízszintes irányfelület hozza létre.

A függőleges tengely és a hossz-tengely körüli legyező, ill. orsózó mozgást az oldalkormány, ill. a csűrőkormányok vezérlik, és mivel e mozgások általában együttesen lépnek fel, vagyis egymással kapcsolódnak, e két tengely körüli stabilizálást a függőleges irányfelület és a szárny célszerű kialakítása együttesen hozza létre.

Az irányfelületek és kormányfelületek geometriai kialakítása a szárnyéhoz hasonlóan írható le, és a fesztávolságot, felületet, oldalviszonyt és állásszöget itt is hasonlóan értelmezzük.

A farokfelületek vitorlázó repülőgépeken általában egy függőleges és egy vízszintes irányfelületből állnak. Ritkán előfordul a 35. ábra szerinti kettős függőleges irányfelület, és gyakrabban a 42. ábrán látható hasonló V alakú farokfelület (pillangó-farok) is. Ez utóbbi esetében a szükséges felületeket a szögbe állított farokfelület vetületei adják.

2.2.1. A vitorlázó repülőgép stabilitása

A vitorlázó repülőgép *stabilitásán* azt a képességét értjük, amellyel — miután valamely külső zavaró hatás, pl. széllelés helyzetéből kimozdította — eredeti helyzetébe kormánykitérítés nélkül, tehát teljesen önműködően rövid időn belül visszatér.

Ha a repülőgép a zavaró hatás bekövetkezte után kormánykitérítés nélkül nem tér vissza eredeti helyzetébe, hanem a zavarás hatására felvett új helyzetében repül tovább, akkor *indifferens* (közömbös) *egyensúlyi helyzetben* van. Ha ezzel szemben a zavarás hatására megkezdett mozgást a zavarás megszűnte után is, tehát minden külső ok nélkül tovább folytatja, *labilitásról* vagy *instabilitásról* beszélünk.

A kedvező tulajdonságú repülőgépnek bizonyos mértékben mindhárom tengely

körül stabilnak kell lennie. A repülőgépvezető számára ugyanis nagyon fárasztó lenne, ha a legkisebb külső zavarást is kormánymozdulatokkal kellene ellensúlyoznia. Másrészt, mivel az instabil repülőgép már kicsiny zavarások hatására kilendül helyzetéből, azért azt kicsiny kormánymozdulatok is megváltoztatják. Az ilyen gépek általában túlságosan és hirtelen engedelmeskednek a kormányzásra, és kis kormánykitérések esetén is hajlamosak a túlkormányzottságra.

Bár a vitorlázórepülés kezdeti időszakában a lejtővitorlázáshoz az igen stabil gépek voltak kedveltek, a korszerű teljesítmény-repülőgépek túlzott stabilitása — bármilyen jó siklasi teljesítményűek is — lehetetlenné tenné a termikus emelőáramlatok gyors és hatékony kihasználását. A túlságosan stabil repülőgépek a kormányok kitérítésének csak vonakodva és lassan engedelmeskednek. Vezetésük éppen ezért kellemetlen.

A stabilitás helyes mértékét a repülőgép alkalmazási területe szabja meg. Leginkább stabilnak a kiképzés céljait szolgáló vitorlázó repülőgépeknek kell lenniük, míg a főként teljesítményrepülésre szolgálók stabilitása a mozgékonyság érdekében viszonylag kisebb lehet.

2.2.1.1. A statikus hossz-stabilitás

A súlyponton átmenő elméleti keresztengely körüli stabilitást *hossz-stabilitásnak* nevezzük.

A mechanika elemeiből ismeretes, hogy az egyenes vonalú, egyenletes sebességű mozgást végző test egyensúlyi helyzetéhez a rá ható valamennyi erő és nyomaték egyensúlya szükséges. A repülőgép a szabad testekhez hasonlóan viselkedik, ezért mozgási pályájaként súlypontjának pályáját tekinthetjük. A súlyponton kívül ható erők nyomatékának hatására a súlypont körül elfordulni igyekszik.

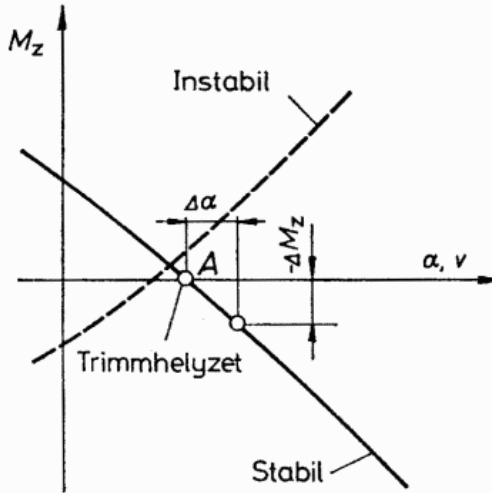
Egyenes vonalú repülésben azt az állapotot nevezzük a *repülőgép egyensúlyának*, amikor a rá ható erőkön kívül azok nyomatékai is egyensúlyban vannak. A súlyponton átmenő, $z-z$ irányú keresztengely körül akkor áll fenn nyomatéki egyensúly, ha a szárnyon, a törzsön és a farokfelületeken keletkező légerők súlypontra vett nyomatékainak összege nulla:

$$M_z = M_{zs} + M_{zt} + M_{zM} = 0.$$

(Mivel a nyomatékokat a súlyponton átmenő keresztengelyre vonatkoztatjuk, azért a G súly M_{zG} nyomatéka 0.)

A légerők alakulása az állásszög nagyságától függ, ezért a nyomatékok alakulása is az állásszög függvénye. Látni fogjuk, hogy a vízszintes farokfelület M_{zM} nyomatéka ezenkívül a magassági kormány kitérítésétől is függ, és a nyomatéki egyensúly fenntartásához — egyetlen esettől eltekintve — a rajta keletkező légerők nyomatéka is szükséges.

Statikusan akkor hossz-stabil a repülőgép, ha az állásszög megváltozásakor olyan M_z eredő nyomaték jön létre, amely azt meggátolni igyekszik. Ha tehát állandósult siklásban a 79. ábrán A ponttal jelzett állásszöggel repül, amikor $M_z = 0$ (azaz nyomatéki egyensúly áll fenn és azt mondjuk: a gép trimmhelyzetben van), valamely zavaró hatás, pl. felfelé irányuló szélleőkés miatt a szárny állásszöge $\Delta\alpha$ értékkel megnő, akkor $-\Delta M_z$ nagyságú *fejnehéz nyomaték* keletkezik. Ez az állásszöget eredeti értékére igyekszik visszaállítani. A zavarás hatására csökkenő állásszög más esetben pozitív, azaz *faroknehéz nyomatékot* hoz létre. Ez tehát az állásszöget növeli, és így ismét a kiindulási helyzet visszaállítására törekszik.



Az ábrán szaggatott vonallal a statikusan instabil repülőgép esetét ábrázoltuk. Ennél tehát — az előző megfontolások értelmében — a zavarás hatására létrejövő ΔM_z nyomaték az állásszögváltozást tovább növeli. Fontos itt megjegyeznünk, hogy a repülőgépek nem mutatnak okvetlenül minden állásszöggel (vagyis a teljes repülési tartományban) azonos stabilitási jelleget. Előfordulhat — de nem kívánatos —, hogy adott állásszögtartományon belül stabil egyensúlyi helyzet áll fenn, másutt pedig instabil vagy indifferens.

A statikus stabilitás vizsgálatakor, az előző fejezetben a légerőkkel kapcsolatban megszokott módon célszerűen alkalmazhatjuk a *dimenzió nélküli nyomatéki tényezőt*:

$$m_z = \frac{M_z}{qFh_A}.$$

Az összefüggésben h_A a szárny közepes aerodinamikai húr hossza (1. később).

A különféle egyensúlyi helyzetek feltételét tehát a következők szerint fejezhetjük ki:

- statikusan stabil a gép, ha $dm_z/d\alpha < 0$;
- statikusan instabil, ha $dm_z/d\alpha > 0$;
- statikusan indifferens, ha $dm_z/d\alpha = 0$.

A stabilitás és instabilitás mértékére az $m_z = f(\alpha)$, ill. $m_z = f(v)$ görbe meredeksége jellemző.

A szárny nyomatéka. A vízszintes farokfelület szerepe

A szárny nyomatékával, ill. a szárny c_m nyomatéki tényezőjének változásával már korábban megismerkedtünk. A szárnyon kívül a törzsön keletkező légerők is hoznak létre hosszirányban ható csekélyebb nyomatékot, amelyeket a hossz-stabilitás pontosabb vizsgálatakor figyelembe kell venni. Mi itt ezektől eltekintünk, ill. úgy vesszük őket a következőkben figyelembe, hogy ott, ahol a szárny nyomatékáról beszélünk, mindig a szárny és a törzs együttes hossznyomatékát értjük.

A szárny általában nem képes önmagában stabil repülésre bár, ha a szerkezet súlypontja a szárny AC aerodinamikai középpontja mögött helyezkedik el, egyetlen állásszög esetében létrejön egyensúlyi állapot, amikor a légerők nyomatéka a súly AC -re vett nyomatékával egyenlővé válik. Ekkor $M_{zs} = M_{zG}$. Ezt az állapotot jelzi a 80. ábrán az A pont. (A továbbiak érdekében itt bevezettük azt a szokásos ábrázo-

lási módot, amely a nyomatékok változását a *szárny* felhajtóerő-tényezőjének függvényében tünteti fel.) Az egyensúlyi állapot azonban az *A* pontban instabil, mert az állásszög változásakor M_{zs} az állásszöget tovább változtató értelemben változik meg.

Ha a súlypont az *AC* függőlegesébe esik, nem jöhet létre egyensúlyi helyzet, mert ekkor $x_s = 0$, és ezért $M_{zG} = 0$. A stabilitási helyzet ekkor indifferens. A normál repülés állásszögtartományában akkor sem állhat be egyensúlyi helyzet, ha a súlypont *AC* elé kerül. Ekkor M_{zG} nyomatéka hozzáadódik a szárny nyomatékához, és minden esetben $M_{zs} + M_{zG} < 0$ (80. ábra).

A hagyományos kialakítású repülőgépek hossz-stabilitását az önmagában instabil elrendezésű (tehát ekkor a súlypont az *AC* mögött van) szárny mögött a törzsrre bizonyos távolságban felerősített vízszintes farokfelület stabilizálónyomatéka hozza létre. Ha ebben az elrendezésben valamilyen okból megváltozik a szárny állásszöge, akkor a vízszintes farokfelület állásszöge is megváltozik. Könnyen belátható, hogy ekkor azon olyan értelmű légerők keletkeznek, amelyek a szárny állásszögét eredeti értékére visszaállítani igyekező

$$M_{zM} = -c_{yM} q F_M l_M,$$

nyomatékokat hoznak létre a súlypont körül,

ahol c_{yM} a farokfelület felhajtóerő-tényezője;

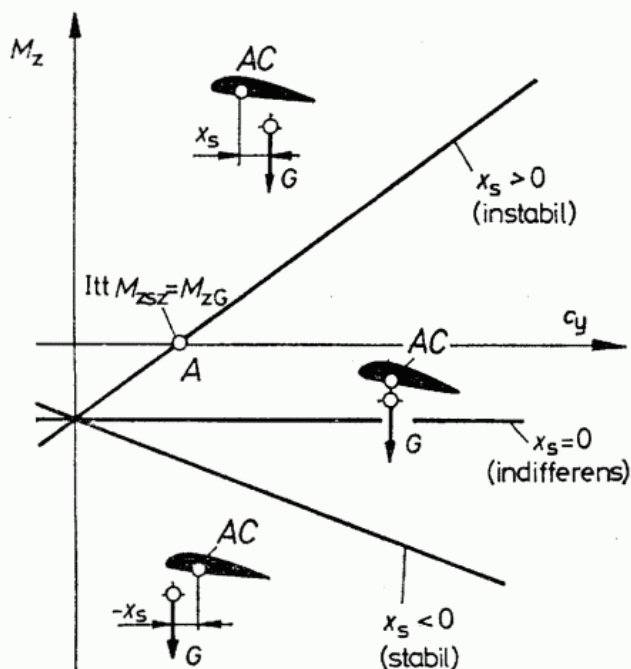
F_M a felülete;

l_M pedig a súlypontra vonatkoztatott nyomatéki karja.

A repülőgép stabilitási viszonyaira most már a szárny (a törzzsel együtt), a súly és a farokfelület nyomatékának

$$M_{zs} + (Gx_s) - M_{zM} = M_{zgép}$$

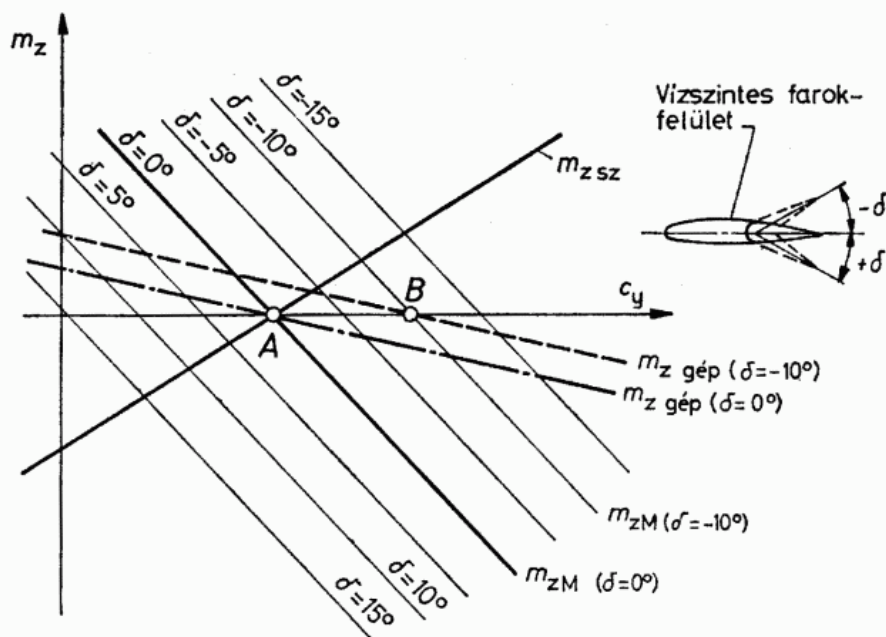
eredője jellemző. Ez, mint a 81. ábrán eredményvonallal bejelölve látható, stabil jellegű. (Az ábrán a nyomatékokat dimenzió nélküli tényezőikkel ábrázoltuk.)



Fejrehez nyomaték értelmezése:



80. ábra. A szárny és a súlypont nyomatékának hatása a stabilitási állapotra



81. ábra. Az egyensúlyi helyzet megváltoztatásának lehetősége

A súlypont célszerű elrendezésének következménye, hogy a stabil jelleg mellett az A pontban egyensúlyi állapot van. A repülőgép tehát — bármilyen értelmű zavarás éri — az A ponttal jellemzett c_y felhajtóerőnek megfelelő sebességre igyekszik visszaállni.

Jóllehet S középvonalú szárnyszelvények alkalmazásával vagy a szárny különleges kialakításával a *farok nélküli* és a *csupaszárny repülőgépek* (l. később) is képessé válnak stabil repülésre, a hagyományos kialakítású repülőgépek vízszintes farokfelülete az előzőekben leírtak miatt nélkülözhetetlen.

A vízszintes farokfelület méretei, elhelyezése és beállítási szöge

Korábban láttuk, hogy a farokfelületekhez használatos szimmetrikus szelvények felhajtóerő-tényezőjének nagysága a szelvény vastagságától csak csekély mértékben függ, a különböző vastagságú szelvények adott állásszög mellett közel azonos felhajtóerő-tényezőt adnak. A hossz-stabilitás szempontjából ezért az alkalmazott szimmetrikus szelvény geometriai kialakításának alárendelt szerepe van. A stabilitással kapcsolatban a szelvényen keletkező légerőknek csak a felületre merőleges, a felhajtóerővel azonosnak tekintett összetevőjével foglalkozunk, és úgy vesszük, hogy az a felület h_M húrhosszának $1/3$ -ában ébred. A farokfelület AC_M aerodinamikai középpontjának ezt a pontot tekintjük.

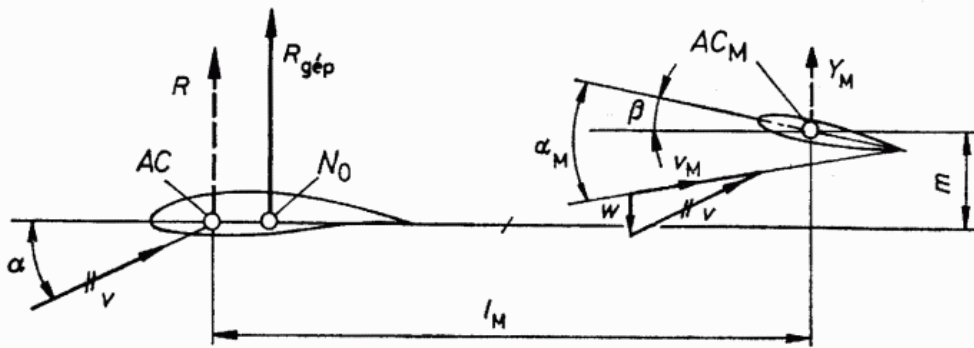
A stabilizálónyomaték alakulása szempontjából fontosabb a vízszintes farokfelületnek a gép súlypontjától vett l_M távolsága, azaz, mivel a vízszintes farokfelület általában a törzs végén foglal helyet, végső soron a *törzs hossza*. Ezen kívül F_M nagyságának van jelentősége. Nagy l_M , azaz hosszú törzs esetén viszonylag kisebb F_M felületű vízszintes farokfelület alkalmazható, ami az ellenállás alakulása szempontjából kedvező. A farokfelület jellemző méreteit és arányait néhány vitorlázó repülőgép esetére a 3. táblázat tartalmazza egyéb adatokkal együtt.

A vízszintes farokfelületet a gép tervezésekor úgy állítják be, hogy az egyensúlyi helyzet a leggyakoribb sebességgel (vitorlázó repülőgépek esetében ez általában a legjobb siklósámhoz tartozó, vagyis v_{opt}) álljon be.

Típus	φ°	F m ²	b m	λ	$h_{\text{vég}}/h_{\text{tő}}$	$F_{\text{csűrő}}$ m ²	$\frac{F_{\text{csűrő}}}{F}$	$\frac{l_{\text{csűrő}}}{b/2}$	F_M m ²	F_M/F	l_M m	F_F m ²	F_F/F	l_F m	A m
<i>R—22S Futár</i>	2,5°	13,50	15,70	18,55	0,264	0,725	0,053	0,530	1,81	0,134	3,64	1,52	0,112	3,92	0,970
<i>R—26S Góbbé</i>	3°	18,00	14,00	10,90	1,000	2,120	0,18	0,456	2,16	0,120	4,68	1,98	0,110	5,36	1,300
<i>Olympia-Meise 51</i>		15,00	15,00	15,00	0,300	1,100	0,074	0,500	2,18	0,145	4,10	1,35	0,090	4,50	1,000
<i>SZD—12 Mucha 100</i>	4°	15,00	15,00	15,00	0,300	1,940	0,129	0,500	1,86	0,124	3,82	1,27	0,085	4,30	1,100
<i>SZD—8b Jaskolka Z</i>	4°	13,60	16,00	18,80	0,245	1,830	0,134	0,482	1,60	1,117	4,45	1,14	0,084	4,75	0,950
<i>SZD—30 Pirat</i>	0/2°	13,80	15,00	16,30	0,582	0,548	0,040	0,350	1,08	0,078	3,87	1,25	0,091	3,86	0,945
<i>SZD—32A Foka 5</i>		12,16	15,00	18,50	0,300	0,744	0,061	0,425	1,48	0,122	4,43	0,922	0,076	3,84	0,890
<i>SZD—38A Jantar 1</i>		13,38	19,00	27,00	0,418	0,880	0,066	0,400	1,35	0,101	4,00	1,10	0,082	4,05	0,738
<i>SZD—36A Cobra 15</i>	2°	11,60	15,00	19,40	0,328	0,628	0,054	0,402	1,40	0,120	4,28	1,10	0,095	3,65	0,860
<i>Cirrus</i>		12,60	17,74	25,00	0,234	1,256	0,100	0,375	0,90	0,071	4,10	1,15	0,091	4,33	0,760
<i>Sigma 1</i>		12,20	21,00	36,00	0,580	1,200	0,098	0,770	1,12	0,092	5,82	1,44	0,120	5,55	0,600
<i>HP—15^{1,2}</i>		12,85	16,64	21,60	0,416	0,970	0,076	0,360	3,06 ⁴	0,238	4,10	3,06 ⁴	0,238	4,10	0,480
<i>OE—01^{1,3}</i>	3°/0	13,95	18,00	23,30	0,445	1,900	0,136	0,480	1,75	0,126	4,65	1,13	0,162	4,65	0,860
<i>A—15^{1,2}</i>		12,30	17,00	23,50	0,440	1,780	0,145	0,930	3,94 ⁴	0,320	4,15	3,94 ⁴	0,320	4,15	0,770

¹ V-farok.² A farok V állásának szöge $\eta = 90^\circ$.³ A farok V állásának szöge $\eta = 114^\circ$.⁴ Teljes (nem vetületi) felület.

Az egyéb jelölések magyarázata a szövegben található.



82. ábra. A vízszintes farokfelület elhelyezése

A tervezett v siklási sebesség melletti egyensúlyi helyzetet (a 81. ábra A pontja) a szárny AC aerodinamikai középpontja mögötti súlyponthelyzet hozza létre. A vízszintes farokfelületet ezért olyan β beállítási szöggel szerelik a szárnyhoz viszonyítva a törzstre, hogy e sebesség mellett állásszöge 0° legyen, tehát ne keletkezzen rajta felhajtóerő. Stabilizáló hatását tehát a repülőgép ettől eltérő hosszdőlései mellett fejti ki.

Tudjuk azonban, hogy a szárny véges volta miatt keletkező indukált örvények a szárny mögött lefelé térítik el az áramlást. A vízszintes farokfelület ezért a szárny w függőleges sebességű leáramlásában foglal helyet. A leáramlás csökkenti a farokfelület hatékonyságát, mert miatta — az őt körülvevő áramláshoz (v_M) viszonyított — effektív állásszöge kisebb a repülőgép v haladási sebességéhez viszonyítottnál (82. ábra). A vízszintes farokfelület β beállítási szögét tehát, a leáramlást is figyelembe véve úgy kell meghatározni, hogy a kívánt sebesség melletti egyensúlyi helyzetben effektív állásszöge $\alpha_M = 0^\circ$ legyen.

A w leáramlási sebességnek az effektív állásszöget csökkentő hatása függ a farokfelületnek a szárnytól való távolságától. Az állásszögcsökkenés annál kisebb, minél nagyobb l_M .

Javítja a vízszintes farokfelület hatásosságát az m elhelyezési magasságának (l. az ábrát) növelése is, mert így a leáramlás hatásának kevésbé van kitéve. Ez az egyik magyarázata annak, hogy a legutóbbi időben egyre több vitorlázó repülőgép vízszintes farokfelületét helyezik el a függőleges felületek tetején ún. T farkot alakítva ki.

Az indukált örvények keletkezési okával és törvényszerűségeivel függ össze az, hogy a szárny oldalviszonyának növelése a vízszintes farokfelület hatásosságára kedvezően hat, ugyanis a nagyobb oldalviszonyú szárnyak mögött a w leáramlási sebesség viszonylag kisebb.

Mivel a leáramlás miatt a vízszintes farokfelület helyén a torlónyomás a zavartalan áramlás q értékétől eltérő q_M nagyságú, a farokfelület korábban már felírt nyomatókát ennek felhasználásával pontosabban kifejezhetjük, éspedig közvetlenül a nyomatóki tényezővel:

$$m_{zM} = \frac{M_{zM}}{q F h_A} = -c_{yM} \frac{q_M}{q} \frac{F_M}{F} \frac{l_M}{h_A} = -c_{yM} \eta_M V_M,$$

ahol h_A a szárny közepes húr hossza;

$\eta_M = q_M/q$ a farokfelület hatásfoka (a T farkelrendezés esetében $\eta_M \cong 1$, egyéb elrendezésben egynél kisebb szám);

$V_M = \frac{F_M l_M}{F h_A}$ pedig a vízszintes farokfelület ún. viszonylagos térfogata.

A hossz-stabilitás mértéke. Az egyensúlyi helyzet megváltoztatása

Térjünk most vissza a 79. ábrához, ahol egy stabil repülőgép hossznyomatékának változását ábrázoltuk az állásszög függvényében. Az ábráról könnyen belátható, hogy a stabilitás mértéke az $\Delta\alpha$ állásszögváltozásra létrejövő ΔM_z nyomatékváltozás nagyságával jellemezhető, éspedig minél nagyobb ez a stabilizálónyomaték-változás, annál nagyobb a repülőgép stabilitása. Ha a szokás szerint a nyomaték helyett a nyomatéki tényezőt, az állásszögváltozás helyett pedig a vele arányos felhajtóerő-tényező Δc_y változását tekintjük, akkor a stabilitás mértékének a $-\frac{dm_z}{dc_y}$ hányados abszolút értéke adódik. Vitorlázó repülőgépek esetében kívánatos értéke 0,03...0,06 között van.

A repülőgép stabilitásának mértékét *kialakítása és méretei*, valamint a *súlypont helyzete* egyértelműen meghatározza. A pilótának repülés közben általában nem áll módjában azt megváltoztatni, hacsak a súlypont helyzetét nem tudja változtatni (ami pl. egyes teljesítmény-vitorlázógépek esetében a vízballaszt leengedése következtében előfordul).

A 80. ábrával kapcsolatban láttuk, hogy az önmagában repülő szárny stabilitásának jellegét a súlypont helyzete hogyan változtatja meg. A súlyponthelyzetre való érzékenység az egész repülőgép esetében is fennáll, és a stabilitás jellegét és mértékét döntő módon befolyásolja. Erre a kérdésre a későbbiek folyamán még visszatérünk. Most válaszoljuk meg azt a kérdést, lehetséges-e a 81. ábrán *A* ponttal jellemzettől eltérő sebességgel is stabil egyensúlyi helyzet?

A válasz: minden olyan esetben, amikor a gép eredő hossznyomatéki tényezője $m_{z\text{ gép}} = 0$, azaz azoknál a sebességeknél, amelyekhez tartozó c_y tényezőnél az eredő $m_{z\text{ gép}}$ görbe a c_y tengelyt metszi. Más szóval: létre kell hozni egy olyan új $m_{z\text{ gép}}$ eredőt, amely ezt a feltételt a kívánt sebességgel, azaz c_{yM} -al pl. a *B* pontban teremti meg. Ha a szárny és a súly nyomatéka nem változik, ezt a farokfelület nyomatékának megváltoztatásával hozhatjuk létre.

A szimmetrikus szelvényekkel készült vízszintes farokfelületeknek kétféle változatuk ismeretes: a vezérsík nélküli, teljes egészében állítható *balansz magassági kormány*, és a merev vezérsíkra és állítható kormánylapra osztott, „*csillapított*” *kivitelű*. Az előbbi δ szögben való kitérítése egyértelműen változtatja α_M effektív állásszögét, a rajta létrejövő légerőtényező nagysága $c_{yM} = a_M \alpha_M$ (itt a_M a farokfelület felhajtóerő-tényező görbéjének meredekségére jellemző, és az oldalviszonytól függ). Az osztott farokfelület kormánylapjának δ szögű kitérítése az egész farokfelület α_M állásszögét δ -nál valamivel kisebb $\Delta\alpha = \frac{d\alpha}{d\delta} \delta$ szöggel változtatja meg. Ha az ilyen farokfelület kormányát kitérítjük, a felhajtóerő-tényező a következőképpen alakul:

$$c_{yM} = a_M \left(\alpha + \frac{d\alpha}{d\delta} \delta \right).$$

A farokfelületen keletkező légerő által létrehozott, és a gép súlypontjára vonatkoztatott m_{zM} tényező változása, mint azt a 81. ábrával kapcsolatban láttuk, a szárny c_y felhajtóerő-tényezőjének függvényében stabil változású és lineáris. A δ kormánykitérítés hatására ez a jelleg nem változik, az $m_{zM} = f(c_y)$ egyenes önmagával párhuzamosan felfelé ($-\delta$), ill. lefelé ($+\delta$) tolódik el. Ezeket az egyeneseket a 81. ábrára különböző δ kormánykitérítési szögekre is berajzoltuk. Ezután könnyű belátni, hogy a kívánt sebességre akkor állítható be stabil egyensúlyi helyzet, ha a magassági

kormányt olyan δ szögben térítjük ki (az ábrán éppen $\delta = -10^\circ$ -ra), amelynek m_{zM} egyenese a szárny m_{zsz} görbéjével olyan $m_{zgép}$ eredőt hoz létre, amely a sebességtengelyt éppen a kívánt B pontban metszi. Itt tehát ekkor újra nyomatóki egyensúly jön létre és jellege stabil. Fenntartásához azonban a magassági kormány δ szögű állandó kitérítése szükséges.

Ha a tervezett siklási sebességtől, vagyis attól, amelyre a gép eredetileg ki van egyenlítve, eltérő sebességgel huzamosabb ideig akarunk repülni, a magassági kormányt egész idő alatt kitérített állapotban kell tartani. Ez a repülőgép vezetője számára kényelmetlen és fárasztó. A kormánybot tehermentesítése érdekében a magassági kormányt kilépőélénél kis *kiegyenlítőlappal* (trimmlappal) szerelik fel. Ez tetszés szerint beállítható *fejnehéz* vagy *faroknehéz* helyzetbe. Ha a botkormányt elengedjük, a trimmlap fejnehéz állásában a magassági kormányt a rajta keletkező légerő lefelé ($+\delta$ irányában) téríti ki. Faroknehéz helyzetében hatása ezzel ellentétes ($-\delta$ kitérés). A trimmlap kezelése ezért a következő: a magassági kormány megfelelő kitérítésével beállítjuk a kívánt siklási sebességet, majd a trimmlapot olyan mértékben állítjuk el, hogy a botkormányon ne legyen szükség erőre a magassági kormány kitérített helyzetében való megtartásához.

A hossz-stabilitással kapcsolatos következő kérdés: Mi történik akkor, ha a súly M_{zG} nyomatóka nem azonos a tervezettel?

Ennek két oka lehet. Az egyik a *gyártás pontatlanságából származik*. Ha ugyanis a gépet megépítik, súlya csak a legritkább esetben egyezik meg a tervezettel, de az üres gép súlypontjának helye is eltérhet a számítottól. A másik ok *a vezető és a felszerelés súlyának eltéréseiből* vagy — különösen hosszirányban állítható ülés esetében — *a vezető kabinban való elhelyezkedésének módjából* adódik. A vezető nagyobb súlya vagy előretolt ülés helyzete a törzsorral felé tolja el a súlypontot. A kis pilótasúly vagy a hátrahúzott ülés helyzete ennek ellenkezőjét okozza. Kisebb eltérés általában megengedhető, és az egyensúlyi helyzet a magassági kormány megfelelő kitérítésével létrehozható. (A trimmlap megfelelő értelmű beállítása ilyenkor is tehermentesíti a repülőgépvezetőt a botkormány állandó kitérített helyzetben tartásától.) A nagyobb mértékű súlyponteltolódás a stabilitási viszonyokat mindkét irányban elfogadhatatlan mértékben változtathatja meg.

Ha túlságosan előre kerül a súlypont, akkor túl nagy lesz a stabilitás, ami a gép mozgékonyasága és a kormányozhatóság rovására megy. A túlságosan nagy stabilitású repülőgép a széllekedéseknek, de ugyanígy a kormánykitérítéseknek is erősen ellen-szegül. Ez a tulajdonság a kormányzást megnehezíti.

Ha a súlypont túlságosan hátrakerül, a gép instabillá válhat. Elvileg statikusan instabil géppel is lehet repülni, mert a repülőgépvezetőnek a megzavart egyensúlyi helyzetet a magassági kormány megfelelő kitérítésével mindig módjában áll helyrehozni. Ez azonban igen fárasztó lenne, ezért az instabil repülőgépet nem tekintjük repülésre alkalmasnak.

A súlypontnak a tervezettől eltérő, de megengedhető szélső helyzeteire a későbbiekben még visszatérünk.

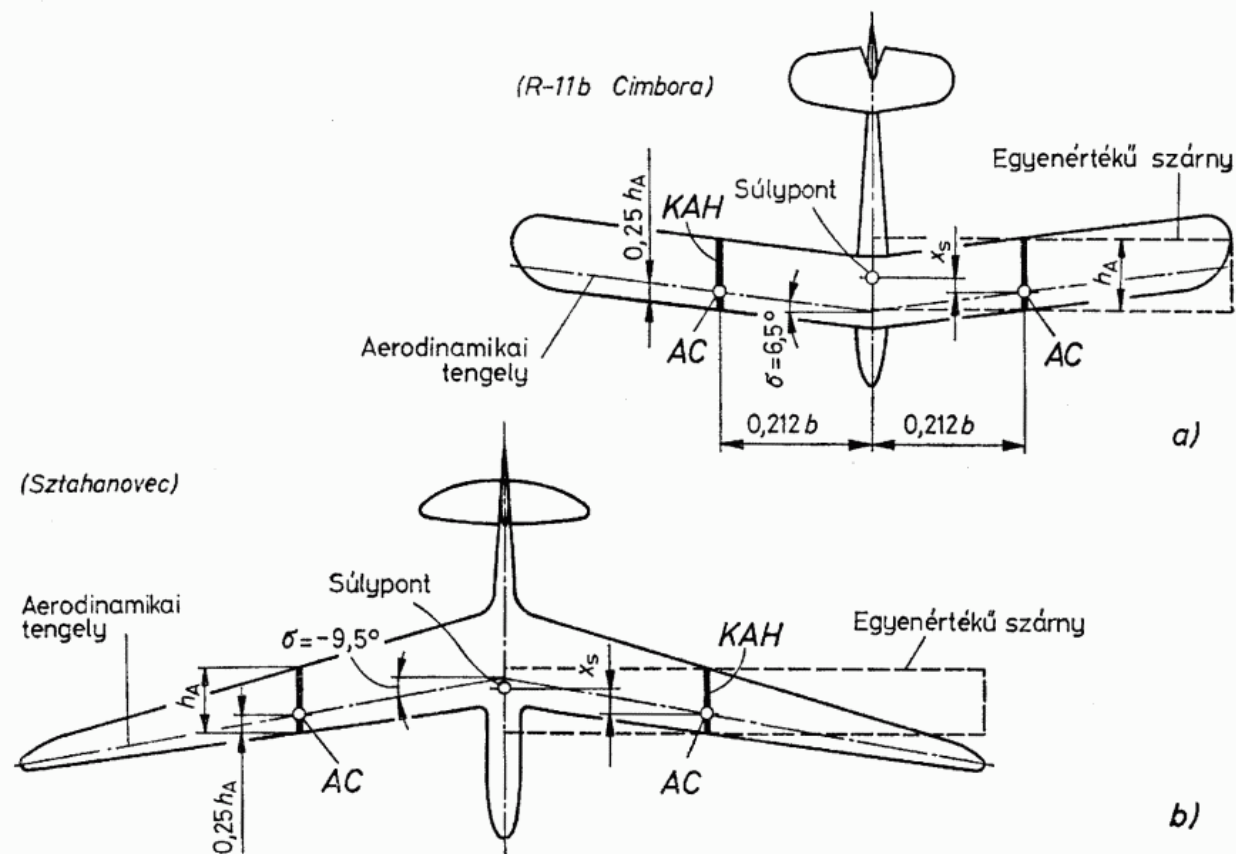
A gyártási hiba folytán bekövetkező kismértékű súlyponteltolódáson a vezérsík elállításával segíthetünk. Ezzel tulajdonképpen azt idézzük elő, amit a 81. ábrával kapcsolatban már megtárgyaltunk, vagyis megváltoztatjuk, és pedig a nekünk kedvező sebességre állítjuk be azt az egyensúlyi helyzetet, amelyben a repülőgép a magassági kormány kitérítése nélkül repülhet. Ne feledjük: a vízszintes farokfelület beállítási szögének növelése a gép fejnehézségét, csökkentése pedig faroknehézségét növeli. Igen fontos tudnunk, hogy a farokfelület beállítási szögének megváltoztatásával a statikus hossz-stabilitás jellegét vagy mértékét nem, hanem csakis az *egyensúlyi*

helyzetéhez tartozó sebességet lehet szabályozni. A beállítási szög eltérése miatt előfordulhat, hogy a repülőgép valamennyi használatos sebességgel fejnehézzé válik, tehát a magassági kormányt bizonyos mértékben mindig húzni kell. Ellenkező esetben, vagyis túlságosan kicsiny beállítási szöggel faroknehézzé válik a repülőgép. Bár mindkét eset stabil egyensúlyi jelleg mellett fordulhat elő, kerülendő.

A közepes aerodinamikai húr és az egyenértékű szárny

A repülőgép hossz-stabilitását eddig úgy vizsgáltuk, mintha a szárny derékszögű négyszög alaprajzú, tehát állandó h húr-hosszú, fesztávolsága mentén végig azonos profilozású, és előlnézetben is teljesen egyenes lenne. A vitorlázó repülőgépek szárnyai azonban ettől az általánosított képtől eltérők, és más-más alaprajzi alakkal készülnek. Ezenkívül a fesztávolság mentén profilozásuk sem végig azonos, sőt az egymás mellett levő szelvények állásszöge sem egyforma, mert a felhajtóerő kedvező eloszlása érdekében elcsavarást alkalmaznak. Mindezen kívül a valódi szárnyak általában V-be vannak állítva, ami azt jelenti, hogy az egymás mellett sorakozó szárnymetszetek alapvonalán átfektetett sík nem merőleges a repülőgép szimmetriasíkjára, hanem azzal a V állás ψ szögét zárja be. A szárnyat gyakran nyilazzák is. *Nyílazásról* akkor beszélünk, ha az egyes metszetek AC aerodinamikai középpontját összekötő egyenes, a szárny *aerodinamikai tengelye*, felülnézetben nem merőleges a gép szimmetriasíkjára, hanem azzal σ szöget zár be. Beszélhetünk előre- ($-\sigma$) vagy hátranyílazásról ($+\sigma$).

A valóságos szárnyak esetében a repülőgép hossz-stabilitásával kapcsolatos jellemzőket az aerodinamikailag semleges, közepes szelvényre, ill. húr-ra (KAH) vonatkoztatjuk (mint ezt már a vízszintes farokfelület nyomatékával kapcsolatban



83. ábra. Az aerodinamikai középhúr (KAH) értelmezése hátra- (a) és előrenyilazott (b) szárny esetén

a viszonylagos térfogat kifejezésében tettük), ennek hosszát h_A -val jelöljük. Jó közelítéssel úgy vehetjük, hogy a KAH a szárnyfeszítávolság $2b/3\pi = 0,212b$ helyén levő húrral azonos.

A közepes aerodinamikai húr fogalmának bevezetésével a tetszőleges alaprajzi alakú, profilozású és elcsavarású szárnyat az ún. *egyenértékű szárny* helyettesíthetjük, vagyis egy olyan h_A húr hosszúságú, derékszögű négyszög alaprajzú szárnyal, amelynek a stabilitással kapcsolatos minden tulajdonsága megegyezik a valódi szárnyéval.

A közepes aerodinamikai húr fogalmának bevezetésével a repülőgéptervező használható módszert kap a repülőgép esetleg nem kielégítő stabilitásának módosítására. Ha pl. a stabilitás mértéke kicsiny, a súlypontot az AC -hez kell közelíteni. Ez megoldható a törzs orrában elhelyezett ballaszt súllyal (legrosszabb megoldás és leginkább a sorozatgépek eltéréseit korrigálják így) vagy a szárny hátrább tolásával, bár ez a megoldás a súlypontot is magával viszi kissé (és sorozatgépeknél általában már nem alkalmazható). A szárny bekötési helye általában már adott, megváltoztatása túlságosan költséges lenne. Ilyenkor a szárny külső részének hátranyilazása segíthet, ami által az aerodinamikai középhúr hátrább, a súlypont pedig ezért — hozzá viszonyítva — előbbre kerül.

A szárny hossz-stabilitási okokból való hátranyilazását alkalmazták az *R—11 Cimbora* kétüléses gépen, ahol az egymás mögött elhelyezett ülések között adva volt a szárnybekötés legkedvezőbb helye, de a súlypont KAH -hoz viszonyított kedvező elhelyezésére $\sigma = 6,5^\circ$ nyilazást alkalmaztak (83a ábra). A kisebb-nagyobb súlypontkorrekciókra példa még az *R—26S Góbé* szárnya, amelyet a mindkét ülésből való kedvező kilátás érdekében $\sigma = -1,5^\circ$ -ban előrenyilaztak.

Még nagyobb, $\sigma = -9,5^\circ$ előrenyilazást alkalmazott *Jemeljanov* a harmincas évek végén többszörös világrekorder *Sztahanovec* nevű kétüléses gépén annak érdekében, hogy a kilátás a hátsó ülésből is minden irányban zavartalan legyen (83b ábra).

A súlypontvándorlás megengedhető határai

Az előzőekben többször utaltunk arra, hogy a vitorlázó repülőgép hossznyomatékának stabil jellegére és a stabilitás mértékére a *súlypont helyzetének* döntő hatása van, de ezenkívül a repülőgép teljesítményét is befolyásolja. A repülőgépek vízszintes farokfelületét a tervezéskor feltételezett súly és súlyponthelyzet figyelembevételével úgy állítják be, hogy az egyensúlyi helyzet a legkedvezőbb sebességgel adódjék. Ekkor a magassági kormány kitérítésére nincsen szükség, s mivel a vízszintes farokfelületen nem keletkezik felhajtóerő, nem ébred indukált ellenállás sem. Ha a súlypont valamilyen okból nem a tervezett helyére kerül, a legkedvezőbb sebesség tartásához a *magassági kormány kitérítésére* van szükség. Ekkor már a vízszintes farokfelületen is keletkezik indukált ellenállás, ami a gép teljesítményeinek csökkenését okozza, és pedig annál nagyobb mértékben, minél nagyobb az eltérés a tervezett egyensúlyi helyzettől.

A súlyponthelyzetnek a tervezettől való elvándorlása a repülőgépvezetésre is kellemetlen hatású lehet. Lehetséges *leghátsó helyzete*, amellyel még statikusan stabil egyensúlyi helyzet lehetséges, az AC aerodinamikai középpont mögött

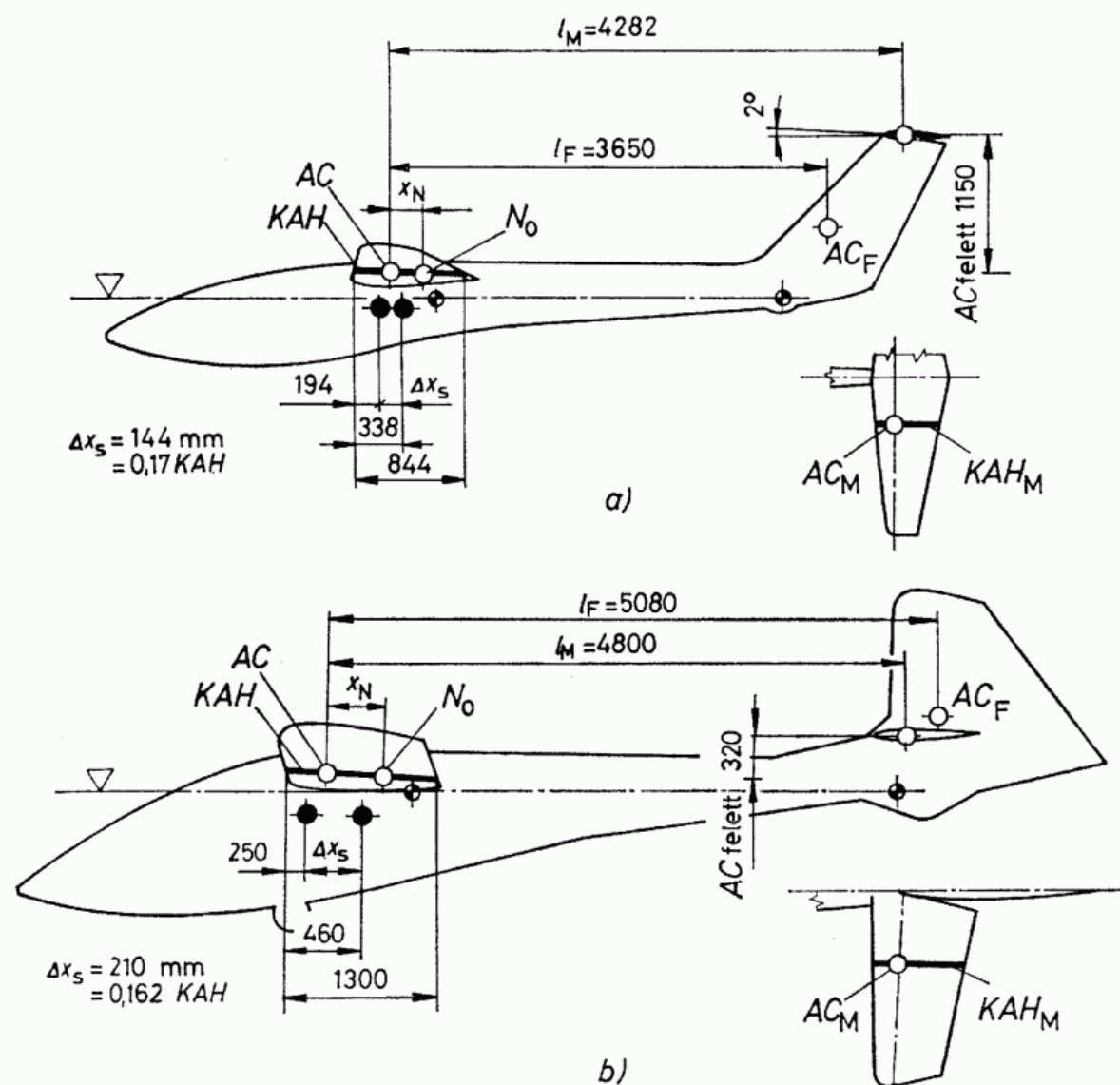
$$x_N = x_s + h_A \frac{dm_z}{dc_y}$$

távolságban van. Vagyis nagyobb húr hosszúságú szárnyak esetében a súlypont hosszirányú elhelyezkedésének abszolút tűrése nagyobb lehet, de az semmiképpen

sem kerülhet az AC aerodinamikai középpont mögött x_N távolságban elhelyezkedő N_0 *semleges pont* mögé. Ez a pont a szárny—törzs—farok együttes közös aerodinamikai középpontja, amely úgy képzelhető el, mint valamennyi, a gépre ható aerodinamikai erő eredőjének támaszpontja (l. 82. ábra).

A semleges pontot a kielégítő stabilitás érdekében a vízszintes farokfelület V_M viszonylagos térfogatának, tehát a szárnyéhoz viszonyított felületarányának, vagy az l_M karnak, esetleg mindkettőnek a növelésével lehet hátrább vinni.

A stabilitás növelésének másik lehetősége a *súlypont előbbrevitele*. Megengedett legelső helyzetét az a követelmény határozza meg, hogy a magassági kormánylap felfelé $-\delta_{\max}$ szöggel való kitérítésekor még a $c_{y \max}$ felhajtóerő-tényezővel tartósan repülni kell tudni. Ez a repülési helyzet leszálláskor, kilebegtetés közben adódik. Egy másik követelmény az, hogy a súlypont mellső szélső helyzetével még olyan hatásos kell maradjon a magassági kormány (vagyis a stabilitásnak még meg kell engednie),



- A súlypont szélső helyzetei
- ⊙ Szintezési jel

84. ábra. A súlypont megengedhető szélső helyzetei

a) Cobra 15; b) Góbé

hogy zuhanórepülésből a repülőgépet a megengedett legnagyobb terhelési többséssel (1. 4. fejezet), még megengedhető nagyságú kormányerővel fel lehessen venni.

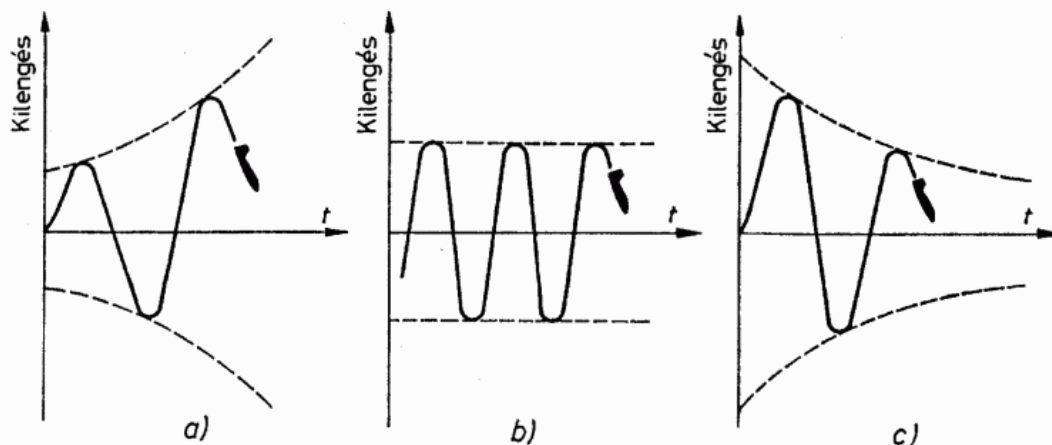
A súlypont megengedett szélső helyzeteit az *SZD—36A Cobra 15* és az *R—26S Góbé* esetére a 84. ábrán szemléltetjük e gépeknek a hossz-stabilitásra jellemző egyéb főbb méreteivel együtt. Látható, hogy a súlypont megengedhető vándorlása a közepes aerodinamikai húrhossz (*KAH*) viszonylag csekély százalékos értékét teszi ki. Éppen ezért az előírt súlyponthelyzet betartása két okból is szükségszerű. Egyrészt a súlypontvándorlás, mint láttuk, megváltoztatja a stabilitás mértékét, és bár a súlyponthelyzet megengedhető határai között ez még nem jár a repülés biztonságát érintő következményekkel, a repülőgépnek a széllekedésekre vagy kormánymozdulatokra való reagálásán észrevehető változást idéz elő. Mivel a vitorlázó repülőgépeken az egyetlen mozgó, ill. változó súly általában a repülőgépvezető (és többüléses gépeken az utasok) súlya, a súlypontvándorlás létrehozható, de korrigálható is a repülőgépvezető ülésének a törzs hossza irányában való elállítással. Így pl. kisebb súlyú pilóták előre állított üléssel növelhetik meg súlyuk kisebb nyomatékát, a súlyosabbak pedig hátsóbb ülés helyzettel állítják be a súlypont előírt helyzetét. A vitorlázó repülőgép ülésének a vezető testméretei és súlya szerint való beállítása tehát nem kizárólag kényelmi követelmény. Éppen ezért a vitorlázó repülőgép hasznos terhelése sem csak a terhelhetőség szempontjától lényeges előírás, hanem mindig minden repülőgépre megadják a súlyponthelyzet megengedhető határainak betartásához az ülések (két ülés esetén az első, ezenkívül mindkettő együttes) minimális és maximális terhelhetőségét is.

A tervezett súlyponthelyzet pontos betartásának másik szükségszerű oka abból származik, hogy a repülőgép *egyetlen súlyponthelyzettel* képes a magassági kormány kitérítése nélkül egyensúlyi helyzetben repülni. Ettől való minden eltérés esetén ki kell téríteni a magassági kormányt a felborult nyomatéki egyensúly helyreállítására. Ekkor azonban a vízszintes farokfelületen indukált ellenállás ébred, és az annál nagyobb, minél távolabb van a súlypont legkedvezőbb helyzetétől, vagyis minél nagyobb kormánykitérésre van szükség az egyensúlyi helyzet létrehozásához. A kitérített magassági kormánnyal való repülés tehát így végső soron a repülőgép teljesítményeit lerontja.

2.2.1.2. A dinamikus hossz-stabilitás

A statikusan stabil repülőgép a külső zavaró hatás által megváltoztatott állásszögét kormánykitérés nélkül önműködően igyekszik eredeti értékére visszaállítani. A gép azonban az egyensúlyi állapot elérésekor nem jut azonnal nyugalomba, hanem tehetetlensége folytán az ellenkező irányba lendül át. Ekkor ismét működésbe lép a statikus stabilitás visszatérítő hatása, és így az egyensúlyi helyzet körül *lengések* keletkeznek. A repülőgép dinamikusan akkor hossz-stabil, ha a külső zavaró hatás által megzavart egyensúlyi helyzetét (állásszögét, sebességét) a magassági kormány használata nélkül, néhány csillapodó lengés után visszanyeri (85. ábra).

A repülőgép *hosszirányú lengéseinek* két változata lehetséges. Az első változat akkor következhet be, amikor egyensúlyi helyzetéből pl. a széllekedés kitéríti. A szárny állásszöge ekkor igen gyorsan változik, és az ezt követő felhajtóerő-változás miatt a pillanatnyi pályairányra merőleges gyorsulás lép fel. A gyorsulást a repülőgép vezetője igen gyorsan csillapodó, rövid periódusú, függőleges síkban lezajló lengésként észleli, amelyben a gép hosszoldását nem, csak állásszögét változtatja. Ezt a lengésfajtát ezért *állásszöglengésnek* nevezik. A másik lengési mód a gép hosszoldásának



85. ábra. A dinamikus hossz-stabilitás különféle esetei

a) dinamikus instabil; b) dinamikus közömbös; c) dinamikus hossz-stabil repülőgép mozgása

változásaival jár együtt: a lengés folyamán a repülőgép hosszdőlése és sebessége viszonylag hosszú periódusidővel felváltva csökken, majd növekszik. Ezzel egyidejűleg a repülési pálya magassága is állandóan változik: a repülőgép függőleges síkban jellegzetes hullámvonalat ír le. A hosszirányú lengésnek ezt a fajtáját *pályalengésnek*, a lengés jellegzetes pályáját pedig *figoidpályának* nevezzük. A pálya elnevezése után a lengési módot szokás *figoidlengésnek* is nevezni.

Sajnos a figoidlengésekre nem fordítanak mindig kellő figyelmet, mivel általában lassú folyamatról van szó, ezért a repülőgépvezetők a legtöbb esetben nem is figyelnek fel rá. A gépről alkotott véleményükben a figoidlengés ritkán kap helyet, jóllehet éppen a vitorlázó repülőgépek repülési tulajdonságaira gyakorol komoly hatást. A figoidlengések csillapodása a repülőgép felhajtóerő- és ellenállástényező viszonyai-val van összefüggésben, mégpedig c_y/c_x -szel fordítottan arányos, de a lengésidő egyedül a c_y tényező függvénye. Az aerodinamikailag jó kialakítású, tehát viszonylag kis ellenállású repülőgépek csillapítása kisebb. Ezek közé tartoznak általában a nagy c_y/c_x viszonyú vitorlázó repülőgépek. A figoid mozgás a nagy felhajtóerő-tényezőkkal, azaz kis sebességgel való repülésben kellemetlenebb. Különösen a teljesítmény-repülőgépek esetében áll ez fenn, míg a kiképzés céljaira szolgálók ellenállása általában nagyobb (c_y/c_x tehát kisebb), ezért a lengések csillapodása szempontjából ezek kedvezőbbek.

Az egyensúlyi helyzet megzavarásakor a lengések éppen a csekély csillapítás miatt fejlődhetnek ki, majd további lefolyásuk a repülőgép dinamikai hossz-stabilitásának jellege és a csillapítás nagysága szerint alakul.

A *dinamikusán indifferens hossz-stabilitású* repülőgép a zavarás hatására megkezdett lengő mozgást közel állandó amplitúdóval és lengésidővel addig folytatja, amíg a magassági kormány kitérítése azt meg nem szünteti. A *dinamikusán instabil* repülőgép viszont a megkezdett lengéseket egyre nagyobb sebesség- és magasságingadozással folytatja mindaddig, amíg egyik sebességszökkenési fázisa végén át nem esik vagy az ellenkező fázisban zuhanásba nem megy át (85. ábra). Ha egy teljes lengés ideje nagy, legalább 20...30 s, a dinamikus instabilitást még nem kell okvetlenül veszélyesnek tekinteni, mivel a repülőgép vezetőjének ekkor a magassági kormány megfelelő kezelésével mindig lesz elegendő ideje a lengések megszüntetésére, mielőtt azok túlzott mértékben kifejlődnének. Sajnos a vitorlázó repülőgépek nagy részét egyáltalán nem lehet dinamikus hossz-stabilitásuk tekintetében ideálisnak nevezni.

A *dinamikus hossz-stabilitásnak* alapvető feltétele, hogy a repülőgép statikusan hossz-stabil legyen. Fordítva azonban ez már nem áll fenn okvetlenül, és a statikusan hossz-stabil repülőgép egyúttal nem okvetlenül mutat dinamikusan is stabil tulajdonságokat. A dinamikus hossz-stabilitás, ill. instabilitás a következőkben nyilvánul meg:

— Elégtelen a dinamikus stabilitás mértéke, ill. a repülőgépet *dinamikusan instabilnak* kell tekintetni, ha a sebesség kicsiny megzavarása esetén is egyre növekvő lengések lépnek fel, és már 5—6 lengés után zuhanásig gyorsul vagy átesik a gép. Ezt a tulajdonságot már a prototípus vizsgálatokor elfogadhatatlannak kell minősíteni.

— Az előbbinél kedvezőbb esetben a zavaró hatásra létrejövő lengések — elengedett magassági kormányval — csak igen lassan növekednek, és legfeljebb 18—20 teljes lengés után kerül a repülőgép szélsőséges, pl. zuhanó helyzetbe. Az ilyen dinamikus hossz-stabilitást mutató repülőgép általában már elfogadható.

Ha a vitorlázó repülőgép lengései elengedett kormányval a zavarásra csak igen lassan növekednek, de a sebesség még több teljes lengés után sem haladja meg a kezdősebesség kétszeresét, *kielégítő dinamikus hossz-stabilitásról* beszélhetünk.

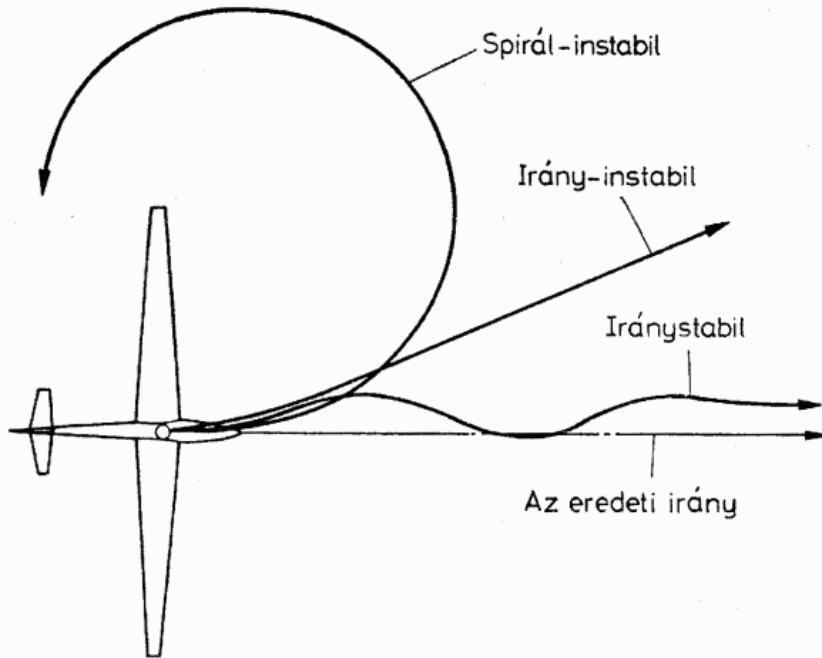
— Bizonyos esetekben a repülőgép kicsiny zavarások után csakhamar megállapodik egyensúlyi helyzetében, de a nagyobb zavarások hatására instabilan viselkedik. A dinamikus hossz-stabilitás elfogadhatóságát ilyenkor annak a zavarásnak a nagysága alapján ítélik meg, amellyel az instabilitás bekövetkezik.

A vitorlázó repülőgép bizonyos fokú dinamikus instabilitása látás melletti repülésben még nem jelentkezik okvetlenül kellemetlenül. Vakrepülésben azonban már igen zavaró, sőt veszélyes lehet, mivel a látás hiányában nemcsak a repülőgép pillanatnyi helyzete, hanem a pillanatnyi mozgás tendenciája sem ismerhető fel elegendő műszerezettség nélkül. Az instabilitás ilyenkor a sebesség és a gyorsulások olyan mérvű megnövekedéséhez vezethet, amely a szerkezet törését okozhatja.

A dinamikus instabilitás kiképzés céljára szolgáló vitorlázó repülőgépeknél sem kívánatos repülési tulajdonság. Ebből a szempontból szerencsésnek mondható az a körülmény, hogy a lengések — túlnyomó részben az ellenállásból származó — csillapítása az általában kedvezőtlenebb aerodinamikai kialakítású repülőgépek esetében nagyobb.

2.2.1.3. A repülőgép iránystabilitása

Ha oldalirányú széllelés vagy egyéb, nem a szimmetriasíkban ható zavarás a repülőgépet függőleges tengelye körül előző, állandósult repülési irányától elfordítja, tehetlensége folytán súlypontja kis ideig még megtartja a mozgás eredeti irányát. A törzs ezért az áramláshoz viszonyítva β *csúszási szöggel* oldalozva halad. Ha az így oldalozva haladó repülőgépen olyan oldalirányú légerők keletkeznek, amelyeknek a súlypontra vett nyomatéka a csúszást a kormányok működtetése nélkül rövid időn belül megszünteti, és a gép egyensúlyi helyzetébe önműködően visszatér, *statikai iránystabilitásról* beszélünk. Ennek teljesüléséhez nem szükséges, hogy a repülőgép a zavarás fellépte előtti égtáj szerinti irányba haladjon ismét tovább, csupán az újra felvett, állandósult, egyenes vonalú, csúszásmentes repülési helyzet a feltétele. *Irány-instabilitás* akkor jön létre, ha a zavarás elmúltával a repülőgép magától nem igyekszik felvenni az eredetit megközelítő helyzetét, hanem a zavarás hatására felvett új irányban repül tovább (86. ábra).



A csúszás közben a repülőgépen oldalirányban fellépő erők nyomatékát *legyezőnyomatéknak* nevezzük, mivel a gép függőleges tengelye körüli legyező mozgására gyakorol hatást.

A szélzászló-stabilitás. A függőleges farokfelület és a szárny V állásának szerepe

Nézzük meg, hogy a 87a ábrán látható, csúszással mozgó vitorlázó repülőgépen keletkező légerők visszatérítik-e azt szélzászló módjára eredeti irányába, továbbá vizsgáljuk meg, hogy melyek az iránystabilitás feltételei.

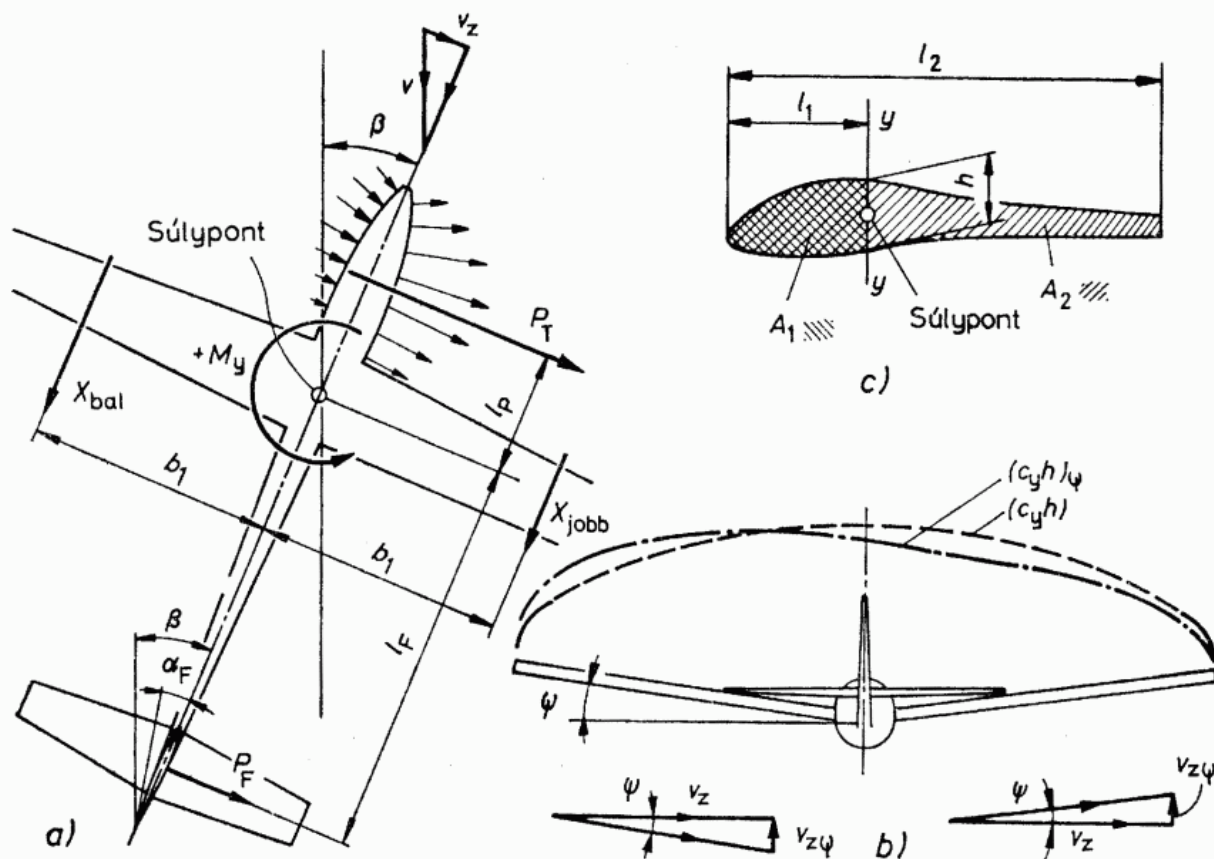
Az ábra alapján beláthatjuk, hogy az oldalozva haladó vitorlázó repülőgép körüli áramlás iránya megváltozik (a haladási iránynak a szimmetriasíkkal bezárt β csúszási szögének megfelelő $v_z = v \sin \beta$ sebességösszetevő jön létre a szárny terjedtsége irányában), aszimmetrikussá válik.

A törzset β csúszási szöggel érő v sebességű áramlás azon oldalirányban a P_T légerőt hozza létre. E légerőnek a súlypontra vett M_y nyomatéka a csúszás szögét növelni igyekszik. Ennek megakadályozására, vagyis az iránystabilitás biztosítására alkalmazzák a repülőgépeken a *függőleges farokfelületet*.

Míg szimmetrikus, tehát csúszás nélküli repülési helyzetekben a szimmetrikus profilozású függőleges farokfelületen nem keletkezik oldalirányú légerő, a csúszási szög következtében az áramlás iránya itt is megváltozik a korábbihoz képest. Az áramlás a törzs és a szárny zavaró hatása miatt a β csúszási szögnél kisebb, de 0° -nál nagyobb α_F effektív állásszögben éri a függőleges farokfelületet. A 0° -tól eltérő effektív állásszög miatt ezért a függőleges farokfelületen oldalirányú

$$P_F = a_F \alpha_F q F_F$$

erő jön létre, amelynek $M_{yF} = P_F l_F$ nyomatéka a csúszást létrehozó és növelni igyekvő erők M_y nyomatéka ellen hat. (Az összefüggésekben a_F a farokfelülethez alkalmazott szelvény felhajtóerőtényező-változásának meredeksége, l_F pedig az F_F nagyságú függőleges farokfelület távolsága a repülőgép súlypontjától.)



87. ábra. Az iránystabilitás fogalmai

a) a szélzászló-stabilitás; b) a felhajtóerő-eloszlás megváltozása csúszásban; c) a törzs méretviszonyai

Az iránystabilitás feltétele, hogy a megcsúszás hatására a függőleges tengely körül mindig olyan légerők keletkezzenek, amelyek eredő nyomatéka 0-tól eltérő nagyságú és visszatérítő értelmű, azaz

$$\frac{dM_y}{d\beta} > 0$$

legyen.

Kis csúszási szögek esetén a nyílazás nélküli, téglalap alaprajzú, egyenes szárnyak áramlási viszonyai, ill. a keletkező légerők csak lényegtelenül változnak meg, éppen ezért az iránystabilitás létrehozásában szerepük jelentéktelen. Fokozni lehet azonban a repülőgép iránystabilitását a szárny V-be állításával (87b ábra). Ha ugyanis a pozitív ψ szöggel V-be állított szárny megcsúszik, a v_z csúszási sebesség az áramlás irányára most β szöggel ferdén álló szárnyat $v_{z\psi}$ függőleges összetevővel is éri. Ennek eredményéül a csúszás irányába eső szárnyfél állásszöge $(v_z/v)\psi$ mértékben megnövekszik, a másiké pedig ugyanilyen mértékben lecsökken. Az állásszögnek a fesztávolság mentén ilyen módon aszimmetrikussá válása a két szárnyfélen eltérő nagyságú légerőket hoz létre, és ezért a csúszás irányába eső oldal indukált ellenállása megnövekszik, a másik oldalon pedig lecsökken. Ez az aszimmetrikus ellenálláseloszlás a függőleges tengely körül

$$M_{ysz} = b_1 \frac{dc_x}{d\alpha} \frac{v_z}{v} \psi q F$$

nagyságú stabilizáló nyomatékot hoz létre. Az összefüggésben b_1 az aszimmetrikus eloszlású ellenállás eredőjének karja (87a ábra), a $dc_x/d\alpha$ hányados pedig a csúszás következtében létrejövő állásszögváltozás hatására keletkező ellenállástényező-változás nagyságára jellemző.

Ezzel magyarázatot kaptunk a repülőgépszárnyak V-be állításának okára. A V állás azonban nemcsak a *szélzászló-stabilitással* kapcsolatban előnyös megoldás, hanem a repülőgép minden olyan mozgásával kapcsolatban is, amely csúszással van összekötve.

*A törzs alakjának szerepe a repülőgép iránystabilitásában.
Mekkora legyen a függőleges farokfelület?*

Az előzőekben láttuk, hogy az iránystabilitás alakulásában a törzsnek is fontos szerepe van. A csúszás következtében létrejövő oldalirányú áramlási-sebesség-összetevő általában olyan oldalirányú légerőket hoz a törzsön létre, amelyeknek a súlypontra gyakorolt nyomatéka instabilizáló értelmű. Ennek az a magyarázata, hogy a légerők eredője a törzs hosszának mintegy 1/4-ében támad, a repülőgép súlypontja pedig ennél rendszerint hátrább van. A légerők alakulásában fontos szerep jut a törzs oldalnézeti alakjának és oldalnézeti területének, főként pedig a terület eloszlásának. Kísérletekkel megállapították, hogy minél nagyobb a súlyponton átmenő, képzeletbeli függőleges forgástengelytől a törzssorrig terjedő szakasz felülete és hossza (a 87c ábra jelöléseivel az $A_1 l_1$ szorzat) a törzs teljes oldalfelületéhez és a teljes törzshosszhoz viszonyítva ($A_2 l_2$), továbbá minél inkább a súlypont közelében helyezkedik el az A_2 felületrész (nagy h^2/A_2 arány), annál kedvezőtlenebb a kialakítás az iránystabilitás szempontjából. Ha a törzsön keletkező légerőkre jellemző, és kialakításától, azaz az előző értékektől, továbbá a β csúszási szög nagyságától függő k_t tényezőt bevezetjük, akkor a törzs függőleges tengely körüli nyomatékára a következő összefüggést kapjuk:

$$M_{y \text{ törzs}} = k_t \beta q A_2 l_2.$$

A k_t tényezőnek a β csúszási szögtől függő alakulását — akár a szárnyon keletkező légerők tényezőit — szélcsatornakísérletekkel határozzák meg a különféle törzsalakokra. Ha azonban az előbbieket alaposabban végiggonduljuk, néhány általános következtetést is levonhatunk a törzs oldalnézeti alakja és a repülőgép iránystabilitása közötti összefüggéssel kapcsolatban. A felület eloszlása szempontjából a *Fóka*, a *Zefir*, a *Kevély* gépekéhez hasonló törzsek kedvezőbbek — ezek között is előnyösebbek az alacsonyabb, azaz kis h méretű törzsek —, mint az ellenálláscsökkentés miatt igen kicsinyre szabott hátsó részfelületű, de a befogadóképesség miatt szükséges nagyságú A_1 mellső felületrészüek. Ez utóbbiak közé tartozik pl. az *Austria*, a *D—30*, a *Tr. Vuia* és a *Szellő* gépek, valamint a korszerű vitorlázó repülőgépek egy részének (pl. *Cirrus*, *Jantar*, *Sigma* vagy *PIK 20*) törzse.

Az ilyen kialakítású gépeken a kellő iránystabilitás létrehozására kétféle út kínálkozik. Vagy a függőleges farokfelületeket kell kellően nagy méretűre kiképezni, hogy a keletkező, viszonylag nagy helyreállító légerők kis l_F karon is elegendő nagyságú stabilizálónyomatékot gyakoroljanak, vagy pedig a kisebb ellenállás (és főként a kisebb indukált ellenállás) érdekében kisebb függőleges felületeket alkalmaznak, de a törzs hosszát, azaz a helyreállító légerők l_F karját növelik meg. E két lehetőség közül az előbbi utat választották a *D—30*, a *Koma* és a *Tr. Vuia* esetében, de a függőleges farokfelületét növeli az *R—26S Góbé* függőleges vezérsíkjának a törzsvég fölé előre nyúló, háromszög alakú gerince is. A második utat a *Cirrus*, a *Jantar* stb. gépek esetében választották.

Meg kell jegyeznünk, hogy a függőleges tengely körüli legyező mozgást a repülőgép súlyából származó tömegerők is észrevehetően befolyásolják. A csúszó mozgás kezdetén, a függőleges tengely körül való elfordulással együtt létrejövő szöggyorsulás hatására a szárny tömege kezdetben visszatartó hatást gyakorol, majd a már megrendült tömeg éppen a csúszási szöget növelni igyekvő nyomatékokat hoz létre a függőleges tengely körül. Ezek a tömegerőkből származó nyomatékok a nagy oldalviszonyú, de ezért nagyobb fesztávolságú vitorlázógépek esetében (ilyen a felsoroltak nagy része) olyan irány-instabilizáló hatást jelenthetnek, amely különösen kis sebességgel (pl. felszállás közben), amikor a függőleges felületen még viszonylag kis stabilizáló erők keletkeznek, igen kellemetlenül érvényesülhet.

A *függőleges farokfelület méreteinek és arányainak* megválasztásakor ellentmondó szempontot jelent a következő két kíváncsi: az indukált ellenállás csökkenése érdekében oldalviszonyát nagyra kellene választani, mivel így adott oldalkormány-kitérés viszonylag nagyobb oldalirányú erőt hoz létre. Ellentmondó ezzel az a körülmény, hogy nagy csúszási szögek esetén a függőleges farokfelület is képes (oldalirányban) átesni, amivel hatásossága ugrásszerűen lecsökken. Ez a tény tehát éppen kis oldalviszonyú függőleges felületet igényel, mivel annak kritikus állásszöge viszonylag nagy. A két kíváncsi közötti kompromisszumos megoldást az az igény adja, hogy a repülőgép üzemében előforduló csúszási szögek esetén — beleértve a szándékos csúsztatást is — a *függőleges farokfelületről még ne váljon le az áramlás*.

A függőleges farokfelület optimális méretét nemcsak a statikus szélzászló-stabilitás követelményei szabják meg. A következőkben még találkozni fogunk az ún. *spirál-instabilitás* jelenségével, amely a függőleges felületekkel kapcsolatban szintén követelményeket támaszt.

Az irány- vagy oldalstabilitásnak bármely összetevőjéről is van azonban szó, a V állás és a függőleges farokfelület nagysága közötti összefüggésre is fel kell figyel-nünk. Mivel mindkettő azonos értelmű stabilizálónyomatékokat hoz létre, szerepük bizonyos fokig helyettesíthető egymással.

A függőleges farokfelület hatékonyságára — mint a vízszintes farokfelület esetében — szintén jellemző $V_F = \frac{F_{Fl_F}}{Fb}$ viszonylagos térfogata, amely tulajdonképpen a farokfelület elhelyezését és nagyságát hozza összefüggésbe a szárny geometriai kialakításával.

2.2.1.4. A repülőgép oldalstabilitása

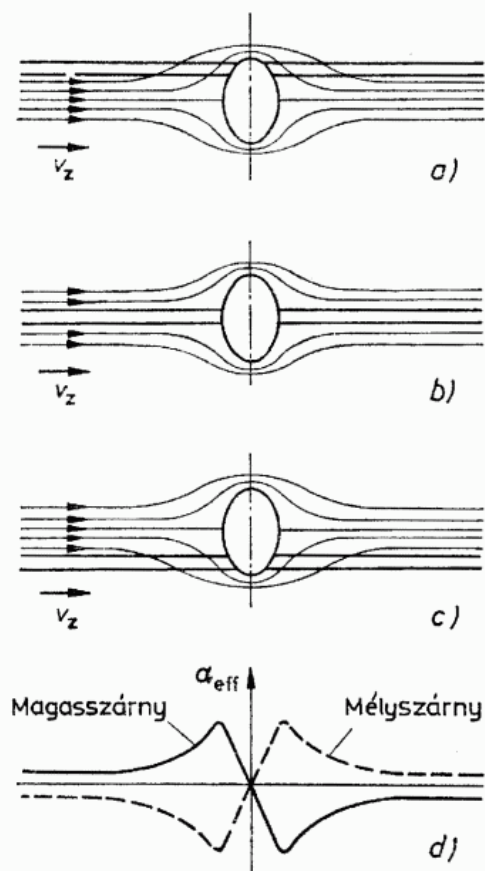
Az előzőkben láttuk, hogy a repülőgép függőleges tengelye körüli zavaró hatásra mutatott viselkedését — iránystabilitását — a megcsúszással és annak következményeivel magyarázhatjuk. Az iránystabilitás tehát független a repülőgép hosszten-gelye körüli orsózó mozgásban mutatott tulajdonságaitól, éppen ezért erről az egyéb mozgásoktól elkülönítve beszélhetünk. Fordítva azonban már nem mondhatjuk el ugyan-ezt. A hosszten-gely körüli kifejezett stabilitásról nem is beszélhetünk. Ha a repülőgép valamely zavaró hatásra megdől, nem keletkezik semmiféle visszatérítőnyomaték. Hosszten-gelye körül a repülőgép tehát *indifferens*, azaz *közömbös egyensúlyi állapotot* mutat. A megdőlt repülőgép dőlt helyzetében „lógva” maradna, ha vezetője a csűrő-kormányok használatával nem térítené vissza vízszintes helyzetébe. Ha ezt nem teszi, a δ szöggel lógó szárnyal repülő gép, G súlya $G \sin \delta$ összetevőjének hatására *megcsúszik*. Már az iránystabilitással kapcsolatban láttuk, hogy a csúszásban levő szárny állásszöge — V-be állításának eredményeképpen — a csúszás irányába eső oldalon

megnö, a másik oldalon pedig lecsökken. A rajta keletkező légerők $(c_y h) \rho$ fesztávolság menti eloszlása ezért aszimmetrikussá válik (87b ábra), és a csúszást megszüntető, valamint a megdőlt szárnyat vízszintes helyzetébe visszatérítő, *stabilizáló orsózónyomaték* keletkezik. Amint látjuk, a hossztengety körüli „keresztstabilitás” önállóan nem jön létre, hanem csak csúszással, vagyis a függőleges tengely körüli mozgással egybekötve.

A repülőgép oldal- és iránystabilitása igen fontos az oldalirányú kormányzási tulajdonságok, pl. a fordulóban való vezethetőség szempontjából. A stabilitás mértékére a legnagyobb hatást a szárny V állása gyakorolja, de erre a hatásra a gép általános elrendezésének is van befolyása.

A repülőgépeket — különféle meg gondolások alapján — *magasszárnyú*, *középszárnyú*, ill. *mélyszárnyú* elrendezéssel készítik. A szárny elhelyezésekor vitorlázó repülőgépek esetében többek között azt a szempontot is figyelembe veszik, hogy a nagy fesztávolságú szárnyak végeinek a földön való mozgás közben mindig bizonyos biztonsági magasságban kell még maradnia a föld felett akkor is, ha a gép széllökés stb. miatt kissé megdő. További szempont a szárny—törzs átmenetnél keletkező interferencia-ellenállás csökkentése. Ezek mellett a repülőgép stabilitása szempontjából sem lényegtelen a szárny helye. Csúszás közben ugyanis az oldalirányú áramlásnak kitett törzsön, mint láttuk, oldalirányú légerők is keletkeznek. Ezek a gép hossztengetye körül is hoznak létre elforgató-, azaz orsózónyomatékokat. Ez a nyomaték a stabilitás szempontjából lehet kedvező értelmű, vagyis a stabilitást növelő, de lehet kedvezőtlen is, vagyis azt csökkentő értelmű.

A törzs jelenlétének további hatása, hogy az oldalirányban megcsúszó szárny körüli áramlást függőleges irányban eltéríti, és így a fesztávolság mentén módosítja az effektív állásszög nagyságát és eloszlását. Az állásszögváltozás — amely közvetle-



88. ábra. a) Magas-, b) közép- és c) mélyszárnyú repülőgép körüli áramlás csúszásban; d) az effektív állásszög megváltozása csúszásban

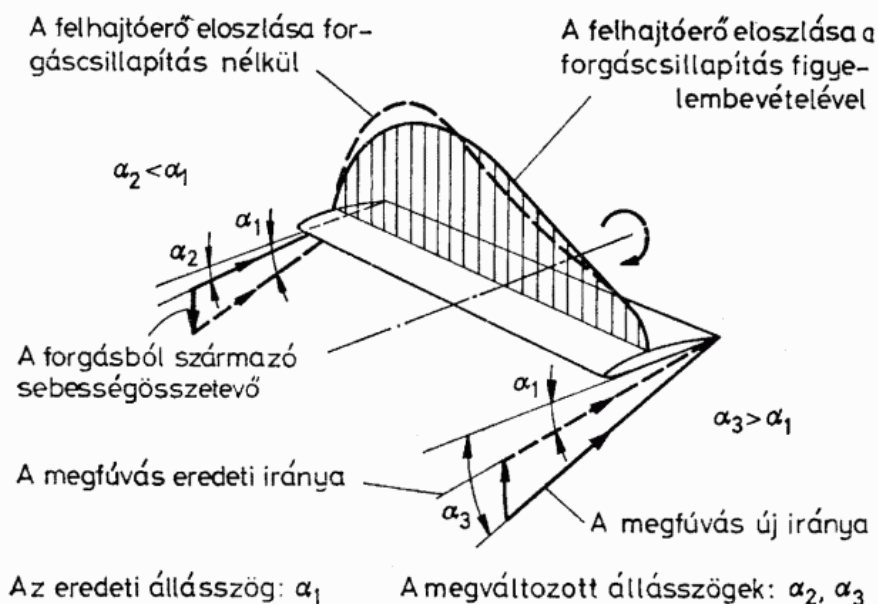
nül a törzs közelében a legnagyobb, és attól távolodva a szárnyvégek felé csökken — igen érdekes módon függ a szárnynak a törzshöz viszonyított függőleges elhelyezésétől is. A váll- és a magasszárnnyú elrendezésekben (88a ábra) az állásszögváltozás a csúszás iránya felé eső szárnyfél effektív állásszögét növeli, a másik oldalét pedig csökkenti. Hatásában ez a szárny bizonyos fokú V-be állításával egyenértékű. A törzshöz viszonyítva mélyen elhelyezett szárny körül kialakuló áramlásnak csúszásban ezzel éppen ellenkező a hatása (88c ábra), vagyis ez az elrendezés a V állás csökkentésével egyenértékű.

Megállapíthatjuk tehát, hogy a magasszárnnyú repülőgépek ugyanazon V állás mellett stabilabbnak bizonyulnak, mint a mélyszárnnyúak, ill. azonos fokú oldalstabilitást magasszárnnyú gépek esetében kisebb V állással lehet elérni, mint a mélyszárnnyúakkal. A középen elhelyezett szárny ilyen vonatkozásban közömbös, és a törzs jelenléte a V állás nélküli szárny körüli áramlásra csúszásban nem gyakorol hatást (88b ábra).

Tévedés volna azt állítani, hogy az oldalstabilitás kizárólag a szárny V-be állításával kapcsolatos. A stabilitás mértékét ezenkívül még számos egyéb tényező is befolyásolja, így pl. érdekes módon az oldalviszony is. Az oldalviszony növekedésének ugyanis, mint erről már többször szó volt, az a következménye, hogy az egységnyi állásszögváltozásra nagyobb felhajtóerő-tényező-változás jön létre a szárnyon. Ez jelen esetben azt jelenti, hogy már kisebb v_z csúszási sebességekkel vagyis kisebb V állás mellett is viszonylag nagyobb stabilizáló légerők, ill. nyomatékok keletkeznek rajta.

A szárny csillapítása orsózó mozgásban

Az orsózó mozgással kapcsolatban meg kell emlékeznünk a szárny csillapító hatásáról is. A hossz tengelye körül forgó repülőgép szárnyának állásszöge a forgás következtében megváltozik, mert a haladási és a forgási sebesség összeadódik. A lefelé haladó szárnyfél állásszöge ezért megnő, a másik oldalon pedig csökken. Az állásszögváltozás következtében a két szárnyfélen keletkező felhajtóerő is megváltozik, ami — tekintve, hogy a forgás irányába eső oldalon növekszik — a forgás ellen dolgozik és azt csillapítja (89. ábra). A csillapító hatás az oldalstabilitásban is szerepet játszik, mert a



89. ábra. Orsózó mozgás közben fellépő csillapító hatás

zavarás hatására bekövetkező dőlés mértékét csökkenti, ill. a közömbös egyensúlyi helyzetet jelentő orsózó mozgást csakhamar lefékezi. Bár a csillapító hatás a mozgékonytságot kissé korlátozza, a repülőgép vezetésére kellemesen hat, mert a kormányok kitérítéskor hatásukat lassabban engedi érvényesíteni.

A dinamikus oldalstabilitás problémái

Ha a repülőgép valamilyen zavaró hatásra függőleges vagy hossz tengelye körül elfordul, a megkezdett mozgás — az előzők értelmében — a másik tengely körüli elfordulással kapcsolódik. Ezt néhány hossz- és kereszt tengely körüli lengés (a gép egyik irányú dőlését, majd megcsúszását a másik irányba való dőlés és megcsúszás) követi. Az ilyen mozgást *holland orsónak* nevezik. Nem mindegyik repülőgép kerül azonban néhány lengés után nyugalmi helyzetbe. Előfordul, hogy a kormányok elengedése után a magára hagyott repülőgép valamely kis zavarás hatására enyhe spirálba kezd, amely lassan, de folyamatosan szűkül a dőlési szög állandó növekedésével. A repülőgépvezető megfelelő kormánykitéréssel beavatkozva kényelmesen megszüntetheti ezt a nem kívánt mozgást, de ha ezt nem teszi, a dőlésszög egyre nagyobb lesz, miközben a gép hossz tengelye egyre inkább a föld felé hajlik. Eközben erős magasságvesztésre kerül sor, és a sebesség gyorsan nő, a pillanatnyi pályairányra merőlegesen pedig nagy gyorsulások lépnek fel. A repülőgépnek ezt a mozgását *zuhanóspirálnak*, azt a hajlamot pedig, amellyel a repülőgép a leírt módon zuhanóspirál repülési pályára megy át, *spirál-instabilitásnak* nevezzük.

A felhőkben való vakrepüléskor, amikor a föld látásának hiánya a térben elfoglalt helyzet felismerését nagyon megnehezíti, a zuhanóspirál-hajlam szilárdságilag elviselhetetlen sebesség- és gyorsulásnövekedéshez vezethet. Következménye szárnytörés lehet. A kevésbé gyakorlott repülőgépvezető a spirál-instabil gépet esetleg egyáltalán nem tudja nyugalomba hozni a felhőben, mert a zuhanóspirál kifejlődött szakaszában a megszüntetéséhez alkalmazott kormánymozdulatok túlkormányzást okoznak.

Érdekes, hogy a spirál-instabilitás nem minden sebességgel, hanem csak bizonyos, gépenként változó nagyságú c_y tényezővel, és annál kisebb sebességgel repülve jelentkezik, mégpedig éppen azoknak a gépeknek az esetében, amelyeknek különben nagy a szélzászló-stabilitásuk. Ebben az esetben a repülőgép függőleges farokfelületének viszonylagos térfogata nagy, a V állás pedig kicsi. Most ismét egymásnak ellentmondó követelményekkel találkozunk. A kielégítő iránystabilitás ugyanis megkívánja, hogy a zavarásra bekövetkezett lengés csakhamar lecsillapodjék. A csillapítást a V állás csökkentésével lehet fokozni, az iránystabilitás növelésének tehát ez lehetne a módja. A V állás csökkentése és az iránystabilitás növelése azonban egyaránt spirál-instabilitást von maga után. A tervezőnek tehát nem könnyű a dolga az ellentmondó követelmények között a V állás, a törzhossz és a függőleges farokfelület helyes méreteinek keresésekor.

A régebben gyakran alkalmazott sirályszárny (*Minimoa*, *M—22*, *Orlik*, *Short Nimbus* stb.) is az oldalstabilitási problémák megoldására volt hivatva. Ennél a szárny V állását — de rendszerint nagyobb ψ szöggel — a fesztávolságnak a törzhöz közeli részére korlátozták, vagyis oda, ahol a 88. ábra szerint a csúszás állásszögváltoztató hatása a leginkább érvényesült. A fesztávolság külső részeinek 0° -os V állása ilyenkor a csillapítás csökkentését célozza.

A fordulékonyság és a jó kormányozhatóság érdekében általában megengednek némi spirál-instabilitást.

2.2.2. A vitorlázó repülőgép kormányzása és kormányozhatósága

A repülőgépeket a kormányok olyan rendszerével szerelik fel, amely vezetője számára lehetővé teszi az egyensúlyi helyzet fenntartását, vagy tetszőleges megbontását a súlyponton átmenő tengelyek körül a repülőgépre ható légerők által létrehozott nyomatékok korrigálásával vagy megváltoztatásával. A légerők nagysága és elosztása azokkal a *mozgatható kormányfelületekkel* változtatható meg, amelyeket a lehető legnagyobb nyomatéki karok elérésére a repülőgép súlypontjától legtávolabbi helyeken alakítanak ki. Így a magassági kormányt a vízszintes farokfelület, az oldalkormányt a függőleges farokfelület, a csűrőkormányt pedig a szárnyak szimmetriasíkjától távolabbi szakasza részeként képezik ki.

Kormányzáskor általában az lenne ideális, ha egy kormányfelület kitérítését a repülőgép egyetlen tengelye körüli mozgása követné, tehát az, amelynek létrehozása éppen a kormányfelület feladata. A valóságban ez nem így van. Valamely kormányfelület kitérítését rendszerint több tengely körüli mozgás kíséri. A csűrőkitérítés az orsózőnyomatékon kívül egyúttal legyezőnyomatékot, az oldalkormány kitérítése pedig a kívánt legyezőnyomaték mellett orsózőnyomatékot is létrehoz. Ez a kellemetlen jelenség megoldandó feladatot jelent minden vitorlázó repülőgép esetében.

A *kormányfelületek kitérítéséhez* a repülőgépvezetőnek a kormányszerveken (bot- és láb kormányon, valamint a féklap és az ívelőlap mozgatókarjain) bizonyos nagyságú *erőt* kell kifejtenie. Az erő nagysága a kormányfelületeket mozgó mechanizmusok belső súrlódásain kívül a kormányfelületek kialakításától függ, és általában ez utóbbi szerepe a döntő.

A repülőgépvezető gépét „érzésből” vezeti. Ezen azt kell értenünk, hogy a repülőgép vezetéséhez szükséges kormánymozdulatokat a kormányfelületek kitérítésekor kifejtendő erő nagyságának és a kitérítés mértékének, a repülőgép kormánykitérítésekre való reagálásának, valamint a kormányok harmóniájának érzékelése alapján alkalmazza. E tényezők közül a *kormányerők* alakulása fontosabb, mint a kormánykitérítés nagysága. A kormányerőnek ugyanis nem szabad túlságosan kicsinynek lennie, mert ez túlkormányzáshoz vezethet, s ez a gép épségét is veszélyeztetheti. Nem szabad túlságosan nagynak sem lennie, mert az meg a könnyű vezethetőséget akadályozná. A kormányszervek szükséges kitérítése ne legyen túlságosan kicsiny, mert ezzel a kormányok túlságosan érzékennyé válnának, de túlságosan nagyok sem lehetnek, mert a vitorlázó repülőgépek kabinjában rendelkezésre álló hely ezt nem engedi meg.

A kormányszervek kitérítésének nagyságát a szerkezet mechanikus áttételezésével lehet befolyásolni. A kormányerők nagysága pedig a kormányfelületeken alkalmazott aerodinamikus és súlykiegyenlítéssel, valamint célszerű geometriai kialakításukkal szabályozható.

Igen fontos még megjegyezni, hogy mint minden légerő, a kormányzáshoz felhasznált légerők nagysága is $Y = c q F$ alakban határozható meg, tehát a kormányzóerők, és ezeken keresztül a kormányzónyomatékok is v^2 függvényei.

2.2.2.1. A kormányzás elve és hatásossága

A magassági és az oldalkormány

A magassági kormány működési elvét tulajdonképpen már a 2.2.1.1. pontban a hossz-stabilitással kapcsolatban ismertettük. Akkor megállapítottuk, hogy kitérítésekor a vízszintes farokfelület körül megváltozó áramlási kép a kormányfelület kitérésével arányos változást hoz létre a rajta keletkező c_{yM} felhajtóerő-tényezőben (68. ábra). A vízszintes farokfelületen keletkező Y_M légerő

$$M_{zM} = Y_M l_M$$

nyomatéka hozza létre a repülőgép hossz-stabilitását. E nyomatéknak a kormányfelület tetszőleges kitérésével való változtatása azonban a repülőgép kereszttengele körül bólintó mozgást idézi elő, és így a gép hosszszögének változtatásán keresztül a szárny állásszögének megváltoztatására alkalmas. A kormányfelület kitérésékor tehát — a farokfelület nyomatékának a kívánt értelemben és mértékben való megváltoztatásával — a szárny kisebb vagy nagyobb állásszögre kényszeríthető, és ezzel velejár összes légerőtani jellemzőjének megváltozása is. Az új állásszöghöz új c_y és c_x , valamint c_m tényező tartozik. Ezekkel a kereszttengele körül új egyensúlyi helyzet alakul ki. Az új egyensúlyi helyzetben a gép hosszszöge előző értékétől eltérő, ezért — miután a Bevezetésben láttuk, hogy a hosszszög és a siklási sebesség egymással szorosan összefüggő fogalmak — sebessége a kiindulási helyzethez viszonyítva megváltozik. A magassági kormány tehát nem csupán az egyensúlyi helyzet beállítására, de egyúttal *sebességi kormányként* is szolgál.

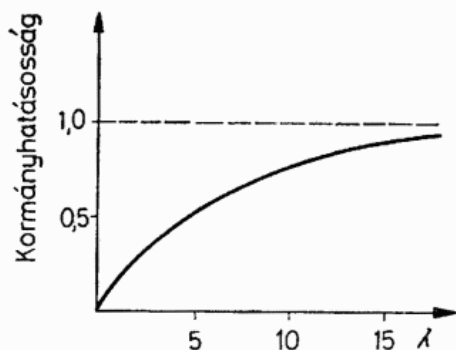
Egy repülőgép adott kialakítású vízszintes farokfelületének, ill. magassági kormányának hatásosságára a bólintónyomatéknak az a változása jellemző, amelyet a kormány δ_{MK} kitérésének $d\delta_{MK}$ szögű megváltoztatása hoz létre. Alkalmazzuk a farokfelület geometriai kialakításának jellemzésére a viszonylagos térfogat már ismert összefüggését (1. a 2.2.1.1. pontot). Ezzel a nyomatéki tényező $dm_z = -V_M c_{yM}$, ahol c_{yM} a farokfelületen δ_{MK} kormánykitéréssel keletkező felhajtóerő-tényező.

A kormányhatásosság ezzel:

$$\frac{dm_z}{d\delta_{MK}} = -V_M a_{MK}.$$

(Itt $a_{MK} = dc_{yM}/d\delta_{MK}$ a vízszintes farokfelülethez alkalmazott szelvény felhajtóerő-tényezőjének változása $d\delta_{MK}$ kormánykitérésre.)

A magassági kormány hatásossága tehát a viszonylagos térfogattól (ennek alakulásával már a hossz-stabilitással kapcsolatban foglalkoztunk, és az ottani megállapítások a kormányhatásosságra is érvényesek) és az alkalmazott szelvény állásszög-, ill. kormánykitérés-változásaira létrejövő felhajtóerő-tényező változásaitól függ. A 68. ábrán ezt a változást $h_K/h_{IF} = 0,5$ húr hosszarányra ábrázoltuk, és megállapítottuk, hogy ennek az aránynak a növelése a kormányhatásosságra kedvező. A kormány hatásossága tehát — ha kitérés szöge és egyéb méretei egyébként azonosak — akkor nagyobb, ha húr hossza a farokfelület húr hosszához viszonyítva nagy. Ilyen szempontból legnagyobb hatásosságú az osztatlan felületű *balansz magassági kormány*, amely a viszonylag legkisebb δ_{MK} kitérés szöggel hozza létre a kormányzáshoz szükséges bólintónyomaték-változást. A magassági kormány hatásosságára kedvező a *szárny oldalviszonyának* növelése is, mert a nagyobb oldalviszonyú szárny mögött kisebb w leáramlási sebességnek van kitéve (90. ábra).



90. ábra. A magassági kormány hatásosságát a szárny oldalviszonya is befolyásolja

A felhajtóerőt létrehozó felületek ellenállása nem kizárólag a felhajtóerővel kapcsolatos indukált ellenállásból áll, hanem az állásszög változásaival összefüggő profil-ellenállásból is. A profilellenállás kismértékben a kormánykitéréssel is nő, így a balansz magassági kormány alkalmazása a repülőgép ellenállásának csökkenéséhez vezet. Ezért a tulajdonságáért gyakran alkalmazzák teljesítmény-vitorlázógépeken.

A magassági kormány kialakításának egyik igen fontos szempontja, hogy zuhanórepülésben a vitorlázó repülőgép szilárdsági méretezése által megengedett legnagyobb terhelési többlest előidéző gyorsulást létre lehessen vele hozni, azaz a gép segítségével zuhanórepülésből normál repülési helyzetbe hozható legyen.

Az *oldalkormány* a függőleges farokfelület mozgatható részét képezi, és működése a magassági kormánnyal kapcsolatban az előbbieken elmondottakkal teljesen azonos. Hatásossága a magassági kormányéhoz hasonlóan a $\frac{dm_y}{d\delta_{OK}} = -V_F a_{OK}$ alakban fejezhető ki.

A képletben δ_{OK} a kormányfelület kitérési szöge;
 V_F a függőleges farokfelület viszonylagos térfogata;
 a_{OK} a függőleges farokfelülethez alkalmazott szelvény felhajtóerő-tényezőjének változása δ_{OK} kormánykitérés esetén;
 m_y a kormánykitéréssel a függőleges tengely körül létrehozott nyomaték dimenzió nélküli tényezője.

Az oldalkormány felületének és legnagyobb kitérésének szükséges nagyságát a normál repülési helyzetek által támasztott igények kielégítése mellett végső fokon az a körülmény határozza meg, hogy a vele létrehozható legnagyobb $y-y$ tengely körüli nyomatékkal dugóhúzóból való kivételkor meg kell tudni állítani a repülőgép forgását. A súlyponton átmenő hossz tengelyhez viszonyítva általában nem szimmetrikusan elhelyezhető függőleges felületek miatt az oldalkormány kitérése — a kívánt légerőnyomaték mellett — ellentétes orsózányomatékokat is ébreszt. Ez a gépnek a tervezett forduló iránya ellen való dőlését okozza, ill. a forduló irányába kitérített csűrőkormány hatékonyságát csökkenti. E tulajdonság a függőleges felületek helyes eloszlásával javítható. Az oldalkormány legnagyobb kitérési szöge általában nem haladja meg a $\delta_{OK\max} = \pm 30 \dots 35^\circ$ -ot.

Osztatlan felületű oldalkormányt vitorlázó repülőgépen nem alkalmaznak.

Az oldalkormány hatásossága még a legnagyobb csúszási szög elérhető nagysága miatt is fontos. A csúszóképeség minden vitorlázógépnél kívánatos, mert a szándékosan előidézett csúszás, a *csúsztatás* közben az oldalról megfújt törzs nagy ellenállása miatt a gép merülősebessége erősen megnövekszik. A gép tartós csúsztatásával tehát — más eszköz hiányában — eredményesen lehet a siklószámot szabályozni, és ez leszálláskor előnyt jelenthet.

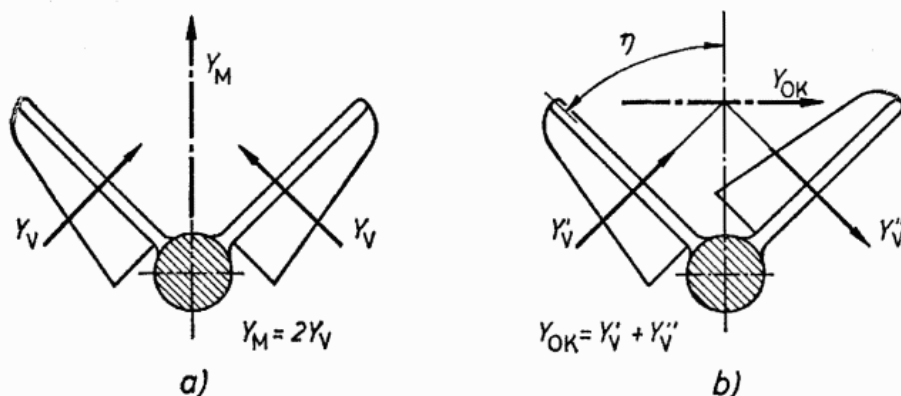
A pillangókormányban egyesített magassági és oldalkormány

Vitorlázó repülőgépen először a *CAGI-1* (l. 42. ábra) esetében alkalmaztak V farokfelületet, amelyet az idők folyamán számos újabb követett (pl. *Jaskolka L, R-23 Gébics, SHK, A-15* stb.). Ha ezt a megoldást magasságikormány-felületként kívánjuk működtetni, mindkét felületen fel-, ill. lefelé térítjük ki a kormánylapokat. Az eredő légerő (Y_M) ekkor a gép szimmetriasíkjában ébred (91a ábra). Oldalkormányként való működtetésekor a két kormánylap egyenlő szöggel, de ellenkező értelemben tér ki, és ekkor az eredő (Y_{OK}) a gép szimmetriasíkjára merőleges (91b ábra). A pillangófarok alkalmazásának ez hátrányos velejárója. Az eredő erő ugyanis távolabb hat a gép hossz tengelyétől, mint a szokásos elrendezések esetében, így oldalkormányzásra való kitérítésekor meglehetősen nagy ellentétes orsózónyomatékot is ébreszt. Ez a gépnek a forduló irányába való dőlése ellen hat, de ugyanakkor a törzs szilárdsági igénybevételét fokozza. E kedvezőtlen tulajdonságon bizonyos mértékig segít a felületek kisebb η szögbe állítása, mert így az eredő erő hatásvonala alacsonyabbra kerül. (A felületek a függőlegessel általában $\eta = 45^\circ \dots 60^\circ$ -ot zárnak be.)

A V-be állított farokfelületek alkalmazását első közelítésben a harmadik farokfelület elhagyásával kisebbé váló ellenállással magyaráztuk korábban. Ez így nem teljesen helytálló. A V farokfelület ugyanis nem egyszerű vetületeivel fejt ki stabilizáló hatását. A kielégítő stabilitáshoz vízszintes vetületének szükséges felülete: $F_M = F_V \cos^2 \eta$, ill. a függőleges vetület szükséges felülete: $F_M = F_V \sin^2 \eta$. Azonban $\sin^2 \eta + \cos^2 \eta = 1$, és ebből az az érdekesség adódik, hogy a V farokfelület összfelületének — azonos stabilitási tulajdonságok létrehozására — ugyanakkorának kell lennie, mint a hagyományos kialakításban szükséges vízszintes és függőleges farokfelületek összfelülete, vagyis

$$F_V = F_M + F_F.$$

A V farokfelület alkalmazásának oka elsősorban nem is a súrlódási ellenállás közvetlen csökkentése. A helyzet az, hogy ezeket a felületeket a hagyományos kialakítású farokfelületeknél sokkal jobb oldalviszonnyal lehet kialakítani. A jobb oldalviszonyú felület a értéke, vagyis az állásszögváltozás hatására bekövetkező felhajtóerőtényező-változás nagysága kedvezőbb, így kisebb felület választható, mint a hagyományos kialakítás esetében. Ezzel már a súrlódási ellenállás is csökken, a farokfelület és a törzs egymáshatásából származó ellenállások pedig lényegesen kisebbek lesz-



91. ábra. A pillangókormány működése

a) magassági, b) oldalkormányzás

nek. A V farokfelület ellenállásának csökkentése az osztatlan felületű balansz-kiképzéssel még tovább fokozható, amire példa az *SHK* gép megoldása.

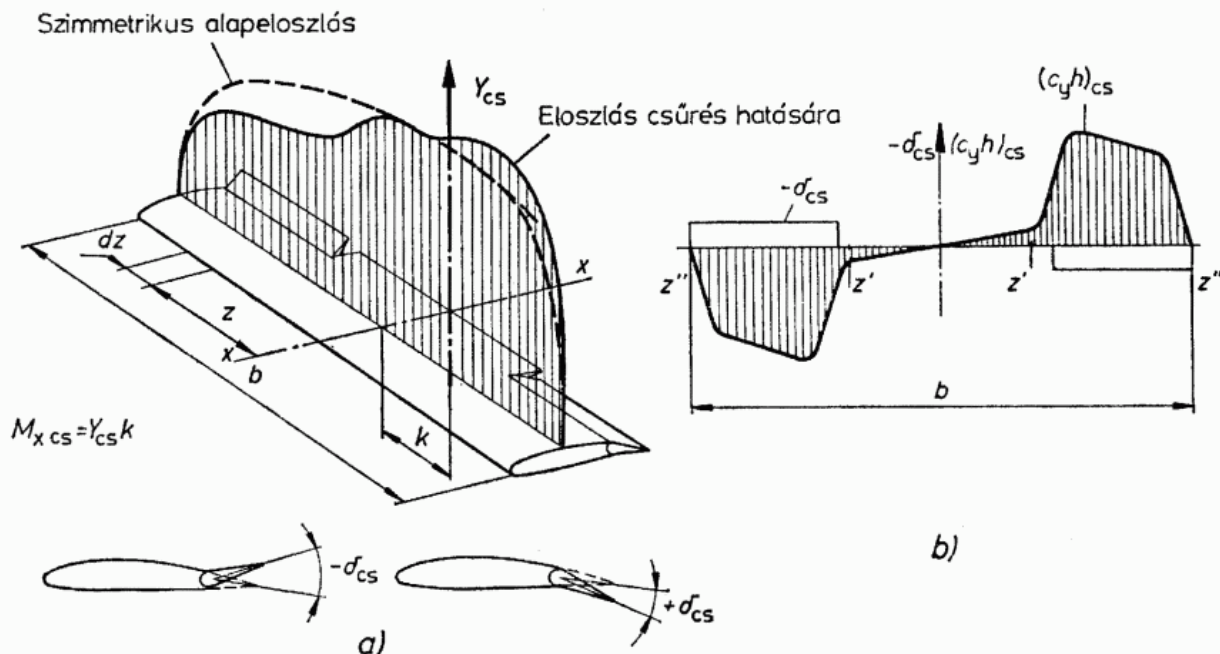
A V farokfelületek pillangókormányainak szerkezeti megoldásában biztosítani kell, hogy a magassági- és az oldalkormány-hatás egymástól függetlenül vagy egyidejűleg is kifejthető legyen vele. Az ilyen kialakítású magassági és oldalkormányok bizonyos fokú egymásra hatása tapasztalható általában (pl. az oldalkormány „magával viszi” a magasságit), amit a repülőgép vezetőjének — a vezetést rendszerint bonyolultabbá nem tevő módon — kell ellensúlyoznia.

A repülőgép hossz tengely körüli kormányzása.

A csűrőkormány

Ha a repülőgép szimmetriásíkjával párhuzamos áramlásban, tehát csúszás nélkül repül, a szárnyon keletkező légerők a fessztávolság mentén a 73. és 74. ábrán láthatóhoz hasonló módon szimmetrikusan oszlanak el. Eredőjük a szimmetriásíkban hat. Ha most eltekintünk attól, hogy a szárnyon kívül a repülőgép egyéb részein is keletkezhetnek olyan légerők, amelyek orsózónyomatékokat hoznak létre, beláthatjuk, hogy orsózó mozgás csak akkor jöhet létre, ha a szárnyon keletkező légerők eredője a szimmetriásíkból kilép, és így a felhajtóerő fessztávolság menti eloszlásának szimmetrikus-sága megszűnik.

A repülőgép hossz tengelye körüli orsózó mozgását a szárnyra ható erők szimmetriájának megbontásával érjük el. Ebből a célból a kilépőél mentén a szárny külső részein elhelyezett csűrőlapokat egymással ellentétes irányban kell kitéríteni. Azon a szárnyfélen, ahol a csűrőlap lefelé tér ki, a szelvény íveltebb lesz (és állásszöge is megnő), tehát megnő rajta a felhajtóerő. A másik oldalon ezzel szemben, ahol a kormánylap felfelé tér ki, az íveltség csökken vagy ellenkező irányú lesz (az állásszög ezzel együtt csökken). Az itt keletkező felhajtóerő is kisebb lesz, mint a kitérítetlen csűrőkormányok esetében volt. Mindennek eredményeképpen a 92a ábrán látható



92. ábra. a) A felhajtóerő fessztávolság menti eloszlása a csűrés hatására megváltozik; b) csűrési eloszlás

aszimmetrikus felhajtóerő-eloszlás jön létre. (Az áttekinthetőség kedvéért a 92b ábrán a viszonyokat úgy ábrázoltuk, mintha a szárnyon csak a csűrőfelületek kitérítése eredményeképpen keletkezne légerő. Ez a kép a valóságban a szárny mindenkor állásszögétől függő szimmetrikus eloszlásra szuperponálódik.) Eredője többé nincs a gép szimmetriásíkjában, és ezért a hossz tengely körül M_{xcs} orsózónyomatékot ébreszt. A repülőgép a nyomaték hatására megdől.

Az M_{xcs} orsózónyomatékot a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlásával kapcsolatos előbbi (1. a 2.1.4.1. pontot) meghatározásunkhoz hasonlóan dz szélességű és h hosszúságú felületelemeken a csűrőkitérítés hatására keletkező elemi felhajtóerők nyomatékainak összességéként definiálhatjuk. Vagyis, ha a felületelemen keletkező elemi felhajtóerő nagysága $\Delta Y_{cs} = \Delta c_{y_{cs}} \frac{\rho}{2} v^2 h dz$, és mivel $\Delta c_{y_{cs}} = a_{cs} \delta_{cs}$, azért az elemi felhajtóerő nyomatéka:

$$\Delta M_{cs} = -a_{cs} \delta_{cs} \frac{\rho}{2} v^2 h z dz.$$

Vegyük figyelembe a másik szárnyfélen kitérített csűrőkormány által létrehozott felhajtóerő-eloszlás forgatónyomatékát is, és így a *csűrőkitérítésre létrejött teljes orsózónyomaték*:

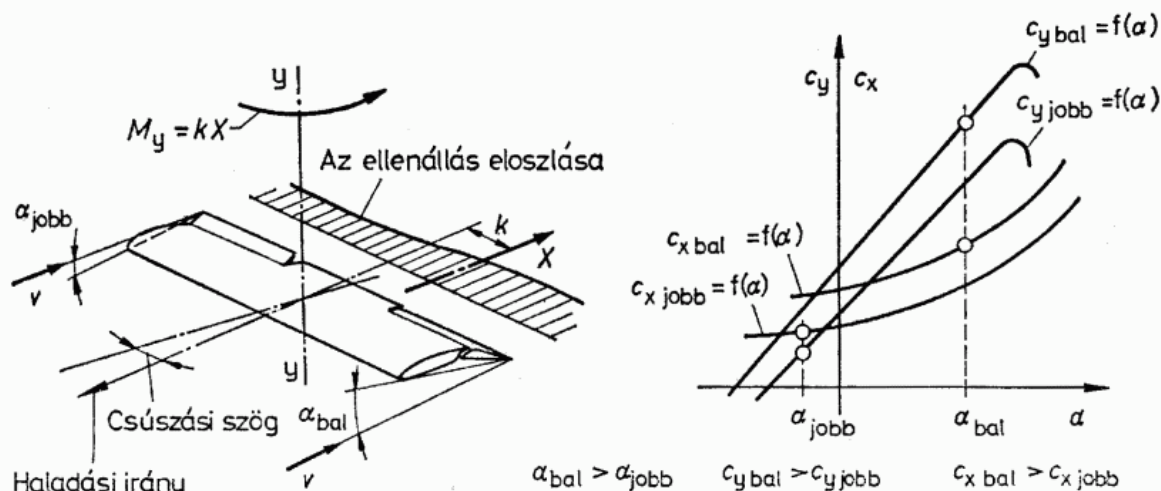
$$M_{xcs} = -2a_{cs} \delta_{cs} \frac{\rho}{2} v^2 \int_{z'}^{z''} h z dz.$$

Mitől függ tehát az orsózónyomaték nagysága? Mindenekelőtt az alkalmazott szelvény aerodinamikai jellemzőitől (a_{cs}), majd a csűrőkitérítés δ_{cs} nagyságától. Ezeket a különféle szárnyszelvényekre szélcsatornamérések alapján diagramban adják meg (1. a 69. ábrát, ahol $h_{cs}/h = 0,2$ húrviszonyú csűrővel a *NACA 23012* profil felhajtóerő-tényezőjének változásait ábrázoltuk az állásszög függvényében különböző δ kormánykitérésekkel). Eddigi ismereteinkből az már nyilvánvaló, hogy a csűrő mélységének a szárny teljes húrhosszához viszonyított h_{cs}/h arányának növelésével a kormány hatásossága nő. Egy adott csűrőkitérítéssel létrehozott nyomaték azonban — az előző összefüggés értelmében — a csűrőkitérítéssel érintett szárnyfelület nagyságától is függ (a h húrhosszúságú, z' -től z'' -ig terjedő szakasz), és az is lényeges, hogy ez a felület a gép szimmetriásíkjától minél távolabb helyezkedjék el (a z távolságok nagyok legyenek).

Az elmondottakból tehát kitűnik, de a nyomaték fogalmának definíciója is hozzásegít annak belátásához, hogy a csűrőkormányok leghatásosabb része a szárnyvéghez esik közel, mert az itt keletkező légerők nyomatéki karja a legnagyobb. Az ideális csűrő ezen a szakaszon lenne a legnagyobb h_{cs} mélységű, és belső végénél, ahol hatásossága már a kisebb nyomatékok miatt is csökken, ez a mérete kisebb lehet. A csűrők nagy δ_{cs} kitérítési szöge nem kedvező, mert ezzel az ellenállás nő. Nagyon fontos viszont, hogy a csűrőfelület és a szárny között a kormány elmozdíthatósága érdekében kialakított rés minél kisebb legyen. A túlságosan nagy résen át ugyanis a szárny felső és alsó része közötti nyomáskülönbség kiegyenlítődésére lenne lehetőség, ez pedig a csűrő hatásosságát nagyon csökkentené, ugyanakkor a szárny felhajtóerejére nézve is kedvezőtlen lenne. Bár régebben a csűrők helyes légerőtani kialakítása nem minden vitorlázó repülőgépen volt megoldott probléma, a rést gyakran mégis leragasztották egy vászoncsíkkal (*Pilis, Kevély*). A korszerű gépeknél ezt a követelményt — az egyszerűbb iskolarepülőgépek kivételével — igen gondos kiképzéssel, minimális réssel elégítik ki.

Az 1. fejezetben a régebbi vitorlázó repülőgépek elrendezési rajzain általában a fél szárnyfeszítávolsággal egyenlő terjedtségű csűrőket találunk. A legújabb lamináris szelvényű szárnyakon viszonylag kis mélységű és rövidebb, de legalábbis hosszában megosztott csűrőfelületeket alkalmaznak. Az osztott felületek közül a belsők kitérése általában kisebb a külsőkénél.

Már korábban utaltunk a repülőgépek kormánymegoldásainak arra a kellemetlen tulajdonságára, hogy kitérésükkor nemcsak azon tengely körül ébresztenek forgatónyomatékokat, amelyre feladatuk szerint hivatottak, hanem a más tengely körüli egyensúlyi helyzetet is megzavarják. Így a csűrőkormány kitérése a függőleges tengely körüli legyezőnyomatékokat is ébreszt. Ennek az az oka, hogy a kormánykitérés nemcsak a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlását változtatja meg, hanem az ellenállását is. A szárnynak a lefelé kitérő csűrő oldalán megnő a profilellenállása és a felhajtóerő-növekedés miatt az indukált ellenállása is (93. ábra). A felfelé kitérő csűrő



93. ábra. Az ellentétes fordulónyomaték létrejötte

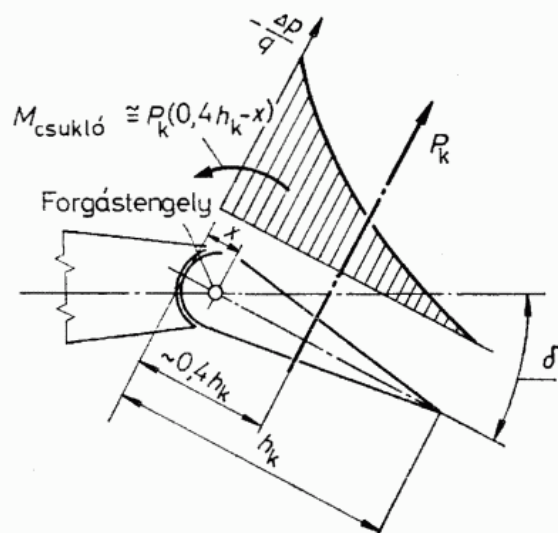
oldalán éppen ellenkezőleg, csökken az ellenállás. Csűrőkitéréskor tehát nemcsak hossz tengelye körül forog el a gép, hanem — és ez igen kellemetlen jelenség — függőleges tengelye körül is, de olyan irányban, hogy a gép megcsúszik. Ha tehát a repülőgépvezető egy jobb forduló megkezdéséhez a csűrővel jobbra bedönti a szárnyat, a csűrőkitérés következtében fellépő legyezőnyomaték egyúttal balra fordítja el a függőleges tengely körül. Olyan tulajdonság ez, amely a megkezdett forduló ellen hat. Ezt a jelenséget *ellentétes forduló*- vagy *csűrőnyomatéknak* nevezzük. Nagy felhajtóerő-tényezőkkel, azaz kis sebességgel erősebben jelentkeznek, mint kis felhajtóerő-tényezőkkel, azaz nagyobb sebességek esetében.

Az ellentétes csűrőnyomaték csökkentésére a csűrők kitérését általában úgy differenciálják, hogy a felfelé kitérő felület δ_{cs} szöge kétszerese a lefelé kitérőének. Más megoldásban ún. *Friese-csűrőt* alkalmaznak (l. 2.2.2.2. pontot). Mindkét esetben a cél: az ellenálláseloszlás csűrőkitérésre bekövetkező aszimmetriájának csökkentése. E megoldások mellett igen fontos a csűrő és az oldalkormány együttes használata minden esetben, mivel ezek megfelelő mértékű együttes kitérésével az ellentétes csűrőnyomaték csökkenthető, ill. ellensúlyozható. Régebbi vitorlázó repülőgépeken a csűrő- és az oldalkormány mozgatószerkezetét úgy kötötték egymással össze, hogy az egyik kormány kitérését önműködően követte a másiké is.

2.2.2.2. A kormányszerveken a kormányok kitérítésekor kifejtendő erők

A csuklónyomaték

Mindenekelőtt meg kell ismerkednünk egy új fogalommal. A 70. ábrán a kormánylappal felszerelt *NACA 23012* jelű szárnszelvény körüli nyomás eloszlását látjuk a kormánylap kitérítetlen és kitérített helyzetében. Látható, hogy ez utóbbi esetben a kormánylap előtti résnél 0-ra csökkenő $\Delta p/q$ értéke a kormánylap körül ismét nő, és a szelvény körüli nyomás alakulását mintegy megismétli. Az egész szelvény körüli nyomáseloszlást is befolyásoló kormánylap körüli eloszlás a δ kitérítési szöggel változik, és a kormánylapon keletkező légerő P_K eredője a forgástengelyre a δ szögtől függő nagyságú csuklónyomatékot fejt ki (94. ábra).



94. ábra. A csuklónyomaték

A csuklónyomaték nagysága, amelyet most a kivitelezett kormányfelületektől elvonatkoztatva csak a szelvénnel kapcsolatban tekintsünk, számos tényező függvénye. Alakulása mindenekelőtt a szelvény állásszögétől és a kormány kitérítési szögétől függ, de a szelvény vastagsága is befolyásolja. A kísérletek ugyanis azt mutatják, hogy minél vastagabb szárny-, ill. farokfelület-profil alkalmaznak, annál kisebb csuklónyomaték keletkezik, vékonyabb szelvény alkalmazása viszont növeli a csuklónyomatékot. Igen fontos a kormányfelület belépőéle körüli orr-részének és a szárny és a kormánylap közötti rész kiképzése is. Célszerű kialakításukkal a csuklónyomaték nagyságát a célnak megfelelően lehet alakítani, de ezzel kapcsolatban meg kell jegyeznünk, hogy a csuklónyomaték és a kitérítési szög nagysága közötti összefüggés nem minden kialakítás esetén lineáris.

A csuklónyomaték a kormánylapok mozgatókarjain és a mozgatómechanizmuson keresztül hatva a kormányszerveken a kormányzáskor kifejtendő *kormányerőben* jelentkezik. Mivel — mint mondtuk — a repülőgépvezető gépét érzés után vezeti, a kormányerőknek a kormány kitérítésekor bekövetkező alakulása a repülőgép tulajdonságainak megítélésében fontos szerepet játszik.

A kormányerők összhangja és a kormányerők csökkentésének módjai

A vezető számára mindig kellemes, ha a kormányok kitérítésekor bizonyos erőt kell kifejtenie, mert az erő nagyságából érzékeli a kitérítés mértékét és hatásosságát is. Ha azonban az erő túlságosan nagy, tartós kifejtése — hosszabb repülés esetén — fárasztó. Azt tekintik általában kellemesnek, ha a kormányok kitérítéséhez és kitérítve tartásukhoz a kormányokat mozgató testrészeknek csupán a súlya is elegendő.

A vitorlázó repülőgépek építési előírásaiban megtalálható a kormányerők ajánlott nagysága. Ezek mindig sokkal kisebbek, mint az a legnagyobb erő, amit az átlagos fizikai képességű repülőgépvezető a kormányszerveken kifejteni képes lenne. A 4. táblázatban az OSTIV előírásai (1. a 4. fejezetet) alapján azokat a legnagyobb

4. táblázat

A kormányerők megengedett nagysága az OSTIV előírásai szerint

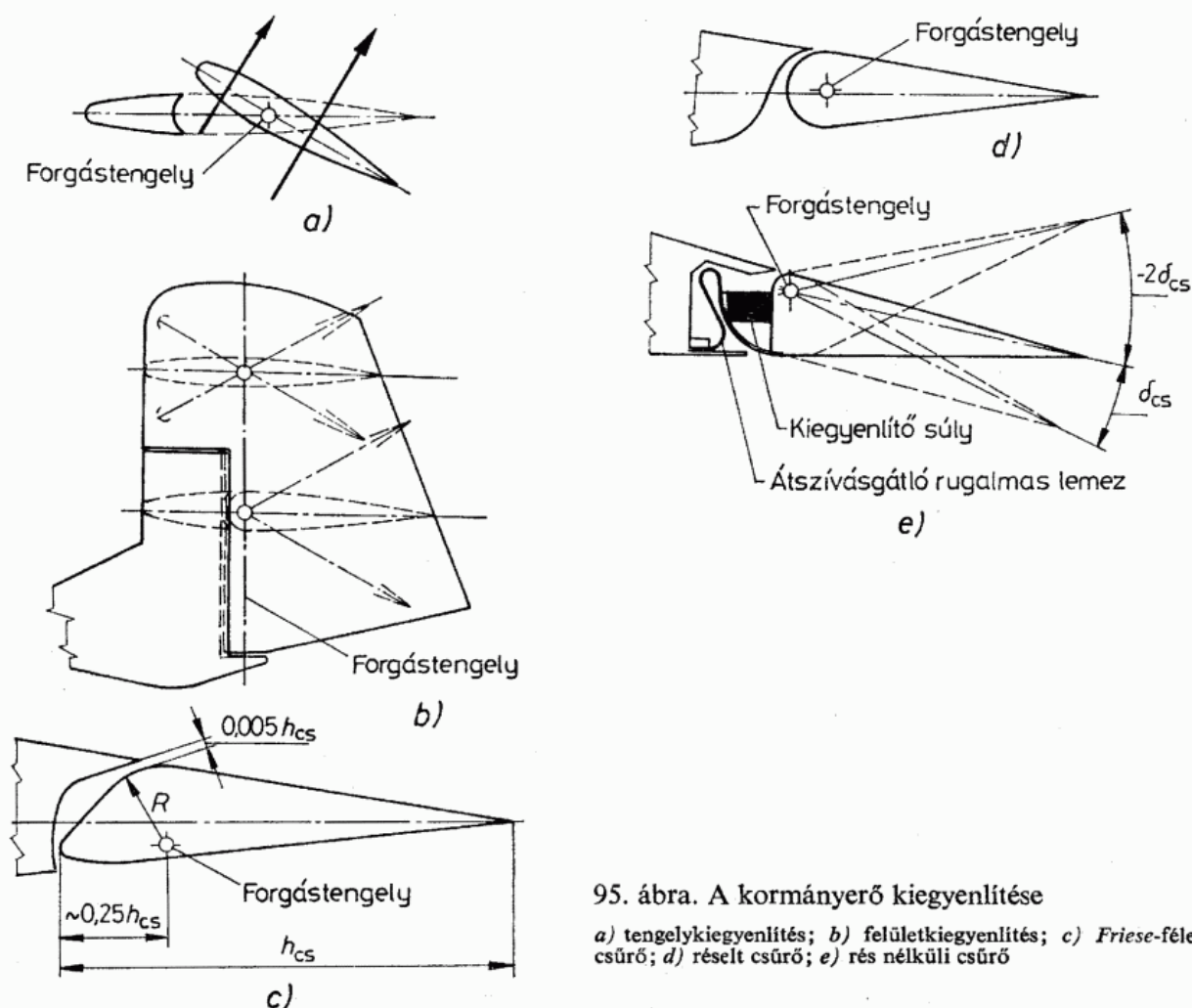
Az erő kifejtés jellege		A kormányerő, kp		
		botkormányon	lábpedálón	féklapkaron, futómű- mozgatáson
Rövid ideig tartó erő- kifejtés	húzás, nyomás	20	—	20
	csűrés	10	—	—
	nyomás	—	35	—
Tartós erő- kifejtés	húzás, nyomás	2	—	—
	csűrés	1	—	—
	nyomás	—	10	—

kormányerőket állítottuk össze, amelyek a repülőgép normál üzeme közben a kormányszervek kitérítéséhez megengedettek lehetnek, továbbá azokat a legnagyobb erőket, amelyeket a repülőgépvezető a kormányszerveken tartósan kifejteni képes.

Igen fontos, hogy a repülőgép három tengelye körüli kormányzásához szükséges erők egymással megfelelő összhangban is legyenek. Az összhang akkor a legjobb, ha a csűrő-, a magassági és az oldalkormány kitérítéséhez szükséges erők egymással 1 : 2 : 4 arányban vannak. A kormányerők ettől eltérő arányát a repülőgépvezető kellemetlen repülési tulajdonságként érzékeli, jóllehet véleménye megalkotásában nem csak a kormányerők nagysága, de a sokkal kevésbé érzékelhető kitérítés mértéke is befolyásolja. A kormányok hatásossága — mint a légerőkkel kapcsolatos jelenségek általában — a sebesség négyzetével arányosan nő. Ez azt jelenti, hogy nagyobb sebesség esetén ugyanazt a kormányzónyomatékot kisebb kormánykitérítéssel lehet létrehozni, mint kisebb sebességgel. Ez a körülmény túlságosan kicsiny vagy össze nem hangolt kormányerők esetében kellemetlen következményekkel járhatna, ha a repülőgépvezetőnek nem állna rendelkezésére olyan eszköz, amely a túlkormányzás lehetőségét korlátozza. Ez az eszköz a *kormányerő*, amely a jó tulajdonságú repülőgépeken ugyancsak a sebesség négyzetével arányosan nő. Így a kormányok valamely hatása (de nem a kitérése!) kis és nagy sebességekkel egyaránt közel azonos nagyságú kormányerőhöz van kötve. A repülőgépvezetőnek tehát nem kell okvetlenül tudatosan figyelemmel lennie a kormányok kitérítésének mértékére, mert azokat a kormányerő változó nagysága önműködően is szabályozza.

Adott felületű és kitérítési szögű kormányfelülettel keletkező kormányerő nagyságát a csuklónyomaték nagysága határozza meg. A legegyszerűbb, rés nélküli kormányfelületen keletkező légerő eredője a kormányfelület h_k húr hosszának mintegy 40%-ában ébred. Az ilyen kialakítású kormányokon nagyobb sebességekkel esetleg olyan nagy kormányerők lépnének fel, amelyek a kívánatos értékeket meghaladják. Éppen ezért a kormánylapokat úgy alakítják ki, hogy a csuklónyomaték nagysága egy bizonyos értéket ne haladjon meg.

Magassági kormányokon ritkábban, oldalkormányon azonban igen gyakran alkalmazzák a *belső* vagy *tengelykiegyenlítést*. Ennek lényege, hogy míg a kiegyenlítetlen kormánylap orr-részt a forgástengellyel egybeeső középpontú kör határolja, itt a forgástengely lényegesen hátrább kerül. A kormánylap kitérítésekor ezért az orr-rész a kitérítés irányával ellenkező oldalra bukik ki a szelvény körvonalából, és a rajta keletkező légerők a forgástengelyre ellenkező, a kitérítést megkönnyítő nyomatékokat adnak (95a ábra). Minél közelebb kerül a forgástengely a kormánylapon keletkező légerő eredőjéhez, annál nagyobb a kiegyenlítés mértéke, vagyis annál jobban csökken a csuklónyomaték. A tengelykiegyenlítést alkalmazzák a felület teljes hosszában vagy annak csak egy szakaszán is. Kisebb teljesítményű gépeken — elsősorban az oldalkormányon — gyakran találkozunk azzal a változattal, amikor a *kiegyenlítést csak a felület végén* alkalmazzák (95b ábra). Az ilyen *oldal- vagy felületkiegyenlítés* bizonyos mértékig növeli a kormány hatásosságát is.



95. ábra. A kormányerő kiegyenlítése

a) tengelykiegyenlítés; b) felületkiegyenlítés; c) Frieese-féle csűrő; d) réselt csűrő; e) rés nélküli csűrő

A legnagyobb gondot a csűrőlapok kialakítása okozza, itt ugyanis az ellenállást növelő alkalmatlan megoldás vagy a túlságosan nagy csűrőréseken való átszívás erősen csökkentheti a gép teljesítményeit. Másrészt éppen a csűrőerő csökkentésére van a leggyakrabban szükség a kormányerők helyes összhangjának létrehozásához. Ezt rendszerint megnehezíti az a körülmény, hogy a jobb teljesítményű vitorlázógépeken az ellenállás csökkentése érdekében a csűrők mozgatókarjait általában olyan kicsinyre készítik, hogy a szárny felületéből ne álljanak ki. A kisméretű karokon azonban a csuklónyomaték legyőzésére nagyobb erőt kell kifejteni, vagyis a kormányerő ezért itt nagyobb.

Főként a kisebb oldalviszonyú, gyengébb teljesítményű vitorlázó repülőgépek egy részén (pl. iskolagépeken) alkalmazzák az ún. *Friese-csűrőt*. Azokon tehát, amelyeken a csűrőkitérítés miatti indukált ellenállás változása és ezzel az ellentétes csűrőnyomaték viszonylag nagy. A *Friese-csűrő* 95c ábrán látható kialakításának lényege, hogy felfelé való kitérítésekor orr-része a szárny körvonalából alul kibukik. Ezzel egyrészt megnöveli a fél szárny ellenállását, másrészt a kibukó orr-részre ható légerő csökkenti a csuklónyomatékot. E megoldással így két cél is megvalósul, és pedig az ellenállás növekedése előnyösen egyenlíti ki az ezen az oldalon lecsökkent indukált ellenállásból adódó ellentétes fordulónyomatékot, a csuklónyomaték csökkenése pedig a kormányerő szempontjából lényeges. Lefelé irányuló kitérésnél a csűrő orra a szárny körvonalán belül marad, így itt nem mutatkozik kiegyenlítő hatás. Ha a szárnynak a csűrő előtti részét *réseleten* alakítják ki (95d ábra), akkor a szűkülő résen áthaladó, felgyorsuló áramlás a lefelé kitérített kormánylap felső részén később válik le, és ezzel a csűrőhatásosság javul.

A *Friese-csűrő* hátránya, hogy a csuklónyomaték változása a δ_{cs} kitérítési szöggel nem egyenesen arányos, így a kormányerő változása is eszerint alakul.

Teljesítmény-vitorlázógépek csűrőihez sem a tengelykiegyenlítés, sem a *Friese*-féle megoldás nem alkalmas járulékos ellenállásuk miatt. Ezeknél főként réseletlen csűrőket alkalmaznak, és a kormányerő csökkentését a kitérési szögek nagy differenciálásával (pl. az *SZD—32A Foka 5* esetében $\delta_{cs(le)} = 16^\circ$ és $\delta_{cs(fel)} = -34^\circ$) oldják meg (95e ábra). Emellett pl. a *BJ—3* (140. ábra) és a *Sigma 1* (141. ábra) gépeken a felfelé kitérő csűrő előtt a szárny felületéből kiemelkedő *leválasztólapot* találunk, ennek kitérítéséhez aránylag kis erő szükséges, és az ellentétes fordulónyomaték csökkentésére is alkalmas. Működésének lényege nevéből is kitűnik: az áramlás leválásának előidézésével csökkenti a felhajtóerő-tényezőt az egyik szárnyfélen, és így orsóznónyomatékot létesít.

Az elengedett kormányval mutatott stabilitás és a kormányerő összefüggései

E fejezet 2.2.1. pontjában annak feltételezésével foglalkoztunk a vitorlázó repülőgép stabilitásával, hogy kormányai minden körülmények között alaphelyzetben maradnak, és kitérésüket a repülőgépvezető a kormányszervek középhelyzetben való megtartásával meggátolja. Ez természetesen csak egyszerűsítő feltételezés volt. A viszonyok a leírtaknál bonyolultabban alakulnak. Ha pl. elengedi a kormányokat, a stabilitás mértéke megváltozik. Ennek az az oka, hogy a bot-, ill. láb kormány elengedése után valamely zavaró hatásra egyensúlyi helyzetéből kilendülő gép kormányfelületei az áramlásban „lebegve” keresik meg egyensúlyi helyzetüket, amit a rájuk ható légerők okozta csuklónyomaték hatására fognak elfoglalni. Erre a magassági kormány esetében például két dolognak van hatása:

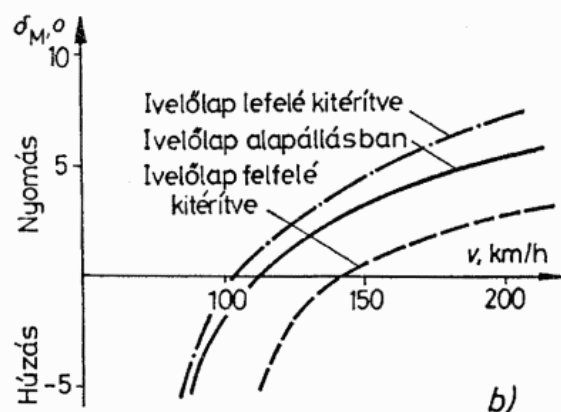
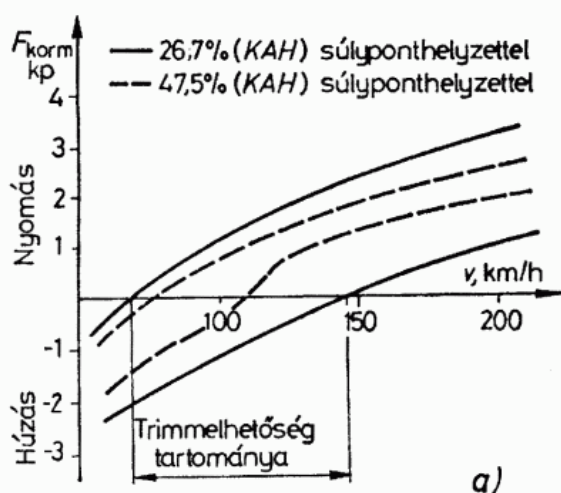
— Ha a kormányfelület nagy tengelykiegyenlítéssel vagy még inkább nagy

felületi kiegyenlítéssel készült, akkor a botkormány elengedése után az áramlás ellenében tér ki. A statikus stabilitás ezzel nő, vagyis így az elengedett kormányú stabilitás nagyobb, mint fogott kormánnyal.

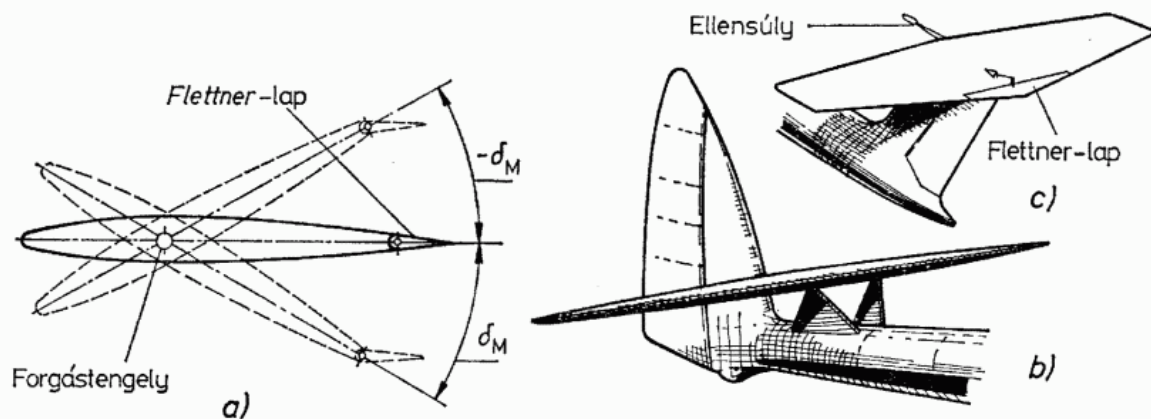
— Ha a kormányfelület nem tengely- vagy felületkiegyenlítésű, akkor az elengedett kormány „lebeg” és a stabilitás mértéke csökken a fogott kormány esetéhez képest. Előfordulhat tehát, hogy a fogott kormány esetében statikusan stabil repülőgép elengedett kormánnyal instabillá válik. Az elengedett kormánnyal mutatott stabilitás jellege és mértéke, valamint a kormányerő alakulása között ilyenformán összefüggés van.

Ezután az is belátható, hogy a kormányerő alakulása és a súlypont helyzete között is van összefüggés, hiszen a súlyponthelyzet, mint láttuk, a hossz-stabilitás mértékét jelentősen befolyásolja. A 96a ábrán az SZD—38 Jantar 1 vitorlázógép, F_{korm} magassági kormány erejének változását látjuk a sebesség függvényében a súlypont megengedett legelső (folyamatos vonal) és a leghátsó (szaggatott vonal) helyzetében. Látható, hogy nagyobb sebességek mellett a lineáris változástól kissé eltér, annál valamivel kevésbé nő. Ez az egyensúlyi helyzet létrehozásához szükséges kormánykitérítés mértékével van összefüggésben, amelynek változását ugyanezen az ábrán láthatjuk.

Az ívelőlap kitérítése megváltoztatja a szárnynyomaték nagyságát, és ezzel az egyensúlyi helyzethez tartozó sebességet. E helyzet létrehozásához szükséges kormánykitérítés változása a pozitív és a negatív irányban kitérített ívelőlapok esetében a 96b ábrán látható.



96. ábra. a) A magassági kormányerő változása a sebesség függvényében; b) ívelőlap kitérítéskor létrejövő hossznyomaték-változás ellensúlyozásához szükséges magassági kormánykitérítés a sebesség függvényében



97. ábra. a) A balans magassági kormányval kapcsolatos fogalmak; b) az 1935-ben épült lengyel C. W. 5/35 gép érdekes farokmegoldása; c) az SZD—32A Foka 5 balans magassági kormánya

Az osztatlan, balans magassági kormány megoldása különös figyelmet igényel, és alkalmatlan kivitelezése esetén igen veszélyessé válhat. Trimmlap nélkül ez a megoldás elengedett kormányval nem biztosít stabilitást, bárhol is helyezik el a forgástengelyét. Ha a forgástengely az aerodinamikai tengely mögött helyezkedik el, a kitérítést növelő értelmű kormányerő keletkezik. Ez a megoldás alkalmatlan. Abban az esetben, ha a forgástengely a kormányfelület aerodinamikai tengelyével egybeesik, kitérítéskor egyáltalán nem ébred csuklónyomaték. A kormányerő érzetét a mozgatómechanizmushoz csatlakozó rugó helyettesítheti, de a rugóerőnek a torlónyomással arányosan kell változnia. Ha ez nem így lenne, a kormány valamennyi sebesség mellett egyforma erővel lenne kitéríthető, és ez — mint láttuk — a vezetésre veszélyes következménnyel járna. A legjobb megoldásnak az mutatkozik, ha a balans kormányt Flettner-lappal együtt alkalmazzák (97a ábra). Ez mechanikus áttételezéssel kapcsolódik a kormányfelülethez, ezért kitérése mindig azzal ellenkező irányú. A Flettner-lap által létrehozott kormányerő a sebességgel arányosan változik.

A balanszkormány viszonylagos érzékenysége (nagyobb hatásosságával) van összefüggésben az a tulajdonsága, hogy ha a forgástengely és az aerodinamikai tengely egymáshoz közel helyezkedik el, a pilóta könnyen hoz létre kormánymozdulataival hossz-irányú állásszöglengéseket (l. a 2.2.1.2. pontot). A lengés csillapodásának lehetősége is kapcsolatban van a két tengely egymáshoz viszonyított helyzetével.

2.2.3. Két különleges repülési fázis: az átesés és a dugóhúzó

2.2.3.1. A repülőgép repülési tulajdonságai kis sebességekkel. Az átesés

Az áramlás az α_{krit} kritikus állásszög elérésekor leválik a szárny felületéről és az aerodinamikai jellemzők rohamos változáson mennek át: a c_y tényező $c_{y_{max}}$ elérése után hirtelen csökken, a c_x tényező pedig erősen nő. Ezt a jelenséget *átesésnek* nevezzük, és a repülésben az egyik legveszélyesebb helyzetet jelenti. Viszonyait a sebességi görbe (3. ábra) bal oldaláról olvashatjuk le. A v_{min} legkisebb sebesség a $c_{y_{max}}$

felhajtóerő-tényezővel, ill. α_{krit} állásszöggel érhető el. A sebesség tehát ennél tovább nem csökkenthető, mert az állásszög további növelésekor c_y kisebbé válik annál, amely a repülőgép G súlyának hordásához elegendő lenne, és ezért a gép zuhanni kezd. A helyzet veszélyességét csökkenti, hogy a gép hossz-stabilitása következtében a zuhanással való sebességgyűjtés után, miközben az állásszög lecsökkent a kritikus alá, a szükséges sebesség elérésekor önműködően visszatér normál helyzetébe. Igen fontos, hogy a repülőgép kormányai átesés közben is hatásosak maradjanak. Ez különösen a csűrőkormányra vonatkozik, továbbá, hogy az oldalstabilitás elegendő nagy legyen ahhoz, hogy átesés közben a szárny kisebb zavarások hatására ne billenjen le valamelyik oldalra.

A kellő stabilitású repülőgépek — ha elengedett kormányval kerülnek átesésbe — kormánymozdulat nélkül maguktól kijönnek a zuhanórepülésből, és néhány hossz-irányú lengés után ismét felveszik a siklóhelyzetet. Túlhúzás következtében az átesés minden repülési helyzetben (siklásban, fordulóban stb.) bekövetkezhethet, az átesési sebesség azonban nem mindig ugyanaz.

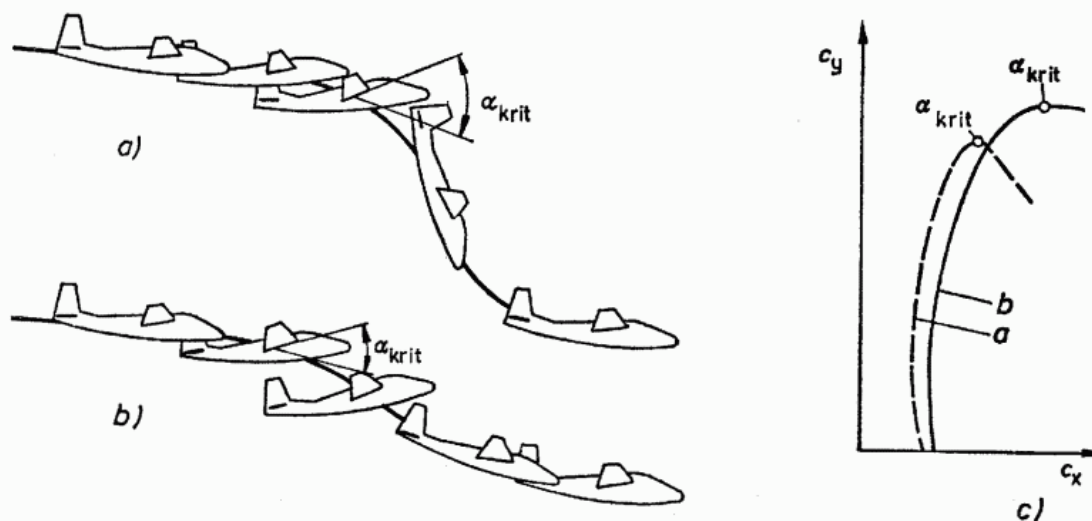
Az átesési tulajdonságokat a következők befolyásolják:

- a szárny oldalviszonya,
- a felületi terhelés,
- a szárnyprofil jellege és
- a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása.

Az oldalviszony hatása abban nyilvánul meg, hogy a karcsúbb szárnyak a legnagyobb felhajtóerő-tényezőt kisebb állásszöggel érik el, mint a rosszabb oldalviszonyúak, így kisebb állásszöggel (de azonos c_y -nal) esnek át, mint azok.

A G/F felületi terhelés szerepe a minimális sebesség nagyságában jut kifejezésre. A nagyobb felületi terhelésű gép ugyanis nagyobb sebességgel esik át, mint a hasonló kialakítású, de kisebb felületi terhelésű.

Az átesés heveségére a szárnyprofil jellegének, pontosabban polárgörbéjének a $c_{y\max}$ környezetében való alakulása döntő hatású. Láttuk, hogy a $c_{y\max}$ értékét hogyan befolyásolja a szelvény vastagsága, íveltsége és egyéb jellemzők. A 98. ábrán az átesés két jellegzetes esetét látjuk: a kellemetlenebb *hirtelen átesését* (a), és a kevésbé kellemetlen, inkább *átmerülésnek* nevezett változatát (b). Az előbbi jellege a szárny vékonyabb és kevésbé ívelt szelvényével kapcsolatos, amelynek polárgörbéje $c_{y\max}$ elérése után hirtelen törik le, az utóbbi pedig az íveltebb és vastagabb, nagyobb



98. ábra. Az átesés kétféle lefolyása

a) durva; b) enyhe átesés; c) az átesés lefolyására a polárgörbéből következtethetünk

orrsugarú szelvények tulajdonsága. Ezek polárgörbéje $c_{y\max}$ környezetében nem törik le hirtelen, hanem csak ellaposodik (98c ábra).

A repülőgép legkisebb sebességét csökkentő berendezéseket a 3. fejezetben ismertetjük. Ezek általában az átesés jellegére és a kis sebességű repülési tulajdonságokra is hatást gyakorolnak.

A felhajtóerő fesztávolság menti eloszlásának az átesésre gyakorolt hatását a dugóhúzóval kapcsolatban tárgyaljuk.

2.2.3.2. A dugóhúzó

A legkisebb indukált ellenállást keltő és ezért legkedvezőbbnek tekintett elliptikus alaprajzú szárnyon a felhajtóerő fél ellipszishez hasonlóan oszlik meg a fesztávolság mentén. Bár az ellenállás szempontjából ez kedvező, az a körülmény, hogy a szárny a fesztávolság minden helyén ugyanazon állásszöggel éri el a $c_{y\max}$ -ot, és az átesés mindenütt egyszerre következik be, igen kellemetlen és veszélyes. Ebben az esetben ugyanis a kritikus állásszög megközelítésekor a legkisebb zavarás (pl. szélleökés) hatására is bekövetkezhet valamelyik szárnyvég helyi átesése, és ez a repülőgép önpörgéséhez, *dugóhúzóhoz* vezet.

Dugóhúzó közben az egyik szárnyfél állandóan átesésben van, és a felhajtóerő ezen az oldalon való lecsökkenése, valamint a kritikusnál nagyobb ($\alpha = 40 \dots 60^\circ$) állásszöggel létrejövő nagy ellenállástényező a gépet egyszerre készleteti orsózó és legyező mozgásra. Ugyanakkor a másik szárnyon még kialakuló felhajtóerő és a kisebb ellenállás a forgó mozgást mindkét tengely körül elősegíti. A repülőgép dugóhúzóban tehát hossz- és függőleges tengelye körül forog, és mivel ezt magától, kormánymozdulat nélkül végzi, azt mondjuk *önpörgésben* van. Súlypontja egy képzeletbeli függőleges tengely körül csavarvonalat ír le, és erősen merül. A törzs eközben többé-kevésbé meredek helyzetet vesz fel. A két szárnyfél állásszögei közötti különbség a dugóhúzóban állandóan megmarad, sőt a függőleges tengely körüli forgás miatt az át nem esett szárnyfél sebessége nagyobb, így a rajta keletkező felhajtóerő mindaddig forgásban tartja a repülőgépet, amíg azt a dugóhúzóból ki nem veszik. Éppen ebben rejlik a dugóhúzó veszélyessége. Mindaddig pörög ugyanis a gép, amíg a dugóhúzót előidéző sebességvesztést, ill. az aszimmetrikus felhajtóerő-eloszlást meg nem szünteti.

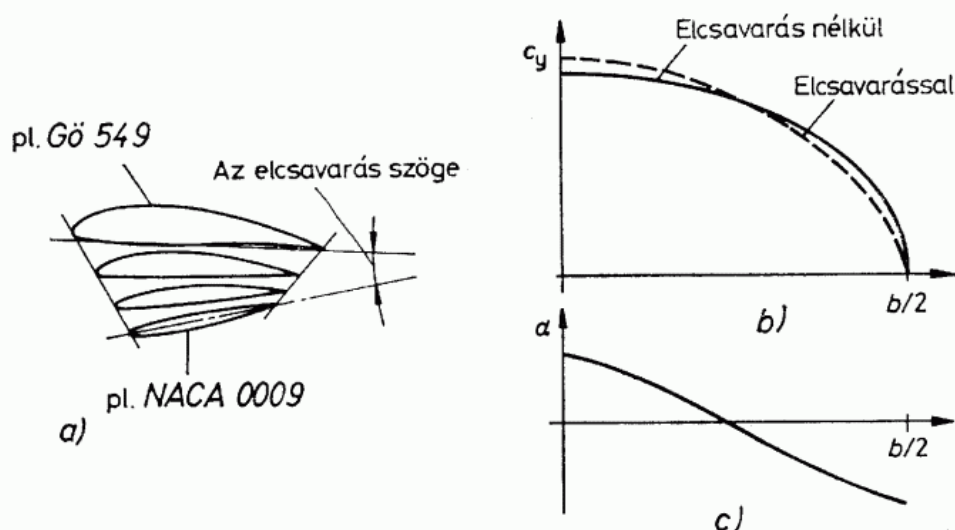
Dugóhúzóra azok a repülőgépek hajlamosak, amelyek egyébként is könnyen átesnek. Így a vékony szelvényű szárnyak ebből a szempontból kedvezőtlenebbek. Vastagabb szelvényű szárnyakon a felhajtóerő csökkenése folyamatos, és az áramlás leszakadása csak lassan, vontatottan következik be. Így a felhajtóerő és az ellenállás fesztávolság menti eloszlásának szimmetriája akkor is kevésbé lesz megzavarva, ha az áramlás a két szárnyfélen nem egyszerre válik le. Az ilyen repülőgépeket az oldal-kormány és a csűrők segítségével gyakran vissza lehet tartani a dugóhúzóba eséstől.

A dugóhúzó létrejöttében és a repülőgép dugóhúzótulajdonságainak alakításában a legtöbb szerepe a *szárnynak* van. Két fontos szempontot kell figyelembe vennünk:

— A dugóhúzót a felhajtóerő és az ellenállás aszimmetrikus fesztávolság menti eloszlása hozza létre a kritikus állásszög elérésekor, így a gép hajlamosabb a dugóhúzóra akkor, ha a szárnyvég hamarabb képes átesni, mint a szárnytő.

— Az átesés és a dugóhúzó szorosan összefüggő jelenségek. Ha átesés közben a gép hossz tengelye körül is kormányozható marad, vagyis a csűrők ekkor is hatásosak, a dugóhúzó akaratlan létrejötte elkerülhető.

Az indukált ellenállás csökkentésére a szárnyvégeket a szárnytőhöz viszonyítva többé-kevésbé elcsavarják, azaz kisebb állásszögre állítják (99a ábra). Ezzel azt kívánják elérni, hogy a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása a nem ellipszis alakú alaprajzú szárnyak esetében is ellipszis alakú legyen. A dugóhúzó létrejötte szempontjából azonban nemcsak a felhajtóerő ($c_y h$), hanem a felhajtóerő-tényező (c_y) eloszlásának is jelentősége van. Ezt ugyanis a szelvények terjedtség menti célszerű összeválogatásával és geometriai elcsavarásával úgy alakítják, hogy a helyi c_y tényező a töben nagyobb legyen, mint a szárnyvégeken (de emellett a felhajtóerő-eloszlás az optimális ellipszisszerűt megközelítse), és ezért ott a $c_{y\max}$ -ot hamarabb érje el (99b ábra). Az áramlás tehát ekkor itt válik le előbb, a csűrők környezetében, a



99. ábra. a) Aerodinamikai és geometriai elcsavarás; b) az elcsavarás hatása a felhajtóerő-tényező fesztávolság menti eloszlására; c) állásszögeloszlás

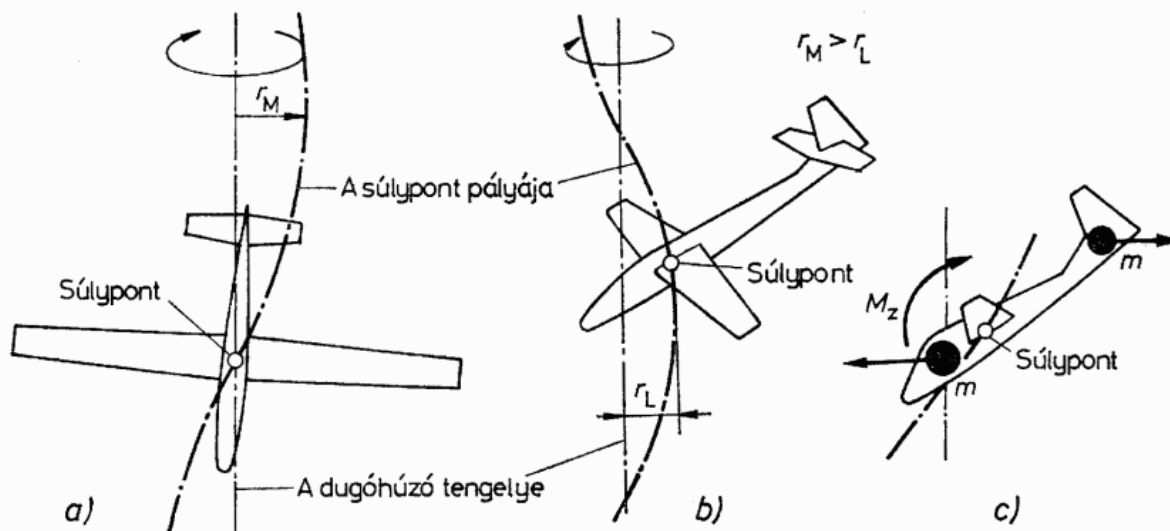
szárnyvégeken pedig zavartalan marad. A célszerű kialakítás megakadályozza át-
eséskor az oldalra való leborulást, és a kormányozhatóság eközben fennmarad.

A dugóhúzót azok a repülőgépek, amelyek szárnya a leírt módon nagy $c_{y\text{tő}}/c_{y\text{vég}}$ aránnyal van kialakítva, lágyan, vontatottan kezdik meg. A kevésbé elcsavart, egyenletes c_y eloszlású gépek dugóhúzóba menete viszont durva és hirtelen.

Kétféle dugóhúzót különböztetünk meg: a meredek és a lapos dugóhúzót (100. ábra). A *meredek dugóhúzót* a törzs nagy, $45\ldots 60^\circ$ -os hosszdőlése, és az jellemzi, hogy a gép súlypontja pörgés közben bizonyos — nem túl kicsi — sugarú csavarvonalpályán süllyed (100a ábra). A *lapos dugóhúzó* jellemzője, hogy a hosszdőlési szög az előzőnél sokkal kisebb, a normál repülési helyzetig is lecsökkenhet, a gép súlypontja viszont igen kis sugarú csavarvonalpályán mozog, és közben a pörgésszögsebessége igen nagy lehet (100b ábra).

A lapos és a meredek dugóhúzó kialakulása igen nagy mértékben függ a *repülőgép súlyeloszlásától*. A súlyponttól távolabb elhelyezkedő nagy tömegek pörgés közbeni centrifugális ereje ugyanis a dugóhúzó ellaposodását segíti elő (100c ábra).

A már állandósult pörgés tulajdonságait a szárny alakján kívül az oldalkormány alakja és nagysága, továbbá a törzs oldalirányú felületének nagysága befolyásolja. Dugóhúzó közben ugyanis a törzs bizonyos β szöggel csúszásban is van. Motoros gépekkel megállapították, hogy a dugóhúzó megszüntetésének könnyűsége függ a csúszási szögtől, és pedig az előlről vagy a forgás tengelye felől megfújt törzs esetén könnyebb, kívülről megfújt törzs esetén pedig nehezebb a kivétel a dugóhúzóból.

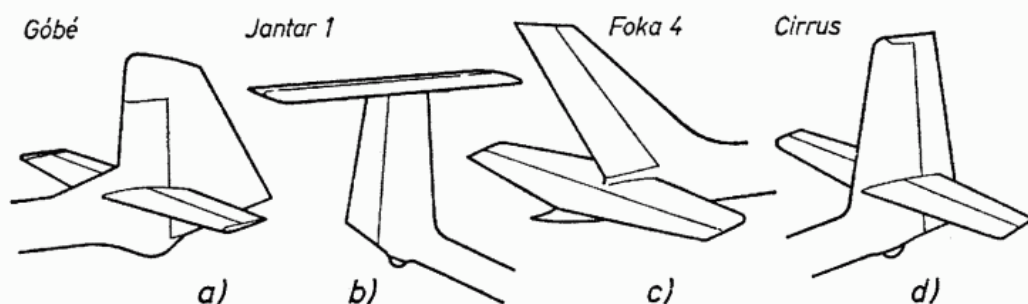


100. ábra. A meredek (a) és a lapos dugóhúzó (b) viszonyai. c) A tömegeloszlás a dugóhúzó jellegét befolyásolja

Vitorlázógépekkel éppen ellenkezőleg azt tapasztalták, hogy a kívülről megfújtt törzs hajlamos a dugóhúzó abbahagyására, és ekkor csak nagyobb oldalkormány-kitérítéssel lehet benne megtartani.

Egy repülőgép dugóhúzótulajdonságaival kapcsolatban igen fontos kérdés megszüntetésének egyszerűsége és a gép erre való készsége. Kíváncsú, hogy a magassági kormány megnyomásával és az oldalkormány alaphelyzetbe állításával (szükség esetén a forgás iránya ellen való kitérítésével) a pörgés megállítható legyen. Ezt a tulajdonságot a szárny alakján, a törzs oldalirányú felületén és az oldalkormány felületének nagyságán kívül a súlypont helyzete is befolyásolja. A mellső szélső helyzet körüli súlyponthelyzettel a gép kevésbé hajlamos az önpörgésre, de azt meredekebben végzi, és könnyebben jön ki belőle. A hátsóbb súlyponthelyzetek hatása ezzel éppen ellentétes.

A dugóhúzó megszüntetésének legfontosabb eszköze az *oldalkormány*, mivel a megfelelő irányú kitérítésével létrehozott legyezőnyomatékkal az aszimmetrikus ellenálláseloszlás könnyűszerrel ellensúlyozható. Igen fontos azonban, hogy pörgés közben felületét a repülőgép egyéb részei, így főként a vízszintes farokfelület ne árnyékolja le, és mindig hatásos maradjon. Különösen lapos dugóhúzóban áll fenn az oldalkormány leárnyékolódásának veszélye, ezért a vízszintes és függőleges farokfelület egymáshoz viszonyított helyzetére nagy gondot fordítanak. A 101. ábrán látható elrendezések közül különösen előnyös a b és a c megoldás.



101. ábra. A függőleges és a vízszintes farokfelületek célszerű elrendezése a dugóhúzóval kapcsolatban is fontos

3. A korszerű vitorlázó repülőgépek

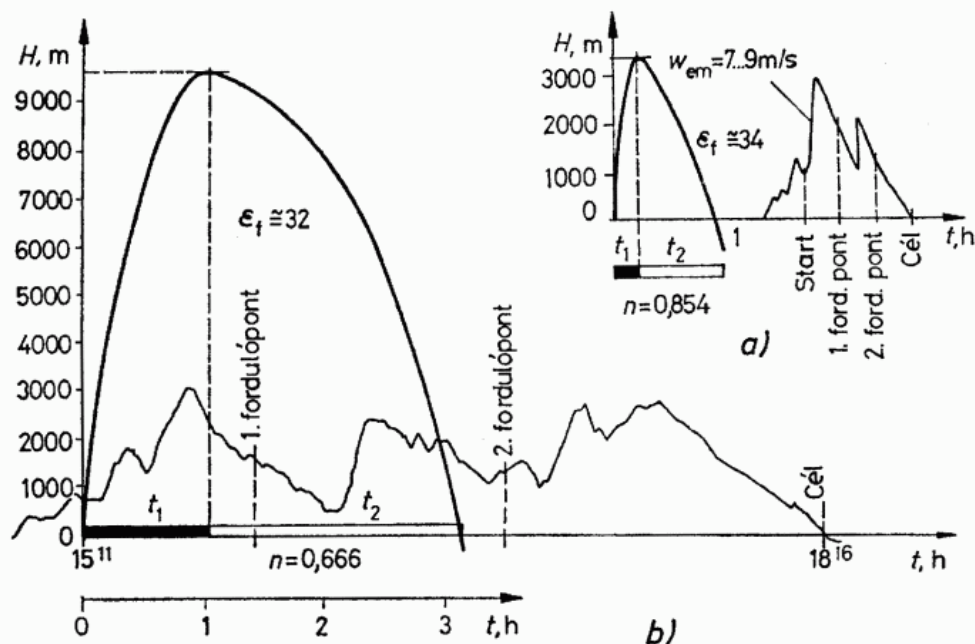
3.1. Teljesítmény-vitorlázógépek

A vitorlázó repülőgépek történetének csaknem hat évtizede alatt a teljesítményrepülés fogalma nem jelentett mindig egyet. Míg a kezdeti időkben az időtartam-repülés volt a fogalom tartalma, helyét rövidesen a távrepülés foglalta el. A meteorológiai lehetőségek feltárása és a technikai haladás egymást sarkallva ösztönözte a vitorlázórepülők fantáziáját, hogy az elérhető távolságok növelésének újabb és újabb lehetőségeit kutassák ki. A felhőutak alatt, főként hátszélben végrehajtott, végcél nélküli, *szabad távrepülés* határát az emelkedő áramlásoknak az időjárás napi menete szerinti megszünte és a hosszú repülés miatti fizikai kimerültség szabta meg. Ugyanez szabott határt az előre megjelölt célú és az időjárási lehetőségeknek már sokkal alaposabb megfontolására alapozott *céltávrepüléseknek* is. Nem a tér vált tehát szűkké, hanem az időjárási feltételek korlátozott volta miatt a repülésre rendelkezésre álló idő. A továbbfejlődés iránya így a repülési sebesség növelése lehetett.

A korszerű teljesítményrepülésnek egyik úttörője volt *Rotter Lajos*, akinek 1936. évi Berlin—Kiel-i céltávrepülését már az 1. fejezetben említettük. Ha *Nemeréjét* talán nem is nevezhetjük egy iskola megalapítójának, hiszen a távrepülés sebességének növelése abban az időben már egyre jobban szükségszerűvé vált, joggal tekinthetjük a sebességi vitorlázórepülés egyik korai megvalósítójának.

A *Nemerét* és létrehozásának alapelveit az 1936. évi Berlin—Kiel közötti távrepülés barogramjával együtt ismertettük. Az elmúlt negyven év alatt a legjobb vitorlázó repülőgépek teljesítményei és ezzel a repülési taktika rendkívüli fejlődésen ment át. A harmincas évek legjobb gépeinek maximálisan 26...30-as siklószáma helyett ma még a 15 m-re korlátozott fesztávolságú *standard* vitorlázógépek között is $\varepsilon = 35$ (*SZD—32A Foka 5*), $\varepsilon = 38$ (*ASW 15*) és $\varepsilon = 40$ siklószámokkal (*PIK 20*) találkozunk. A konstrukciós lehetőségek korlátlan alkalmazásával létrehozott *szabad osztályú* gépek esetében a teljesítmények javulása még szembeszökőbb. Míg az 50-es évek közepén a *Weihe* $\varepsilon = 29$ siklószámával az élvonalba tartozott, napjaink 18 m fesztávolságú gépeinek siklószáma $\varepsilon = 45$ körüli, a 22 m fesztávolságú *Nimbus* pedig éppen $\varepsilon = 50$ siklószámot ér el.

A teljesítmények ilyen mértékű növekedése következetes fejlesztőmunka eredménye, amit a lamináris szárnyszelvények alkalmazásán kívül az aerodinamikai minőség napjainkban elért fokát lehetővé tevő üvegszálerősítésű műgyanta építési anyagként való elterjedése jellemez.



102. ábra. *Moffat* két sebességi rekordrepülésének barogramja és értékelése (a) 100 km-es háromszögrepülés; b) 300 km-es háromszögrepülés

A vitorlázó repülőgép legjobb siklószáma igen fontos összehasonlítási adat az aerodinamikai jószág megítéléséhez, de teljesítőképességének jellemzésére mégsem elegendő önmagában. Mivel a motor nélküli repülőgép távrepülése az emelkedő áramlatokban való emelkedések, majd siklások egymást követő sorozata, olyan mértéket kell találni, amely a távrepülés mindkét mozzanatát magába foglalja. Ilyen a termikus távrepülésben elérhető *átlagsebesség*.

A vitorlázórepülésben az átlagsebesség fogalmának kiszámításakor az adott távolság megtételéhez szükséges teljes repülési időt veszik alapul, amely tehát magába foglalja a siklásokon kívül az emelkedések idejét is. Ha arra gondolunk, hogy az adott távolságot a repülőgép — szélcsendet feltételezve — csak a siklások folyamán hagyja maga mögött, nyilvánvaló, hogy az emelkedés — bár a motor nélküli távrepüléshez nélkülözhetetlen — lényegében olyan idővesztés, amely a *távrepülés hatásfokát* (ha ugyanis ezt az $n = \frac{\text{siklási idő}}{\text{összidő}}$ arányának vesszük) nagyon befolyásolja.

A fejlődés irányát *G. Moffat* két 1962-es rekordrepülésének barogramja szemlélteti (102. ábra). Az *a* ábra 100 km-es háromszögútvonalon megtett 128,38 km/h átlagsebességű repülésének barogramja. *Moffat* mindössze két $w_{em} = 7 \dots 9$ m/s emelkedési sebességű termiket használt ki ebben az esetben, és a 100 km-es távolságot két siklással hagyta maga mögött. Ha az emelkedésben és a siklásban eltöltött idők arányát tekintjük, akkor $n = 0,854$ hatásfoktényezőt kapunk (vö. *Rotter* repülésének $n = 0,566$ értékével). Ezzel a gép átlagos siklási sebességét is kiszámíthatjuk: $128,38 / 0,854 = 150$ km/h. Ha ezt az értéket egyedül a földrajzi fekvés adta rendkívüli emelkedési lehetőségeknek és a viszonylag rövid távolságnak tulajdonítanánk, *Moffat* két nappal későbbi, 300 km-es háromszögútvonal feletti repülésének barogramja (102b ábra) eloszlatja kételyeinket. *HP-8* típusú gépével ezen a távolságon 108,12 km/h átlagsebességet ért el. A távrepülés $n = 0,666$ hatásfokából, ill. a siklásban töltött időből kiszámított átlagos siklási sebesség igen nagy, 194 km/h értékre adódik. (*Moffat* beszámolójából tudjuk, hogy siklási sebessége az első repülésnél a 220 km/h-t is elérte.) A két barogram a nyilvánvalóan igen kedvező időjáráson

kívül azt is bizonyítja, hogy a $HP=8$ még ezekkel a korábban szinte elképzelhetetlenül nagy siklási sebességekkel is meglehetősen jó siklószámokat ér el, és ez a tulajdonság az átlagsebesség alakulásában igen fontos.

Egy megállapítás szerint szélszélben, átlagos erősségű és eloszlású termikus időjárási helyzetben a termikeken kívüli optimális merülősebesség éppen a felére adódik a termikekben elért emelkedési sebességnek. Ez azt jelenti, hogy pl. 100 km-es háromszögpályán 100 km/h átlagsebesség eléréséhez 150 km/h átlagos siklási sebesség, 150 km/h átlagsebességhez pedig 225 km/h siklási sebesség szükséges. E gondolatok helyességét egy újabb, 100 km-es háromszögpályán 1974-ben repült 165,35 km/h átlagsebességű világrekord példája is igazolja, amelyet 3600 m-es magasságig való emelkedésből egyetlen siklással hajtottak végre a második fordulóponttól a célvonalig 240 km/h sebességgel.

A következőkben áttekintést adunk a vitorlázó repülőgépek kialakításának azon jellegzetességeiről, amelyek az átlagsebességre hatást gyakorolnak.

3.1.1. Az átlagsebesség mint teljesítménymérce

Tekintsük át először is, milyen tényezőkből adódik távrepülésben a vitorlázó repülőgép átlagsebessége?

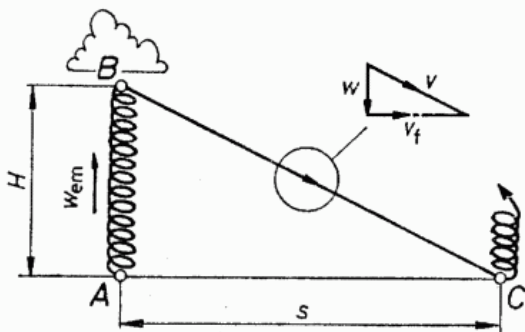
Induljunk ki a távrepülésnek egy emelkedésből és az azt követő siklásból álló jellegzetes szakaszából (103. ábra). A termikbe az A pontban érkező vitorlázó repülőgép körözve w_{em} emelkedési sebességgel emelkedik a H magasságban felette levő B pontig. Itt kezdi meg a v sebességű siklást az A ponttól s távolságban levő C pontban fellelt újabb termikig, ahol a folyamat előlről kezdődik. A v sebességű siklás közben a gép siklószáma (élve a 16. oldal lábjegyzetében bizonyított lehetőséggel, amely szerint a siklási és a föld feletti sebesség jó közelítéssel azonosnak vehető) $\varepsilon = v/w$ volt.

Az s távolság megtételéhez szükséges idő tehát két részből tevődik össze, az emelkedés $t_1 = H/w_{em}$ és a siklás $t_2 = H/w$ idejéből. Ezzel az A és C pont közötti átlagsebesség már meg is határozható:

$$v_a = \frac{s}{t_1 + t_2} = \frac{v}{1 + \frac{w}{w_{em}}} = \frac{v}{1 + \frac{v/\varepsilon}{w_{term} - w_{ford}}}$$

Az összefüggésben szereplő $w_{term} - w_{ford} = w_{em}$ kifejezés azt jelzi, hogy az emelkedés w_{em} sebessége a termik w_{term} emelkedési sebességének és a repülőgép fordulóban mutatott w_{ford} merülősebességének különbségéből származik.

A v_a átlagsebesség az előző összefüggés szerint olyan tényezők függvénye,



103. ábra. A távrepülés egy szakaszának egyszerűsített vázlata

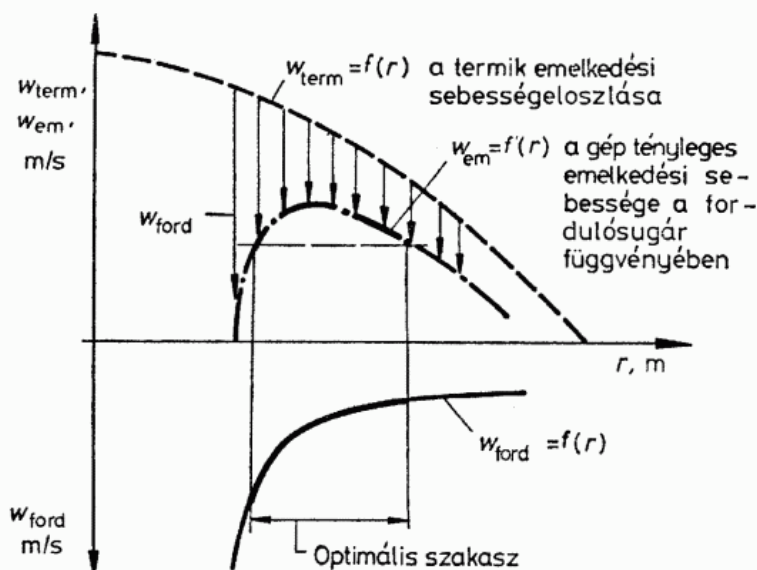
amelyek alakulását a repülőgép aerodinamikai kialakításának jósági foka (ε , w , w_{ford}), a meteorológiai körülmények (w_{term}) és a repülőgépvezető képességei (v , w_{ford} megválasztása) határozzák meg.

3.1.2. A repülőgépvezető képességeinek és a termik emelkedési sebességének hatása az átlagsebességre

Az átlagsebesség alakulását befolyásoló tényezők közül a meteorológiai körülmények és a repülőgépvezető képességei csak közvetve kapcsolatosak a harmadik tényezővel: a repülőgép aerodinamikai kialakításával. Célunk ez utóbbi részletes taglalása, ezért először kíséreljük meg függetleníteni magunkat a két előbbtől származó bizonytalanságoktól.

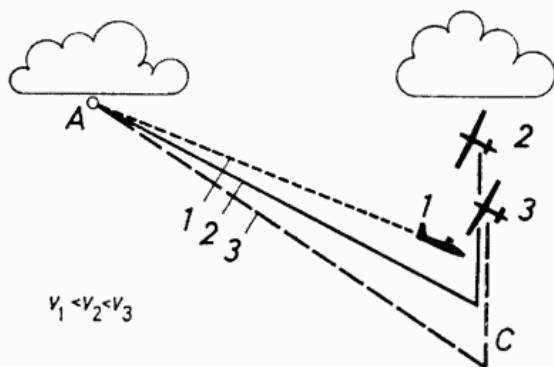
A meteorológiai körülmények figyelembevétele meglehetősen nehéz feladat, hiszen a termikviszonyok alakulása nemcsak az éghajlattól, évszaktól, időjárástól stb. függ, hanem napi menete és területi eloszlása miatt egyazon repülés folyamán is eltérő lehet. Amikor a vitorlázó repülőgépek kialakításának szempontjait kívánjuk tárgyalni, leghelyesebb, ha ezt egy modellhelyzetre vonatkoztatjuk. Ebben a termikek a repülés folyamatos végrehajtásához megfelelő sűrűségben oszlanak el, az egyes feláramlások átmérője és emelkedési sebessége mindenütt egyforma, az emelkedési sebességnek a termik átmérője mentén való eloszlása pedig a 10. ábra szerinti idealizált eloszlások valamelyikének felel meg. Az időjárás változóságában rejlő bizonytalanságot ezzel kiküszöböltük.

Lássuk, mi a repülőgépvezető képességeinek a szerepe? A vezető egyéniségétől és képzettségétől függő elhatározásai még teljesen azonos időjárási helyzetben is sokfélék lehetnek, ezért az átlagsebesség alakulására döntő hatást gyakorolnak. Az alapul vett homogén időjárási helyzetben elvileg két döntése járul hozzá az optimális repülés körülményeitől való eltéréshez. A repülőgépvezető elhatározásától függ ugyanis körözés közben a dőlésszög — ezen keresztül a fordulósugár —, valamint siklásban a siklási sebesség megválasztása.



104. ábra. A termik kihasználásának optimális viszonyai

A 10. ábrán látható idealizált eloszlások mindegyike azt mutatja, hogy a termik emelkedési sebessége középpontja felé nő. A legnagyobb w_{em} emelkedési sebességet tehát viszonylag kis körön repülve, azaz nagy dőlésszöggel lehet elérni. A nagy dőlésszög viszont a merülősebességet növeli. A 104. ábra szerint az emelőáramlat sebességeloszlásának és a gép fordulópólárisának egybevetéséből az *optimális emelkedési sebesség* az azt lehetővé tevő fordulósugárral, ill. dőlésszöggel együtt egészen pontosan meghatározható. A repülőgépvezető ezt csak a variométer segítségével kísérrelheti meg megtalálni, és így az optimális viszonyok elérése vagy attól való eltérés elhatárolásának találó voltától függ.



105. ábra. A siklási sebesség szerepe a távrepülésben

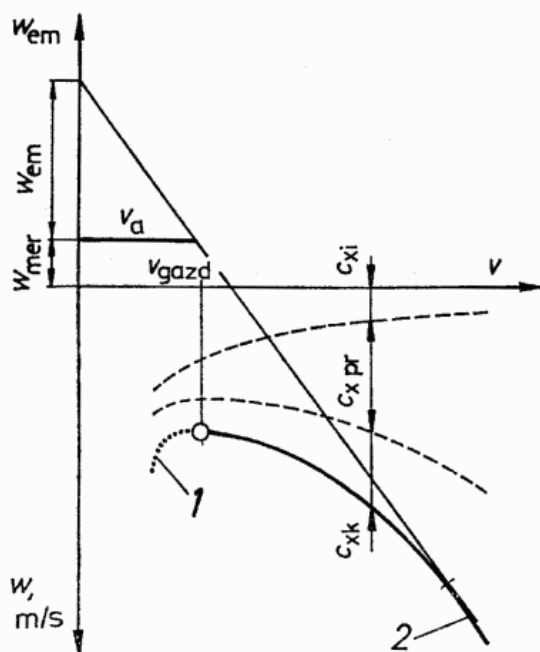
Az A és C pontok közötti *optimális siklási sebesség* a vitorlázó repülőgép sebességi görbéjének alakulásától és a következő termik várt emelkedési sebességétől függ. E két tényező összehangolása ismét a repülőgépvezető feladata. A 105. ábra szerint ugyanis a különböző v siklási sebességekkel (és így eltérő siklószámmal) repülő gépek a következő emelésbe különböző időpontokban érkeznek. Azt, hogy a nagyobb sebességgel előbb, de alacsonyabban (3) vagy kisebb sebesség miatti későbbi, de magasabb érkezés (1) volt a kifizetődő, a termik emelkedési sebessége dönti el. Ábránk szerint a 2 gép vezetője cselekedett helyesen, mert a három közül — adott pillanatban — ő került a legmagasabbra. Az optimális siklási sebesség megválasztásához a repülőgépvezetőnek a *McCready*-féle számológéppel áll rendelkezésére, így személyének szubjektív döntéseit ezzel kiküszöböltnek tekinthetjük.

3.1.3. A vitorlázó repülőgép jósági fokát meghatározó tényezők az átlagsebesség szemszögéből

Miután az előzőkkel az időjárás alakulásait és a repülőgépvezető szubjektivitását kiküszöböltük, az átlagsebesség alakulását már csak a repülőgép kialakításával szoros kapcsolatban levő tényezők határozzák meg. Az átlagsebesség összefüggéséből tehát a következő jellemzők változásainak hatását kell figyelembe vennünk:

- a v siklási sebességet,
- a körözésben mutatott w_{ford} merülősebességet és
- az ε siklószámot.

Ha ezeket a jellemzőket is tovább elemezzük az előző fejezetekben megismert összefüggéseik alapján, végül azt kapjuk eredményül (ha még a levegő ρ sűrűségének a hatásától is eltekintünk, mint ami a gép kialakítását nem befolyásolja közvetlenül), hogy a siklási és körözési teljesítményeket egyértelműen jellemző sebességi görbét kell részletesebben elemeznünk.



106. ábra. A repülőgép különböző részeinek ellenállása a távrepülés átlagsebességének alakulására döntő hatású

1 a sebességi görbe körözési tartománya; 2 siklási tartomány

A *sebességi görbe* a repülési fázisok szerint két tartományra osztható: a v_{\min} legkisebb sebességtől a legkisebb merülősebességhez tartozó v_{gazd} siklási sebességig, vagyis a körözésben való emelkedésre is jellemző 1, továbbá a v_{gazd} -nál nagyobb sebességeknek a siklóteljesítményekre jellemző 2 szakaszára (106. ábra). Az előbbi a t_1 emelkedési idő, az utóbbi pedig a t_2 siklási idő alakulására gyakorol hatást.

Ha visszagondolunk a Bevezetésben a körözési sugárral és a fordulópólárisal kapcsolatban mondottakra, beláthatjuk, hogy a görbe 1 szakasza akkor kedvező, ha v_{\min} és w_{\min} minél kisebb. Mindkettő a repülőgép legnagyobb felhajtóerő-tényezőjével kapcsolatos, és értékük annál kisebb, minél nagyobb $c_{y \max}$. A görbe 2 szakaszának kedvező alakulására nézve az optimális átlagsebességnek az ábrán látható szerkesztési módjából kapunk felvilágosítást. Ez tehát akkor alakul kedvezően, ha a nagyobb sebességeknél is minél laposabban, azaz minél kisebb merülősebességekkel fut. Korábban láttuk, hogy a vitorlázó repülőgép ellenállása három fő részből tevődik össze, éspedig a c_{xpr} profilellenállásból, a különféle eredetű c_{xk} káros ellenállásokból, és a c_{xi} indukált ellenállásból:

$$c_{x \text{ gép}} = c_{xpr} + c_{xk} + c_{xi} = c_{xpr} + c_{xk} + \frac{c_y^2}{\pi \lambda} k.$$

A 106. ábrán feltüntettük ezek változását is a siklási sebesség függvényében, így képet kaphatunk arról, hogy a kétféle üzemi állapot (körözés és siklás) egymástól mennyire eltérő igényeket támaszt az optimális kialakítással szemben. Látható pl., hogy míg kis sebességekkel, vagyis a körözési tartományban az összellenállás túlnyomó részét a c_{xi} indukált ellenállás teszi ki, a nagyobb sebességek mellett ez az összetevő csaknem elenyészik, de ekkor már többszörösére nőtt a kezdetben kisebb profil- és káros ellenállás. A sebességi görbe alakulását tehát végső soron a repülőgép tervezésekor azon tényezők célszerű kiválasztásának sikeressége szabja meg, amelyek a repülés különböző fázisaira nézve az aerodinamikailag és a repülés egyéb szempontjai által diktált legkedvezőbb kialakítást adják. Ezek közül is elsőrendű fontosságúak a *szárny kialakítását meghatározó tényezők*:

- a felületi terhelés nagyságának hatása;
- az alkalmazott szárnyszelvény polárgörbéjének jellege;

- az oldalviszony és a fesztávolság;
- a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlásának jellege, vagyis a szárny alaprajzi körvonalának és elcsavarásának a hatása.

Ezek mellett a törzs és az irányfelületek célszerű kialakítása az összellenállás további csökkenéséhez járul hozzá.

3.1.4. A szárny kialakításának szempontjai

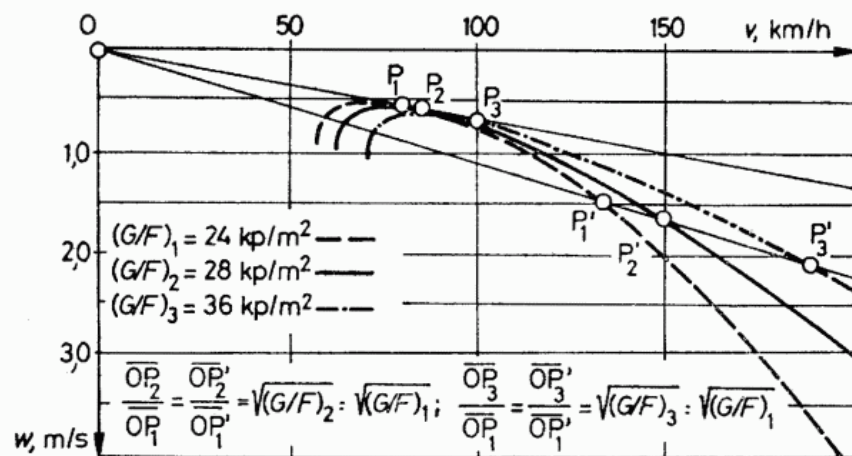
3.1.4.1. A felületi terhelés nagyságának hatása

A felületi terhelést, azaz G/F hányadosát egyformán megtaláljuk a v siklási sebesség és a w merülősebesség korábban felírt összefüggésében. Hatása mindkettőben egyforma értelmű, és pedig növekedése azonos arányban növeli v és w értékét.

Tudjuk, hogy a siklószám $\varepsilon = v/w$, de egyúttal c_y/c_x -szel is egyenlő. A vitorlázó repülőgép sebességi görbéjének alakulását pedig ez utóbbiak szabják meg. A felületi terhelés nagyságának, vagyis adott repülőgép esetében a súlynak a megváltozása a különböző állásszögekhez (c_y tényezőhöz) tartozó siklószám nagyságát nem befolyásolja, de megváltoztatja a hozzátartozó siklási és merülősebesség nagyságát. Mivel v és w azonos arányban változik, a felületi terhelés megváltozása azt jelenti, hogy a sebességi görbe — alakját megtartva — mintegy a siklószámot jellemző sugarak mentén eltolódik (csökkenő G/F esetén) a kisebb vagy (növekvő G/F esetén) a nagyobb siklási és merülősebességek irányába (107. ábra).

Az ábráról látható, hogy a *felületi terhelés növelése* a repülőgép nagyobb siklási sebességek melletti siklási tulajdonságaira kedvezően hat, de rontja a kisebb sebességekkel elérhető jellemzőket: v_{\min} , w_{\min} és v_{gazd} értékét. Ez utóbbi tulajdonság nemcsak azt jelenti, hogy a nagyobb felületi terhelésű repülőgép átesési és leszállási sebessége nagyobb, mint a kisebb felületi terhelésűé, hanem azt is, hogy a felületi terhelés növelése a körözési teljesítményeket is rontja. Eszerint a kisebb felületi terhelés kisebb fordulósugarat is lehetővé tesz, de r_{\min} értéke a felületi terhelés növekedésekor egyre nagyobb lesz. Hasonló a felületi terhelés hatása a w_{ford} merülősebességre is.

A felületi terhelés hatásának jellegét ezzel általános érvennyel meg is határoztuk. Növekedése a siklási teljesítményeket, csökkenése pedig az emelkedési teljesítményeket



107. ábra. A felületi terhelés változásának hatása a sebességi görbe alakulására

javítja. Adott időjárási helyzetre így legjobb átlagsebességet biztosító értékét a 10. ábra szerinti elméleti termikprofilok figyelembevételével meg is lehetne határozni. Az így kialakított repülőgép azonban csak az alapul vett időjárási helyzetre tekinthető optimálisnak. Az attól eltérő időjárási feltételek, éghajlati eltérések az optimális felületi terhelés nagyságában döntők. Így — az előző általános megállapítások érvényben tartásával — a kis felületi terhelésű gépek okvetlenül jobban érvényesülnek a szűk és kisebb átlagemelést adó termikekben, míg a nagyobb felületi terhelésű és ezért gyorsabb gépek csak a nagyobb átmérőjű és átlagemelésű áramlatokban válnak egyenértékűvé ezekkel. Az eltérő időjárási feltételek kiegyenlítésére a *felületi terhelés repülés közbeni változtathatósága* kínálkozik. Ezt kétféleképpen oldják meg: tetszés szerint leengedhető vízballaszt alkalmazásával vagy a szárny felületének változtatásával.

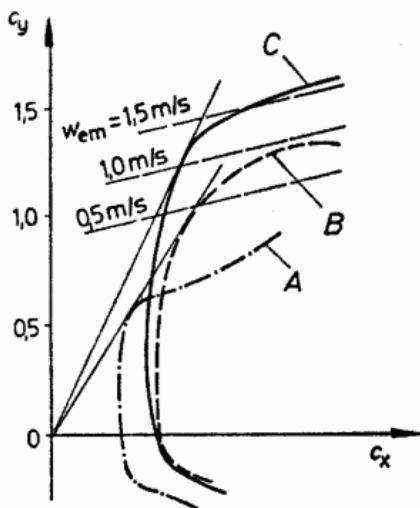
A vízballaszt alkalmazása a repülőgépvezető kezébe a felületi terhelés egyszeri alkalommal való szabályozására ad lehetőséget. Így kedvezőbb időjárási körülmények között módjában áll — vállalva a velejáró gyengébb emelkedési teljesítményt — a nagyobb felületi terheléshez tartozó sebességi görbét kihasználni, vagy a ballasztot leengedve a gyengébb emelkedési sebességű termikek kihasználása érdekében a siklási teljesítmények rovására emelkedési képességét javítani.

3.1.4.2. A korszerű szárnyszelvények jellegzetességei

A 2. fejezetben megismertük a hagyományos szárnyszelvények geometriai kialakítása és c_y , c_x , valamint c_m tényezők közötti összefüggéseket. A vitorlázórepülés kezdeti időszakában, amikor csak a kis merülősebességekre törekedtek, viszonylag nem volt nehéz a választás a rendelkezésre álló szelvények között. A lehetséges legnagyobb $c_{y\max}$ elérésére lehetőleg erősen ívelt és vastag profilokat választottak (pl. Gö 535). Az akkor kedvezőnek tartott csekély felületi terhelés miatti nagy szárnyfelület és húrhosszúság mellett ez a kellő szilárdságon kívül kis súlyú szerkezet kialakítását is lehetővé tette. A legjobb siklószám növelésével és a kedvezőbb repülési tulajdonságok igényével együtt vált kedveltté a kisebb ellenállású Gö 549 szelvény. A hagyományos szárnyszelvények azonban csak viszonylag kis sebességtartományban nyújtottak optimális teljesítményeket. A hasznosított sebességtartomány kiszélesítésével a rendelkezésre álló ilyen szelvények már nem bizonyultak megfelelőnek.

A lamináris határréteg kialakulásának előnyeit a 2. fejezetben ismertettük, és a 66. ábrával kapcsolatban láttuk, hogy a lamináris szelvények ellenállása — bizonyos állásszögtartományban — igen kicsi. Az első ilyen szelvényeket még a motoros repülés számára kísérletezték ki (NACA), és éppen ezért a kis ellenállást biztosító állásszögtartományuk igen szűk volt. Bár vitorlázó repülőgépeken is alkalmaztak ilyeneket, mégsem váltak be egészen.

A 108. ábrán Thomas [20] nyomán három azonos felületi terhelésű és oldalviszonyú, de különböző szelvénnel készült szárny polárgörbéi láthatók. Ezek közül az A jelű $c_y = -0,12 \dots 0,6$ között kétségtelenül a legkisebb ellenállást adja, ezért ebben a tartományban siklószáma a legjobb. A legjobb siklószám $c_y = 0,6$ -hoz tartozik, ezért e szárnyal készült gép kifejezetten „sebességi” gép, körözési tulajdonságai pedig a hirtelen megnövekvő c_x tényező és $c_{y\max}$ viszonylagos kicsinysége miatt gyengék. Az ilyen szelvények a vitorlázórepülésben csak különlegesen kedvező időjárási helyzetre (pl. a BJ—3 esetében, l. később) alkalmazhatók. A B szelvény már sokkal kedvezőbb tulajdonságokat mutat, és az előzőével közel azonos nagyságú legjobb siklószöge kb. $c_y = 1$ felhajtóerő-tényezőhöz, tehát az előbbinél kisebb sebességhez tarto-



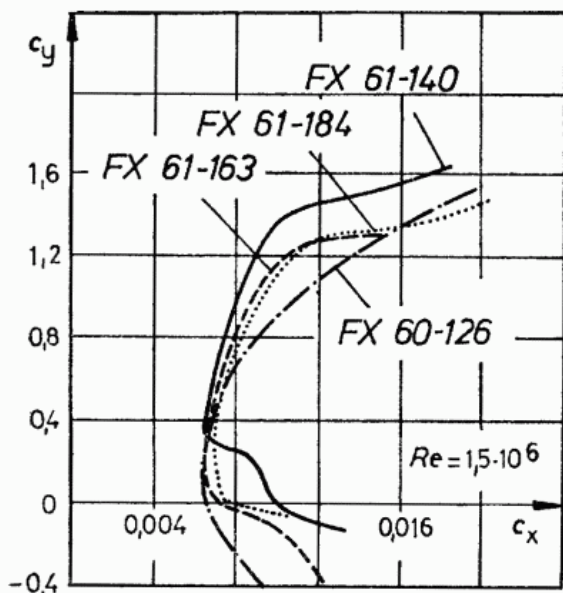
108. ábra. Különböző jellegű szárnyszelvények értékelése az átlagsebesség szempontjából

zik. Ez elsősorban azért fontos, mert az ábra tanúsága szerint így az előzőhöz hasonló siklószámok tartománya — a c_y felhajtóerő-tényezőt tekintve — sokkal nagyobb, és e szárnyal készült gép sokoldalúbban alkalmazható. Körözési tulajdonságai $c_{y \max} = 1,3$ körüli értékével az A jelűt messze felülmúlják. Az egyoldalúan nagy sebességre (tehát kis c_y tartományra) tervezett szelvény kis sebességgel rendszerint kedvezőtlen, és ez fordítva is fennáll. A korszerű vitorlázórepülésben olyan szelvényekre van szükség, amelyek kicsiny c_y értékek mellett kis ellenállásúak, de ez a tulajdonságuk a nagy felhajtóerő-tényezők mellett is fenntartható. Ilyen tulajdonságai vannak *R. Eppler*, *W. Pfenniger* és főként *F. X. Wortmann* kifejezetten vitorlázó repülőgépek számára szerkesztett szelvényeinek (az ábra C polárgörbéje). Ezek minden szempontból felülmúlják a csak szűk lamináris tartományban kis ellenállású szelvényeket. A 108. ábrán a w_{em} emelkedési sebesség berajzolt egyenesei azt szemléltetik, hogy az A szelvény erősen hátrányban marad a B , de különösen a C jelű, kiterjedt lamináris tartománnyal rendelkezőkkel szemben. Ez utóbbiak az optimális átlagsebesség kívánalmainak sokkal inkább megfelelnek.

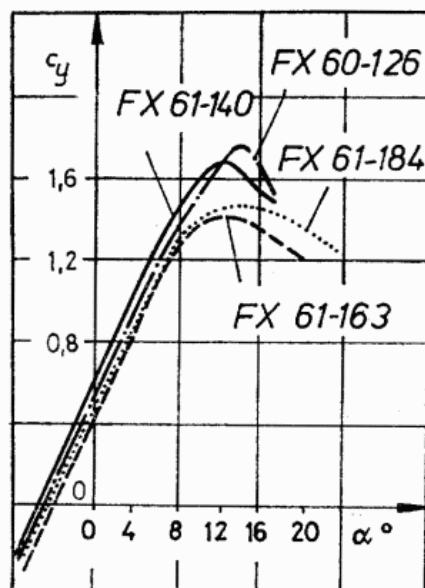
A napjainkban legkorszerűbbnek tekinthető *Wortmann*-féle szelvények kis ellenállású tartományának kiterjesztését a lamináris határréteg létrehozásán kívül a turbulens határréteg kedvező alakulásának befolyásával növelik [23]. Ezek a szelvények lényegesen nagyobb $c_{y \max}$ tényezőt érnek el, mint pl. a *NACA* szelvények, a határréteg átváltási pontja általában a húrhossz 60%-a körül van, és kis ellenállású tartományuk igen tág állásszöghatárok között helyezkedik el. Mivel a szárnyat általában nem azonos szelvénnel alakítják ki teljes terjedtségében, *Wortmann* a különféle szelvények káros egymásrahatásának elkerülésére 12...18% vastagság között egy sor olyan profilt szerkesztett, amelyek lamináris tartományukban hasonló tulajdonságúak (109. ábra), így a velük készült szárnyak aerodinamikai jellemzői a teljes fesztávolság mentén egységesen alakulnak.

Az *FX 60—126* szelvényt kifejezetten a szárnyvégen való alkalmazásra szerkesztették. A $c_{y \max}$ értéke, valamint a hozzátartozó állásszög nagyobb, így felhajtóerő-tényezője az egész szárny átesési állásszögének megközelítésekor lassabban csökken, mint a szárny egyéb részein alkalmazott szelvényeké, ugyanakkor az áramlási viszonyok a fesztávolság mentén közel azonosak maradnak. Ez a tulajdonság a hagyományos, pl. *NACA*-féle lamináris szelvényekkel nem érhető el, mivel azok c_y és c_x viszonyai a kis ellenállású részen kívül rohamosan változnak, így az egymás melletti eltérő effektív állásszögű szelvények áramlási viszonyai is erősen eltérhetnek egymástól.

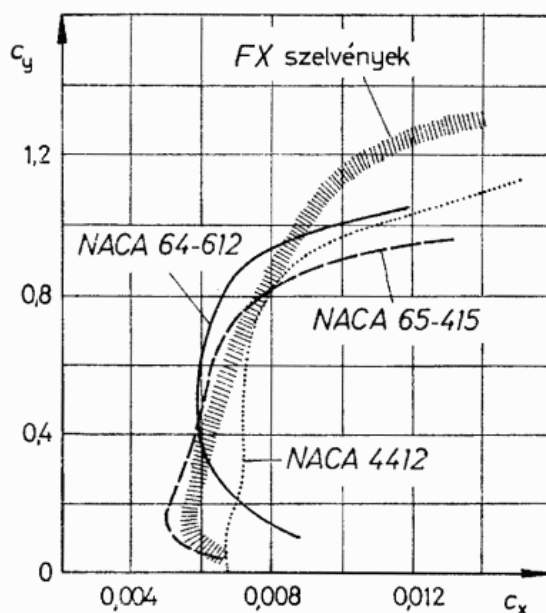
Az *FX* szelvények ellenállása — mint a 108—110. ábrákon látható — a lamináris



109. ábra. Az *FX* szelvények jellegzetességei



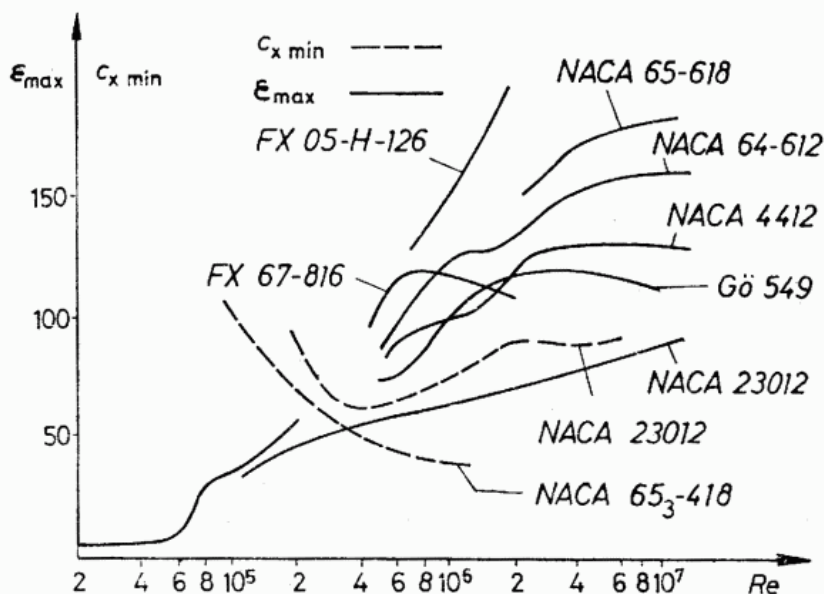
110. ábra. Lamináris szelvények jellemzőinek összehasonlítása



tartományban nem csökken olyan mértékben, mint a *NACA* szelvények esetében, de kedvező tulajdonságaikat igen széles állásszög-(sebesség-)tartományban érik el, és így velük a legnagyobb és legkisebb sebességekkel egyaránt optimális teljesítmények várhatók.

Wortmann az *FX* szelvények egy csoportját csűrő- és ívelőlaphoz készítette, gondosan ügyelve arra, hogy a kormánylap kitérítése a szárny körüli kedvező áramlási viszonyokat a legkevésbé zavarja.

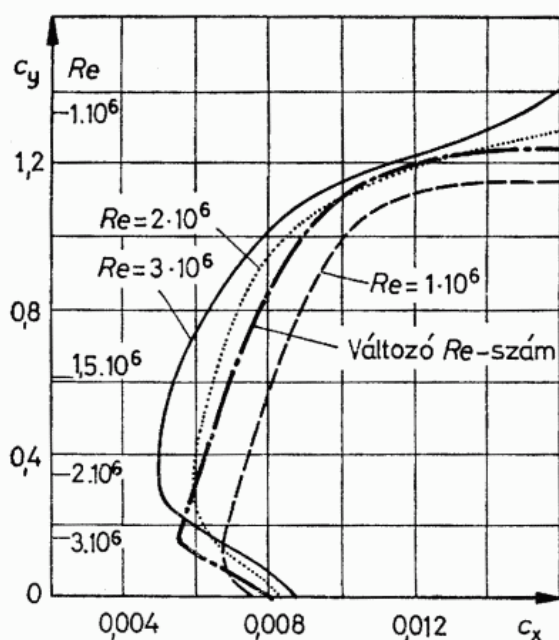
Már a határreteg fogalmával kapcsolatban utaltunk arra, hogy az átváltási pont helye függ a *Reynolds*-szám nagyságától is, így annak a felhajtóerő és ellenállástényező alakulása is függvénye bizonyos mértékben. Az 55. ábrán a síklap súrlódási ellenállástényezőjének változását is bemutattuk a *Re*-szám függvényében. Mivel a lamináris szelvények esetében a profilellenállás túlnyomó részét a súrlódási ellenállás teszi, ezért a *Re*-szám nagysága különös hatást gyakorol ezek aerodinamikai jellemzőire. Ha a



111. ábra. A Re -szám hatása $c_{x \min}$ és ϵ_{\max} alakulására

vitórlázógépszárnyak szokásos húrhosszát ($h_{tő} \cong 1$ m, $h_{vég} \cong 0,2$ m) és a 60...250 km/h sebességtartományt tekintjük, a Re -szám $0,25 \cdot 10^6 \dots 4 \cdot 10^6$ között változik. Néhány szelvény ϵ_{\max} értékének változását a 111. ábrán láthatjuk a Re -szám függvényében. Mindegyik közös jellemzője, hogy a legjobb siklószám egy optimális Re -számig növekszik. Ez kisebb mértékben tudható be a felhajtóerő-tényező növekedésének, mint inkább a növekvő Reynolds-számok miatt az ellenállástényező csökkenésének. A minimális ellenállástényező jellegzetes változását a NACA 23012 és a 65-418 szelvény esetére a 111. ábrára is berajzoltuk. Látható, hogy nagyobb Re -számokkal a lamináris szelvény $c_{x \min}$ értéke jóval kisebb a hagyományosénál. Csökkenő Re -számokkal azonban mindkét fajta szelvény $c_{x \min}$ értéke kedvezőtlenebbé válik, ami a lamináris határréteg leválásával kapcsolatos jelenség.

A Reynolds-számnak a profil polárgörbéjére gyakorolt hatását a 112. ábra szemlélteti az FX 61—140 szelvény esetében. Látható, hogy a polárgörbe növekvő Re -számmal egyre inkább a kis ellenállások felé tolódik el. Az ábrázolás ilyen módja azonban csak elvi jelentőségű, mert a valóságban a szárny polárgörbéjének pontjai



112. ábra. A Re -szám hatása a polárgörbe alakulására

különböző sebességekkel alakulnak ki. Ezen az ábrán ezért azt a polárgörbét is ábrázoltuk, amely a repülés közben változó sebesség miatt különböző Re -számokkal alakul ki a különböző c_y tényezők mellett, és így a valóságos viszonyok hű képét adja.

3.1.4.3. Az oldalviszony és a fesztávolság hatása

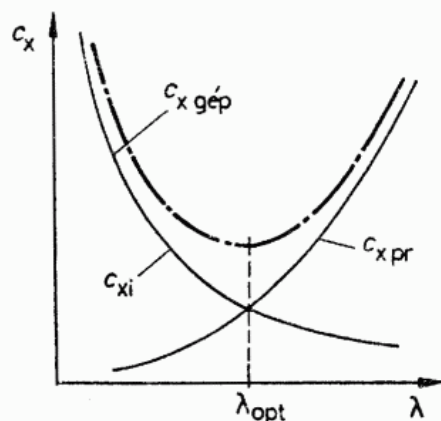
Akár a 78. ábrát, akár pedig a 106. ábrát vesszük szemügyre, egyformán kitűnik, hogy az összellenállás egyik legfontosabb része az indukált ellenállás. Alakulására a szárny oldalviszonyának nagysága gyakorol döntő hatást, melynek növelése az összellenállást akkor is jelentősen csökkenti, ha az egyéb ellenállásösszetevőkre nem is fektetünk különösebb gondot. Ez az oka annak, hogy a teljesítmény-vitorlázógépek közös jellemzője a korai kezdettől napjainkig a *minél nagyobb oldalviszony*.

Az oldalviszony növelésének korábban szilárdsági okok szabtak határt. Ez a korszerű építési anyagok, elsősorban a szálerősítésű műanyagok miatt már túlhaladott állapot, és az oldalviszonyt szinte kizárólag az aerodinamikai követelmények szerint lehet meghatározni. Ha tehát a fesztávolság növelésének nincsen akadálya, akkor az oldalviszony úgy növelhető, hogy a *Reynolds*-szám még kedvező értéken maradjon.

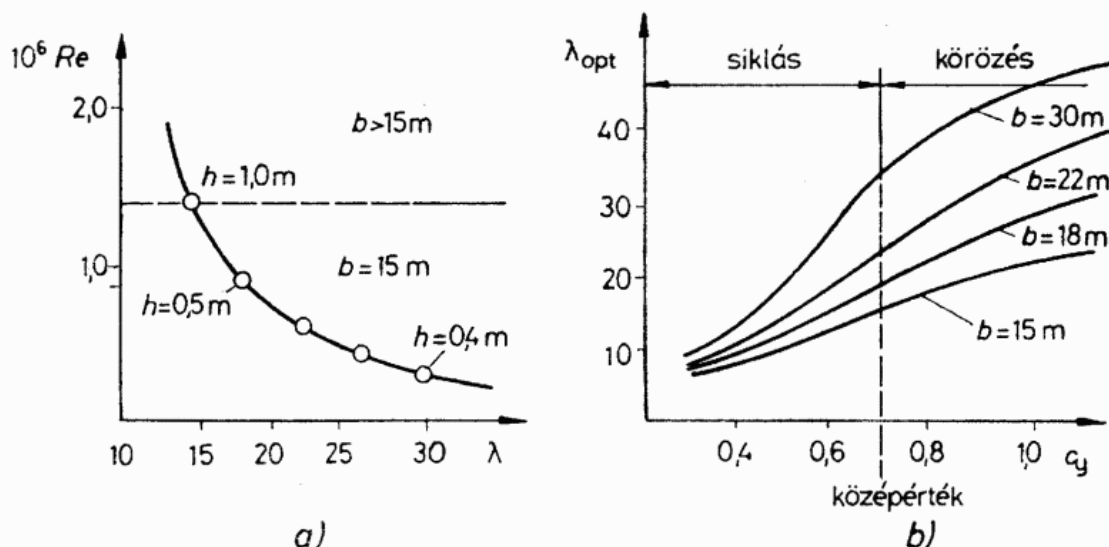
Ugyanez nem mondható el azokról a gépekről, amelyek esetében a fesztávolságot meghatározott értékre korlátozzák (pl. a standard osztályú gépek esetében, amikor is a fesztávolság a $b = 15$ m-t nem haladhatja meg), mert ekkor az oldalviszony csak a szárny húr hosszának csökkentésével fokozható, ami viszont a *Reynolds*-szám csökkenéséhez vezet. Mint láttuk, ekkor a profilellenállás igen erősen növekszik (111. ábra). A korlátozott fesztávolságú gépek esetében az oldalviszony növelésekor a húr hossz csökkenése következtében beálló profilellenállás-növekedés egy optimális oldalviszony esetében éppen kiegyenlíti az indukált ellenállás csökkenését. Az oldalviszony további növelése már értelmetlen lenne azért, mert a kétféle ellenállás összege — mint a 113. ábrán látható — ekkor újból emelkedni kezd.

Az oldalviszony legkedvezőbb nagyságának eltalálását megnehezíti az a körülmény, hogy a kis sebességű repülés feltételei éppen ellenkezően hatnak, mint a gyors repülésé. Így a körözési teljesítmények és a legjobb siklószám szempontjából a nagy oldalviszony az előnyösebb, de a nagy sebességekkel, azaz kis c_y tényezővel kisebb oldalviszony is megfelelő.

A legcélszerűbb az oldalviszonynak a sebességgel együtt a madarak szárnyfelületéhez hasonló módon való változtathatósága lenne. Sajnos a kis sebességű repülés körülményeinek javítására alkalmazott eszközök közül a *Fowler*-lap és a változtatható geometriájú szárnyak egyéb megoldásai az oldalviszony csökkenését okozzák,



113. ábra. A legkedvezőbb oldalviszony meghatározásához



114. ábra. A legkedvezőbb oldalviszony meghatározásához

tehát hatásuk ebből a szempontból a kívánatossal éppen ellenkező. A legcélszerűbb megoldás — a teleszkopikus szárnykialakítás — az oldalviszony növelését a fesztávolság növelésével éri el. Az ezzel járó felületnövekedés és felületterhelés-csökkenés szintén kedvezően hat a körözési tulajdonságokra. E megoldással e könyv írásának idején az FS—29 jelű gépen kísérleteznek.

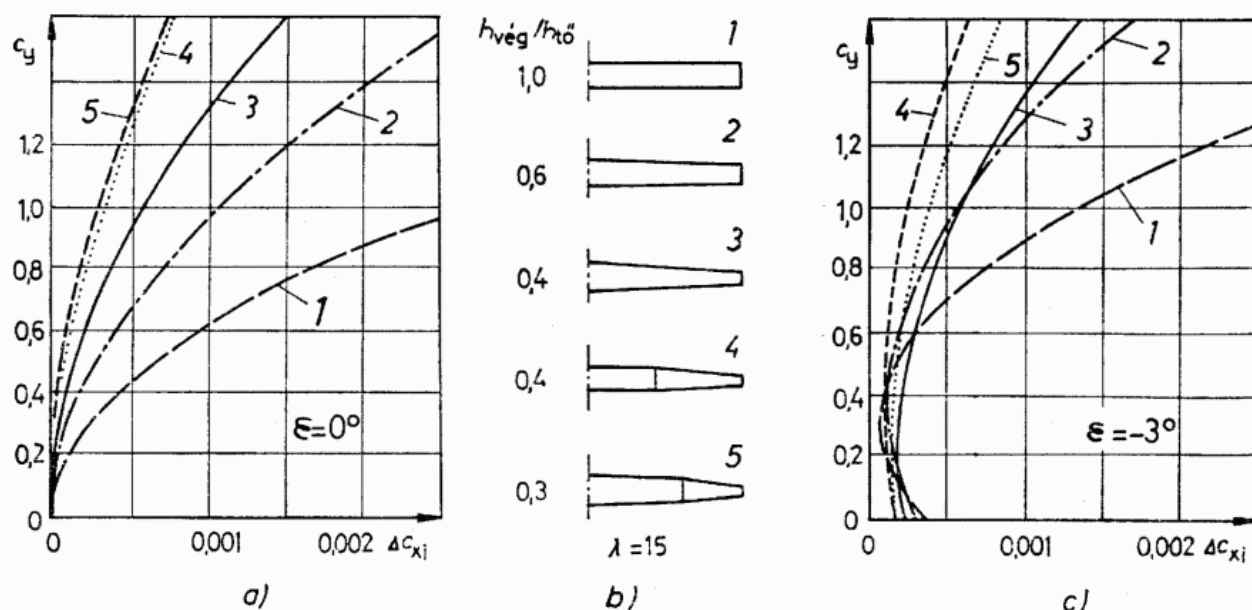
A szokásos szárnymegoldások esetén a körözési és siklási feltételek közötti közép-utas megoldást alkalmazzák, és kb. $c_y = 0,7$ -hez határozzák meg az oldalviszony optimális értékét (114. ábra).

3.1.4.4. A szárny alaprajzi alakja és az elcsavarás

A legkisebb ellenállást adó *ellipszis alaprajzú* szárny vitorlázó repülőgépekhez — bár a harmincas években több ízben is építettek ilyet — alkalmatlannak tekinthető a térbeli görbültségű felületek nehéz előállíthatósága miatt. Ez az alak egyébként azért volna kedvező, mert az elliptikus felhajtóerő-eloszlás a teljes fesztávolság mentén azonos állásszöggel (tehát elcsavarás nélkül) jönne létre. Bár ez a repülőgép átesési tulajdonságai miatt nem előnyös, az indukált ellenállás alakulása szempontjából a legkedvezőbb.

Gyakorlati okokból a korszerű vitorlázó repülőgépeken ehelyett inkább trapéz vagy összetett alakú alaprajzot alkalmaznak. Az ilyen szárnyak alkalmazásakor azonban két kérdés merül fel: hogyan változik az indukált ellenállás a legkedvezőbb, elliptikus alaprajzú szárnyéhoz viszonyítva, továbbá milyen tulajdonságai vannak kis sebességek esetén?

A szárny alaprajzi kialakítása és az elcsavarás mértéke egymással összefüggő fogalmak. A 115. ábrán különféle alakú elcsavaratlan (a) és -3° -os elcsavarással készített szárnyak (c) felhajtóerő-tényezőjének változását annak a Δc_{xi} indukáltellenállás-növekmény függvényében ábrázoltuk, amely az adott szárnyon az ideális, elliptikus alaprajzúhoz viszonyítva többletként jön létre. Itt az látható, hogy az elcsavaratlan szárnyak 0-hoz közelítő c_y értékek esetében igen hasonlóak egymáshoz. A valóságos szárnyakon azonban mindig alkalmaznak a túlhúzási viszonyok javítására elcsavarást, és ez a képet módosítja.



115. ábra. A legkedvezőbb szárnyalak kiválasztásához

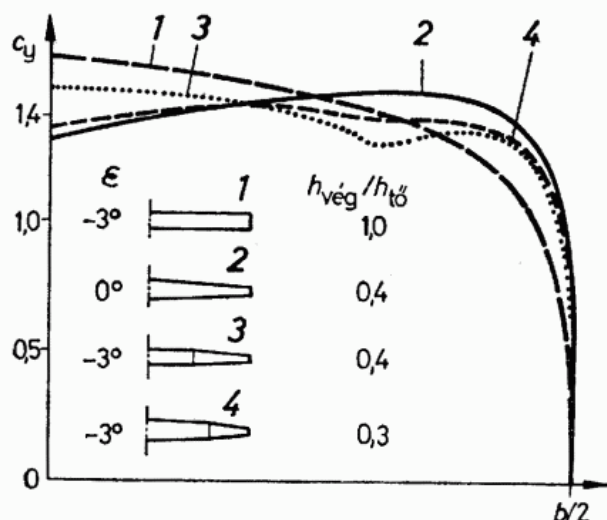
a) és c) a felhajtóerő-tényező változása az indukáltellenállás-növekmény függvényében $\epsilon = 0^\circ$ és $\epsilon = -3^\circ$ elcsavarás esetén b) vizsgált szárnyalaprajzok

Az elcsavarás miatt — mivel ezért a szárny egymás melletti szelvényei nem egyszerre érik el a $c_y = 0$ értéket — mindig keletkezik felhajtóerő. Az elcsavarás mértékével együtt nő c_{xi} minimális értéke. A trapézviszony növelésének hatása az ábrán látható. Növekvő $h_{\text{vég}}/h_{\text{tő}}$ viszony mellett a polárgörbék kedvezőtlenebbek. A különböző alakú szárnyak összehasonlítása azt mutatja, hogy a téglalap alaprajzú $\epsilon = 0^\circ$ -os és a 0,4 trapézviszonyú $\epsilon = -3^\circ$ -os elcsavarású szárny egyformán a legkedvezőtlenebb a nagyobb sebességek (kis c_y -ok) tartományában, ellenállásuk az ábrázoltak közül itt a legnagyobb. Másrészt $c_y = 0,4$ körül a 0,6 trapézviszonyú, -3° -os elcsavarású trapézsárny előnyösebb.

A kedvezőbbek közé tartozik a *kettős trapéz alaprajz* elcsavarás nélkül, de -3° -os elcsavarással ennél is jobb a téglalap középrésszel és trapéz alakú végekkel készült szárny. Kétségtelen, hogy ez utóbbi a legalkalmasabb mind a kis, mind a nagy sebességű tartományban. Hozzá hasonlóan jó az 1 : 0,8 : 0,4 húr hosszarányú kettős trapéz is. Mindkettő előnyös még azért is, mert a középrész nagyobb húr hossza viszonylag nagyobb terjedtségű szakaszon ad nagyobb Re -számot. Így velük a profilellenállás is kedvezőbben alakul. A korszerű vitorlázó repülőgépek legnagyobb része ezért ilyen, egyúttal könnyen is gyártható szárnyalakkal épül.

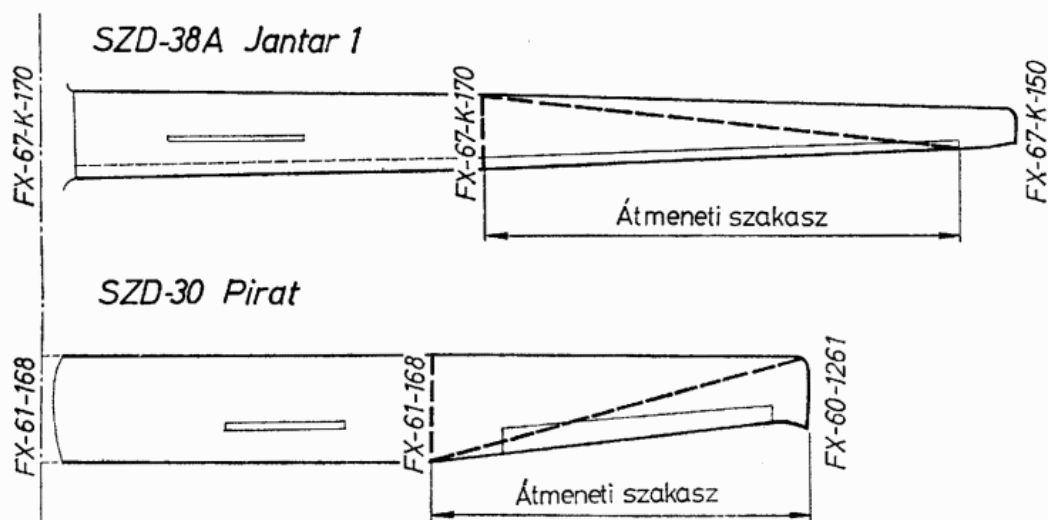
Az alaprajz és az elcsavarás megválasztásakor figyelembe kell venni az *átesés*, ill. a *kis sebességű repülés* tulajdonságait is. Annak érdekében, hogy a kormányozhatóság és az oldalstabilitás még átesés közben is fennmaradjon, úgy alakítják ki a szárnyat, hogy külső részei a csűrők környezetében később essenek át, mint a belsők. Ehhez a fesztávolság mentén úgy választják össze a szelvényeket, hogy $c_{y\text{max}}$ tényezőjüket ne egyszerre éri el, hanem az állásszög növelésekor először a szárny közep-részen, és a végén csak jóval később.

A 116. ábrán különböző alaprajzú és elcsavarású szárnyak helyi c_y tényezőjének fesztávolság menti eloszlását látjuk. Az átesés szempontjából a téglalap alaprajzú bizonyul a legkedvezőbbnek (az említett tulajdonság ezekkel viszonylag könnyen teljesíthető), de ezzel a szárny $c_{y\text{köz}}$ értékének mintegy 15%-os csökkenése jár együtt. Ez a c_y/c_x viszonyokra, vagyis a teljesítmények alakulására nézve kedvezőtlen. Ilyen alaprajzú szárnyat ezért főként az iskolagépekhez készítenek.



116. ábra. A legkedvezőbb szárnyalak meghatározásához

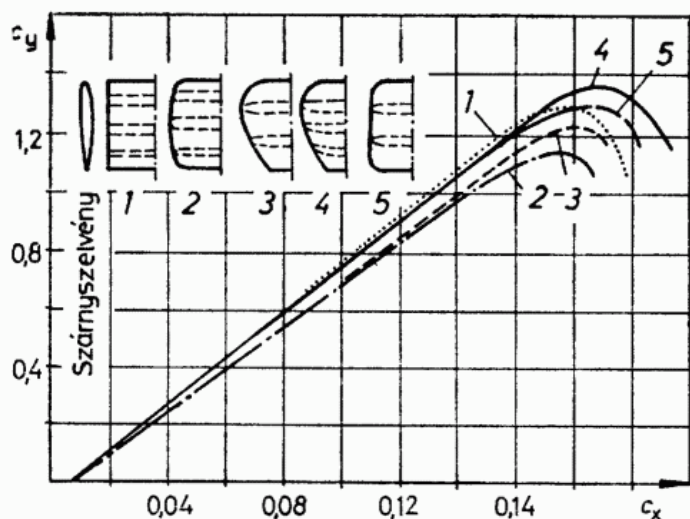
Ha az ellenállásviszonyokat és az átesési tulajdonságokat tekintjük, a téglalap alakú szárnyaknál kedvezőbbnek bizonyulnak a $h_{\text{vég}}/h_{\text{tő}} = 1$ -nél kisebb trapézviszonyúak, de ezek között is legkedvezőbb az a téglalap középrészű, amelynek elcsavart szakasza csak a fél fesztávolság külső 1/3-ára terjed ki mindkét oldalon. Ebben az esetben a csűrőt tartalmazó szakaszokon a c_y tényező a középrészéhez képest csak mintegy 5...10%-kal kisebb, és ez a teljesítmények alakulása szempontjából fontos előny (116. ábra). Ezeket az elveket igen szemléletesen valósítja meg az SZD—30 Pirat és az SZD—38A Jantar 1 117. ábrán látható szárnya, amelyeket Wortmann FX jelű szelvényeivel a minimális elcsavarás és a legjobb teljesítmények elérésének követelményei szerint alakítottak ki.



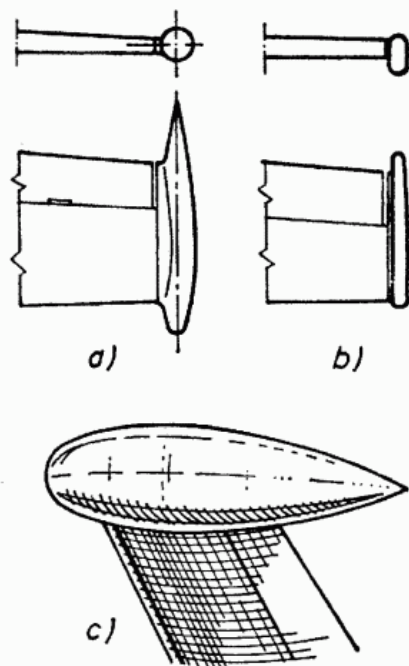
117. ábra. A szárny tulajdonságainak alakítása és aerodinamikai elcsavarás létrehozása a fesztávolság mentén változó szelvényekkel

3.1.4.5. A szárnyvégek kialakítása és az ellenállás kapcsolata

Korábban a szárnyvégeket főként esztétikai vagy gyártási szempontok figyelembevételével alakították ki. Hoerner kísérletei azonban megmutatták, hogy a vitorlázó repülőgépek teljesítményeinek javítása szempontjából igen fontos veszteségmentes kiképzésük is. Kimutatta, hogy a szárnyvég kedvezőtlen kialakítása jelentősen hozzájárul az indukált ellenállás növekedéséhez, de kedvező kialakítása esetén a geometriai



118. ábra. Különböző alakú szárnyvégek jellemzőinek összehasonlítása



119. ábra. Az örvénysorsó

a) R-22S-D Futár; b) SZD-22 Mucha; c) Meteor

méretek szerinti oldalviszonnyal várt eredményeknél is valamivel jobbák érhetők el. Emellett a profilellenállás eloszlásának a fesztávolság mentén mérésekkel való meghatározása azt mutatta, hogy a szárnyvégeken kifejezett maximum alakul ki. Ha ezeket csökkenteni lehet, nagyobb állásszögű repülésben, pl. körözésben jelentősen javíthatók a teljesítmények.

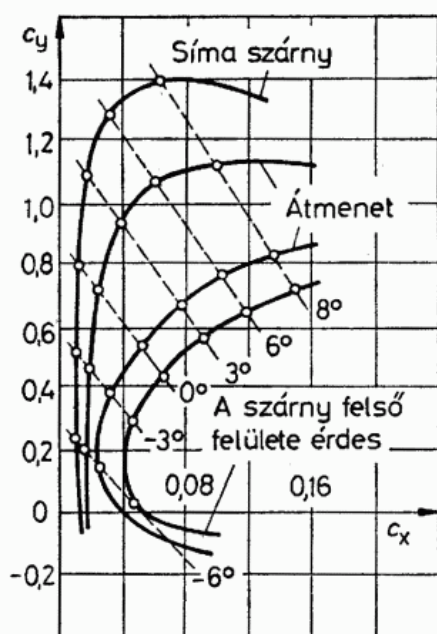
A szárnyvég kedvező kialakítása tehát egyaránt hozzájárul az indukált és a profilellenállás csökkentéséhez. A 118. ábrán *Hoerner* szerint a különféle szárnyvégkialakításokkal elérhető eredményeket láthatjuk, amelyek közül a 4 adja a legjobb középutat a három kívánt tulajdonság között. *Hoerner* ennek alkalmazását ajánlja. Figyeljünk fel arra is, hogy az egyenesre vágott és az 5 szárnyvég között alig van eltérés. Ennek oka *Hoerner* szerint a szárnyvégen kialakuló indukált örvény effektív oldalviszonynövelő hatása, és főként a hosszú, egyenes kilépőél. Igen kiváló gépek épültek egyenesre vágott szárnyvéggel (*HP* gépek), de a korszerű vitorlázógépek nagyobb része (*Cirrus*, *Jantar* stb.) a 4-hez hasonló kialakítású.

Itt kell még megemlékeznünk az ötvenes években szívesen alkalmazott ún. szárnyvégorsóról is. Ilyet pl. a *Meteor* és a *Mucha* gépeken találunk (119. ábra). Egy *Meise* gépen hatására a siklószám — a mérések szerint — $\varepsilon = 23,5$ -ről $25,1$ -re növekedett, de kis c_y értékeknél az ellenállástényezőt $c_x = 0,001$ -del növelte. A legújabb gépeken ezért alkalmazása feleslegesnek bizonyult.

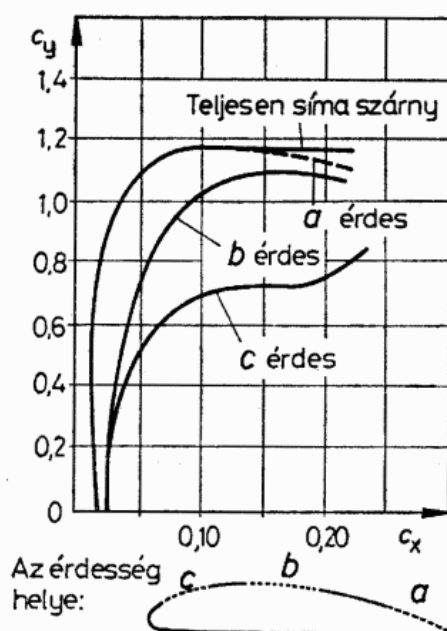
3.1.4.6. A szárnyfelület simaságának hatása a polárgörbe alakulására

A szárnyfelület simaságának az aerodinamikai tulajdonságokra gyakorolt hatásával már igen régen foglalkoznak. Kezdetben a szárny alsó felületének érdesítésével remélték a nyomásnövekedést, és ezzel a felhajtóerő fokozását. Ennek következménye természetesen a profilellenállás növekedése volt. *Prandtl* kísérletei egyértelműen megállapították az érdeség hatását az aerodinamikai tulajdonságok alakulására:

— A szárny alsó részének érdesége a profilellenállás csekély növekedését és a $c_{y \max}$ csökkenését okozza.



120. ábra. Az érdesség hatása a szelvény polárgörbéjének alakulására



121. ábra. Az érdesség helyének hatása a szelvény polárgörbéjének alakulására

— A felső rész érdessége az ellenállás általános növekedését vonja maga után a felhajtóerő csökkenésével együtt.

— A szárny mindkét oldalának érdessége ezeket a következményeket még fokozza.

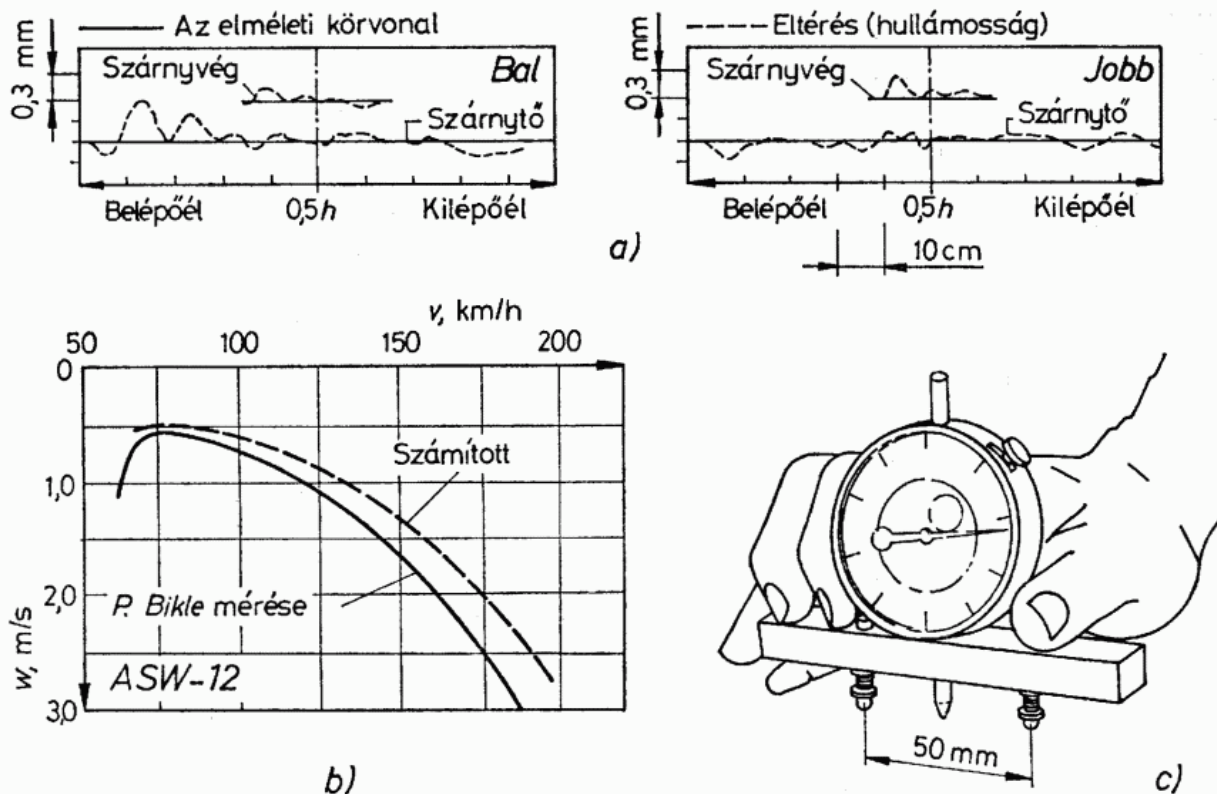
Különösen a szárnyfelsőrész simaságának fontossága tűnik ki a 120. ábrából. Egy kísérleti szárnyat itt négyféle érdességgel vizsgáltak. Az eredmény: az érdesség növekedése c_y és c_x erős romlásával jár együtt.

Az, hogy a szárny húrhossza irányában mely részein érzékeny különösen az érdességre, a 121. ábrából tűnik ki. A kilépőél közelében az érdesség hatása gyakorlatilag nem jelentkezik. Sokkal észrevehetőbb viszont a húrhossz közepe táján a szárny felső részén, legzavaróbb pedig az áramlási rendellenességekre amúgy is érzékeny belépőél közelében. Az ellenállás az érdesség hatására erősen nő, de egyúttal c_y is kisebb lesz minden állásszöggel.

A felületi minőség jósága különösen fontos a lamináris szárnyszelvények alkalmazásakor, mert ezeken az érdesség és a felületnek az elméleti körvonalától való eltérései, továbbá a felület hullámossága döntő szerephez jut a lamináris határréteg kialakulásában vagy annak lehetetlenné válásában. Az elkészült szárnyak mindegyike bizonyos érdességgel és hullámossággal épült, még a legjobb minőséget nyújtó műgyanta építési anyagok esetében is.

P. Bikle mérései alapján egy ASW—12 típusú, $\lambda = 25,8$ oldalviszonyú, és FX—62—131KM szelvénnel készült gép szárnyfelületének hullámosságát látjuk a húrhossz mentén, a 122a ábrán. A mérést a c ábrán látható egyszerű eszközzel végezték el. Ehhez hasonló minden vitorlázórepülő készíthet, amivel gépe szárnyának felületét ellenőrizheti, hogy a nagyobb hibákat csiszolással kijavítsa. Az ilyen módon elérhető ellenálláscsökkenés igen jelentős lehet, különösen a nagy sebességek tartományában. A kiviteli pontatlanságok és a felületi hibák hatásának tekinthetjük ugyanezen ASW—12 gép P. Bikle által bemért, és a 122b ábrán látható sebességi görbéjének lényeges eltérését a gyár által számítások alapján megadottól.

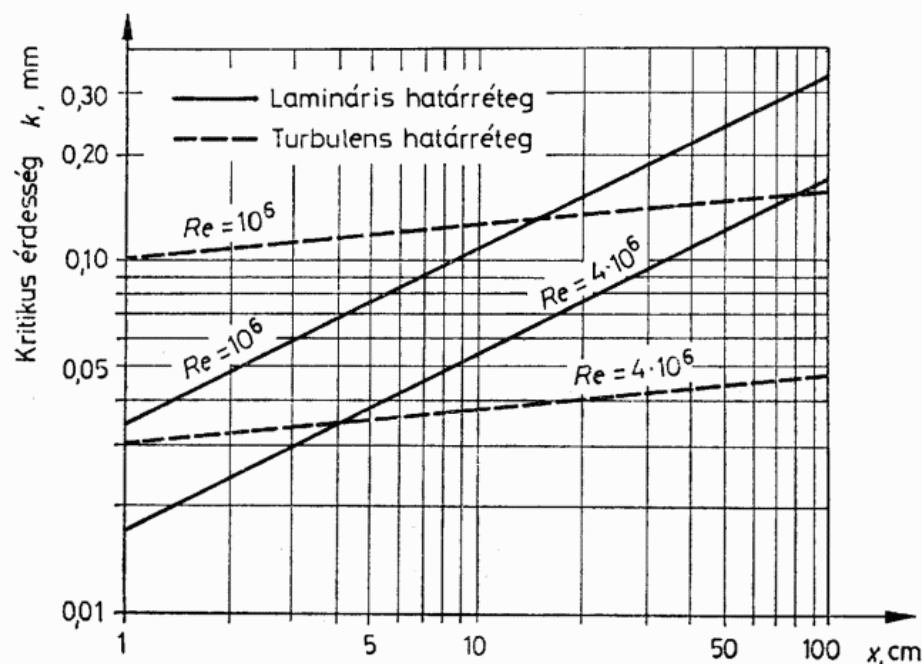
A felületi egyenetlenségek még megengedhető nagysága — mint a határréteggel kapcsolatos tényezők — szoros összefüggésben van a Reynolds-szám nagyságával.



122. ábra. A szárny érdessége a sebességi görbe alakulását döntően befolyásolja

a) Egy ASW-12 gép szárnyainak érdessége; b) számított és mért sebességi görbe eltérései; c) a felület minőségének ellenőrzésére alkalmas mérőeszköz

Szerencsére az érdesség és a hullámosság csak akkor hat károsan a határréteg alakulására, ha a Re -szám függvényében változó bizonyos magasságot elér. Ezt a magasságot *kritikus érdességnek*, ill. *hullámosságnak* nevezzük, ami a határréteg vastagságának körülbelül $1/13$ -része. A 123. ábrán Wortmann szerint [22] 1 m húrhosszú síklap kritikus érdességi magasságát szemléltetjük a vitorlázórepülésben előforduló Re -számok esetében. Ez az ábra célszerűen alkalmazható a repülőgépszárnyak megengedhető érdességének megállapítására is, ha adatait a szárny valóságos méreteire átszá-



123. ábra. Diagram a megengedhető érdesség meghatározásához

mítjuk. Az átszámítást a

$$k = h \left(\frac{0,35}{\sqrt{Re}} \sqrt{\frac{x}{h}} \right)$$

képlettel végezhetjük el, ahol k az ábra alapján kapott kritikus érdesség. Ez rögtön arról is útbaigazítást ad, hogy a fesztávolság különböző helyein a megengedhető érdesség nagysága eltérő. Ennek az eltérő húr hosszak miatt változó Re -szám az oka. Például 0,5 trapézviszony esetében a szárnyvégek simasága 30%-kal nagyobb (vagyis a megengedhető k ennyivel kisebb) kell legyen, mint a szárnyközépen. Mivel az ábra szerint meghatározott érdességértékek sík lapra vonatkoznak, a valóságos szárnyak esetében ezeknél valamivel kisebbek engedhetők meg. A szárnyak feletti nyomásviszonyok alakulása miatt a határréteg 20...30%-kal vékonyabb, mint a sík lapé. Ez a szárnyak megengedhető érdességét az ábrából meghatározotthoz viszonyítva hasonló mértékben csökkenti.

Az elmondottakból kiderül: az az állítás, hogy a szárny felületén már egy zsírfolt is turbulenciához vezet, semmiképpen sem állja meg a helyét. Ellenkezőleg, a megengedhető érdesség mértékét gyakran a finom csiszolóvászon durvasága sem haladja meg. A viszonyok természetesen sokkal kritikusabbak a belépőél környékén vagy a törzs orr-résznél. Az emberi kéz érzékenységeinek ismeretében úgy vehető, hogy a kézzel már nem érzékelhető érdesség a határréteg alakulására nem gyakorol hatást, mert a kritikusnál kisebb.

A 123. ábrán két turbulens határréteget jelző egyenes is látható. A felületet, ha érdessége az egyenesek által meghatározott értékeknél kisebb, *aerodinamikailag simának* nevezhetjük. Ennél nagyobb érdesség azonban a súrlódási ellenállást a turbulens határrétegben is növeli, mégpedig az ábrán adott értékek duplázódásakor kb. 20%-kal. Eszerint a belépőélt követő mintegy 100 millimétertől eltekintve turbulens határréteg esetén a felületnek sokkal simábbnak kell lennie, mint lamináris határréteg esetén!

Az érdesség mellett a *hullámosság megengedhetősége* már nehezebben határozható meg, sőt kifejezett megengedhetőségről szó sincs. Kimutatták, hogy a hullámosság méreteitől függetlenül bekövetkezhet a lamináris határréteg leválása, ha a hullámok bizonyos hosszat vagy ismétlődést érnek. *Wortmann* szerint a veszélyes hullámhossz, ha a hullámmagasság nem haladja meg a 123. ábra szerinti kritikus értékeket, a hullámmagasság 80...150-szeresére tehető. Ez a felületi egyenetlenség különösen veszélyes a leválás megindulása szempontjából.

A felületi simaság és a hullámmentesség a lamináris szárnyakon legalább a szelvény legnagyobb vastagságáig elengedhetetlen. A féklapoknak a gondos megmunkálás esetén is könnyen kiálló lemezei a határréteget végzetesen befolyásolhatják, és réseinél átszívás is keletkezhet. Mindkettőt el kell kerülni, de a féklapot általában nem szükséges a húr hossz 70%-ánál hátrább vinni, sőt optimális helye — különösen, ha mögötte ívelőlap is elhelyezkedik — a húr hossz 50...65%-ában van. A lamináris határréteg itt még elég vastag, és ezzel a kritikus érdesség magassága is nagyobb itt.

3.1.4.7. Felhajtóerőt növelő szerkezetek.

Változtatható alakú szárnyak

Az ideális teljesítményskála megvalósítása nehéz feladat. Ahhoz, hogy a gépnek nagy sebességeknél jó siklószáma legyen, kis ellenállásra van szükség. Ez részben a törzs, de főként a szárny ellenállásának minimumra való csökkentésével valósulhat meg.

Az előbbi kíváncsi mellett minden vitorlázó repülőgépnél a lehető legkisebb merülősebség elérésére törekednek, és a körözési tulajdonságok miatt az is fontos, hogy a legkisebb merülősebséghez tartozó siklási sebesség viszonylag kicsi legyen. Emellett arról sem szabad elfeledkezni, hogy a repülőtéren kívüli leszállásokra gyakran igen kis területen kerül sor, ezért a leszállósebségnek és ezzel v_{\min} -nek szintén a lehető legkisebbnek kell lennie.

Ezek a követelmények egymásnak meglehetősen ellentmondanak. Egyrészt nagy $c_{y \max}$ értéket, másrészt pedig kis $c_{x \min}$ értéket kell biztosítani. Valamennyi használatos szelvény ellenállástényezője erősen növekszik $c_{y \max}$ közelében. Az erősen ívelt és vastag szelvények használata — amelyek különben egyedül a kis sebességű repülés feltételeit tekintve előnyösek lennének — ezért nem célszerű. A vékony, közel szimmetrikus szelvények pedig nem adnak elég nagy $c_{y \max}$ értéket. Célszerű megoldás tehát, ha a szelvényt a siklási teljesítmények kívánalmai szerint választják ki, és alakját repülés közben állíthatóvá teszik. Így a szelvény íveltsége tetszés szerint változtatható, és a $c_{y \max}$ növelésére bármikor lehetőség nyílik. A gép sebességi polárgörbéje tehát repülés közben változtatható lesz, és alakulása a pillanatnyi helyzetnek megfelelően akkor tehető kedvezőbbé, amikor éppen szükség van rá. A szelvény ívelésének fokozása a körözési és a minimális sebességet csökkenti tovább, nagyobb sebességekkel pedig az ívelés csökkentése a siklószámot javítja.

A szelvény ívelése a kormányfelületekhez hasonló ívelőlapokkal lehetséges. Ezek a húr hossz kilépőél előtti 20...25%-ában helyezkednek el, és $\delta = +30^\circ \dots -10^\circ$ között fokozatokban vagy fokozatok nélkül téríthetők ki. Kitérítésükkor a szárny aerodinamikai jellemzői a 67—70. ábrákkal kapcsolatban mondottakhoz hasonlóan változnak meg. A 5. táblázat az SZD—38A Jantar 1 vitorlázó repülőgép szárnyának néhány jellemzőjét foglalja össze különféle ívelőlapkitérések esetén. Látható, hogy ívelőlap használata esetén $c_{y \max}$ és $c_{x \min}$ értéke mellett a $dc_y/d\alpha$ érték, vagyis az állásszögváltozásra eső felhajtóerőtényező-változás is módosul. Ez a körülmény arra figyelmeztet, hogy az ívelőlap kitérítésekor tulajdonképpen annak minden egyes állása mellett más és más tulajdonságú repülőgéppel van dolgunk. A szelvény ívelésekor a nyomatóki tényező is változik. A repülőgépvezető a tulajdonságok megváltozását leginkább abból veszi észre, hogy az ívelőlap kitérítésekor rendszerint a gép hosszdőlésének megváltoztatására is szükség van. Ezt az ívelőlap pozitív kitérítésekor általában fejnehéz, negatív kitérítésekor pedig faroknehéz értelemben kell helyesbíteni.

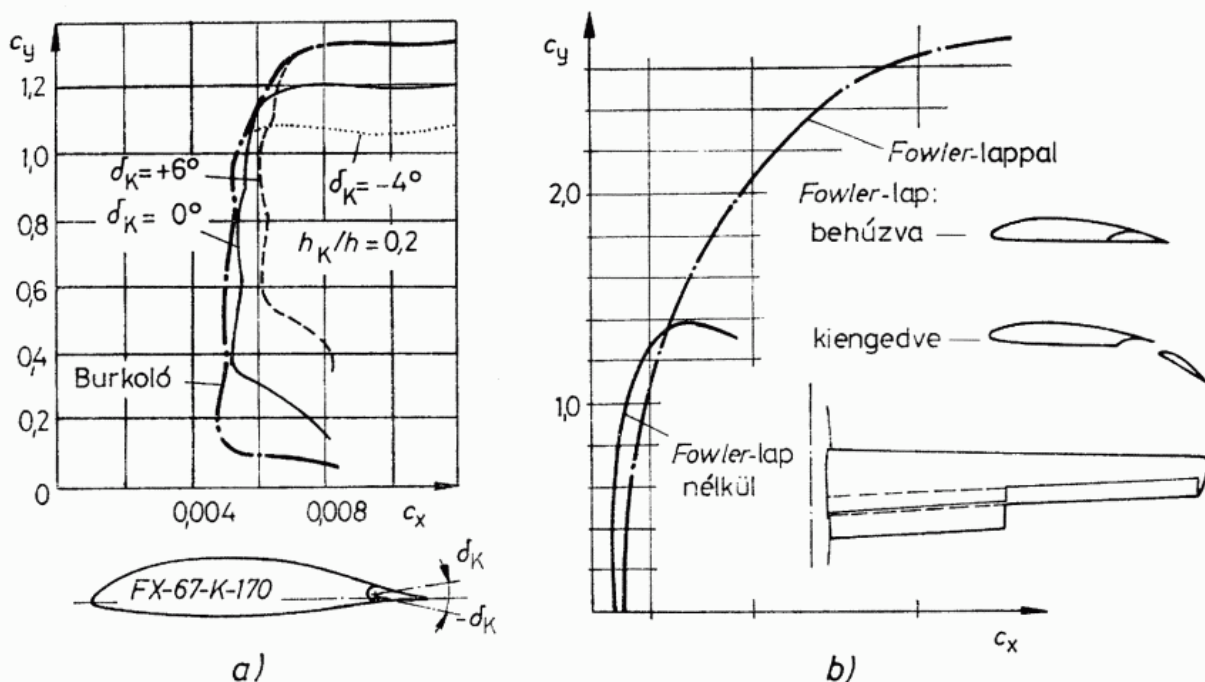
Az ívelőlap helyes kialakításával és kezelésével elérhető, hogy a legjobb siklószám viszonylag tág c_y tényezők, ill. sebességhatárok között fenntartható (l. a 124a

5. táblázat

Az SZD—38A Jantar 1 néhány jellemzője különféle ívelőlapkitérések esetén

Ívelőlap- kitérés δ°	$c_{y \max}$	$c_{y \min}$	$c_{x \min}$	$\frac{dc_y}{d\alpha}$	v_{\min}^1 km/h	v_{\min}^2 km/h
+8	1,395	−0,66	0,015	4,71	68	77
0	1,255	−0,8	0,010	5,21	72	81
−8	1,045	−1,0	0,007	5,44	79	90

¹ Vízballaszt nélkül; ² vízballaszttal.



124. ábra. Ívelő-lap hatása a szárny jellemzőinek alakulására (a); Fowler-lap kitérítésének hatása a szárny jellemzőinek alakulására (b)

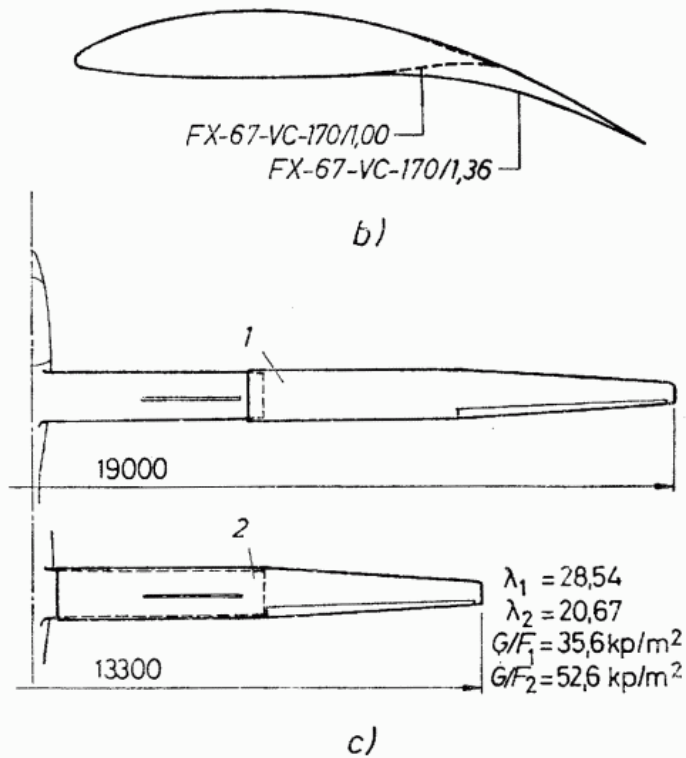
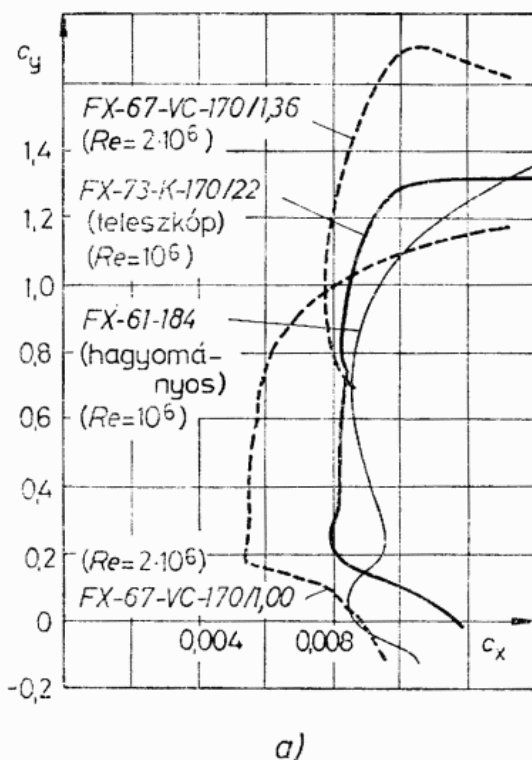
ábrát). 60°-os vagy ennél nagyobb kitérítésekor *leszállólapként* alkalmazzák, bár ezek hatásossága általában elmarad az egyéb féklapok mellett (l. a 3.1.7. pontban).

Az ívelőlapok orr-részének kiképzése a kormányfelületekéhez hasonló. Hatásossága szempontjából igen fontos a szárny és az ívelőlap közötti résen való átszívás megakadályozása vagy legalábbis csökkentése. Ideális megoldást jelentett a *HKS-1* gép (1953) rugalmas, rés nélküli szárnya.

A *Fowler*-szárny az ívelés és a felületnövelés hatását egyesíti magában. E megoldásnál a 124b ábrán látható módon hátracsúszó segéd szárny az íveltséget és a felületet egyaránt változtatja. Bár kiengedett állapotban a szárny hatásos oldalviszonyát jelentősen lerontja, és ezzel az indukált ellenállás megnő, a felületnöveléssel járó felületterhelés-csökkenés és az ívelés a körözési és minimális sebességet igen kedvezően befolyásolja.

A *Fowler*-szárny alap gondolatából kiindulva különleges felületnövelő megoldást választottak a *Sigma 1* kísérleti gép tervezői. A siklási viszonyokra optimálisan kiválasztott *FX-67-VC-170/1,00* szelvényt a szárny belsejéből résmentesen hátracsúszatható felülettel a körözéshez optimális tulajdonságú *FX-67-VC-170/1,36* szelvénné lehet átalakítani. Így a 125b ábrán látható kétféle szárny alakítható ki repülés közben. Bár a felület mozgatásának mechanikai megoldása közbenső helyzetek beállítását nem teszi lehetővé, a kilépőél előtt elhelyezett kis mélységű ívelőlapok a polárgörbe alakulásának további finomítását teszik lehetővé repülés közben (l. még a 141. ábrát).

A felületnövelő lapoknak velejáró kedvezőtlen tulajdonságuk, hogy a hatásos oldalviszony csökkentésével a szárny indukált ellenállását éppen a körözési fázisban növelik meg, vagyis akkor, amikor az az összellenállás alakulásában döntő. A felületnövelés ilyen módon való megoldása tehát nem tekinthető optimálisnak. Minden szempontból eredményesebb az az elképzelés, amely szerint a felületnövelést a fesztávolság repülés közbeni növelésével kívánják elérni, vagyis a *teleszkopikus szárny* megoldása (125c ábra). Ez a megoldás a következő előnyöket hozza magával: a fesztávolság növelése a felület mellett az oldalviszony növelésével jár együtt



125. ábra. A felületnövelés kétféle lehetősége

a) A *Sigma 1* és az *FS-29* szárnyjellemzői; b) a *Sigma 1* felületnövelő lapja két különböző szárnyat valósít meg; c) a teleszkopikus szárny a felületet az oldalviszonnyal együtt növeli meg

ez pedig éppen a körözési fázisban csökkenti az indukált ellenállást. További előny a felületnöveléssel csökkenő felületi terhelés, de — bár elvileg az ilyen szárnyak is felszerelhetők ívelőlappal — elmarad az íveléssel együtt változó hossznyomaték-változás is. Ez utóbbi azt jelenti, hogy a törzs körözésben és siklásban egyaránt legkisebb homlokfelületét fordítja az áramlás irányába (l. 3.1.5. pontot). A teleszkopikus szárnymegoldással e könyv írásakor még kísérleteztek (*FS-29*). Sikeres megoldása főként szilárdsági és szerkezeti problémákon múlik.

3.1.5. A törzs kialakítása

A 106. ábrán látható, hogy a törzs alaki és súrlódási összetevőkből álló ellenállása a sebesség növelésével egyre jelentősebb részét teszi ki a gép összellenállásának (c_{xk}). Meglepő tehát, hogy a tervezők korábban — az olyan kísérletektől eltekintve, mint az *Antonov*-gépek, a *Nemere*, a *Fafnir* vagy a *Reiher* — milyen kevés gondot fordítottak helyes aerodinamikai kialakítására. Erre irányuló törekvésük szinte elenyészik a lamináris szárny létrehozásában kifejtett igyekezetük mellett. A sebességi repülés azonban már ezt a kérdést is sürgetően veti fel.

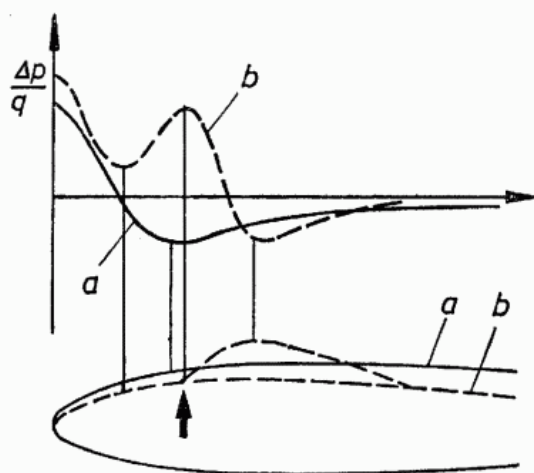
A törzs kialakításában az aerodinamikai szempontokon kívül lényeges feladat a stabilitási követelmények kielégítése és a repülőgépvezető kényelmes, korlátozatlan kilátású, minél nagyobb befogadóképességű kabinban való elhelyezése is. Ezek a követelmények egymásnak némiképpen ellentmondók, és csak együttes figyelembevételük esetén oldhatók meg kielégítően. Bizonyos vonatkozásban még az építési anyaggal és a gyártási technológiával is összefüggnek.

Az alaki ellenállás és a súrlódási ellenállás alakulására egyformán fontos hatást gyakorol a törzs mellső részének kiképzése. A korszerű vitorlázó repülőgépeken álta-

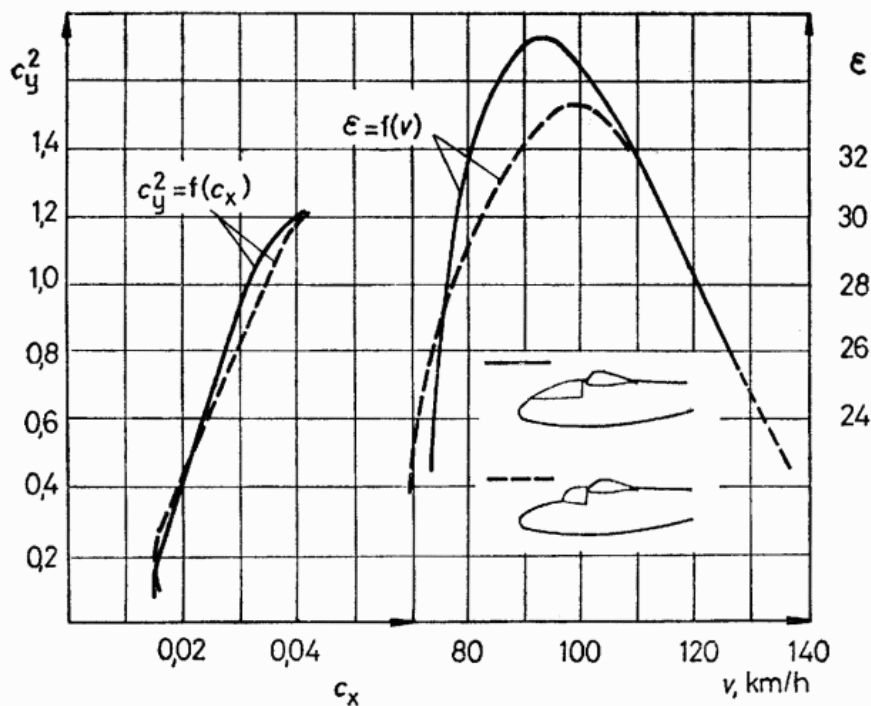
lában a 126. ábrán látható két megoldás valamelyike jelenik meg fő vonalaiban. Az *a* jelű áramlástanilag tökéletesebb, az orrpontjában kialakuló $\Delta p/q$ túlnyomás a törzs ívelt felső része felett csakhamar enyhe nyomáscsökkenéssé alakul át, és ez a jelleg viszonylag hosszan fennmarad a törzs hosszában. Kísérletek szerint hullámmentes, sima felület felett még $Re = 6 \cdot 10^6$ -ig is fenntartható a lamináris áramlás, ami azt jelenti, hogy a törzs hosszában nagy sebességek mellett legalább a szárnyak belépő-élig megvalósítható fennmaradása. Ez a lehetőség a valóságban a műgyanta építési anyag alkalmazásával és a kabintetőként alkalmazott szerves üvegek tökéletes felületeket nyújtó technológiájával valósítható meg. Igen fontos azonban, hogy a lamináris áramlást sem a műszerek kiálló érzékelőinek (ezért ezeket újabban a törzs hátsó részén vagy a függőleges vezérsík belépőélén helyezik el), sem pedig a szellőzőnyílásoknak nem szabad megzavarnia. Még a kabintető ledobható része körüli egyenetlenség és rés is turbulenciát okoz.

A törzs orrpontjától hátrafelé haladva az áramlás laminaritása azonban nem csupán a nyomáseloszlás alakulásának függvénye. Vastagsága némiképpen eltér attól, amit a 123. ábra alapján várhatnánk, és pedig az onnan számítható értékeknek csak 60...70%-a alakul ki. Ennek a törzs körül lényegében három dimenzióban folyó áramlás az oka, és azzal függ össze, hogy az áramlás a törzs orrpontjától kezdve — mivel annak keresztmetszeti felülete növekvő — egyre nagyobb felületeket súrol. A lamináris határréteg ezért a törzs legnagyobb keresztmetszete felé haladva egyre kevésbé vastagodik a sík lappal tapasztaltak alapján elvárthoz viszonyítva. Ez a jelenség a törzs hátsó, csökkenő keresztmetszetű szakaszán fordított, és itt a határréteg ismét viszonylag vastagabb.

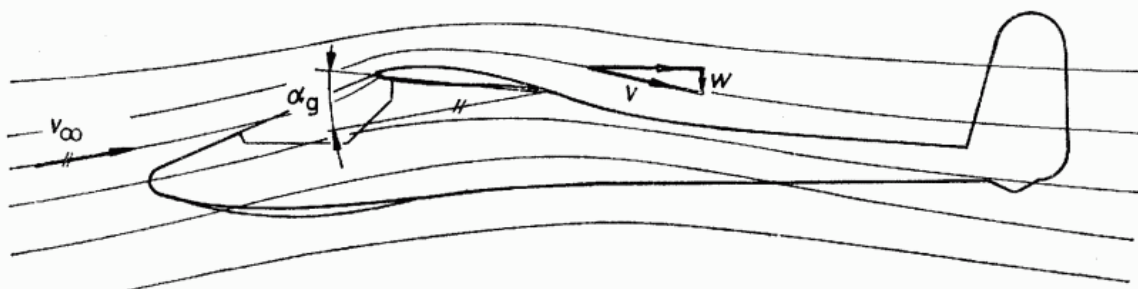
Gyakran találkozunk az újabb gépeknél is a 126. ábrán *b*-vel jelzett törzsalakkal. Ezek az előzőnél lényegesen kedvezőtlenebbek az ellenállás alakulása szempontjából, mert — mint az ábrán látható — a nyomáseloszlás nem teszi lehetővé a lamináris határréteg hosszú szakaszon való kialakulását. Egy másik hátrányos tulajdonsága, hogy a kiugró kabintetőnél az ábrán nyíllal jelzett helyen örvények válnak le, és ezek a szárnytő körüli áramlást is megzavarják. Az ilyen kabinkialakításnál — amelyet az *a* jelűhöz viszonyítva lényegesen jobb kilátás végett alkalmaznak — nincs különösebb jelentősége sem a ledobható rész körüli résnek, sem pedig a szellőző elhelyezésének, mivel ezek már az amúgy is megzavart áramlásban helyezkednek el. A kabintető vonalának enyhébb szögben való vezetése nem jár különösebb áramlástanai eredménnyel, csupán a kilátás lehetőségét csökkenti. A kabintetővel egybeépített, töretlen vonalú törzsorrkiképzés az ellenállás csökkentésének alapvető követelménye, és a lamináris határrétegnek a törzs legnagyobb keresztmetszeti méretéig való fenntartása ellenállásának máris felére való csökkentését jelenti. A törzsorr vonalába simuló és



126. ábra. A törzsorr körüli nyomásviszonyok



127. ábra. A kabintető kialakítása a polárgörbe alakulását jelentősen befolyásolja



128. ábra. A Kria törzsének kialakítása

a kiugró kabintető ellenállása közötti különbséget jól mutatják az *RJ—5* gép lineari-
zált polárgörbéi és siklószámgörbéi, amelyek a gép átalakításai során végzett mérése-
ken alapulnak. Ez utóbbi szerint a siklószámjavulás a kiugrás nélküli kabintető ese-
tében kb. 6% (127. ábra).

Az ellenállás alakulásában a törzs további részének is jelentős szerepe van. Egyes
esetekben, mint pl. a 128. ábrán látható *Kria* gépnél, a szárny mögötti leáramlást
figyelembe véve igyekeztek azt az áramlás irányához igazítani.

Elterjedtebb ennél a törzskeresztmetszetnek a vezető ülése mögötti csökkentése
úgy, hogy az a szárny kilépője mögött kör keresztmetszetű, kúpos csőként húzódik.
Ez a megoldás, amelyet már a legkorábbi *Antonov*-féle gépeknél is láttunk, egyaránt
kíván eleget tenni az alaki ellenállás nyomásviszonyokkal kapcsolatos törvényeinek,
valamint a súrlódási felület csökkentésével kapcsolatos kívánalmaknak.

A 129. ábrán az utóbbi 25 évben megépült néhány vitorlázó repülőgép törzsének
kialakítását szemléltetjük. Itt három fő irányzatot figyelhetünk meg. Az első csoportba
a 126. ábrán *b* jelűhöz hasonló törzsor-kialakítású *SZD—8 Jaskolka bis* és a *Ka—6*
tartozik. A maga korában mindkettő kiváló teljesítményű és számos rekordot repült
gép. Bár az 1950-ben épült *Győr 2* és *R—22S Június 18* típust is ide soroljuk, ezeken
már a törzs hátsó részének keresztmetszeti felületét csökkentő elvékonyodása is észre-
vehető (129a ábra).

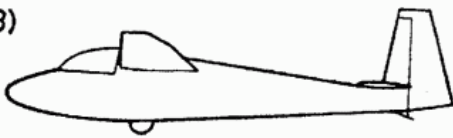
A második csoportba tartozó *Foka*, *Breguet 901S*, *SZD—29 Zefir 3* és a *Cobra 15*
gépek törzsének mellső része a 126. ábra *a* kialakítása szerinti. Bár ellenállásuk az

előzőkénel sokkal kisebb, ezt csak a lefelé való kilátás erős korlátozása révén érhették el (129b ábra). A *Zefir* esetében a kilátás előre is olyannyira korlátozott, hogy még a vakrepülő műszereket is billenthetően kellett beépíteni. Így használaton kívül a látótérből eltávolíthatók.

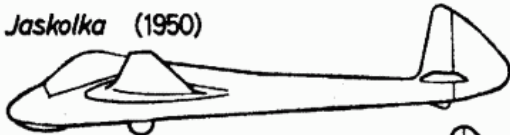
Figyelemre méltó a *Cobra 15* törzselőrszékének kismértékű lefelé irányítása is, ami egyrészt a kedvezőbb kilátás érdekében hasznos, másrészt a *Kria* törzséhez hasonlóan az áramlás irányához való illeszkedést célozza.

A harmadik csoportot nem véletlenül kezdjük az 1951-ben épült *OE-01* gépünkkel. Ezt méltán tekinthetjük a korszerű vitorlázó repülőgépek egyik legelső megvalósításának, melynek korát megelőző elgondolásait csak a gyártástechnológiai hiányosságok nem engedték érvényre jutni. A sorba az *A-15* és a *HP-15* fémgépek (ezek esetében az építési anyag bizonyos formai egyszerűsítéseket igényelt) után a Kazanszkij Avicinnüj Insztitút *KAI 19* fémgépe, a *Cirrus* által képviselt műanyaggépek, és végül a *Sigma 1* kísérleti szupergép tartoznak (129c ábra).

Ka-6 (1958)



SZD-8 Jaskolka (1950)



Győr 2 (1950)



R-22S Junius 18 (1950)

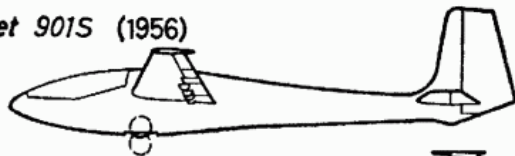


a)

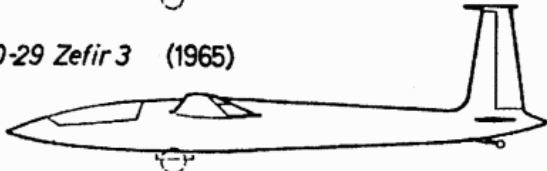
SZD-24-4 Foka (1963)



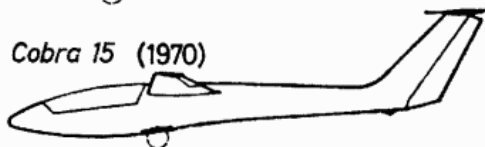
Brèguet 901S (1956)



SZD-29 Zefir 3 (1965)

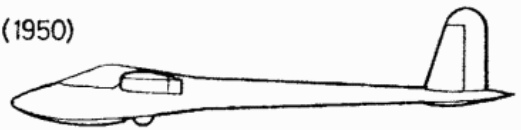


SZD-36A Cobra 15 (1970)



b)

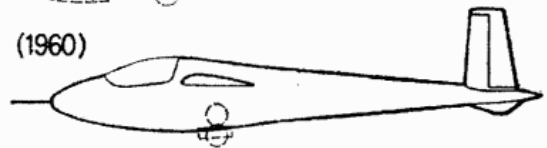
OE-01 (1950)



Meteor (1956)



A-15 (1960)



HP-15 (1972)



KAI 19 (1965)



Cirrus (1968)

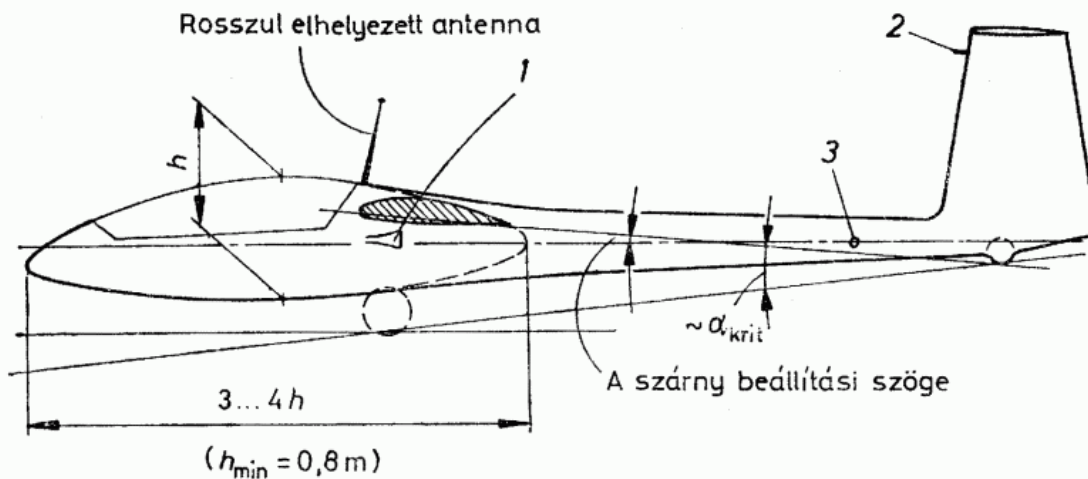


Sigma (1970)



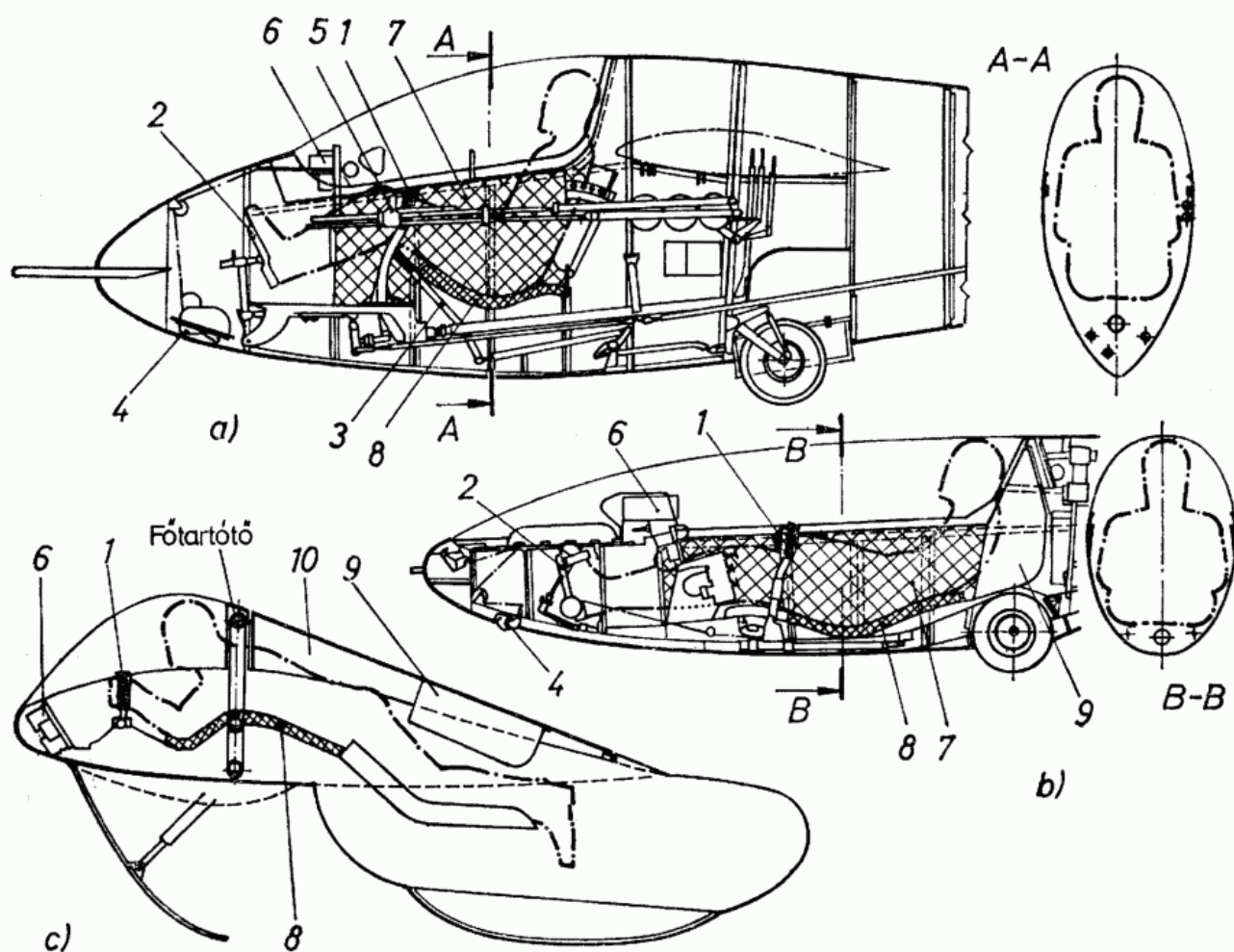
c)

129. ábra. A törzs aerodinamikai kialakításának három jellegzetes csoportja



130. ábra. A korszerű vitorlázó repülőgép törzse

1 szellőző; 2 össznyomásérzékelő cső; 3 statikus nyomást bevezető nyílás



131. ábra. Szélsőséges elrendezésű vezetőkülék

a) Az A-15 rendkívül kényelmes fülkéje; b) a KAI-14 vezetője fekve helyezkedik el a fülkében; c) a Ho-VI csupaszárny vezetője hason feküdt

1 botkormány; 2 lábpedál; 3 futóműbehúzó kar; 4 vontatókötél-rögzítő készülék; 5 ívelőlapmozgató kar; 6 műszerfal; 7 oldalsó kárpitozás; 8 üléspárna; 9 ejtőernyőtök; 10 ledobható kabintető

Ha ezek után a felsoroltak mellett napjaink korszerű vitorlázó repülőgépeit tekintjük, a törzs kialakításában bizonyos egységességet tapasztalhatunk. Ezt a *Cirrus—Nimbus—Jantar* sor alapján a 130. ábra szemlélteti. Ha a néhány évvel korábbi *SZD—24 Foka* vagy a mindössze 70 cm magas törzsű argentin *Urubu* gépre gondolunk, úgy tűnik, mintha a keresztmetszeti felület nagyságának jelentősége tűnőben lenne. Az igazság az, hogy a törzs előrésze körüli áramlás lamináris volta többet nyom a latban, mint a keresztmetszet néhány százalékos csökkentése, ami különben is a pilóta kényelmének rovására megy. Gondosan ügyelnek arra, hogy mivel a törzs ellenállása különböző megfúvási szögek mellett változó, a szárnyhoz olyan *beállítási szögben* illesszék, amellyel v_{opt} esetén adja a legkisebb ellenállást.

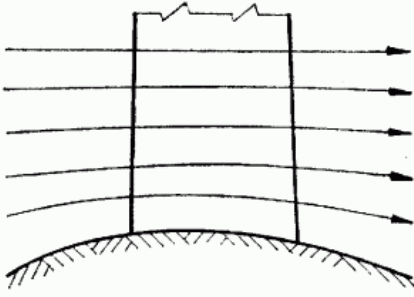
Bár a repülőgépvontatás és különösen a különféle felhajtóerő-tényezőt növelő berendezések a felszálláskor különösebb követelményeket nem támasztanak, a megfelelő *leszállási hosszdőlés* biztosítása igen fontos. A minimális sebességgel való földet érés érdekében, vagyis a kilebegtetés lehetőségére a behúzható futómű szárnhosszát úgy választják meg, hogy földön, álló helyzetben a szárny állásszöge α_{krit} körül legyen. Az ívelőlap alkalmazása viszonylag alacsonyabb futóművet tesz lehetővé, mivel a leszálláshoz szükséges c_y tényezőt kitérített ívelőlappal nagyobb hosszdőléssel éri el a gép, így a kilebegtetés céljára viszonylag nagyobb dőléstartomány áll rendelkezésre. A korszerű vitorlázó repülőgépek kis ellenállására jellemző, hogy a korábban e tekintetben lényegtelennek tekintett antennának az ábra szerinti elhelyezése is igen káros. Ezzel az elhelyezéssel akkora ellenállástöbblet jár, mint amit a teljes vízszintes farokfelület ébreszt.

A törzs kialakításával szemben támasztott egyik igen fontos kíváncsi a *kabin* lehetőség szerinti kényelemre való méretezése. A kényelem mértékét illetően eltérő vélemények szélsőséges megoldásokat hoztak létre a *Nemere* már-már túlzott méretű vezetőkabinjától a *Foka* és a *KAI 14* félig fekvő helyzetű üléséig. Az utóbbi — kezdetben talán bizarrnak tűnő megoldás — kétségkívül a legkevésbé fárasztó hosszú repülések alatt, mivel ebben a test nagyobb felületén fekszik fel. A 131. ábrán néhány szélsőséges ülésmegoldást láthatunk.

3.1.6. A szárny és a törzs közötti átmenet kialakítása

Amikor a repülőgép ellenállásviszonyait vizsgáljuk, nem elegendő pusztán az egyes alkatrészek ellenállását összegeznünk. Számolni kell azzal is, hogy az egyes alkatrészeket összeépítve a körülöttük kialakuló áramlások egymásra is hatnak, ezért az áramkép végül is másképpen alakul, mint az önmagában vizsgált részé. Az egymásrahatás lehet kedvező, de lehet kedvezőtlen is.

Ha két áramlásban levő test egymáshoz közel helyezkedik el, a körülöttük kialakuló áramlás kölcsönösen megzavarja határrétegeiket, és a súrlódási ellenállás ezen a helyen megnő. Kedvezőtlen egymásrahatást tapasztalunk akkor is, ha két egymás közelében levő test körül az áramlás először gyorsul, majd a széttartó felületek között ismét lelassul. Már a határréteggel kapcsolatban láttuk, hogy a fellépő nyomásnövekedés miatt az áramlás ilyenkor igen könnyen leválik. Ezt a jelenséget *diffuzorhatásnak* nevezzük (132. ábra). Az ilyen jelenség a szárny és a törzs, vagy a törzs és a vezérsík csatlakozásánál alakul ki. Mi itt csak az előbbi esettel foglalkozunk. A törzs a mellette haladó áramvonalakat sűrűsödésre készíti, majd amikor azok a szárny legvastagabb részén túljutottak, a szabad áramlásban eltávolodnak egymástól, ezért itt viszonylagos nyomásnövekedés lép fel. A diffuzorhatás kedvezőtlenül befolyásolja az



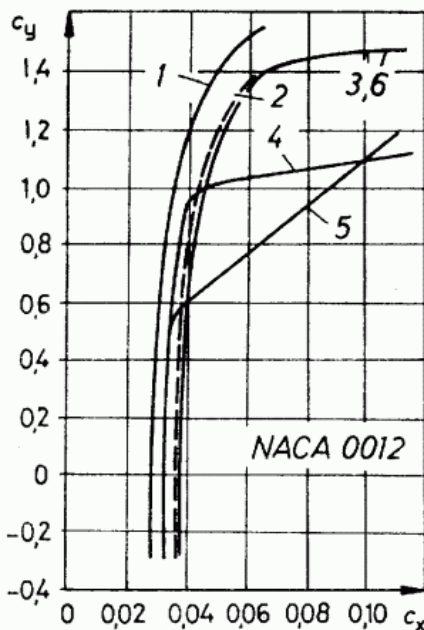
132. ábra. A diffúzorhatás

interferencia-ellenállás alakulását, de ezenkívül a $c_{y\max}$ elérhető nagyságára is hat. Ez a hatás szorosan összefügg a szárny és a törzs egymáshoz viszonyított függőleges elhelyezkedésével.

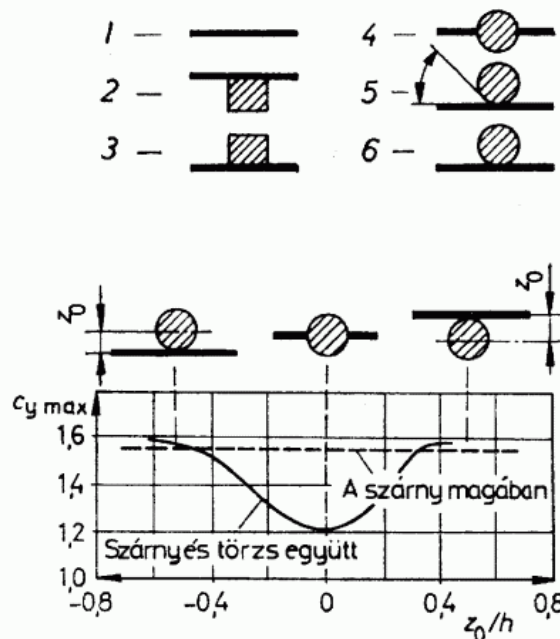
A 133a ábrán *NACA 0012* szelvénnel készült szárny polárgörbét látjuk (1), továbbá a magas-, mély- és középszárnyú, különféle átmenetű kombinációkét. A 2 és 3 esetben a polárgörbék csak $c_y = 1,4$ felett térnek el az 1 görbétől, az 5 görbe által jellemzett ellenállás viszont $c_y = 0,6$ -tól erős növekedésnek indul. Nem sokkal jobb a helyzet a 4 görbével jellemzett középszárnyú esetében sem. Mindez a szárny—törzs átmenet kialakításának hatását jelzi, és a következőkre mutat rá:

1. A magasszárnyú gépek esetében az egymásrahatás akkor küszöbölhető ki legalaposabban, ha a szárny alsó része és a törzs közötti szög nagy (2). Ilyen szempontból kifogástalan megoldást jelent a *Wien* 134a ábrán látható szárny—törzs átmenete. Hasonló törekvés vezérelte az 1929-es *Koktyebel* gép esetében a *Ljusin—Koroljev* tervezőpárost is (134b ábra), valamint az ötvenes években a törzs felső részének levágásával „Flat Top”-pá alakított *TG—4A* iskolagéppel kísérletezőket (134c ábra).

2. Bár vitorlázó repülőgépek céljára a mélyszárnyú megoldás általában alkalmatlan, az ábra szerint a törzs és a szárny közötti szög megfelelő áramvonalazással való növelésével az egymásrahatás és ezzel az interferencia-ellenállás csökkenthető (3).

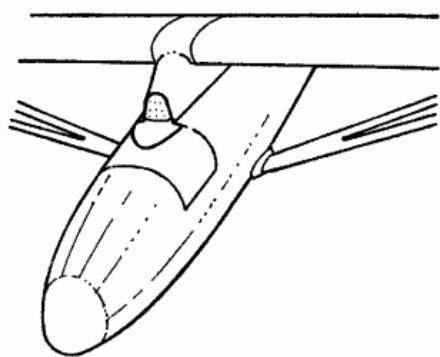


a)

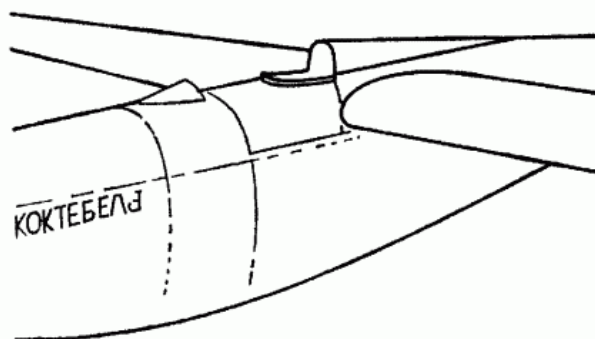


b)

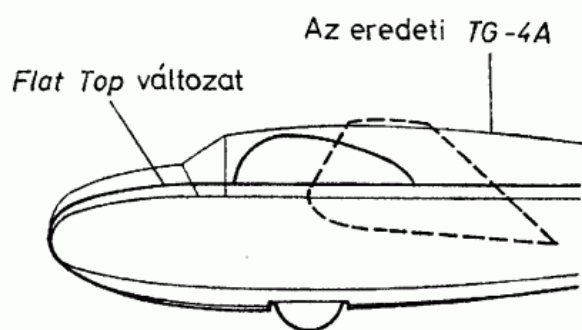
133. ábra. A szárny elhelyezésének és a szárny—törzs átmenet hatása az aerodinamikai jellemzők alakulására



a)



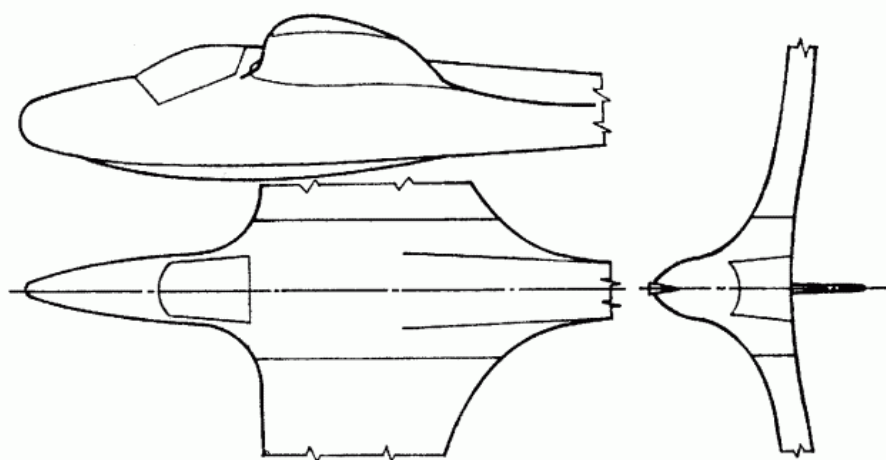
b)



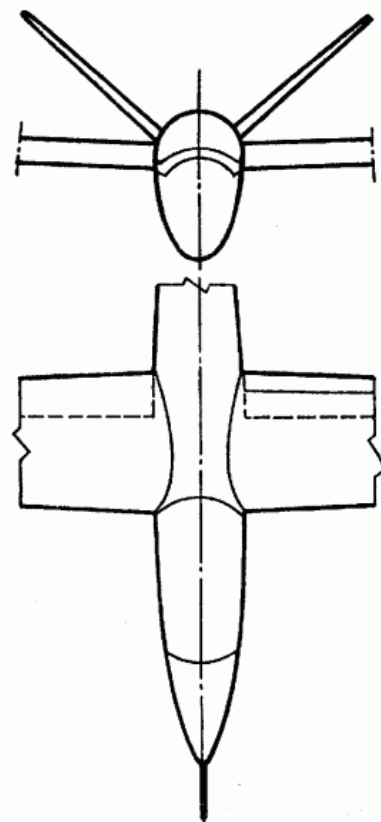
c)

134. ábra. Szárny—törzs-átmenet megoldások

a) Wien; b) Koktyebel; c) a TG-4A két változata



135. ábra. A Göttingen IV. szárny—törzs átmenete
aerodinamikailag kedvező, de igen költséges volt



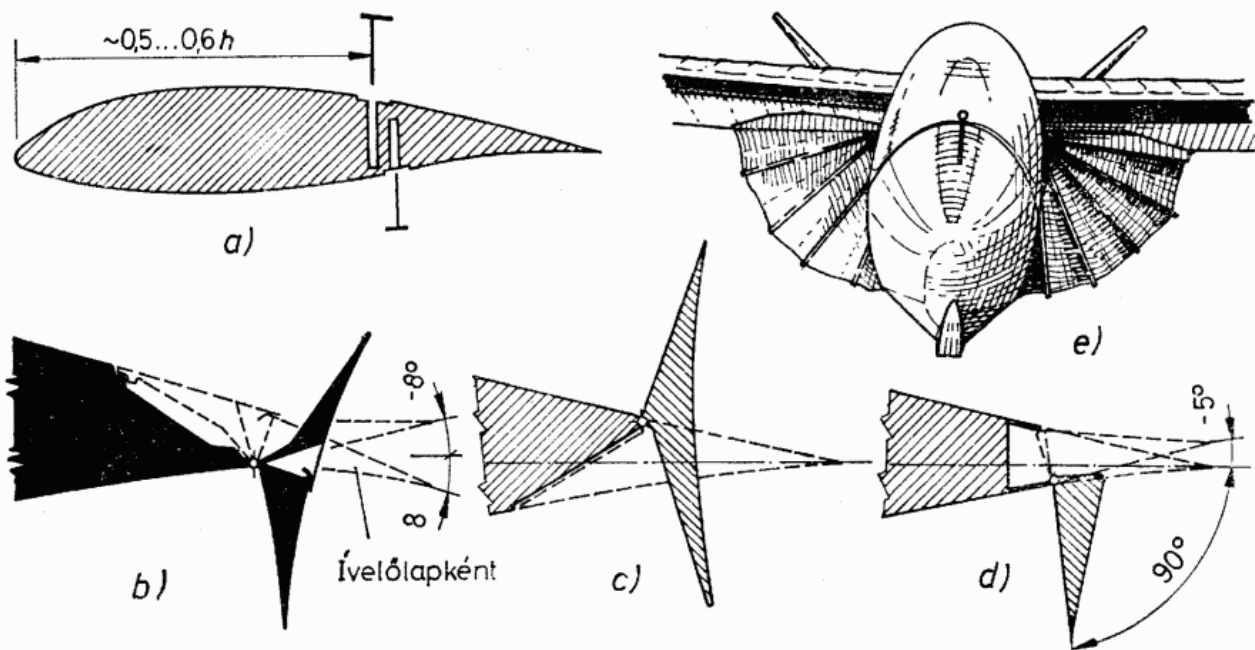
136. ábra. Az A-15 szárny—törzs átmenete

3. A törzs és a szárny közötti egymásrahatás a középszárnyú gépek esetében sem mondható kedvezőnek (4). Ezt különösen a 133b ábrával kapcsolatban látjuk be, ahol a *NACA 0012* szelvénnel készült különféle elrendezésekkel a törzs környezetében elérhető $c_{y\max}$ tényezőnek a szárny elhelyezésétől való függését szemléltetjük. Látható, hogy ha az önmagában álló szárny legnagyobb felhajtóerő-tényezője $c_{ymxx} = 1,55$, akkor középszárnyú elrendezésben a törzs hatása ezt $c_{y\max} = 1,2$ -re módosítja (a hatás ellensúlyozására az *R-22S Június 18* és az *OE-01* gép szárnyközéprésze a törzs felé növekvő vastagságú szelvénnel készült), de mély- vagy magasszárnyú elrendezésben egyaránt elérhető az önmagában álló szárny felhajtóerő-tényezője is.

A szárny—törzs egymásrahatásának csökkentésére egyes régebbi gépeken költséget nem kímélő, áramlástanilag ugyan indokolt, de a gép egyéb fogyatékoságai miatt (pl. a lamináris áramlás hiánya) csupán szép kísérletnek tekinthető megoldásokat láthatunk. Ilyen pl. a *Göttingen IV* szárny—törzs átmenete, amelyen a felületek hosszan, összeolvadóan mennek át egymásba (135. ábra). A korszerű vitorlázó repülőgépek esetében ezek a megoldások túlságosan bonyolultak és költségesek lennének az elérhető eredményekhez viszonyítva. Ezeknél inkább az *A-15* gép példamutatóan egyszerű, de áramlástanilag jól megoldott kialakításához hasonlókat találunk (136. ábra).

3.1.7. Féklapok

Sok baleset, levegőben előfordult szárnytörés és a megnőtt felületi terhelésű és siklószámú gépek leszállási tulajdonságai kényszerítették rá a tervezőket a különféle *féklapok* kidolgozására. A balesetek értékelésekor ugyanis arra az eredményre jutottak, hogy számukat erősen korlátozni lehet a siklási sebesség 200...250 km/h fölé növekedésének megakadályozásával. A féklapok másik feladata a siklószög megnövelése leszálláskor, mert így viszonylag kisebb területen hajtható végre. Ennek távrepüléseknél, repülőtéren kívüli leszállások esetében van különös jelentősége.



137. ábra. Féklap-megoldások

a) *Schempp-Hirt* féklap; b) a *Calif A-21* egyesített ívelő- és féklapja; c) kilépőél-féklap; d) leszállólap; e) az *R-23 Gébics* törzsféklapja

A különféle féklapok mindegyike a repülőgép összellenállásának növelésén alapul. A 137. ábrán többféle megvalósításukat látjuk. Mivel a szárnyon alkalmazott féklapok az áramlást a teljesítményeket lerontó módon zavarhatják, egy időben kísérleteztek törzsön elhelyezett féklapokkal is (pl. *R—23 Gébics*, *D—34*).

A féklapoktól általában megkövetelik, hogy a vitorlázó repülőgép siklási sebességét egy megengedett értékre korlátozza, és azt függőleges zuhanásban se lépje túl. Újabban az OSTIV előírásai csupán azt a követelményt támasztják, hogy 45°-os siklási pályán a gép nyitott féklappal ne gyorsuljon a megengedett sebesség fölé.

A zuhanási sebesség korlátozására és a siklásszög növelésére egyaránt alkalmasak az általában a törzsvégéből kibocsátott, 1...1,2 m átmérőjű *ejtőernyők* is. Ezek használat után rendszerint ledobhatók, de készítettek behúzható fékernyőt is (l. a 139. ábrát).

A szárnyféklapok csukott állapotban is előforduló teljesítményrontó hatásának kiküszöbölésére egyes vitorlázógépeken *leszállólapként* a 60...90°-ra kitérített ívelőlapot alkalmazták. Ez ilyenkor az összellenállás és a felhajtóerő növelése mellett (ez utóbbi a kis leszállósebesség érdekében) a hosszdőlés szögét is növeli.

Igen érdekes megoldású a Caproni—Vizzola gyár *A—21* típusú gépének egyesített ívelő- és féklapja (l. a 137. ábrát).

A különféle féklapok működtetése eltérő repülési technikát igényel.

3.1.8. Hogyan érvényesülnek a korszerű vitorlázórepülés elvei a teljesítmény-repülőgépek kialakításában?

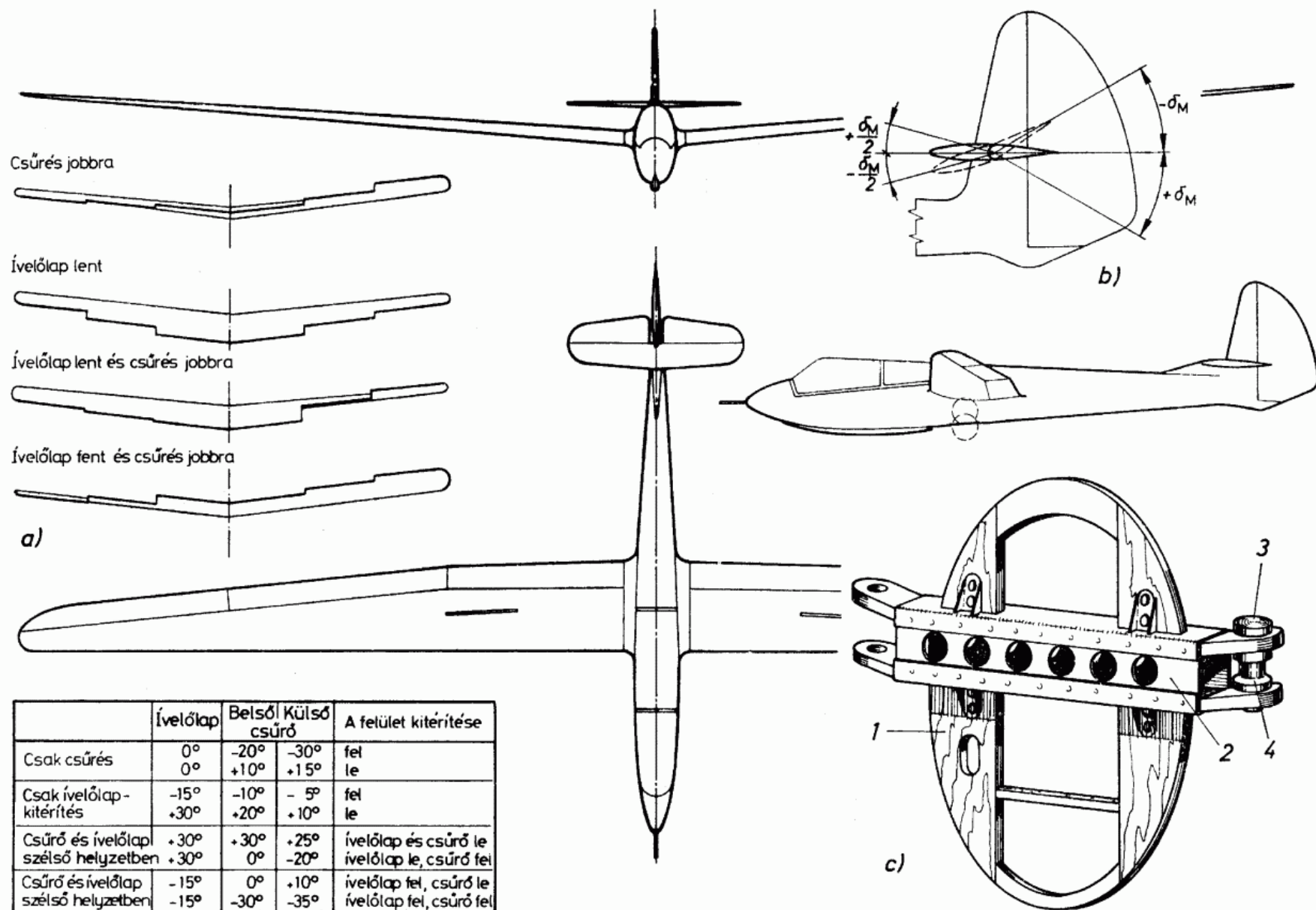
Megismerkedtünk azokkal a legfontosabb tényezőkkel, amelyek a korszerű sebességi vitorlázórepülés gépeinek jóságát alakítják. A következőkben ismertetett néhány vitorlázógép példáján figyeljük meg, hogyan valósulnak meg az elvi lehetőségek a gyakorlatban.

A vitorlázórepülésben jártas olvasónak talán feltűnik, hogy mi itt a *Cirrus*, *Nimbus*, *Jantar*, vagy az eredményeikkel, esetleg legyártott darabszámuk nagysága által kitűnt egyéb gépek helyett talán kevésbé sikereseknek tűnőket ismertetünk. Ezt azért tesszük, mert e gépekben olyan gondolatok valósultak meg, amelyek később talán kifinomultabban, talán szerencsésebb körülmények között, eredményesebben visszatérve a fejlődés irányát megszabták, és egy korszak alkotásához kiemelkedően hozzájárultak.

3.1.8.1. Az *M—30 Fergeteg*

A Műegyetemi Sportrepülő Egyesület Tervező Irodája *Benicky Lajos* irányításával 1942-ben kezdett hozzá ehhez a kétülékes teljesítmény-vitorlázógéphez, amely még 1950. évi elkészültekor is a legeredetibb elgondolású gép volt világviszonylatban is. Tervezése idején a „nagy” időjárású helyzetek kihasználására tartották alkalmasnak, de ma már tudjuk, hogy ez az azóta megvalósult sebességi repülést jelentette tulajdonképpen.

A 18 m fesztávolságú gép üres, ill. repülő súlya $G_u = 220$ kp, ill. $G_{max} = 450$ kp volt az eredeti tervek szerint. A többszöri áttervezés folyamán ez $G_u = 365$ kp-ra és $G_{max} = 530$ kp-ra változott, amivel a felületi terhelés is megnőtt 23,7 kp/m²-ről 28 kp/m²-re. Ezt az értéket akkoriban igen nagynek tartották, azonban a gépnek



138. ábra. Az M—30 *Fergeteg* korát megelőző elgondolásokat valósított meg

a) az ívelőlapok és csűrőlapok kitérítésének kombinációi; b) az első példány fél-balansz magassági kormányja; c) a törzs főkerete
1 főkeret; 2 átmenő vasalás; 3 szárnybekötő csapszeg; 4 távtartó

(a Budapesti Műszaki Egyetem mérései szerint) a kerek húsz évvel későbbi, együléses *Foka* gépével csaknem megegyező sebességi polárgörbét biztosított a 100 km/h feletti sebességek tartományában (51. ábra). Ha a fordulópólárist is egybevetjük a korszerű, vízballasztal megnövelt felületi terhelésű teljesítménygépekével, arra kell következtetnünk, hogy a *Fergeteg* viszonylagos sikertelensége (legnagyobb teljesítménye egy Budapest—Kolozsvár közötti távrepülés) az őt létrehozó, korát megelőző koncepció következménye, amely a korabeli, 18...20 kp/m² felületi terhelésű, lassú gépekhez szokott repülőgépvezetők képességeit messze megelőzte.

A *Fergeteg* korát megelőző kialakítását kis ellenállásra törekvő szépvonalú törzse mellett a behúzható futókerék (az eredeti tervek szerint ugyancsak behúzható orrcsúszó és vontatóhorog) és az egymás mögött elhelyezett ülésekből minden irányban korlátlan kilátás jellemezte. A jó kilátási viszonyokat az tette lehetővé, hogy a helyes súlyelosztás és a szárny enyhe előrenyílazása miatt a hátsó ülés is teljesen a szárny elé kerülhetett.

A *NACA 23012* szelvénnel készült szárny kilépőéle mentén osztott csűrő és ívelőlap húzódott. Ezek kitérését úgy kombinálták, hogy míg a differenciáltan működő külső csűrőfelületek kitérése a legnagyobb minden esetben, a belsőké pedig kisebb. Az ívelőlap kitérítésekor a csűrők vele azonos értelemben állítódnak el, de oly módon, hogy az elállítódás a belső csűrőkön volt nagyobb, a külsőkön pedig kisebb (138. ábra). Ilyenformán a felhajtóerő fesztávolság menti mindenkor legkedvezőbb eloszlását az ideális, rugalmas kilépőélt megközelítő módon oldották meg. A csűrő- és az ívelőlapok mozgatókarjait az ellenállás csökkentése érdekében teljesen a szárny körvonalain belül helyezték el. A gép érdekessége volt még a fél—balansz vízszintes farokfelület. Ebben a megoldásban — amely viszonylag kisebb méretű felületek alkalmazását tette lehetővé — a vezérsík is elmozdult a magassági kormány kitérítésekor, de annak csak fele mértékével. Trimmeléshez a vezérsík az ülésből repülés közben is állítható volt.

A *Fergeteg* rendkívül egyszerűen volt szerelhető. A főtartókat egy-egy függőleges csapszeg kötötte össze a törzzsel. A vízszintes farokfelületet egy szárnyas anya oldásával, ill. rögzítésével lehetett szerelni. Szereléskor valamennyi kormánymozgatás önműködően csatlakozott.

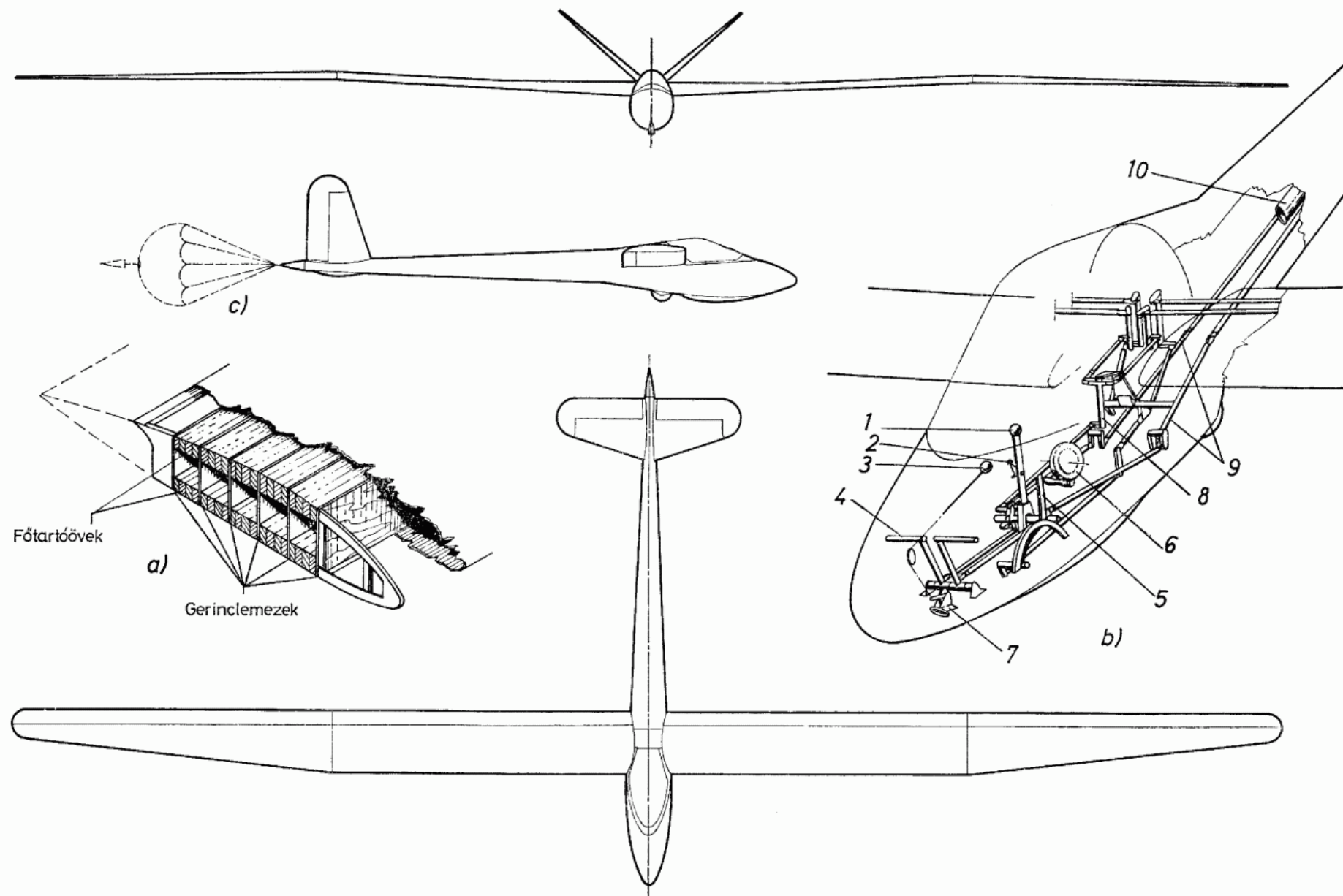
A *Fergeteg* különféle változataiból összesen öt készült.

3.1.8.2. Az *OE—01*

Ha az *OE—01* (*R—20*) jelű vitorlázó repülőgép elrendezési rajzára (139. ábra) tekintünk, lehetetlen fel nem fedezni a közvetlen rokonságot a legutóbbi évek korszerű irányzatával.

Ezt a gépet 1951-ben az Országos Magyar Repülő Egyesület tervezőgárdája szerkesztette *Rubik Ernő* irányításával. Elsőrendű célkitűzés az ellenállás minimálisra való csökkentésén kívül az akkor viszonylag nagy, 20,8 kp/m² felületi terheléssel a nagy sebességek mellett is lapos sebességi polárgörbe elérése volt. Ennek érdekében 18 m fesztávolságú szárnyának oldalviszonyát $\lambda = 23,3$ -ben állapították meg, ami többen 0,9 m húr hosszúságot jelentett. Lamináris szelvényét *Papp Márton* tervezte. A törzs felhajtóerő-tényezőt csökkentő hatását közvetlen közelében a szárnyszelvény megvastagításával ellensúlyozták, és mivel az igen alacsony törzs fél magasságában elhelyezett szárnyak végei a földhöz túlságosan közel kerültek volna, a fél fesztávolságon enyhe törést alkalmaztak.

A lamináris szelvény alkalmazása akkor indokolt, ha egyúttal a törzs ellenállása



139. ábra. Az 1951-ben készült OE—01 a korszerű teljesítménygépek minden jegyét magán viselte

a) szárnyszerkezet; b) a kormányok mozgatószervei; c) behúzható fékezőbernyő

1 botkormány; 2 trimmkar; 3 kötélkioldó gomb; 4 lábkormány; 5 ívelőlapállító kar; 6 fékernyőbehúzó tárcsa; 8 csűrő- és ívelőlapmozgatás összekötőeleme; 9 oldalkormánymozgató rudazat

is a minimálisra csökken. Keresztmetszeti felülete ezért a vezetőülés környezetében is igen kicsiny (bár a megfelelő kényelem még megvolt), de közvetlenül mögötte enyhe átmenettel kis keresztmetszetű, kúpos csővé alakult át.

A hagyományos farokfelületek helyett az $OE-01$ az ellenállás további csökkentésére V farokfelületekkel volt felszerelve.

Újszerű volt a *szárny belső szerkezete* is. Mivel a 0,9 m húrhossz mellett a szelvény legnagyobb magassága alig 18 cm lehetett, a kielégítő szilárdság elérésére olyan hatgerincű főtartót alkalmaztak, amelynek övszélessége a húrhossz mintegy 40%-a volt. A vasalások méreteinek csökkentése érdekében a szárny háromrészes volt. Benne egyébként nem volt hely a szokásos féklap számára, de ennek alkalmazása a lamináris áramlás elérésére való törekvéssel is ellenkezett volna. A leszállás könnyebbé tételére ezért a fél fesztávolság hosszúságú ívelőlapot 60°-os szögben lefelé térítették ki. A zuhanósebesség korlátozására pedig a törzsvégből kibocsátható és repülés közben ismét visszahúzható vagy szükség esetén ledobható 1 m átmérőjű ejtőernyő szolgált.

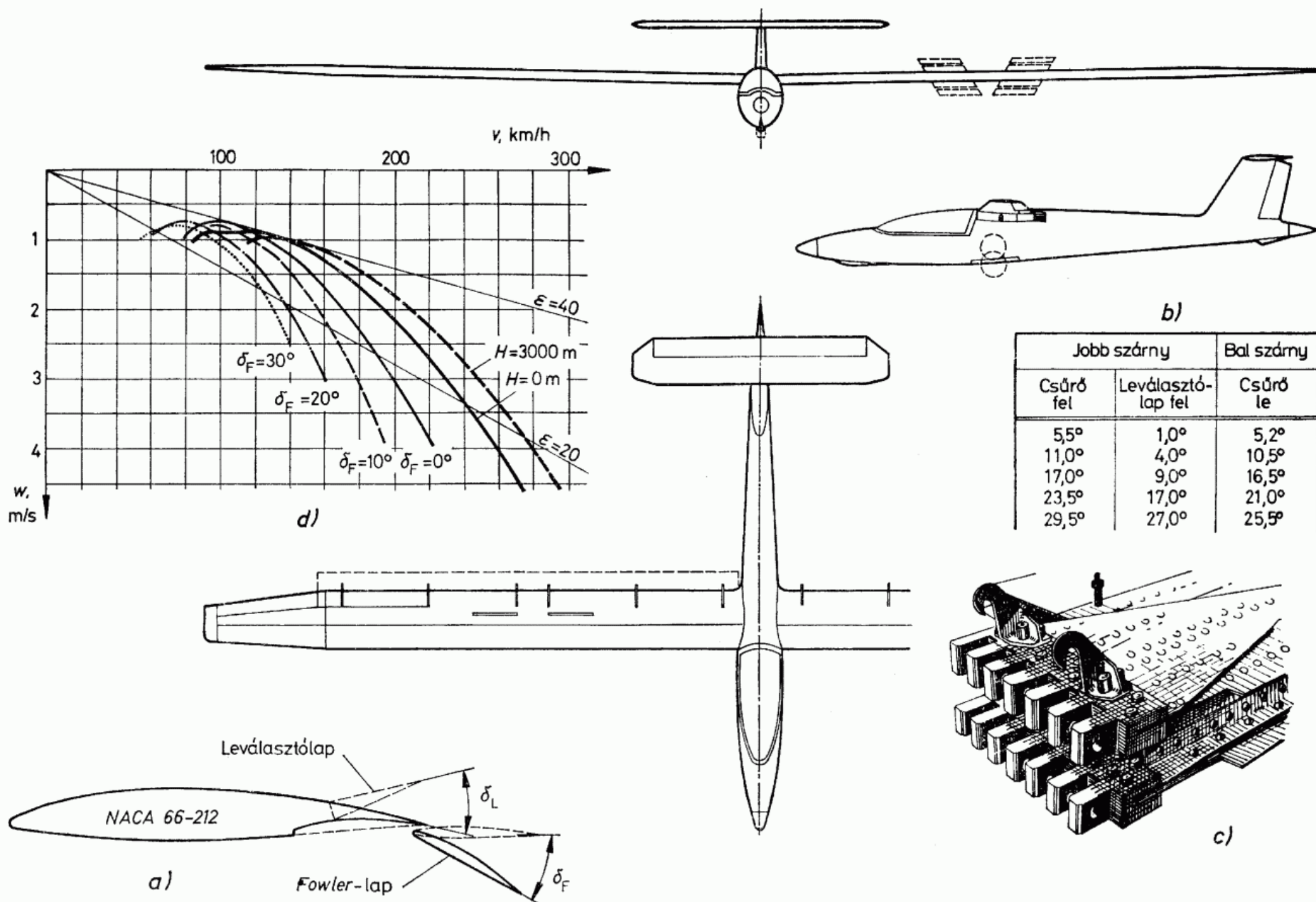
A gép számított teljesítményei a következők voltak: a legjobb siklószám 80 km/h sebességgel $\varepsilon = 35$, legkisebb merülősebessége 72 km/h sebességgel $w_{\min} = 0,54$ m/s. A legkisebb siklási sebességet 65 km/h értékre tervezték. Sajnos a várt siklási teljesítményeket a gép nem érte el, mert a teljesen rétegeslemezzel borított szárny körül sem alakult ki a várt lamináris áramlás, sőt a kényszerűen alkalmazott fa építési mód miatt nagyobb sebességekkel bekövetkező túlzott deformációja az áramlási viszonyokat még tovább rontotta.

Ennek ellenére e gépet úgy kell tekintenünk, mint repülőgéptervezőink egy korai hozzájárulását a korszerű vitorlázó repülőgépek kifejlődésének lehetőségéhez.

3.1.8.3. A *Beatty-Johl BJ-3*, egy különleges időjárási területre tervezett vitorlázó repülőgép

Dél-Afrikában évente 300 napon van termikrepülésre alkalmas időjárás, amikor az átlagemelés legalább 3,6 m/s-re, gyakran még ennél is többre tehető. (A dél-afrikai termikviszonyokra a 10. ábra 2 görbéje jellemző.) Ehhez járul az a körülmény, hogy a dél-afrikai fennsík átlagos magassága 1500 m, és a felhőalap gyakran 3000...4000 m magasan alakul ki a talaj felett. A repülés átlagos magassága így 3000 m körül lehet, ezért az elérhető átlagsebességet már a csökkent légsűrűség is jelentősen befolyásolja. A sebességmérő által ebben a magasságban mutatott 200 km/h a valóságban 230 km/h-t jelent. Ilyen körülmények között a célszerű kialakítás különleges felfogása válik indokoltá.

Mindenekelőtt a gép legnagyobb megengedett sebességét 280 km/h-ban állapították meg, tekintettel az emelőáramlatok között lehetséges 200 km/h feletti utazósebességre. Emellett azonban azt is tudomásul vették, hogy a gyakorlatban a végsiklástól eltekintve ritkán repülnek a legjobb siklószámmal. Ezért a legjobb siklószám $\varepsilon = 40$ fölé emelésétől is eltekintettek, de ehhez 130 km/h sebesség tartozik. A nagy sebességek mellett is jó siklóteljesítmények elérésére a gép tervezője *W. Johl* a mindössze 12% vastagságú *NACA 66-212* szelvényt választotta. Ennek $c_{x\min} = 0,0032$ legkisebb ellenállástényezője a $c_y = 0...0,4$ tartományra terjed, ami a 125...280 km/h sebességtartománynak felel meg. Ehhez 35,2 kp/m² felületi terhelés tartozik. A 3,6 m/s átlagemelés mellett ez tengerszinten 212 km/h optimális emelések közötti sebességet enged meg, amely érték 3000 m magasságban 246 km/h-ra emelkedik! A siklószám ekkor még $\varepsilon = 25$, 190 km/h-val pedig $\varepsilon = 30$, ill. 3000 m magasságban $\varepsilon = 30$ -hoz $v = 220$ km/h tartozik.



140. ábra. A különleges időjárási viszonyokra tervezett BJ—3

a) a szárny elvi megoldása; b) a csűrő és leválasztólapok kitéréseinek kombinációi; c) a szárnyfőtartó tövasalása; d) sebességi görbék

A jó emelkedési teljesítményeket a *BJ—3* gépen (140. ábra) a fesztávolság 80%-ára terjedő és a húr hossz 40%-át kitevő mélységű *Fowler*-lapok teszik lehetővé. 30°-os kitérítésükkor a legkisebb sebesség 55 km/h-ra csökken, a legkisebb merülősebesség pedig 0,75 m/s 65 km/h sebességgel. Az ívelőlap érdekessége, hogy 0°-os szögben is kibocsátható. Ekkor csak a felületet növeli.

A csűrők felülete ezen a gépen a számításba vett nagy siklási sebességek miatt feltűnően kicsi. A kis sebességekkel is kielégítő hatásosság elérésére igen érdekes megoldást alkalmaztak. A csűrők egy része ugyanis az ívelőlappal együtt kibocsátható hátrafelé, ezenkívül mindkét csűrő belső végénél még egy-egy leválasztólapszerű felület is kitéríthető felfelé. A különféle csűrőfelületek mozgásait a következőképpen hozták összhangba: mivel a nagyobb kitérítésekre kisebb sebességek mellett van szükség, a leválasztólapok úgy vannak összekötve az ívelőlappal, hogy amikor azt kis sebességek esetén kibocsátják és a csűrőt lefelé térítik ki, a leválasztólap felfelé kitérve növeli a rést (l. az ábrát) és ezzel ezen a szakaszon csökkenti a felhajtóerőt. Így járulékos forgatónyomaték jön létre. Ezenkívül, mivel a leválasztólap felfelé mindig csak az egyik oldalon tér ki, egyúttal az ellentétes fordulónyomatékot is csökkenti. A csűrőfelületek összetett kitérítéseit a 140. ábrán levő táblázat szemlélteti.

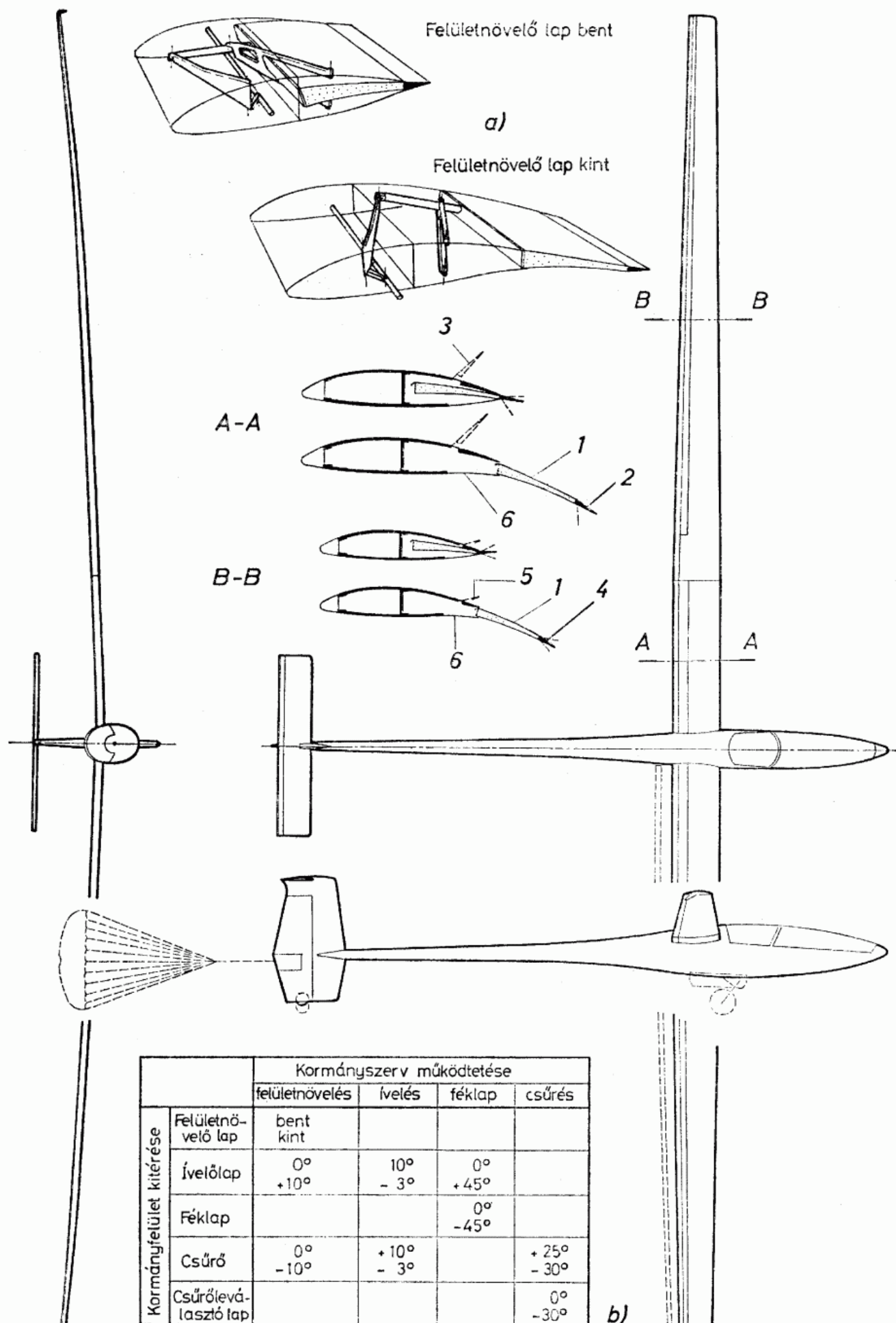
A *BJ—3* teherviselő részei teljesen fémből épültek, mert a műgyanta szerkezeti anyagként való felhasználása a dél-afrikai hőmérsékleti viszonyok között túlságosan kockázatos lenne. A fémfelületek minőségét azonban üvegszállal erősített műgyantarétegek javítják.

A rendkívül érdekes megoldású gép sikerét 127 és 134 km/h átlagsebességű világrekordok jelzik 300, ill. 500 km háromszögön (1965—66).

3.1.8.4. A *Sigma 1* kísérleti vitorlázó repülőgép

Míg a *BJ—3* géppel tervezői egy rendkívül kedvező éghajlat időjárási körülményeit igyekeztek a lehetőségig kihasználni, addig a *Sigma 1* tervezői költségeket nem kímélve (a prototípus előállítási ára 30 000 font volt) az angliai, ill. közép-európai átlagos, a dél-afrikaihoz viszonyítva sokkal gyengébb időjárási lehetőségekhez készítették gépüket (141. ábra). A nagy sebességek melletti jó siklószámok elérése itt is természetes igény volt, de a termikekben eltöltendő idő csökkentésére még nagyobb súlyt kellett itt fektetni, mint az előző például vett *BJ—3* esetében. Az alapul vett termik átmérője 180 m, átlagos emelkedési sebessége pedig 2,4 m/s volt.

Az előzőekben láttuk, hogy a jó emelkedési teljesítmények feltétele a nagy fesztávolság, a nagy szárnyfelület, a nagy $c_{y\max}$ tényező, a kis súly és a kis ellenállás. Az emelkedés végén ezzel szemben a kis ellenállással a lehetséges legnagyobb felületi terhelésnek kell társulnia. A *Sigma 1* esetében ezt igen érdekes megoldású szárny adja. Nagy sebességre az *F. X. Wortmann* által az Operation Sigma Ltd. részére tervezett *FX—67—VC—170/1,00* szelvényű, 21 m fesztávolságú és 36,2 oldalviszonyú szárny készült, amelynek legkisebb ellenállástényezője $c_y = 0,1 \dots 0,8$ tartományhoz tartozik. Ez a felület különlegesen hátracsúszó részével 35%-kal megnövelhető, és *FX—67—VC—170/1,36* szelvényűvé alakítható át emelkedéshez (125. ábra). A felületi terhelés így 42,7 kp/m² és 57,7 kp/m² között változtatható. A szárny kialakítását teljesen ez a megoldás határozza meg (141. ábra). A hátrafelé kicsúszó felületnövelő lap csukott állapotban teljes egészében a szárny belsejében foglal helyet, mozgatni az ábrán látható lengő karokkal lehet. Hossza a teljes fesztávolságra kiterjed, és kilépőélén 10% húr hosszúságú, hosszában két részre osztott állítható lap található. A külső a csűrőlap, a belső felület pedig az ívelőlap. Mindkettő kitérítése



szabályozható együtt is, így a szárny szelvényének alakja siklásban a legkisebb ellenállás érdekében módosítható. Ezzel egyidejűleg természetesen a botkormánnyal a csűrő is vezérelhető az orsózónyomaték létrehozására.

Ezekon kívül még két további kormányfelület található a szárnyon. A külső a csűrő-leválasztólap 10% húr hosszúságú, és mivel a tényleges csűrők hatásossága csak a nagy sebességű siklásban kielégítő, nagyobb orsózónyomaték igénye esetén a botkormány legnagyobb kitérítésének felétől kezdve lépnek működésbe.

A szárny belső szakaszán található leválasztólap húr hosszúsága 20%, és féklapként használható. Hatásosságának növelésére vele együtt a 35% húr hosszúságú felület-növelő lap is működésbe lép. Ez az összetett megoldás egyúttal a leválasztólap alkalmazásakor fellépő faroknehéz nyomatókat is ellensúlyozza.

A szárnyon levő kormányfelületek kitéréseit a 141. ábra táblázata foglalja össze.

A törzs legnagyobb keresztmetszetének helyét a lehetőség szerint hátul alakították ki, hogy a lamináris áramlás rajta minél hosszabb szakaszon fenntartható legyen. E mögött rövidesen igen kis keresztmetszetűre szűkül, hogy a turbulens áramlásnak kitett felület minimális legyen.

Az ívelőlap kiengedett helyzetében a szárny effektív beállítási szögét 8°-kal növeli meg. Ez lehetővé teszi, hogy a leszállási hosszoldás a siklással azonos legyen, ami viszont azt a törzs szilárdsági igénybevételére nézve kedvező megoldást tette lehetővé, hogy a függőleges felületek csaknem szimmetrikusan nyúljanak a törzs középvonala alá.

Az ívelőlap mechanizmusát hidraulika vezérli. A hidraulikus nyomás létrehozására a lábpedálok egyszerre előre és hátra működtethetők, de eközben az oldalkormányzás lehetősége továbbra is fennmarad.

A leírtakból látható, hogy a *Sigma 1* nem a klubpilóták repülőgépe. Mint tervezők vélekednek, a különbség egy korszerű teljesítménygép és a *Sigma 1* között akkora, mint a légszaváros utasszállító és a szuperszónikus *Concorde* között. Ez a megállapítás egyébként — tágabban értelmezve — érvényes a legtöbb korszerű vitorlázó repülőgépre is, ha azokat akár csak a 15...20 év előttiéhez hasonlítjuk is. A korábban szinte elképzelhetetlen teljesítmények egyelőre a repülőgép bonyolultságával járnak együtt, és ez várhatóan csak tovább fokozódik.

3.2. Iskola-vitorlázógépek

A vitorlázórepülés történetének kezdetén minden vitorlázó repülőgép egyben iskola-repülőgép is volt, mert a lelkes úttörők gépük repülőképeségeinek próbálgatásával egyidejűleg tanultak meg repülni is. Rövidesen igény támadt azonban motor nélküli kiképzőgépekre is.

A kiképző- vagy repülőnyelven az iskolagépeket a mindenkorai kiképzési módszer igényei szerint alakították ki. A vitorlázórepülésben kezdetben az *egy kormányos kiképzés* terjedt el, és körülbelül az ötvenes évek elejéig általánosnak volt mondható. Eszerint a kiképzési rendszer szerint a repülő növendék legelső „felszállásától” kezdve

141. ábra. A *Sigma 1* kísérleti vitorlázó repülőgép

a) a felületnövelő lap mozgatómechanizmusa a szárnyban; b) a kormányok kitéréseinek kombinációi
1 felületnövelő lap; 2 ívelőlap; 3 áramlás-leválasztó féklap; 4 csűrő; 5 csűrő-leválasztó lap; 6 rugalmas borítólemez

egyedül foglalt helyet gépében, és a kormányok kezelését lépésről-lépésre tanulva meg, gumikötélindítással húsz—harminc méteres földön csúszásokkal kezdte. Ezeket 1...2 m magasságban néhány másodperces siklások követték, végül sor került a 30 másodperces időtartamú A-vizsgára. Így haladt lassan lépésről-lépésre előre, feladatát és elkövetett hibáit oktatójával a repülések közötti szünetben megbeszélve.

Mit kívánt ez a kiképzési módszer az iskolagéptől?

Mindenekelőtt igen nagy stabilitást, hogy a növendék ne legyen állandó kormány-mozdulatokra kényszerítve, legyen bőségesen ideje cselekedetei megfontolására. A nagy stabilitással az ebben az esetben igen kívánatos lomhaság is velejárt, vagyis a kormányok kitérítésére való lassú reagálás. A gép teljesítményeit illetően az volt a kíváncsi, hogy a siklószám ne legyen jobb $\varepsilon = 8 \dots 10$ -nél, a merülősebesség pedig $w_{\min} = 1$ m/s felett legyen, végül ezeket az értékeket 40...50 km/h-nál nem nagyobb sebességgel érje el.

Az egykormányos kiképzés természetes velejárója volt, hogy a repülő növendék gépvezetési hibáiból kifolyólag durva földet éréskor megsérült a gép. Szerkezetének tehát egyszerűnek és olcsónak kellett lennie, hogy a sérüléseket gyorsan és kis költséggel lehessen javítani, de ugyanakkor olyannak is kellett lennie, hogy a sérüléskor a vezető lehetőleg védve legyen a személyi sérüléssel szemben.

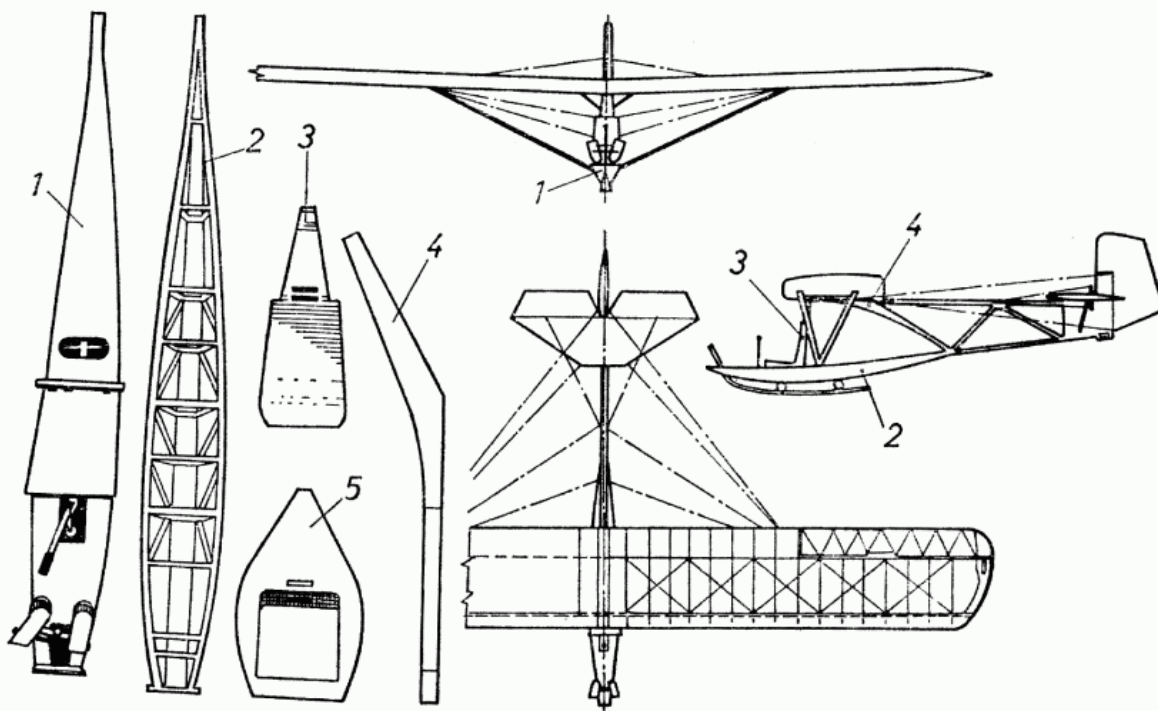
Ebben a kiképzési rendszerben szükség volt az alapfokú gépek és a teljesítmény-repülőgépek közötti távolság áthidalására az ún. *gyakorlógépekre* is. Ezek siklószáma $\varepsilon = 16 \dots 20$, merülősebessége $w_{\min} = 1$ m/s körüli volt, és velük egyszerűbb műrepülést is lehetett általában végezni.

A kiképzés az egykormányos rendszerben a vitorlázórepülés tulajdonképpeni céljáig, a távrepülésig igen lassú volt. Valamelyest gyorsította a csörlő rendszerű indítás elterjedése, ami csak az indítóeszközben jelentett változást, de a hagyományokhoz való ragaszkodás sokáig nem engedett változást ezen a téren.

Magyarországon kezdettől fogva kiváló iskola-vitorlázógépek álltak rendelkezésre, amelyekről az 1938. évtől kezdve *Rubik Ernő* gondoskodott. A világszerte elterjedt *Hol's der Teufel*, *Zögling*, *SG—38* vonalhoz képest abban az időben sokkal korszerűbbnek tekinthető *R—07 Tücsök* (142. ábra), majd az ennek kissé megnövelt és részben burkolt változatát képviselő *R—07b Vöcsök* (143. ábra) együléses iskola-gépek még az ötvenes évek elején is hazai vitorlázórepülő kiképzésünk alaptípusát alkották. Repülőtulajdonságaik igen jók — nyugodtan állíthatjuk, hogy az említett külföldi típusokénál lényegesen jobbak — voltak, és nemcsak az alapkiképzés csúszásaira voltak alkalmasak, hanem — főként a *Vöcsök* — a termikrepülés elemeinek elsajátítására is. Bár e helyen e gépekkel nem foglalkozhatunk részletesebben, meg kell mégis említenünk azt a *Rubik Ernő* által már ekkor megvalósított elvet — amely napjainkban a *kit*, azaz építőszekrény rendszerű építésmóddal jelentkezik újra itt —, hogy ti. célszerűen meg szerkesztett gépek fő részei egymás között cserélhetők, és sérülés esetén a gyárból táviratilag beszerezhetők (142. ábra).

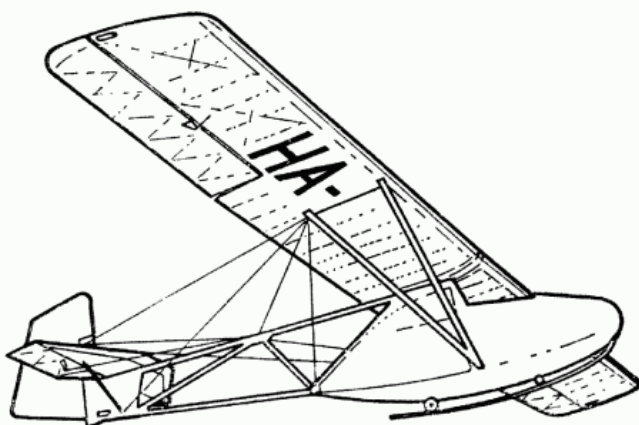
Kétüléses vitorlázó repülőgépeket már a harmincas évek elején is alkalmaztak (pl. *Falcon*, *Falke*, *Grunau 8*) repülő növendékek esetenkénti ellenőrzésére, egyes repülési helyzetek bemutatására. Bár pontos adat nem áll rendelkezésünkre, valószínű, hogy a Szovjetunióban már a harmincas évek vége felé kétkormányos kiképzés folyt. Erről *Antonov* 1936-os, igen nagy számban megépült *US—5 (OKA—32)* jelű kétüléses gépe tanúskodik, valamint *Seremetyev S-sorozatának* hasonló tagjai.

Magyarországon a vitorlázórepülőök oktatásának ilyen módszere az 50-es évek elejétől terjedt el, és kezdetben az 1942-es tervezésű, igen kedvelt, de eredetileg nem erre a célra tervezett *R—11 Cimbora* géppel folytatták. E gépet csakhamar felváltotta az ugyancsak *Rubik Ernő* tervezte *R—15b Koma*.

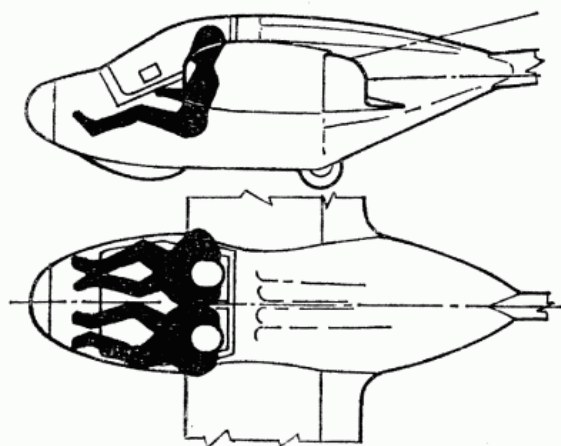


142. ábra. Az R—07 Tűcsök alapfokú kiképzőgép (1938)

1 és 2 törzscsónak; 3 háttámla; 4 törzsív; 5 a Vöcsökkel cserélhető háttámla



143. ábra. R—07b Vöcsök kiképzőgép haladók számára (1938)



144. ábra. Az R—15b Koma üléselrendezése (1950)

Az *R—15b Koma* esetében ismét olyan magyar konstrukcióról van szó, amely a hazai repülőipar szerencsésebb alakulása esetén méltán növelhette volna határainkon túl is vitorlázórepülésünk hírnevét. Ez a 14 m fesztávolságú, egymás melletti üléselrendezésű vitorlázógép repülőtulajdonságaiban a külföldi, hasonló célú gépekkel legalább egyenrangú volt, de ezenkívül elsőként valósította meg a motor nélküli *kétkormányos kiképzőgép* korszerű fogalmát. A *Koma* tervezésének alapgondolataiból a következőket kell megemlítenünk (144. ábra):

Az oktató és növendék szoros kapcsolata, repülés közbeni együttműködése a kétkormányos kiképzés egyik igen fontos kívánalma. Az egymás melletti üléselrendezés ezt a célt szolgálja, de egyúttal azt is lehetővé teszi, hogy mindketten a szárnyak előtt foglaljanak helyet, így a kilátás minden irányban zavartalan.

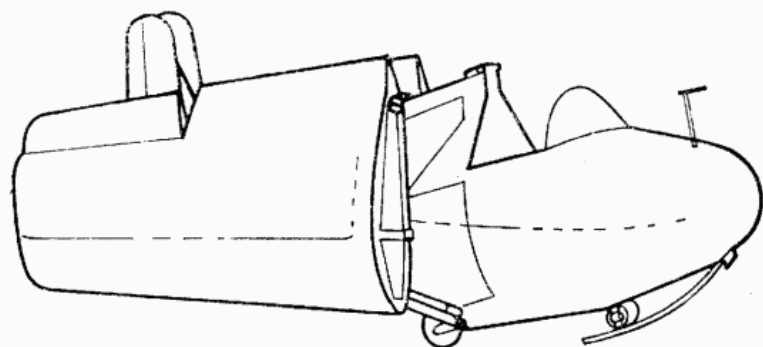
A kétkormányos kiképzés a fel- és leszállások sorozata. A repülőgép élettartamát tehát igen erősen befolyásolja a földet éréskor keletkező terhelések nagysága. Ez szoros összefüggésben van a gép súlyával és a leszállási sebességgel. Az előbbi a tervező eredeti elgondolású szerkezetével mindössze $G_{\text{üres}} = 160$ kp-on tartotta, a leszállási sebességet pedig a nagy felületű ívelőlap leszállófokozata ($\delta = 60^\circ$) csökkentette. A leszállási igénybevételek csökkentéséhez a középszárnyú elrendezésben a föld közelében mozgó szárnyon kialakuló *talajhatás* is hozzájárul.

A *Koma* repülőtulajdonságainak egyik jellemzője — az akkoriban fontosnak tartott — *dugóhúzóbiztonság* volt. A szárnyvég célszerű kiképzése, vagyis a csűrő előtti résnek a szárnyvégek felé való növelése és így réselt szárnyra való alakulása lehetetlenné tette e géppel a dugóhúzóba esést.

Hasonló elvek alapján készült — a *Komáéval* részben azonos alkatrészekből — a kiképzési rendszer egyedül repülő gépe, az *R—16 Lepke* is, amely a korabeli kívánalmak szerint még a *Tücsök—Vöcsök* vonalba illeszkedett bele.

Rubik Ernő gépei — a *Koma* és a *Lepke* — még egy érdekes szerkezeti újdonságot hoztak. A tárolási helyigény csökkentésére mindkét gép szárnyait a törzs mellé hajlítni, sőt ilyen állapotban saját kerekén mozgatni lehetett (145. ábra).

A kiképzőgépek üléseinek egymás melletti vagy egymás mögötti elrendezése az ötvenes évek folyamán hosszas vita tárgya volt. Mindkét elrendezésben szerzett tapasztalatok alapján azonban meg kell állapítanunk, hogy egyik megoldásnak sincs a másikkal szemben lényeges előnye vagy hátránya. Úgy véljük, hogy egyedül az üléselrendezés semmiképpen sem lehet meghatározó a kiképzésre való alkalmasság kérdésében, hanem ahhoz a gép kialakításának számos egyéb szempontja is hozzájárul. A 144. és 146. ábrán különféle megoldású, egymás melletti és mögötti üléselrendezésű kiképzőgépeket szemléltetünk, ahol a repülőgépvezetők elhelyezésén kívül a kilátási lehetőségek is érzékelhetők. Míg az egymás melletti üléselrendezés esetén ez láthatólag nem jelent nehézséget, az egymás mögötti elrendezésben a súlypont és a szárny egymáshoz viszonyított helyzete miatt (l. 2. fejezet) e téren tervezés-

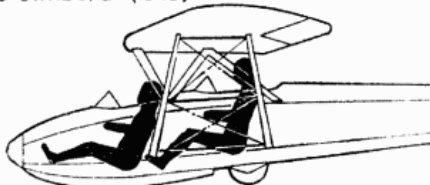


145. ábra. Az *R—16 Lepke* szárnyai a tároláshoz hátracsukhatók voltak

US 5 (OKA 32) (1936)



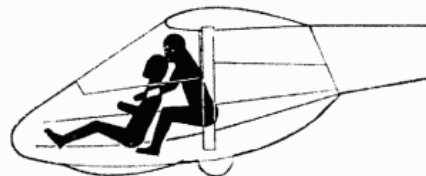
R-11b Cimbora (1940)



Greif VSDG (1950)



Doppelraab (1951)



L-13 Blanik (1956)



R-26S Góbé (1962)



146. ábra. Egymás mögötti üléselrendezésű kiképzőgépek

kor nehézségek támadnak (*Cimbora*, *Doppelraab*), bár e gépek egy részénél (*Greif V—DSG*, *R—26S Góbé*) ezt sikeresen megoldották. Míg a kétkormányos gépek egy részénél egymás mögött és egy szintben, tehát egymástól viszonylag függetlenül helyezkednek el az ülések (*Cimbora*, *Greif*, *Ifjúság*, *Bocian*), addig a korszerűbb megoldásban az oktató ülése kissé magasabban és a növendékéhez közel helyezkedik el (*Góbé*). Ilyenkor a hátsó ülés külön műszerfala rendszerint elmarad, sőt a *Doppelraab* esetében a botkormány is: itt az oktató növendéke vállán áthajolva ragadja meg szükség esetén az egyetlen botkormány e célra szolgáló nyúlványát.

A legjobban sikerült kiképzőgépek közé kell sorolnunk az *R—26S Góbét* is, amely magasszárnyú elrendezésében eleget tesz az ilyen gépektől elvárt stabilitási kívánalmaknak. *Gö 549* szelvényével és téglalap alaprajzú szárnya célszerű (a *Komáé-hoz* hasonló) kialakításával rendkívül jó túlhúzási tulajdonságokkal rendelkezik, de emellett a dugóhúzó bemutatására és gyakorlására is használható. A *Góbéval* sikerült a kiképzés folyamatát egyetlen gépre korlátozni, ugyanis kiváló tulajdonságai alkalmassá teszik a növendék első egyedüli repüléseinek kívül alacsonyabbfokú teljesítmény-repülésre is (203., 204. ábra).

3.3. Különleges vitorlázó repülőgépek

3.3.1. Farok nélküli és csupaszárny vitorlázó repülőgépek

A repülés lehetősége szempontjából egyedül a szárny nélkülözhetetlen, és a hagyományos kialakítású repülőgépek felhajtóerőt nem termelő törzse és farokfelületei szükséges rosszként növelik az ellenállást. Az önmagában repülő szárny gondolata már a repülés kezdeti időiben felmerült. *Etrich* és *Wels* 1907-ben önmagában repülő,

zanonia alakú szárnnal kísérletezett, és e megoldástól a repülés biztonságának növekedését remélte. 1913-tól az első világháború kezdetéig a francia Nieuport gyár számos farok nélküli, motoros, *Dunne*-kétszárnyút gyártott, amelyeket egyformán alkalmaztak szárazföldi és vízi repülőgépként. Az 1921-es rhöni versenyen *Leusch* az osztrák Weltensegler társaság igen érdekes, farok nélküli, motor nélküli gépével jelentkezett.

Az első, valóban csupaszárny repülőgép *A. Lippisch* szerint [11] *B. I. Cseranovszkij Parabola* nevű gépe volt (36. ábra), amely az 1924–25. évi krími versenyeken repült sikerrel. Bár később még több motoros farok nélküli típust tervezett, további ilyen vitorlázó repülőgépeiről nincsen tudomásunk.

Az úttörő idők óta időről időre feltűnnek farok nélküli és csupaszárny vitorlázó repülőgépek, de ahogyan a motoros repülésben sem terjedtek el általánosságban, a vitorlázórepülésben is inkább csak különlegességgként tartjuk őket számon.

Mi az oka ennek?

A farok nélküli és a csupaszárny gépeket két alapgondolatból kiindulva hozzák létre. Az egyik gondolat anyagi természetű, éspedig az, hogy a törzs és a farokfelületek elhagyásával a gyártási költségek mintegy 20...40%-kal csökkenthetők. Az idők folyamán úgy alakult, hogy a legnagyobb számban megépült farok nélküli típusok fő előnye éppen olcsóságukban rejlik, és az elvárt egyéb előnyök emellett alig érvényesülnek (*EPB—1 Flying Plank, AV—36 Monobloc* stb.). A másik gondolat szerint a vitorlázó repülőgép teljesítményei — mivel a gép ellenállástényezője $c_{x\text{ gép}} = c_{x\text{ törzs}} + c_{x\text{ farok}} + c_{xI} + c_{xpr} + c_{xi}$ összetevőkből áll — hatékonyan javíthatók a farok és a törzs elhagyásával. Ezzel az interferencia-ellenállás is elmarad, és a továbbiakban csak az elmaradhatatlan indukált és profilellenállással kell számolni. (A gép személyzetét e megoldásnál a szárnyban helyezik el, ha erre annak méretei lehetőséget nyújtanak.) Így — első megfontolásra — a hagyományos kialakítású gépekhez viszonyítva rendkívüli siklőszámok várhatók.

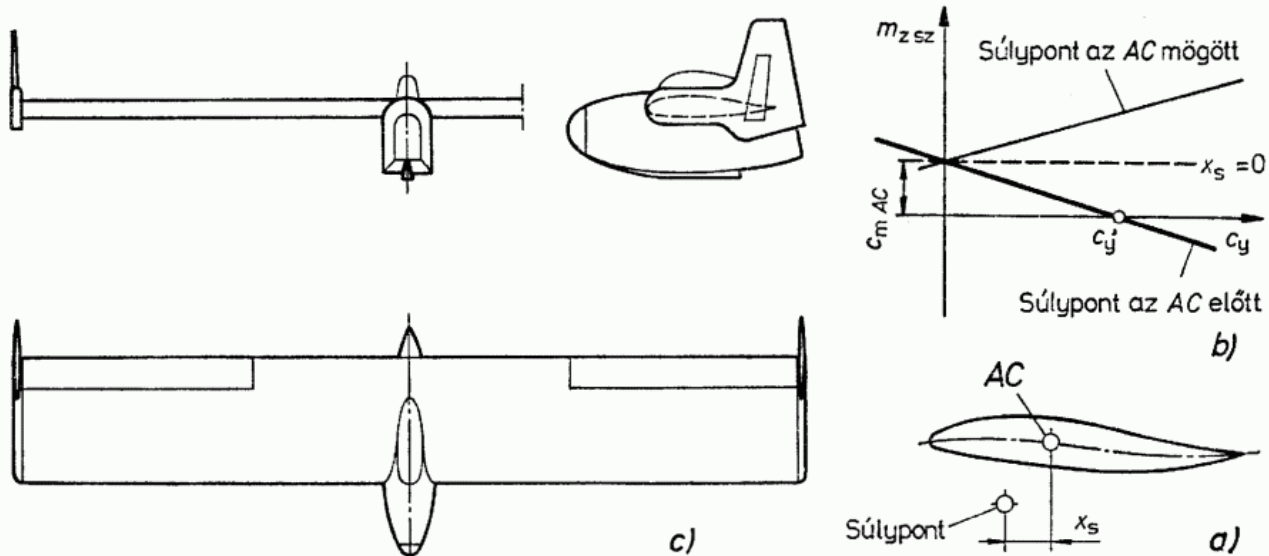
Ez utóbbi feltételezés helyességének eldöntésére vizsgáljuk meg mindenekelőtt a farok nélküli, ill. csupaszárny repülőgépek építésének lehetőségeit.

3.3.1.1. Az önmagában repülő szárny problémái

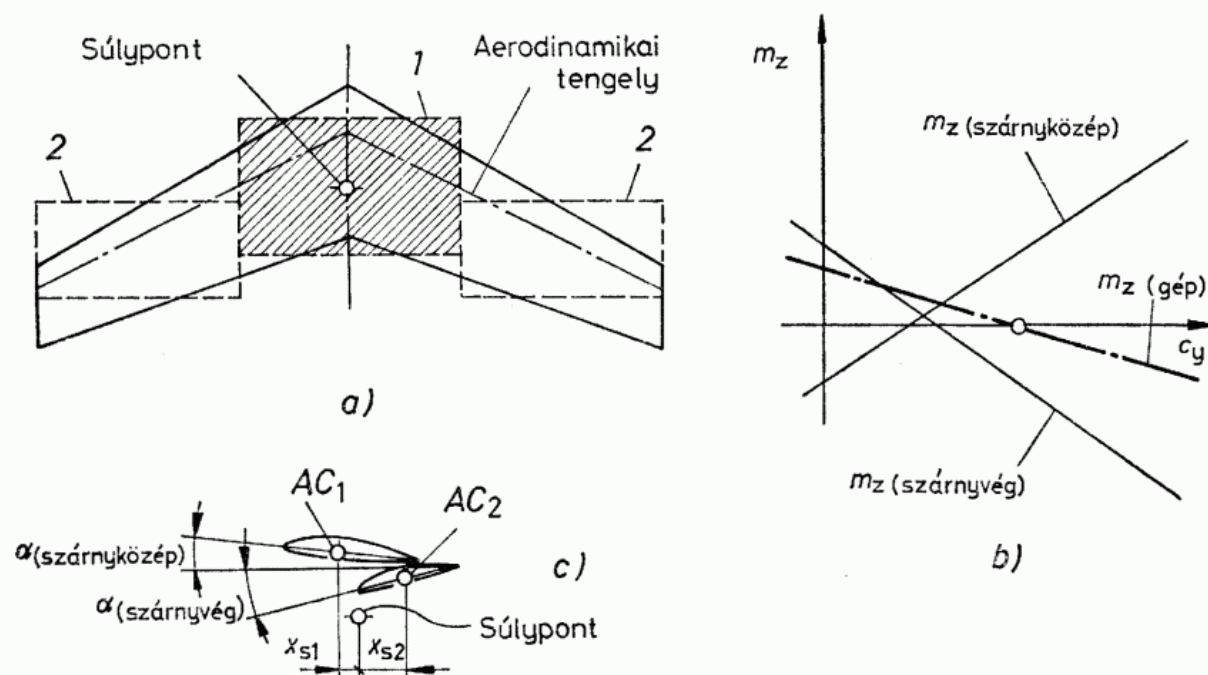
Az önmagában repülő szárnnal kapcsolatban felmerülő első probléma hossz-stabilitásának kérdése. Már korábban láttuk, hogy az önmagában repülő szárny esetében keresztengelye körüli egyensúlyt csak abban az esetben kaphatunk, ha $x_s > 0$, vagyis a súlypont a szárny aerodinamikai középpontja mögött foglal helyet (80. ábra). Ez az egyensúlyi helyzet azonban instabil. A szokásos szelvényekből álló szárny tehát kiegyensúlyozottságot és stabilitást egyszerre nem tud biztosítani. Ehhez van szükség a vízszintes farokfelületre.

A farokfelület elhagyása kétféleképpen lehetséges:

— Az első lehetőség, ha a szárnyat *S-profilokból* állítjuk össze. Az *S-profilok* c_{mAC} nyomatéki tényezője általában pozitív. Az ilyen szárny nyomatéki tényezőjének változását a felhajtóerő-tényező függvényében a 147. ábra szemlélteti. Látható, hogy $x_s < 0$ esetén, vagyis ha a súlypont az aerodinamikai középpont előtt fekszik, az m_{zsz} egyenes metszi a $+c_y$ tengelyt. Ebben a metszéspontban nyomatéki egyensúly van, és mivel az m_{zsz} egyenes balról jobbra süllyed, az egyensúlyi helyzet stabil. Az ilyen *S-profillal* készült szárny tehát egymagában c'_y -vel állandósult, stabil repülésre képes, és általában nyilazás nélkül készítik őket. Az egyenesszárnyú, farok nélküli vagy csupaszárny repülőgépnek ez az egyetlen megoldási lehetősége.



147. ábra. Az egyenesszárnyú farok nélküli repülőgép stabilitása S középvonalú szárnszelvényvel oldható meg (a); b) a hossz-stabilitás feltétele; c) EPB—1 Flying Plank



148. ábra. Nyilazott csupaszárny repülőgép hossz-stabilitásának megoldása

a) nyilazott szárny és egyenértékű szárnyai; b) és c) a hossz-stabilitás feltételei
1 a középrésszel; 2 a külső részekkel egyenértékű szárnyak;

— Az önmagában repülő szárny hossz-stabilitásának másik megoldása a *szárny nyilazása* lehet. A pl. hátranyilazott szárny középrészének profiljaira nézve (148a ábrán a vonalkázott rész) a súlypont a szelvények aerodinamikai középpontjai mögött, a szárnyvégek profiljaira nézve pedig azok aerodinamikai középpontjai előtt foglal helyet. Ha tehát a szárnyközéprésznek és a szárnyvégeknek megfelelő egyenértékű szárnyak hossznyomatéki tényezőinek a c_y függvényében való változását külön-külön rajzoljuk fel, a 148b ábrán látható két egyenest kapjuk. Eredőjük, azaz az egész szárny hossznyomatéki tényezője stabil változást tüntethet fel, de egyensúlyi helyzetet egyelőre még nem kapunk. Ez csak akkor jön létre, ha a szárnyvégeket meg-

felelően elcsavarjuk, mégpedig előrenyilazott szárny esetében a szárnyközéprészhez viszonyítva előredöntjük (148c ábra). Az elcsavarás miatt a szárnyvégek $m_{z(\text{szárnyvég})}$ egyenese önmagával párhuzamosan felfelé tolódik el, és így az eredő $m_{z(\text{gép})}$ hossznyomatéki tényező egyenese — stabil jellegének megőrzésével — a kívánt c_y értéknél metszi az abszcisszatengelyt. A metszéspontnak megfelelő c_y -nal, ill. az ehhez tartozó sebességgel tehát a szokásos profilokból felépített és nyilazott, valamint elcsavart szárny is képes állandósult, stabil repülésre.

Minden bővebb magyarázat nélkül belátható, hogy az ilyen módon önstabilizált nyilazott szárny már normál repülési helyzetekben is nagy csavarónyomatékkal van igénybe véve, mert a negatív állásszögre állított külső szárnyrészek profiljainak nyomásközéppontja hátul, a kilépőél mögött helyezkedik el. Az ilyen szárny konstrukciós szempontból sok problémát okozhat, és előfordulhat, hogy elégtelen merevsége esetén a légerők hatására olyannyira elcsavarodik, hogy statikus stabilitása is megváltozik. 1921-ben *Leusch Weltensegler* gépével bekövetkezett katasztrófája hasonló ok következménye lehetett. A nyilazott szárnyak tervezésekor ezért az alkalmazott szelvényeket igen gondosan kell kiválasztani, és ezért a szárnyvégen szimmetrikus vagy nyomásközéppont-vándorlásmentes profilt alkalmaznak.

A hossz-stabilitás e második megoldásával készült gépek többsége pozitív nyilazással épült (*Horten*-féle gépek, *SZD—20X Vampir 2*), de találkozunk előrenyilazott szárnyúval is (a szovjet *BP—3*). Ez utóbbiakra a stabilitás megoldásával kapcsolatban mondtak értelemszerűen alkalmazhatók.

Látjuk tehát, hogy építhető farok nélküli, ill. csupaszárny repülőgép is megfelelő önstabilitással. Nézzük most a kérdés aerodinamikai oldalát. Vajon a feltételezett teljesítményjavulás valóban elérhető-e, ill. az így kapott eredmény kielégítő-e?

Következő kérdésünk kettős: az önstabil szárny összfelhajtóereje nem változik-e meg a hasonló, de hagyományos kialakítású repülőgép szárnyához viszonyítva, továbbá a törzs és farok elhagyása után az ellenálláscsökkenés a várt mértékű-e?

Az egyenesszárnyú gépek esetében az S-profiloknak a hasonló normál és szimmetrikus szelvényekkel való összehasonlítása a következőket mutatja:

— Az S-profilok a szimmetrikus szelvényekkel szemben ugyan azonos vastagsági viszonyok mellett nagyobb $c_{y \max}$ értéket adnak, de ugyanakkor nagyobb profil-ellenállást is.

— A hasonló vastagságeloszlású, de egyszerű (tehát nem S) középvonalú szelvényekkel szemben az S-profilok $c_{y \max}$ értéke lényegesen kisebb.

Az S-profillal készült szárnyal tehát a hagyományos kialakítású vitorlázó repülőgépéhez viszonyítva nem érhető el lényeges siklőszámjavulás, mert a farokfelületek elhagyásával csökken ugyan $c_{x \text{ összes}}$ nagysága, de ugyanakkor az alkalmazott szárnyszelvény felhajtóerő-viszonyai romlanak. Az $\varepsilon = (c_y/c_x)_{\text{gép}}$ siklőszám tehát nem javulhat lényegesen. Hozzájárul ehhez még az is, hogy az eddig megépült ilyen rendszerű gépek kis méreteik miatt nem voltak valódi csupaszárnyúak, mivel a szárny csekély vastagsága nem tette lehetővé a repülőgépvezető elhelyezését, így egy kabint magában foglaló, rövid törzset mégiscsak ki kellett alakítani. Tagadhatatlan előnyük azonban olcsóságuk, amely pl. az *AV—36 Monobloc* gép kedveltségét is magyarázza.

A nyilazott szárnyakkal kapcsolatban az áramlástan kérdéseket még alaposabban meg kell vizsgálnunk. Mindenekelőtt gondoljunk vissza az elcsavarással kapcsolatban korábban mondtakra. Láttuk, hogy a hagyományos, egyenes szárnyak indukált ellenállása az elcsavarás miatt $c_{y \text{ szárny}} = 0$ esetén sem 0, hanem — egyetlen ponttól eltekintve — valamennyi állásszög mellett eltérő attól. Képet kaptunk az indukált ellenállás elcsavarás miatti növekedésének mértékéről is. Most figyelembe kell vennünk azt, hogy az önmagában is stabil szárny elcsavarása általában nagyobb,

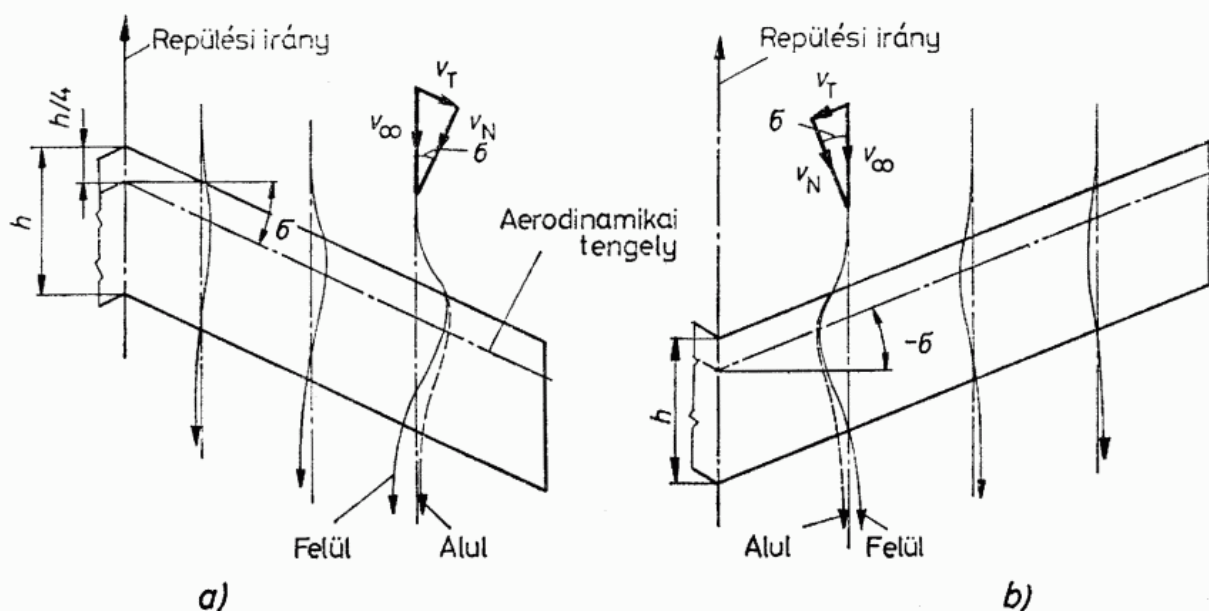
mint a hagyományos gépek szárnyaie, így ezeknél az indukált ellenállás további növekedésére kell számítani.

Hoerner szerint a nyilazott szárnyak indukált ellenállása a nyilazatlanhoz viszonyítva

$$\Delta c_{xi} = \frac{c_y^2}{\pi \lambda} \frac{5}{10^8} |\sigma|^3$$

értékkel nő, vagyis a növekmény értéke csak a nyilazási szög nagyságától függ, és független attól, hogy a szárny előre vagy hátra van nyilazva.

Az elcsavarás hatása mellett a szárny nyilazása is lényegesen befolyásolja a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlásának alakulását. A nyilazott szárny körül ugyanis az áramvonalak nem a szimmetriasíkkal párhuzamosan haladnak, hanem erősen eltorzulnak, mintha a szárny oldalirányban csúszna. (Az áramvonalak eltorzulását a 149. ábrán az érthetőség kedvéért túlozva rajzoltuk meg.) E jelenség okát abban

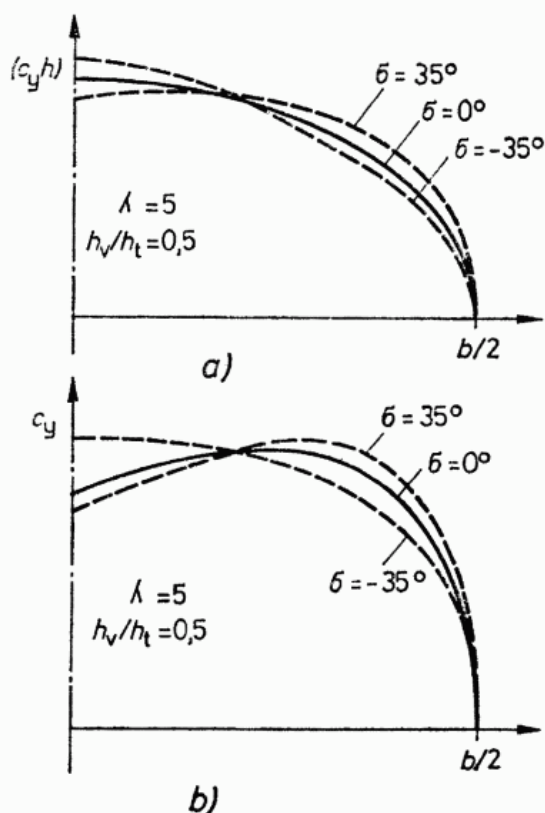


149. ábra. A hátra- (a), ill. előrenyilazott (b) szárny körül az áramlás eltérül a párhuzamostól

kereshetjük, hogy a szárny közvetlen környezetében a nyomáseloszlást kialakító helyi sebességváltozásokat az áramlásnak a szárnyra merőleges $v_N = v_\infty \cos \sigma$ komponense hozza létre, ahol v_∞ az áramlás sebessége a szárnytól nagyobb távolságban, σ pedig a nyilazási szög. A v_T tangenciális sebességösszetevő a fesztávolság mentén végig változatlan. Minél közelebb futnak az áramvonalak a felülethez és minél nagyobb a nyilazás σ szöge, annál inkább eltérnek az áramlás v_∞ sebességének irányától. A torzulás mértéke a szárny felett nagyobb, mint alatta.

Mivel a felülnézetben szimmetrikus szárnyfelek egymásnak tükörképei, a két szárnyfél körüli áramlás egymásra olyan hatást gyakorol, hogy az áramvonalak eltérülése annál kisebb, minél közelebbi áramvonalat vizsgálunk a szimmetriasíkhoz, ahol a torzulás végül is eltűnik. A jelenség érdekessége még, hogy a szárny felett és alatt futó áramvonalak egymáshoz viszonyított eltérülése növekvő állásszöggel fokozódik.

A nyilazott szárnyak effektív állásszöge az egyenes szárnyakhoz viszonyítva megváltozik: a középrészen kisebb, a szárnyvégeken pedig nagyobb. A felhajtóerő eloszlása ennek megfelelően alakul a fesztávolság mentén, és az egyenes szárnyhoz viszonyítva a középrészen kisebb, a végeken pedig nagyobb $c_y h$ értéke (150. ábra).



150. ábra. A nyilazás hatása a felhajtóerő (a) és a felhajtóerő-tényező (b) fesztávolság menti eloszlására

A hátranyilazott szárnyak egy kellemetlen tulajdonsága ebből származik, az ugyanis, hogy ezek helyi felhajtóerő-tényezői a szárnyvégek felé megnőnek. A középrészhez viszonyítva itt tehát fokozódik a nyomáscsökkenés, ezért onnan a határrétegen belül áramlás indul a szárnyvégek felé, ahol idő előtti leválást okoz. Negatív σ szög, azaz előrenyilazás esetén a viszonyok éppen ellenkezőleg alakulnak, és itt a szárny középrészen alakulnak ki nagyobb helyi felhajtóerő-tényezők. Az áramlásnak a szárny középrésze felé való eltérülése az átesés megindulásának helyét tekintve itt kedvezően alakul, ezért egyes esetekben ezt a megoldást részesítik előnyben.

Az áramlásnak a nyilazás miatti szárnyvég felé irányulását néhány megépült csupaszárny kísérleti gépen határréteg-elszívással (AW—52), ill. a szárnyfelületből a szimmetriasíkkal párhuzamosan kiemelkedő gáttal csökkentették.

A szárny nyilazása, mint mondtuk, az effektív állásszög és az effektív áramlási sebességek változását okozza. Ezért az egész szárnyra érvényes eredő felhajtóerő görbéjének meredeksége csökken. Ha a nyilazás szöge $\pm 15^\circ$ -nál nem nagyobb, a csökkenés jó közelítéssel $a_\sigma = a_0 |\cos \sigma|$, vagyis független attól, hogy a szárny előre vagy hátra van nyilazva.

Annak érdekében, hogy a nyilazott szárnnyal a nyilazatlanéval azonos nagyságú felhajtóerő-tényezőt érjünk el (ez esetben eltekintve a csupaszárny gép hossz-stabilitását biztosító elcsavarás hatásától is), állásszögét

$$\Delta \alpha_\sigma = \frac{c_y}{a_\sigma} \left(\frac{1}{|\cos \sigma|} - 1 \right) 57,3$$

fokkal meg kell növelni. Ha most a hossz-stabilitás által megkívánt elcsavarás miatti eredő állásszögcsökkenést is figyelembe vesszük, az állásszöget a nyilazatlan szárnyéhoz hasonló nagyságú eredő c_y tényező elérése érdekében még tovább kell növelni.

A hátranyilazott szárnyak körüli áramlás szárnyvégek felé való elterelődésének az egyéb hátrányos következmények mellett van egy kedvező velejárója is. Az áramlás

leválása ugyanis kisebb *Reynolds*-számok esetében kevésbé határozottan következik be. Ez a nyilazott szárnyra átvive azt jelenti, hogy a szárnyvégeken bekövetkező leválás befelé, a szárnytő, vagyis a növekvő *Re*-számok felé csak vontatottan terjed. Ez a szárnyközéprész $c_{y\max}$ értékének növekedését eredményezi. A szárnyközéprész $c_{y\max}$ értékei a szárnyvégeken mutatkozó $c_{y\max}$ értéket ezért meghaladják. Kis *Reynolds*-számok mellett ezért a nyilazott szárny $c_{y\max}$ értéke nagyobb, mint a nyilazatlan szárnyé. Ez a kedvező tulajdonság azonban a *Reynolds*-szám növekedésével csökken.

Az elméleti fejtegetések után tekintsük most a 151c ábrát, ahol a $b = 20$ m fesztávolságú *Horten IV* csupaszárny vitorlázó repülőgép $c_y^2 = f(c_x)$ linearizált polárgörbét és $\varepsilon = f(v)$ siklószámgörbét hasonlítjuk össze a $b = 20,1$ m fesztávolságú *D—30 Cirrus* hagyományos kialakítású gép hasonló jellemzőivel. Bár e két gép mérete és súlyadatai a közel azonos fesztávolság kivételével eltérők voltak, az összehasonlítás jogosultságát alátámasztja az a tény, hogy létrehozásuk idején (1934—38) a hagyományos, ill. a farok nélküli gépek legkiválóbbjainak tekintették őket.

Az ábra szerint a *Horten IV* ellenállása csak $c_y = 0,3$ -nál kisebb felhajtóerőtényezők mellett, azaz kis állásszögeknél jobb a *D—30*-énál. Ez utóbbi polárgörbájének meredekebb volta szárnya nagyobb effektív oldalviszonyának tudható be. Bár a csupaszárny gép $c_{x\min} = 0,01$ legkisebb ellenállástényezője mintegy 30%-kal kisebb a hagyományos *D—30* gép $c_{x\min} = 0,014$ értékénél, a kialakításra leginkább jellemző $K_{D-30} = 0,81$, ill. $K_{HOIV} = 0,63$ hatásfoktényezők a hagyományos megoldás fölényét jelzik ebben az esetben.

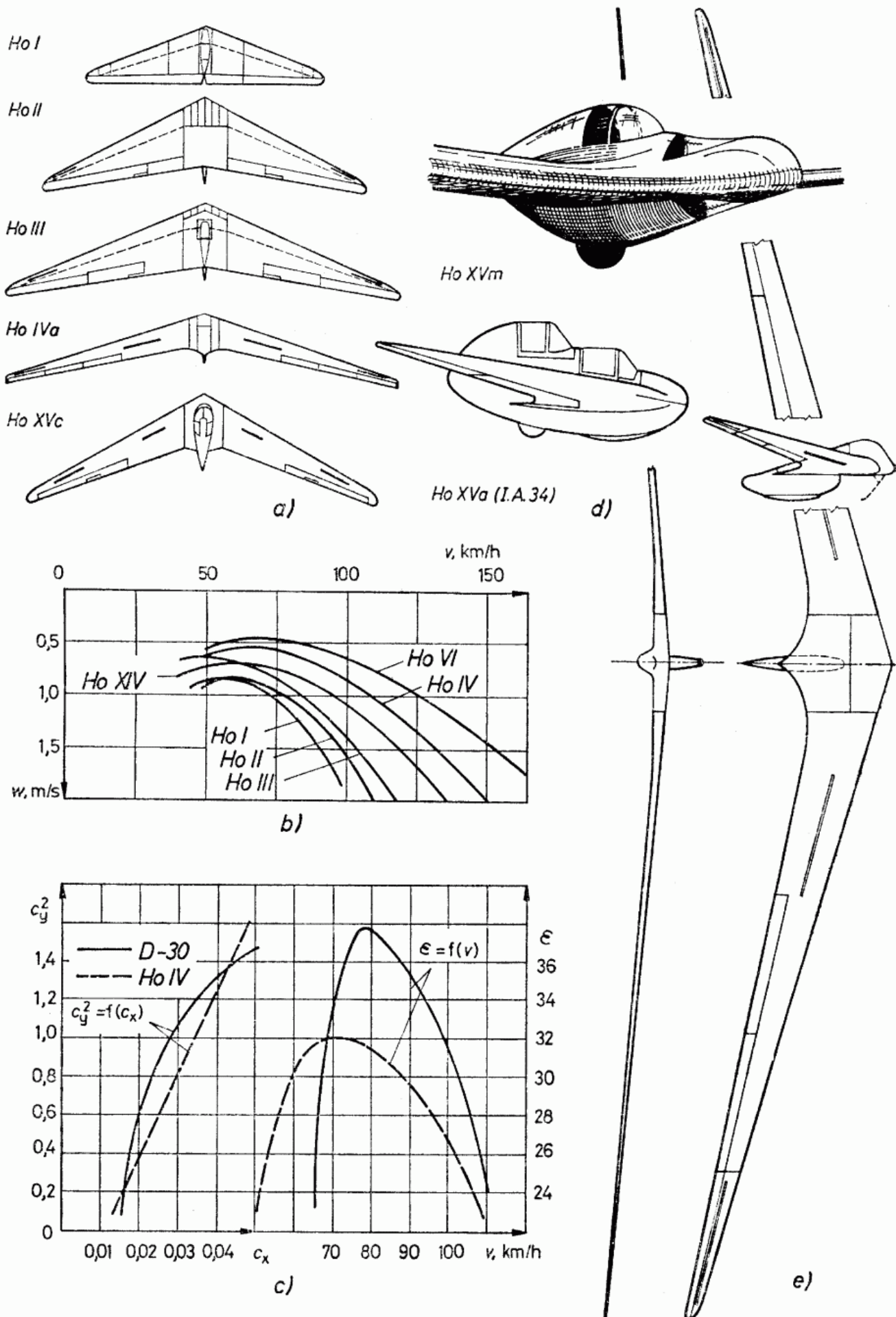
Nem volna teljes a csupaszárny, ill. farok nélküli gépekről alkotott képünk, ha nem emlitenénk meg még néhány olyan további jellegzetességüket, amely alkalmazásukra hatást gyakorolt.

Az első a nyilazott szárnyak kisebb $c_{y\max}$ értékével kapcsolatos. Ez a viszonylag nagyobb leszállósebességben jelentkezik károsan, amelyet főként a felületi terhelés kis értéken tartásával lehet ellensúlyozni. Az ívelőlapok erre a célra való alkalmazhatósága korlátozott, mert nagyobb kitérítésükkor túlságosan nagy fejnehéz nyomatókat hozhatnak létre. Az ívelőlapok alkalmazásához azonban előnyös, hogy itt megszakítás nélkül végigvihetők a kilépőél mentén, a törzs nem áll ennek útjában. Így fesztávolságuk és ezzel hatásosságuk is növelhető, kitérítésük szükséges mértéke pedig viszonylag csökkenthető.

Egyenesszárnyú gépeknél felszálláskor a magassági kormány felfelé való kitérítése „földhöz ragadást” okozhat. Bár a felfelé kitérített magassági kormány a szárny állásszögét növeli, a talaj közelsége miatt fellépő diffúzorhatás alatta olyan nyomáscsökkenést hozhat létre, amely a felhajtóerőt jelentősen lecsökkenti, és a levegőbe emelkedést hátráltathatja. A jelenség kiküszöbölésére egyes gépeknél (l. a 152. ábrán a *BP—3* szovjet gépet) a magasságikormány-felületet a kilépőél mögött helyezték el.

Az iránystabilitás kérdése nyilazott szárnyaknál nagy állásszögek mellett általában már a nyilazás tényével megoldott. Nehézséget okoz azonban az irányváltoztatás: E célra leginkább a szárnyvégeken elhelyezett kisméretű, külön-külön kitéríthető féklapok váltak be. A kis állásszögek melletti iránystabilitáshoz azonban mégis szükség van bizonyos méretű függőleges felületre.

Az egyenesszárnyú gépekkel kapcsolatban feltűnik még, hogy ilyen a nyilazott szárnyúakhoz hasonló, nagy oldalviszonnyal nem épült még. Ez e gépek hossz-stabilitási problémáival kapcsolatos. A nagy oldalviszony ugyanis kis szárnymélységet jelent. Az előzőekben láttuk, hogy a szárny nyomatójának alakulásában a húr hosszának is szerepe van. A kis húr hosszú, önmagában repülő egyenes szárny súlyponthelyzete tehát csak igen szűk határok között mozoghat, így stabilitási terjedelme is korlátozott.



3.3.1.2. Néhány megépült farok nélküli és csupaszárny vitorlázó repülőgép

B. I. Cseranovszkij Parabolája és Lippisch kísérletei után az első jelentős csupaszárny konstrukciók a *Horten* testvérek nevéhez fűződnek. *Hortenék* a nyílazott csupaszárny megoldásra törekedtek, és 1934–60 között számos ilyen típust hoztak létre (151. ábra). A motor nélküliek mellett segédmotorosokat és motorosokat, sőt csupaszárny szállító és harci repülőgépeket is terveztek.

Horten I gépüknél fő feladatnak még a repülőtulajdonságok kikísérletezését tekintették. Bár már a *Ho—II* géppel is kb. 1000 repült óra során gyűjtött tapasztalatot száznál több pilóta, első valóban sikeres gépük a *Horten III* típus és változatai voltak. Ezekből az 1938-as és az azt követő rhöni versenyeken több is indult. Egyéb eredmények mellett számos 6000 m-en felüli magasságot értek el velük. Siklőszámuk az akkori hagyományos gépekének felelt meg.

A szárnyközéprészben elhelyezett repülőgépvezető feje a jobb kilátás (és helyszűke) végett átlátszó, áramvonalazott burkolat alatt volt. A szárny középrészét acélcsőből készítették, a szárnyvégek pedig a szokásos faszerkezetűek voltak. A kilépőélen három kormánylapot láthatunk. Ezek közül a két külső csűrő- és magassági kormányként szolgált. Oldalkormányként a szárnyvégek alsó és felső felületéből kibocsátható féklapok működtek. Együttes működtetésükkel a sebesség csökkentésére voltak használhatók. A leszállósebesség csökkentésére a belső ívelőlapokat térítették ki lefelé. E gépek egyikének a szárnyközéprészét réselték a kisebb sebességű körözés lehetősége érdekében, mivel az áramlás a szárnyközéprészen a kiemelkedő fejburkolat miatt túlságosan hamar vált le. Az 1941-ben, ill. 1943-ban elkészült *Horten IV* és *VI* gépek $\lambda = 20$, ill. $\lambda = 30$ feletti oldalviszonyukkal már lényegesen jobb teljesítményűeknek bizonyultak a korabeli hagyományos kialakítású vitorlázógépekénél. $\varepsilon = 37$ siklőszámuk hosszú évekig utolérhetetlennek bizonyult. Szerkezetük a korábbiakhoz hasonló volt azzal az eltéréssel, hogy a jobb szállíthatóság kedvéért és a rezgési tulajdonságok javítására a hegesztett acélcsőből készült középrészhez csatlakozó külső részeket megosztották egy faszerkezetű középső és egy durából készült külső darabra. A repülőgépvezető az ellenállás további csökkentése érdekében hason fekve helyezkedett el az 1,6 m széles középrészben (131. ábra). A repülőgépvezető elhelyezkedésére szolgáló bölcső testméretei szerint állítható és párnázott volt. E testhelyzet — akárcsak a 60-as évek lengyel *Foka* gépének félig hanyatt fekvő helyzete — igen kényelmesnek bizonyult, és az ülőhelyzetnél még hosszú repülések alatt is kevésbé volt fárasztó. A hason fekvő repülőgépvezető ejtőernyője a kabintető e célra kiképzett tokjában foglalt helyet, amelyből ugrás esetén szabadon kicsúszott. A magassági és a csűrőkormány működtetése különleges kormánykerékszerű tolómechanizmussal, az oldalkormány szerepét betöltő szárnyvég-féklapok pedig lámpedállal voltak mozgathatók. A zuhanóféklapok kiengedett helyzetükben 60° -os siklőszöget tettek lehetővé. A megengedett legnagyobb sebesség lökéses időben 145 km/h volt.

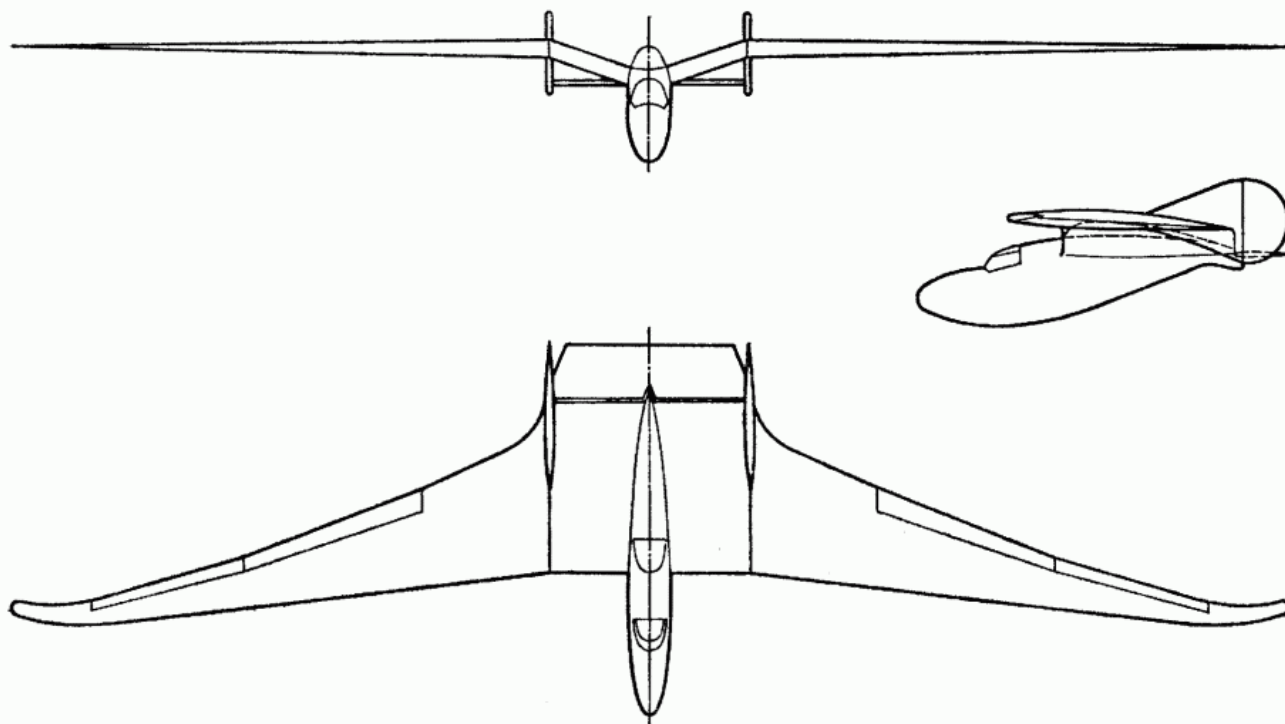
E gépeken kívül még az 1938. évből ismert a *Ho XI* jelű, csupán 8 m fesztávolságú, műrepülő vitorlázógépről, valamint az olimpiai játékokra tervezett, ugyancsak hason fekvő pilótaelhelyezésű *Horten XIV-ről* teszünk említést.

151. ábra. Nyílazott szárnyú csupaszárny vitorlázógépek

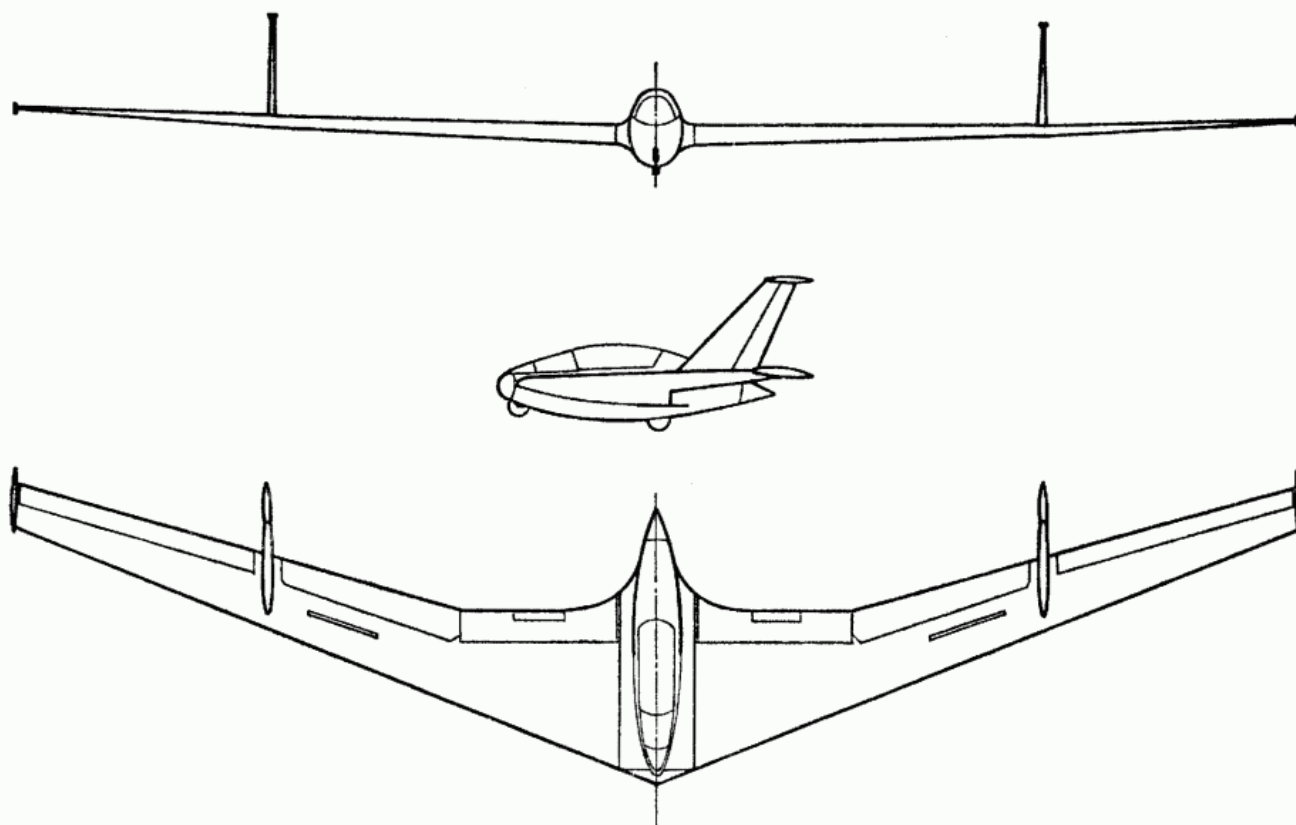
a) *Horten*-féle gépek elrendezése; b) sebességi görbék; c) a *D-30* és a *Ho-IV* aerodinamikai jellemzőinek összehasonlítása; d) a *Ho XVm* együlékes, és a *Ho XVa* (I. A. 34) kétülékes változat; e) *Ho VI*

A 151a ábrán látható *Horten XV* az 1949—54-es évek között többféle változatban készült. A *Ho XVa* egymás mögötti, a *Ho XVc* pedig egymás melletti elrendezésű kétülésként. A *Ho XVm* ismét együléses volt (151d ábra).

Nem hagyhatjuk figyelmen kívül az 1936-ból származó, rendkívül érdekes elrendezésű *BP—3* jelű szovjet kétülékes, előrenyilazott szárnyú, farok nélküli gépet sem.



152. ábra. *BP—3* előrenyilazott csupaszárny gép



153. ábra. *SZD—20X Vampire 2*

Csúpszárny, farok nélküli és kacsá vitorlázó repülőgépek

6. táblázat

Típus	Épült db	b m	F m^2	λ	$G_{\text{ü}}$ kp	G_{max} kp	G/F kp/ m^2	$\varepsilon/v_{\text{opt}}$	$w_{\text{min}}/v_{\text{gazd}}$	Év
Csúpszárny										
<i>BICS 1 Parabola</i>	1	10	20	5	50	120	6			
<i>Ho—I</i>	2	12,4	21,2	7,3	120	210	9,9	21/67	0,8/55	1934
<i>Ho—II</i>	4	16,5	32	8,5	265	365	11,4	23/65	0,73/56	1935
<i>Ho—III</i>	18	20	37,5	10,6	260	360	9,6	24/65	0,64/48	1938
<i>Ho—IV</i>	5	20	19,1	21,4	240	330	17,6	37/87	0,50/65	1941
<i>Ho—VI</i>	2	24,2	17,1	32,2	330	430	25	43/90	0,48/65	1943
<i>Ho—XI</i>	1	8								
<i>Ho—XIV</i>	2	16	16	16	150	240	15	30/75	0,63/50	
<i>Ho—XV</i>	kb. 25	18	28,2	11,4		450	16	24/(?)	0,75/(?)	1949
Farok nélküli										
<i>SD—6X Nietoperz</i>	1	12	14,4	10	150	235	16,3	17/90	1,35/80	1951
<i>SZD—20X Vampir 2</i>	1	15	15	15	175	250	16,7	25/83	0,85/70	1959
<i>EPB—1 Flying Plank</i>		8,1	10	6,6				20/(?)	1/(?)	
<i>AV—36 Monobloc</i>		12	11,2	12,8	120	220	19,6	26/(?)	0,80/(?)	
Kacsá-gép										
<i>IS—5 Kaczka</i>	1	11,6	10	13	120	206	20,5		1,26/76	

Ismereteink ugyan hiányosak e gépről, de érdekessége folytán joggal tekinthetjük egy igen fontos megoldásnak (152. ábra). Az előrenyilazáson kívül a közvetlenül a szárnyközéprész mögött elhelyezett, vezérsík nélküli magassági kormány keltheti fel figyelmünket, amely a kilépőél mögé nyúló függőleges vezérsíkokon volt csapágyazva. Ezt a megoldást — több mint harminc év után — legújabbán a stuttgarti FS—26 segédmotoros gépnél látjuk viszont. Az egymás mögött, ill. a jobb kilátás érdekében egymáshoz viszonyítva függőlegesen is eltolt üléselrendezéssel hagyományos kialakítású vitorlázógépeken is találkoztunk azóta (ill. a *Horten XVa* csupaszárnynál).

A hátranyilazott szárnyú farok nélküliek családjába tartozott az 1951-ben tervezett, lengyel IS—6X *Nietoperz* és az SZD—20X *Vampir 2* (1955—59) jelű kísérleti gép is. Az utóbbinál nyilván az áramlás szárnyvégirányú eltérülésének megakadályozására a függőleges irányfelületek a fél fesztávolság közepe táján, a kilépőél előtt emelkedtek a szárny felső, szívott oldala fölé (153. ábra). Ezekkel aztán a nyilazott szárnyú farok nélküli gépek sorának vége is szakad. A lamináris szárnyszelvények kifejlesztése és az új gyártási technológiák elterjedése — amelyek a valóban lamináris áramlás elérését lehetővé tették — a tervezők figyelmét elfordította ettől a kialakítástól.

Napjainkban az amatőr tervezők egy része (elsősorban az USA-ban) foglalkozik — nyilvánvalóan viszonylagos olcsósága miatt — egyenesszárnnyú farok nélküli gépek tervezésével. Ilyen pl. az EPB—1 *Flying Plank* (147c ábra), amelynek érdekessége a szárnyvégeken elhelyezett függőleges vezérsíkokból oldalra kinyíló, külön-külön oldalkormányként, együttesen féklapként működtethető felületek. Ugyancsak az alacsony beszerzési árnak köszönhető Ch. Fauvel AV—36 *Monobloc* jelű, teljesen faszervezetű, és teljesítményeivel a hagyományos kialakítású gépek közül ki nem tűnő, de amatőr- és klubhasználatra kitűnő farok nélküli kis gépének elterjedése.

A csupaszárny és farok nélküli vitorlázógépek fontosabb adatait a 6. táblázatban foglaltuk össze.

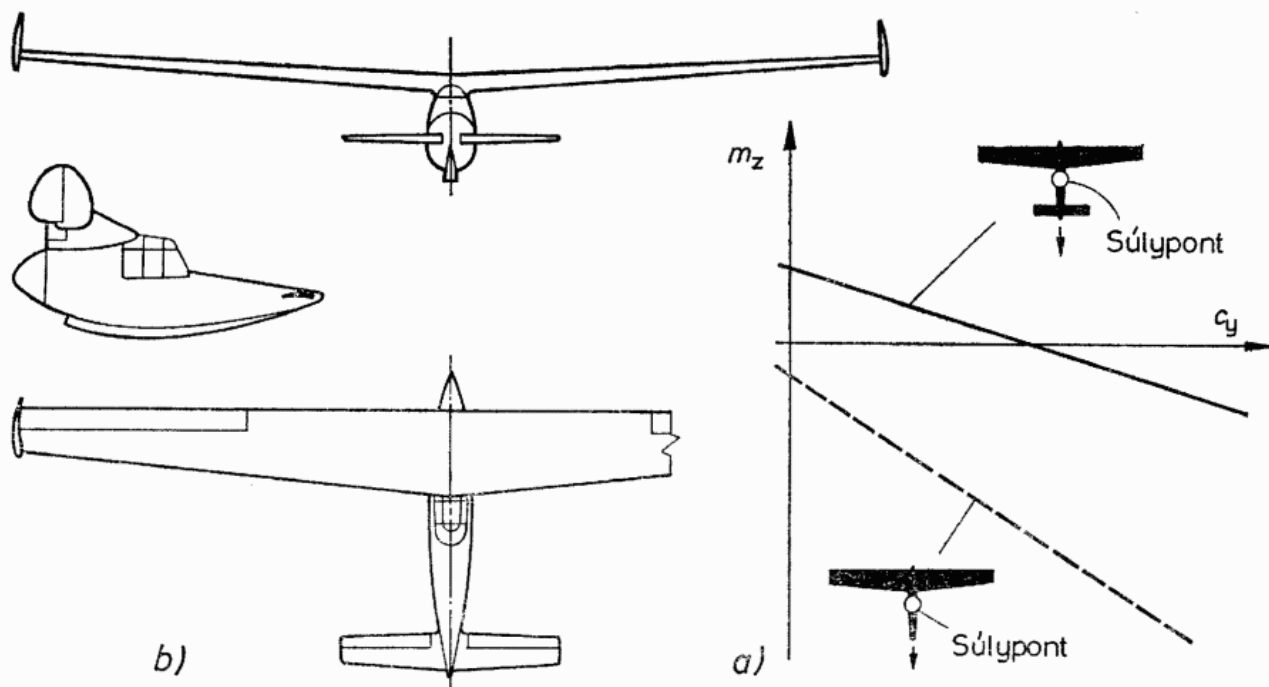
3.3.2. Kacsa-elrendezésű repülőgépek

A hossz-stabilitás megoldásának van még egy lehetősége. Ha a szokásos, ívelt szelvényű szárnyat a törzs vége felé toljuk el, és az aerodinamikai középpont (AC) így a gép súlypontja mögé kerül, stabil jelleget kapunk, de egyensúlyi helyzet nem hozható létre. A stabil jellegű egyensúlyi helyzetet ebben az esetben a törzs mellső részére, a szárnyhoz viszonyítva pozitív beállítási szöggel felerősített vízszintes felület hozza létre. Ebben a kacsa-elrendezésben tehát a szárny és a súly túlzottan stabil jellegű nyomatókát a farokfelület instabilizáló nyomatóka csökkentti olyan mértékűre, hogy a repülőgép statikusan stabil hossz-stabilitással rendelkezzen (154. ábra).

A kacsa-elrendezés igen régi eredetű, és már a *Wright* testvérek is ilyen módon oldották meg szerkezeteik hossz-stabilitását. Azóta azonban csak elvétve találkozunk ilyen megoldással, pl. a húszas években a dinamikus vitorlázás lehetőségeit kutató *Charlotte* gép, majd az 1949-ben épült lengyel IS—5 *Kaczka* esetében.

A kacsa-elrendezésű gépek szárnyának felhajtóereje mindig kisebb a gép súlyánál, mivel a pozitív beállítási szög miatt a vízszintes farokfelületen is keletkezik felhajtóerő, így a gép súlyának hordozásában az is részt vesz. Mivel a farokfelület állásszöge a szárnyénál nagyobb, az elrendezés előnyös tulajdonságának tűnik, hogy a szárny nem esik át, mert azt mindig megelőzi a farokfelület átesése, és ezzel a szárny állásszögének csökkenése. E látszólag előnyös tulajdonság a valóságban kellemetlen jelenségekkel jár együtt.

A hagyományos elrendezésű repülőgépek szárnya hamarabb éri el a kritikus állásszöget, mint a vízszintes farokfelület, így átesése közben a kormányozhatóság és



154. ábra. A kacsarepülőgép hossz-stabilitása (a); IS—5 Kaczka (b)

a stabilitás fennmarad. A kacsá-elrendezésnél viszont, ha előbb a szárny éri el a kritikus állásszöget (pl. széllekedés miatt) és csak azután a farok, a stabilitás megszűnik. Ha pedig a farokfelület esik előbb át, akkor ugyan a hossz-stabilitás fennmarad, de megszűnik a kormányozhatóság, és a szárnyal elérhető $c_{y\max}$ értéke is csökken. A probléma enyhítésére különféle megoldásokat gondoltak ki. Egy lehetséges megoldás a kacsá-helyzetben levő magassági kormány és a szárny kilépőélén elhelyezett ívelőlap kitérésének kombinációja úgy, hogy az egyik trimmként, a másik kormánylapként működik egyidejűleg.

A kacsá-elrendezés további hátrányos tulajdonsága a farokfelület és a szárny körüli áramlás egymásrahatásából származik. A hagyományos elrendezésnél a szárny mögötti leáramlás a viszonylag kisméretű farokfelületre gyakorol hatást. A kacsá-elrendezésben a farokfelület által megzavart áramlás csökkenti a szárny effektív állásszögét és ezzel a rajta keletkező felhajtóerő nagyságát. Az egymásrahatás ezen kívül stabilitási nehézségeket is okozhat.

A kacsá-elrendezésű vízszintes farokfelületnek a törzs végén közepén elhelyezett függőleges irányfelületre gyakorolt hatása a statikus iránystabilitás elégtelenségében jelentkezik különösen nagy állásszögek, azaz kis sebesség mellett. A stabilitás csökkenése abból származik, hogy a hátul elhelyezett szárny indukált ellenállása (amelynek megváltozása hagyományos gépek esetében jelentős szerepet játszik a statikus iránystabilitás kialakulásában) itt nem jelentkezik a szükséges mértékben. A kielégítő iránystabilitás elérésére pl. a Kaczka esetében a szárnyvégeken helyezték el a függőleges felületeket (l. az ábrát). A kacsá-elrendezés további hátránya, hogy a törzs mellő végén levő farokfelület nagyon zavarja a kilátást a repülés irányába, és a hosszú törzsről lefelé is erősen akadályozza azt.

A felsorolt okok miatt a kacsá-elrendezésű repülőgépek a vitorlázórepülésben — néhány kísérlettől eltekintve — nem terjedtek el.

Az IS—5 Kaczka néhány adata: A szárny szelvénye Peyret-féle S-profil. A farokfelület Gö 549 szelvényű. Legnagyobb megengedett siklási sebessége 180 km/h. A gép érdekessége még a függőleges tengely körül szétnyíló törzsféklap. Egyéb adatai a 6. táblázatban találhatók meg.

4. A vitorlázó repülőgépek szilárdsága

Működése közben minden szerkezet különféle erők hatásának van kitéve, amelyeknek üzeme biztonsága érdekében kellő szilárdsággal ellen kell állnia. Különösen vonatkozik ez a repülőgépekre, amelyek megfelelő szilárdsága alapvető életbiztonsági feltétel.

A következőkben azokat a repülési mozzanatok vizsgáljuk meg, amelyek a vitorlázó repülőgép üzeme közben fellépő terhelések alakulására nézve jellemzők. A terhelések ilyen jellegű csoportosítását *terhelési eseteknek* nevezzük. Közülük itt a legfontosabbakkal foglalkozunk.

Az egyenletes sebességű, egyenes vonalú pályán sikló vitorlázó repülőgép G súlyával a szárnyon keletkező R légerő tart egyensúlyt. A siklási pálya ferdesége miatt az $Y = c_y q F$ felhajtóerő a gép súlyánál valamivel kisebb: $Y = R \cos \gamma = G \cos \gamma$. Ha a felhajtóerő és a súly arányát tekintjük, az ún. *terhelési többlest* kapjuk:

$$n = Y/G = \cos \gamma.$$

Példánkban a korszerű vitorlázó repülőgépek szokásos $1 : 20 \dots 1 : 40$ siklószáma (vagyis $\gamma = 1^\circ 25' \dots 2^\circ 50'$) mellett $n = 0,99970 \dots 0,99880$, azaz jó közelítéssel $n = 1$. A szárny a gép egyszeres teljes repülősúlyát hordozza.

A vitorlázó repülőgépek üzeme során azonban nem ez a legnagyobb terhelés. Az előbbi példához hasonló statikus jellegű terhelés a legritkább. A terhelések általában *dinamikus jellegűek*, és pillanatról-pillanatra változnak. A vitorlázó repülőgépet repülése közben széllekedések érik. A repülőgépvezető ezeket kormánymozdulatokkal ellensúlyozza. A többé-kevésbé egyenletes sebességű siklásokat fordulók szakítják meg, és az emelőáramlatokban körözve emelkednek. Ezekben az esetekben, amikor a mozgás iránya vagy sebessége (motor nélküli repülőgépek esetében általában a kettő egyszerre) változik, a gyorsulás következtében tehetetlenségi erők is fellépnek. Ilyenkor a felhajtóerő a gépsúlyhoz viszonyítva megnő, különösen a zuhanásból való felvételben vagy a különféle műrepülő alakzatok repülése közben annak többszöröse is lehet.

A terhelési többlest tehát repülés közben pillanatról-pillanatra *változik*, és ezt a változást részben a repülőgépvezető akaratan kívül ható tényezők (pl. széllekedések), részben pedig kormánymozdulataival és manőverezésével ő maga hozza létre.

A vitorlázó repülőgép szilárdságát jelentősen igénybe veszik a különféle indítási módok (csörlés, repülőgép vontatás), de fel- és leszállás közben a földdel való érintkezés is, különösen ha az nem a legjobban sikerült manőver során jön létre.

A vitorlázó repülőgépekre ható terheléseket *eredetük szerint* feloszthatjuk:

- légerőből származó terhelésekre;
- földi erőkből származó terhelésekre;
- egyéb terhelésekre.

Az egyéb terheléseken a következőket értjük: A vontatókötél által kifejtett erőt, a földön való mozgatás közben a mozgatószemélyzet által a szerkezetre gyakorolt erőhatásokat, a pilóta által a repülőgép kormány szerveire és ezeken keresztül a kormányfelületekre kifejtett erőket stb.

Amikor a repülőgépek szilárdságát vizsgálják, első közelítésben teljes egészét merev testnek tekintik, és nemcsak a külső erőket (légerők, földi erők stb.), hanem a gyorsulások mozgás következtében fellépő belső, tehetetlenségi tömegerőket is figyelembe veszik. A szerkezet igénybevételeit ezek együttesen hozzák létre. A külső erők és a tehetetlenségi erők a mozgás folyamán egyensúlyban vannak.

4.1. A légerőkből származó terhelések

A repülőgép repülésének az a jellegzetessége, hogy a legnagyobb terhelések általában szimmetriásíkjával párhuzamosan, pillanatnyi repülési irányára merőlegesen ébrednek. A következőkben mi is az e síkban ébredő erőket vizsgáljuk.

A repülőgép repülésének egy jellegzetes mozzanata a forduló. *Fordulóban* a repülőgép lefelé irányuló súlya mellett a körpályán való mozgás törvényei szerint $C = mv^2/r$ nagyságú centrifugális tömegerő is fellép. A kettő eredője helyesen repült fordulóban a δ dőlésszögű szárny felületére merőleges R légerővel tart egyensúlyt, a G súllyal pedig a légerők függőleges vetülete: $R \cos \delta$ (4. ábra). Ez azt jelenti, hogy fordulóban $R > G$. Bennünket azonban a pillanatnyi repülési pályára merőleges erők érdekelnek. Mivel az előzők szerint a γ siklószög miatt $Y = R \cos \gamma$, viszont az ábra szerint $R = G/\cos \delta$, ezért

$$Y = \frac{G}{\cos \delta} \cos \gamma.$$

Ezzel a terhelési többes

$$n = Y/G = \frac{\frac{G \cos \gamma}{\cos \delta}}{G} = \frac{\cos \gamma}{\cos \delta},$$

azaz a korábbi megállapítás szerint a kis siklószögek miatt $\cos \gamma = 1$ -et véve

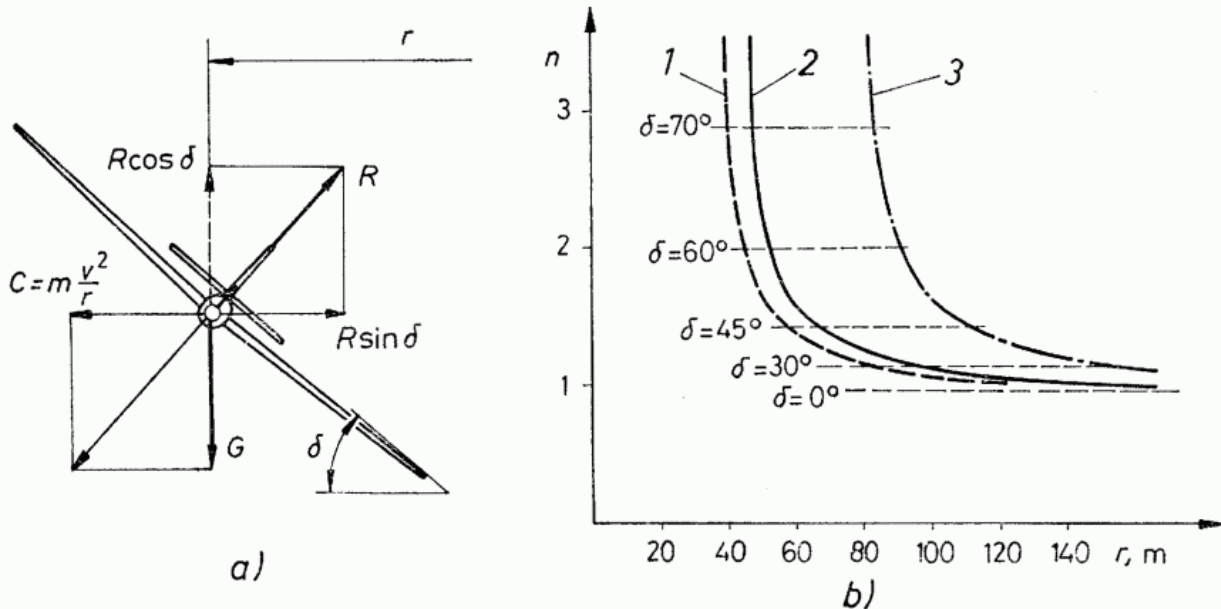
$$n = 1/\cos \delta.$$

A terhelési többes nagysága tehát fordulóban a *dőlésszög függvénye*, és a dőlésszög növelésével értéke nő. A légerők nagysága azonban többek között a repülési sebesség nagyságától függ. Adott dőlésszögű fordulót tehát különböző sebességekkel lehet repülni, amelyekhez más és más fordulósugár tartozik. Egy adott fordulósugár és sebesség esetén a terhelési többes azonban már csak a dőlésszög függvénye.

A 155. ábrán az SZD—32A Foka 5 vitorlázógép optimális körözési polárgörbéje alapján, valamint a vízballasztos SZD—38A Jantar 1 optimális és a lehető legkisebb

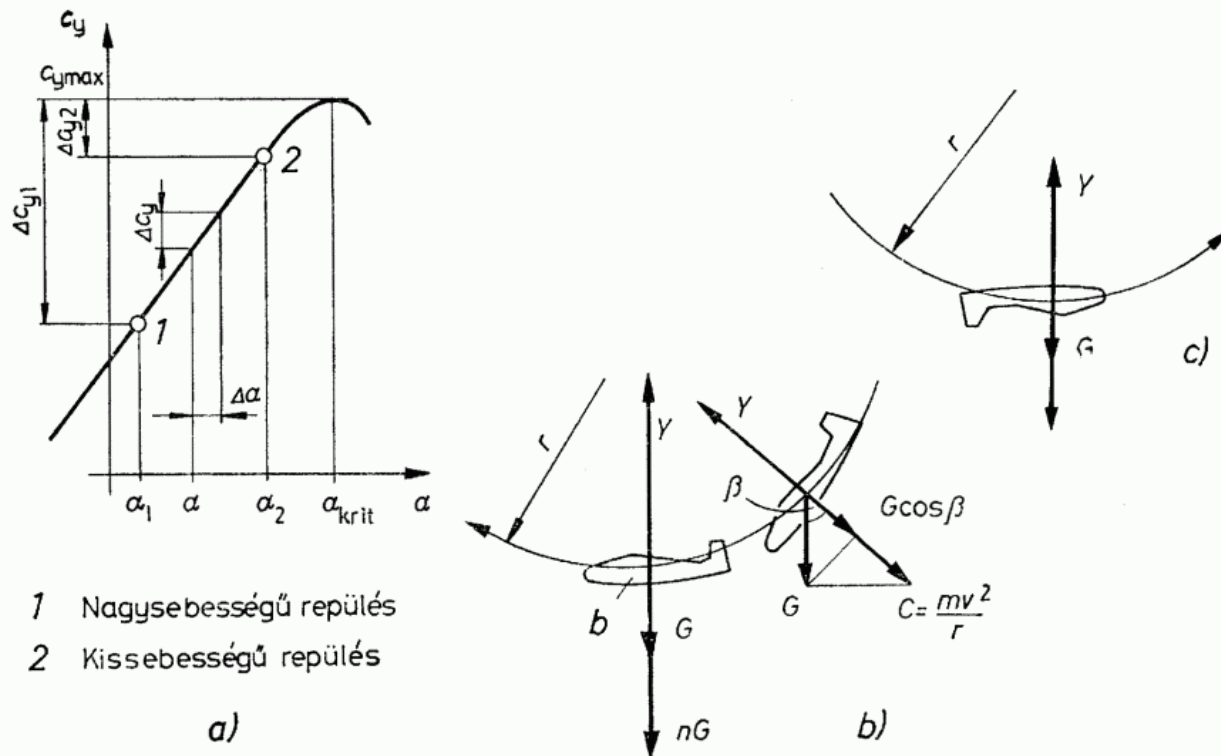
sebességekkel repült, azaz legkisebb sugarú fordulóihoz tartozó terhelési többségeket tüntettük fel a fordulósugar függvényében. Látható, hogy n értéke egyrészt a dőlésszög növekedésével, másrészt pedig a fordulósugar csökkenésével nő.

Hasonlók a jelenségek akkor, ha a repülőgépet meredek siklásból (zuhanásból) vesszük fel. A repülőgép vezetője ekkor a magassági kormány meghúzásával a gép hosszdőlési szögét megváltoztatja. Az áramlás iránya az első pillanatban még nem változik meg, ezért a szárny állásszöge megnő és ezzel a rajta keletkező légerők nagysága is. A felvétel függőleges síkú körpályán megy végbe, amelyre a repülőgépet az a felhajtóerő-növekmény kényszeríti, amely most a centripetális erő szerepét tölti be.



155. ábra. a) Fordulóban ható erők; b) a terhelési többség változása fordulóban

1 Jantar 1 ballasztal, legszűkebb; 2 Foka 5 optimális; 3 Jantar optimális



156. ábra. A felvétel különböző esetei

a) a felhajtóerő-tényező változása felvételnél; b) a felvétel erőviszonyai; c) háton felvétel

A körpályán való mozgással járó folyamatos irányváltozás miatt fellépő centripetális gyorsulás $C = mv^2/r$ centrifugális tömegerőt is létrehoz (156. ábra). A pillanatnyi pályairányra merőleges erők egyensúlya ezután:

$$Y = G \cos \beta + \frac{Gv^2}{gr}.$$

Az ábrából kitűnik, hogy a felvétel folyamán Y , C és G egymáshoz viszonyított pillanatnyi iránya állandóan változik, és a b helyzetben G és C teljes értékben adódik össze (mert ekkor $\cos \beta = 1$). Eredőjük ekkor a legnagyobb, és így

$$Y = G + C = G + \frac{Gv^2}{gr} = G \left(1 + \frac{v^2}{gr}\right).$$

A felvétel folyamán a *terhelési többes* is folyamatosan változik, és legnagyobb értéke:

$$n = Y/G = \frac{G \left(1 + \frac{v^2}{gr}\right)}{G} = 1 + \frac{v^2}{gr},$$

vagyis a sebesség négyzetének és a felvétel sugarának a függvénye: $n = f \left(v^2, \frac{1}{r} \right)$.

Más szóval: a kisebb sebességből, de kis sugáron való felvétel hasonló terhelést jelenthet, mintha az nagy sebességből, de nagy sugárral megy végbe. A nagy sebességből kis sugáron való felvétel két okból is veszélyesebb lehet:

Mondottuk, hogy felvételnél az első pillanatban az áramlás iránya még változatlan marad, s ezért az állásszög nő (156. ábra, $\alpha + \Delta\alpha$). Az állásszög növekedésével a felhajtóerő-tényező értéke is megnő $\Delta\alpha$ -nak megfelelő Δc_y értékkel, és ez a felvétel sugarától függően a $c_{y \max}$ -ot is elérheti. Ezt követően az áramlás leválik a szárnyról és a gép átesik. A felvétel közben előállított Δc_y felhajtóerő-tényező-növekmény azonban felhajtóerő-többletet hoz létre, ami — amint láttuk — jelentős terhelés-növekedést okoz. Ez a terhelésnövekedés a sebességgel négyzetes arányban nő a légerők törvényszerűségei szerint, vagyis ugyanakkora $\Delta\alpha$ állásszögnövekménnyel nagyobb sebességnél lényegesen nagyobb terhelést hoz létre, mint kisebb sebességekkel.

A *felrántáskor* elérhető legnagyobb felhajtóerő-tényező értéke $c_{y \max}$. Nagy állásszöggel (α_2), azaz kis sebességgel repülve $c_{y \max}$ eléréséig viszonylag kisebb Δc_{y2} felhajtóerő-tényező-növekményt hozhatunk létre a felrántással, mintha azt kis állásszöggel (α_1), azaz nagy sebességgel repülve kezdjük el. Ez utóbbi esetben $c_{y \max}$ eléréséig nagyobb Δc_{y1} növekményt hozhatunk létre, amely természetesen a nagyobb sebességgel négyzetesen arányos terhelést hoz létre. Kis sebességek esetében a felvétellel létrehozható terheléseknek $c_{y \max}$ elérése szab határt. Ugyanez azonban nagy sebességeknél már elviselhetetlenül nagy terhelést jelentene.

Az SZD—32A Foka 5 gép felhajtóerő-tényezője $v = 250$ km/h sebességnél $c_y = 0,1365$. Ha $c_{y \max} = 1,6$ a gépre nézve, akkor ennél a sebességnél felrántással előidézhető legnagyobb terhelési többes: $n = 11,7$. Ez pedig már lényegesen meghaladja e gép ezen sebességre meghatározott $n_{\text{törő}} = 6$ *törő terhelési többesét* is. Nagy sebességeknél tehát nem áll rendelkezésre valamely önműködő terheléskorlátozó eszköz — a kis sebességekhez hasonlóan —, hanem a létrehozott terhelések határa egyedül a repülőgépvezető elhatározásától és szilárdságtani ismereteitől függ.

A mai vitorlázórepülés gyakorlatában a felvétel vagy felrántás különböző formáival gyakran találkozunk. Nagy állásszögű felvétel esete áll fenn a dugóhúzóból

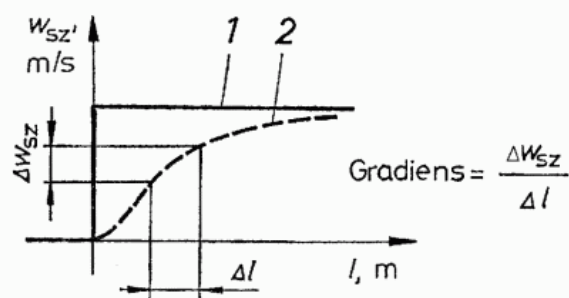
való kivételkor, amikor a pörgés megállítása után a zuhanó vitorlázó repülőgépet siklőhelyzetbe vesszük fel. Versenyek alkalmával az indulási vonalon elterjedt szokás szerint az előírt max 1000 m alatt lényegesen nagyobb magasságból való zuhanórepüléssel haladnak át, majd az így szerzett mozgási energia újra magassággá alakításához a gépet felrántják. A keletkező terhelési többes eközben jelentős lehet. Nagy terhelési többes léphet fel akkor is, amikor gyakran a gép legnagyobb sebességét megközelítő végsiklásból veszik fel a gépet a célvonal átrepülése után.

A felrántás közismert formája a *bukfenc*, amelyről később még lesz szó.

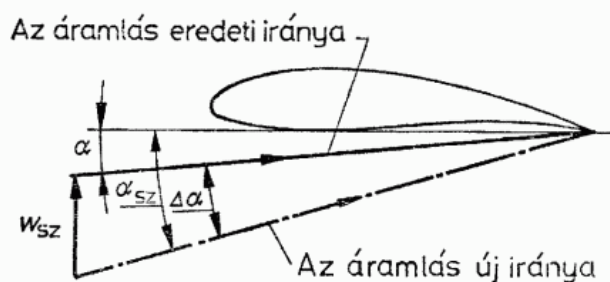
Különleges eset a *háton felvétel*, amikor a háton, negatív állásszöggel sikló vitorlázó repülőgépet a magassági kormány megnyomásával nagy negatív állásszögbe kényszerítik. A folyamat hasonló az előbbieken tárgyalt normál felvételhez, de itt az erők és a terhelések a vitorlázógéphez viszonyítva ellenkező irányúak. A folyamatot legszembetűnőbben az előrebukfenc esete jeleníti meg. A háton felvétel is végbe-mehet kis és nagy negatív állásszöggel. A terhelések alakulása pedig a tárgyaltakhoz hasonló. Az ilyen eseteket nevezzük *negatív terhelési eseteknek*.

Amikor a repülőgép termikus feláramlason halad át, annak felfelé irányuló sebessége, majd az ezt követő leáramlás sebessége függőleges irányú széllekésként jelentkezik. Függőleges széllekés hat a repülőgépre a légköri turbulencia következtében is, továbbá lejtővitorlázás és felhőrepülés közben is. A vitorlázórepülők különösen erős széllekésekkel találkozhatnak a hullámmemelőelőterek eléréséig való repülőgépvontatás alatt, az ún. *rotorokon* áthaladva.

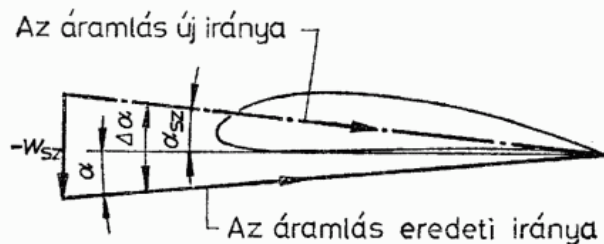
A *széllekés* jelentősége, hogy a lefelé vagy felfelé áramló légtömegbe került repülőgép nem képes azonnal annak sebességét felvéve vele együtt mozogni, hanem



a)



b)



c)

157. ábra. A széllekéssel kapcsolatos fogalmak

a) a széllekés gradiense; b) alulról ható és c) felülről ható széllekés

rövid ideig megtartja eredeti mozgási irányát, és ennek következtében el nem hanyagolható nagyságú többletterhelés keletkezik. A többletterhelés a függőleges széllekés sebességével és azzal az idővel arányos, amely alatt ez teljes értékét eléri, azaz a széllekés ún. *gradiensével*. Szélsőséges esetként vehetjük, amikor a széllekés legnagyobb sebessége egyik pillanatról a másikra átmenet nélkül lép fel (157a ábra 1 görbe). Szerencsére ez az eset csak elméletben fordul elő, és a széllekés mindig átmenettel jelentkezik (az ábra 2 görbéje). A vitorlázó repülőgépek szilárdsági méretezések egyes esetekben elfogadott annak feltételezése, hogy a függőleges szélsősebesség folyamatosan növekedve, a repülőgép előre haladásának minden métere után legnagyobb értékének eléréséig 1 m/s-mal növekszik, vagyis:

$$a \text{ gradiens } \Delta w_{sz}/\Delta l = 1 \text{ m/s/m.}$$

A felvétellel kapcsolatban elmondottak után könnyen belátható, hogy a függőleges széllekés is különösen kis állásszögű, azaz nagy sebességű repülés közben jelenthet tekintélyes terheléstöbbletet. A függőleges széllekés $\pm w_{sz}$ sebessége hozzáadódik a v pálya menti sebességhez (157b, c ábra), és a szárny állásszöge átmenetileg megváltozik: $\alpha_{sz} = \alpha \pm \Delta\alpha$. Az ezzel járó felhajtóerőtényező-változás a szárnyszelvény aerodinamikai tulajdonságaitól, pontosabban a szárnyra jellemző $dc_y/d\alpha$ értéktől függ: $\Delta c_y = \Delta\alpha a$. Ha a zavartalan szárny felhajtóerejét Y -nal jelöljük, akkor a széllekés következtében megváltozott felhajtóerő:

$$Y = c_y F \frac{\rho}{2} v^2 \pm \frac{w_{sz}}{v} a F \frac{\rho v^2}{2} = c_y F \frac{\rho}{2} v^2 \pm \frac{w_{sz} a F v \rho}{2},$$

vagy másképpen:

$$Y = G \pm \frac{1}{2} w_{sz} a F \rho v.$$

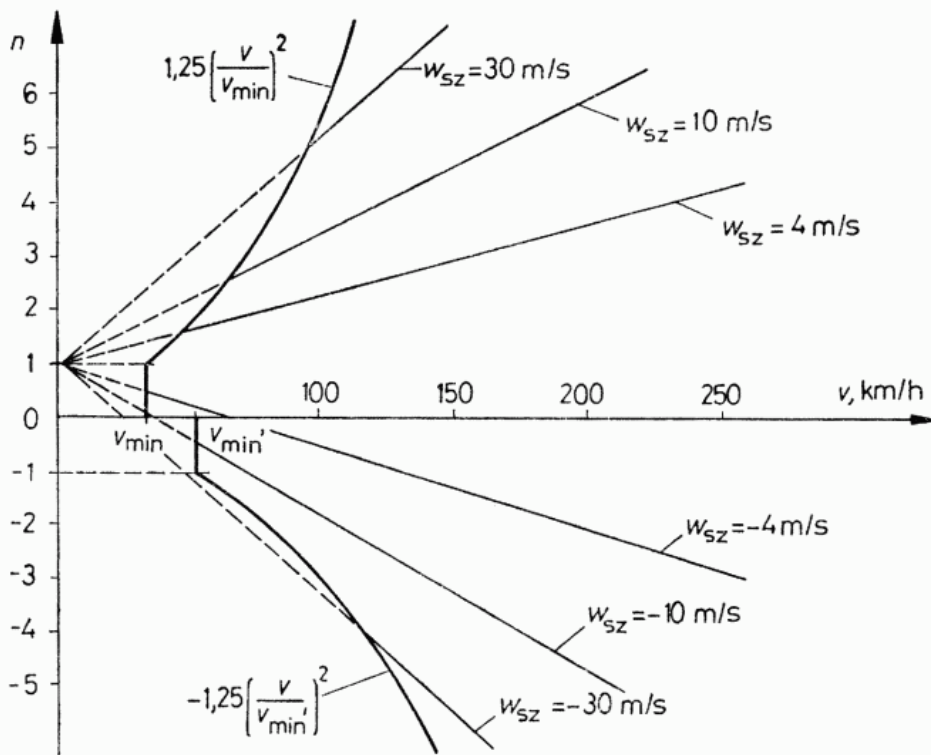
A keletkező terhelési többlet ezek után:

$$n = Y/G = 1 \pm \frac{a w_{sz} v \rho}{2 \frac{G}{F}},$$

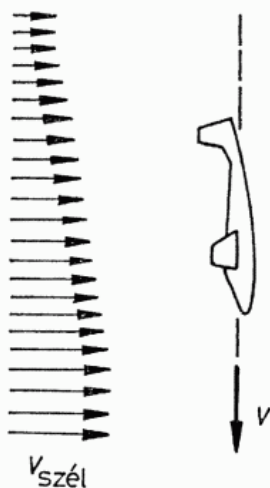
ill. nagysága a szárny aerodinamikai kialakításának, a siklási sebességnek, a széllekés sebességének és a gép felületi terhelésének függvénye: $n = f\left(a, v, w_{sz}, \frac{G}{F}\right)$.

Az SZD—30 Pirat vitorlázógép terhelési többletének változását 4 m/s, 10 m/s és 30 m/s sebességű függőleges széllekés esetén a 158. ábrán szemléltetjük.

A terhelési többlet növekedésének kisebb sebességek esetében a $c_{y \max}$ elérése szab határt a felvétel esetéhez hasonlóan. Ezt a határt az ábrán a pillanatnyi c_y (ez határozza meg v nagyságát) és a $c_{y \max}$ tényező (ez v_{\min} -t határozza meg) arányából adódó $\left(\frac{v}{v_{\min}}\right)^2$ hányados változása mutatja. Itt azonban az ún. dinamikus felhajtóerő-tényező maximumáról van szó. Ez alatt azt kell értenünk, hogy hirtelen állásszögváltozáskor a határréteg nem válik le azonnal a szárnyról, és így a $c_{y \max}$ felhajtóerő-tényező helyett egy nagyobb, $c_{y \max d}$ dinamikus felhajtóerő-tényező keletkezik. Általában feltételezik, hogy $c_{y \max d} = 1,25 c_{y \max}$ és ezért $n_{\max} = \pm 1,25 \left(\frac{v}{v_{\min}}\right)^2$. Nagyobb sebességek mellett azonban ez a határ már túlzottan nagy túlterhelést jelentene, ezért itt ismét



158. ábra. Szállókésből származó terhelési többes változása a sebesség függvényében



159. ábra. A vízszintes szélről származó szállókés értelmezése

a repülőgépvezető mérlegelésének helyességén múlik a terheléseknek a később ismeretendő határok között való tartása.

A szállókés egyik különleges esete akkor áll elő, amikor a repülőgép függőleges zuhanásban (pl. felhőben vagy műrepülés közben) változó sebességű vízszintes lég rétegeken repül át (159. ábra). Az ekkor fellépő terhelési többes azonban általában sokkal kisebb a függőleges szállókések következtében előfordulóknál, mivel a vízszintes szélsébség függőleges gradiense általában kicsiny, vagyis az átmenet kevésbé hirtelen.

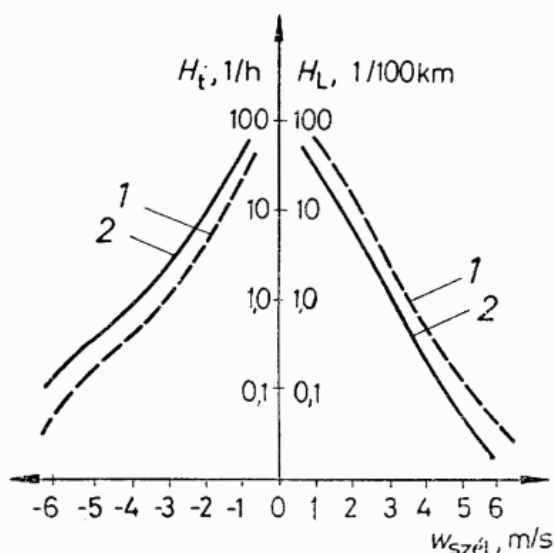
Szállókés a repülés minden helyzetében felléphet; így siklásban, felvétel közben, csörlő- vagy repülőgépvontatásos indításban, műrepülésben stb. A szállókés hatására keletkező többletterhelés a vitorlázó repülőgép pillanatnyi terhelési állapotához hozzáadódik. Veszélyessége éppen abban rejlik, hogy a repülőgépvezető akarától függetlenül bármely, esetleg éppen nagy terhelési többessel repült mozza-

natban is jelentkezhethet, és a gép terhelését a repülőgépvezető előtt ismeretlen mértékben megnövelheti. A széllelés káros következménye ellen egyedül a repülőgép megfelelő kialakítása és kellő szilárdsága, valamint a szilárdsága által meghatározott repülési korlátozások betartása véd.

E terhelési eset előfordulásának gyakoriságára a *Csernov*tól származó 160. ábra ad rendkívül érdekes adatokat: 2546 km távrepülés, ill. 54,4 óra termikrepülés alapján a különböző $\pm w_{szél}$ sebességű függőleges széllelések 100 kilométerenkénti H_L , ill. óránkénti H_t előfordulását. Eszerint az 1...2 m/s sebességű széllelés igen gyakori, száma óránként és 100 kilométerenként egyformán 50...100-ra tehető. Az ábrázolt legnagyobb, ± 6 m/s sebességű függőleges széllelés előfordulása már jóval ritkább, 100 kilométerenként mindössze 0,02 volt. Talán még érdekesebb ennél a szintén *Csernov*tól származó 161. ábra, amelyen az *L-13 Blanikkal* 424 óra levegőben töltött idő folyamán regisztrált terhelési többségeket láthatjuk a csúcstértek óránkénti gyakoriságával ábrázolva (1). Ezen az ábrán külön fel vannak tüntetve a széllelésből származó terhelések (2). Látható, hogy kb. $n = 2,6$ -ig ezek az előforduló legnagyobb terhelési többségek nagyságának mintegy 60%-át érik el. Sajnos egyik ábrával kapcsolatban sincs adatunk arról, hogy a regisztrálás milyen repülési sebesség mellett történt, ami a megengedhetőség kimerítésének mértékéről is képet adhatna. A diagramok egyébként szovjetunióbeli időjárási viszonyokat ábrázolnak. Más körülmények között ezekről kisebb-nagyobb eltérések lehetségesek.

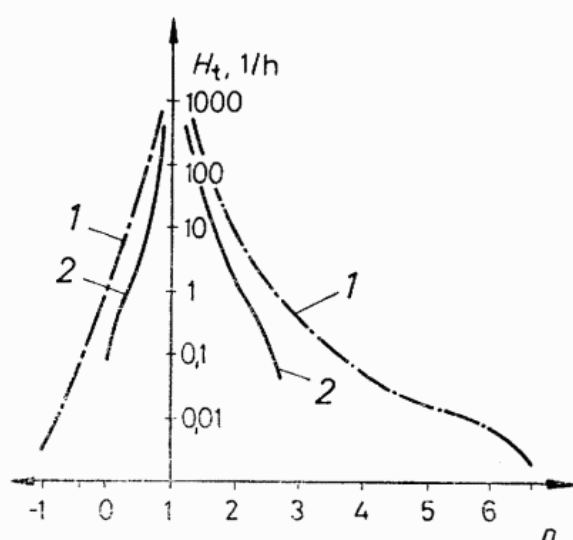
Amikor a széllelés különféle eseteit tárgyaljuk, nem hagyhatjuk figyelmen kívül a csörlőindítást és a repülőgép-vontatást sem. A vitorlázó repülőgép mindkettőnél *kötött pályán* halad, és ez a többletterhelések alakulását lényegesen befolyásolja.

Csörlőindításban a súlypont közelében bekötött csörlőkötél mintegy kényszerpályára készíti a vitorlázó repülőgépet, amely ezért a széllelések hatására (amelyeknek most az emelkedési pálya pillanatnyi szakaszára merőleges összetevőjét kell figyelembe venni), nem térhet ki pályájáról le- vagy felfelé, így a széllelés hatására csörlésben nem keletkezik a pályára merőleges irányú gyorsulás. Ha a mozgás gyorsulós (pl. felvételnél), a szárny súlyától a gyorsulás miatt keletkező tehetetlenségi erő a felhajtóerővel ellenkező irányban hatva csökkenti annak terhelését. Mivel

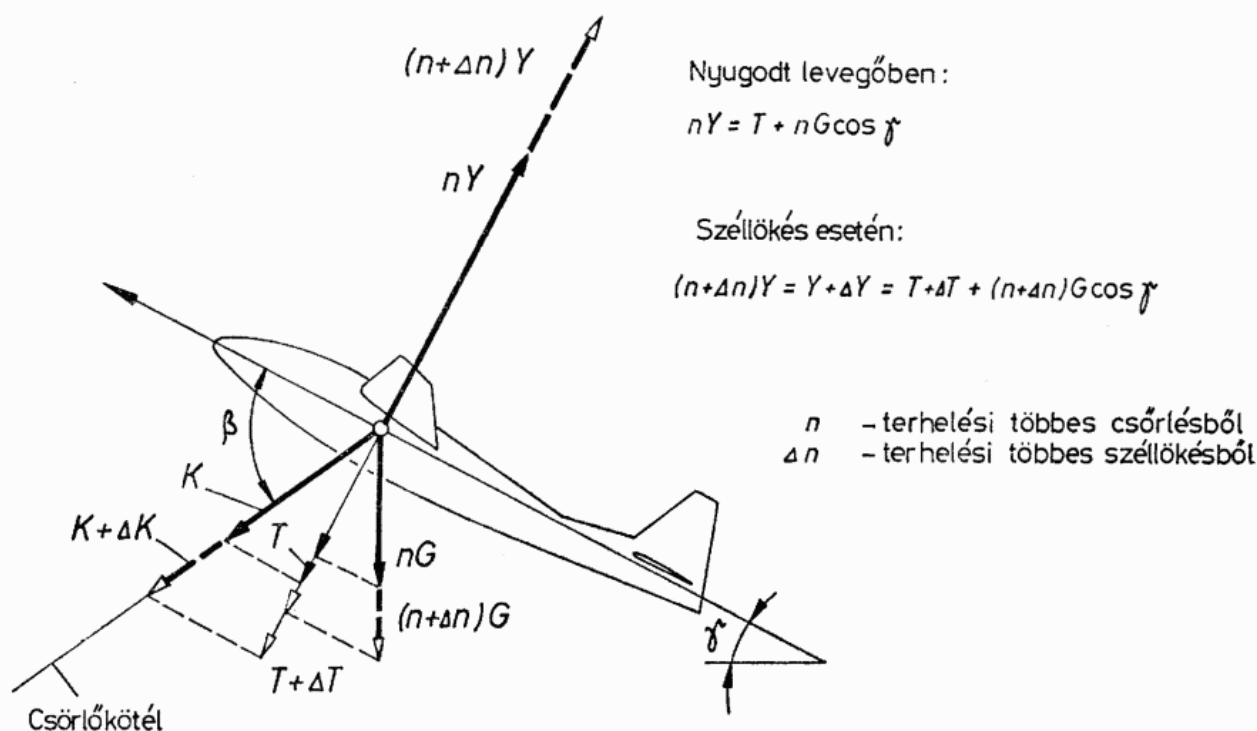


160. ábra. A függőleges széllelés sebességének gyakorisága (*Csernov*)

1 az óránkénti; 2 a 100 km-re eső előfordulás gyakorisága



161. ábra. A függőleges széllelésből származó terhelési többségek gyakoriságának eloszlása (*Csernov*)



162. ábra. Csörlés közbeni szállókés erőviszonyai

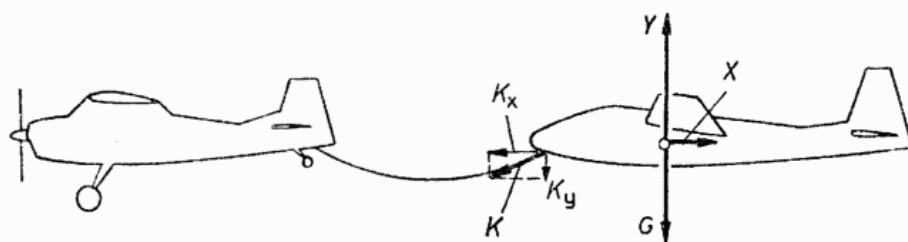
csörlésben a szállókés hatására nem jöhet létre gyorsulás, ezért a szárnyat a teljes felhajtóerő veszi igénybe, és ez ilyenkor nagyobb, mint a szabad repülésben (162. ábra).

A megnövekedett terhelést végső fokon a csörlőkötél veszi fel, amely ilyen szempontból kényszerszakadási helyet is jelent. A szárny túlzott terhelésének elkerülésére ezért indokolt a csörlőkötélbe géptípusonként változó, előírt szakítószilárdságú *biztonsági szakadóbetét* beiktatása.

Valamivel kedvezőbb a helyzet *orrcsőrlésben*. Ekkor ugyanis, ha a szállókés bizonyos sebesség fölé nő, a magassági kormány átesik, és a repülőgép a kötélhorgon keresztirányban átmenő képzeletbeli tengely körül előrebillen, így a szárny állásszöge, vele együtt pedig a terhelés lecsökken.

Az igénybevétel mindkét csörlésfajtánál akkor lehet a legnagyobb, amikor a pillanatnyi haladási irány és a csörlőkötél által bezárt β szög a legnagyobb. Meg kell még azt is jegyeznünk, hogy mivel csörlésben a repülőgép földhöz kötötten mozog, ezért a vízszintes irányú szél sebességében beállt változások is az előzőkhöz hasonló módon növelik a terheléseket.

Repülőgépvontatásban a vitorlázó repülőgép a vontatókötél közvetítésével a rendszerint nála nagyobb tömegű — vontatógéppel van kapcsolatban (163. ábra), s a szállókés pillanatában ezért nem tudnak a gyorsulások a szabad repüléshez hasonlóan kifejlődni. A megkötöttség azonban itt nem olyan teljes, mint a csörlésnél,



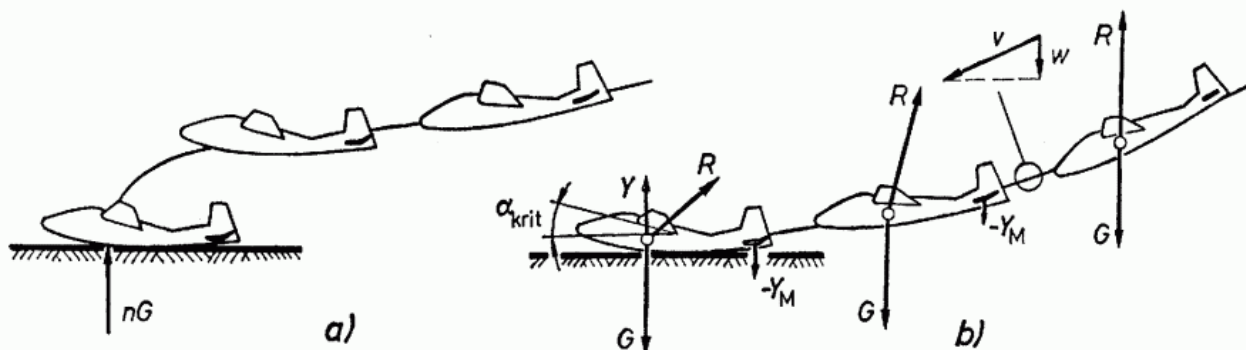
163. ábra. A repülőgépvontatásból származó terhelés magyarázatához

ezért jó közelítéssel feltételezhető, hogy a gyorsulások a szabad repülésben hasonló szélleőkés hatására fellépő értékének fele most is kialakul. A szélleőkés következtében megnövekedett légerőkkel tehát most részben a tömegerők, részben pedig — a csörlés esetéhez hasonlóan — a megnövekedett kötélérő tart egyensúlyt. A szárny tehermentesülése tehát itt bizonyos fokig érvényesül. A *terhelési többes*, ha a szélleőkés hatására szabad repülésben létrejött értékét Δn -nel jelöljük:

$$n = 1 \pm \Delta n \frac{G - 0,5G_{sz}}{G - G_{sz}}.$$

4.2. A földi erőkből származó terhelések

A földi erőkből származó terhelések közül a legfontosabbak a *leszálláskor létrejövő erők*. A 164b ábra a vitorlázó repülőgép leszállásának mechanikai viszonyait szemlélteti a besiklás egy pillanatától a földet érésig. A w merülősebesség (amely a besiklás folyamán a féklap használata miatt w_{min} többszöröse, pl. az SZD—30 Pirat gépe 100 km/h sebességgel $w = 8$ m/s) a felvétel és a kilebegtetés alatt a földet érésig $w = 0$ m/s-ra csökken. Ez az ideális eset azonban csak a legritkábban fordul elő. Sokkal gyakoribb a kisebb-nagyobb mértékben elhibázott leszállás, amikor a repülőgépet jelentős terhelések érik (164a ábra).



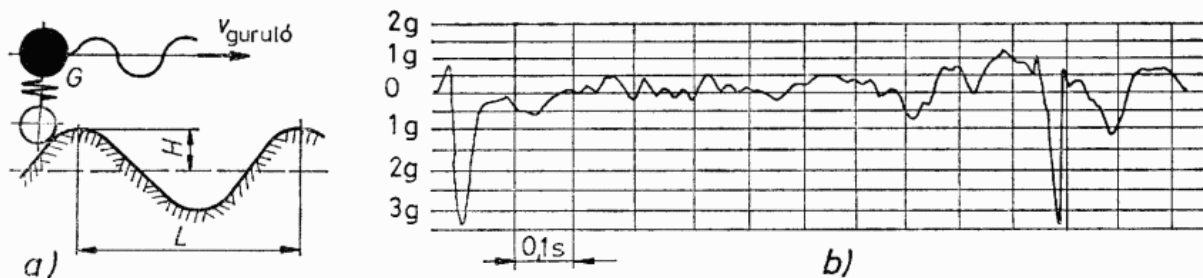
164. ábra. a) Átejtett, b) helyes leszállás

A szerkezet fokozott igénybevételét jelenti, amikor a repülőgép nagyobb magasságból *átejtve* ér földet. A merülősebesség ilyenkor meglehetősen nagy lehet, s a földön való felütődéskor keletkező negatív gyorsulás jelentős tömegerőket hoz létre. A helyes leszálláskor a gép mozgási energiáját a rugalmas elemek (kerék és rugózása), vagy ha ilyen nincs, az egész szerkezet rugalmassága emészti fel. Függőleges irányban a *terhelési többest* ekkor a következőképpen számíthatjuk:

$$n = \frac{w^2}{2g\eta s},$$

ahol η és s a rugalmas elemek munkavégzését jellemzi.

A földet éréssel azonban még nem tehermentesül a vitorlázó repülőgép szerkezete, hanem megállásáig még hosszabb-rövidebb ideig gurul a talajon. Tökéletes simaságú felületen a kigurulás zavartalan lenne, és a terhelési többes a lassulás folyamán csök-

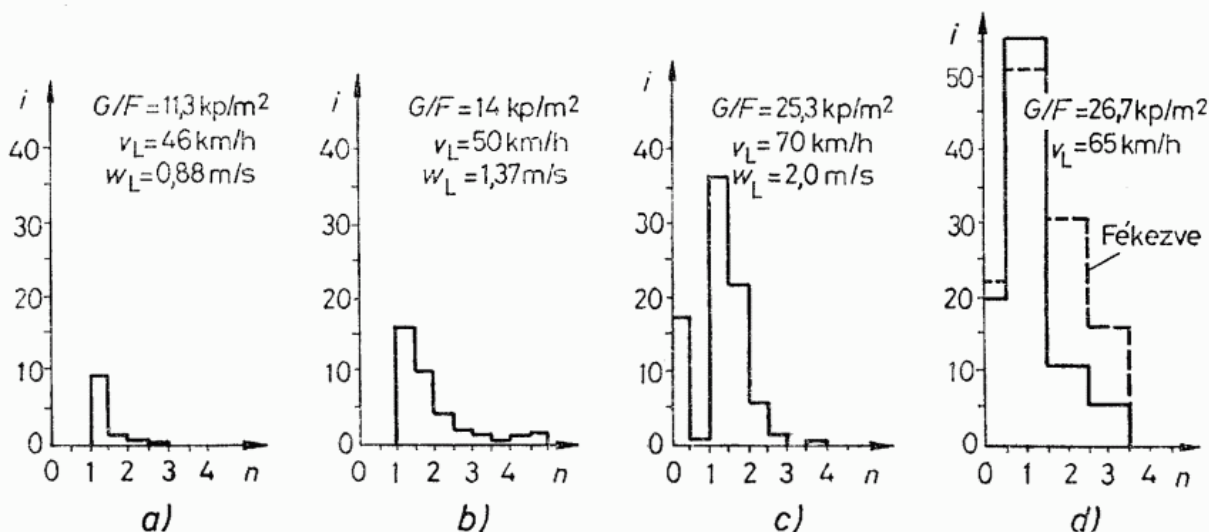


165. ábra. Talajegyenetlenségből származó függőleges gyorsulások leszálláskor (Gedeon)

kenne. A valóságban azonban a repülőterek talaja göröngyös, és a rajta gördülő repülőgép a 165a ábrán látható leegyszerűsített modellként kényszerpályán halad. A talajjal érintkező kerék a változó H magasságú egyenetlenségeken áthaladva függőleges irányú gyorsulásokat közvetít a gép tömegének, ezzel rajta tömegeket ébresztve. A kerék és rugózása, valamint a repülőgép rugalmas szerkezete részben csillapítóként hat a keréktől származó gyorsulások és az össztömeg között. A terhelési többes nagysága a gurulási sebességtől (ez viszont a felületi terheléstől és a repülőgép-vezető manőverezésétől), a talaj egyenetlenségeinek H magasságától és egymástól vett L távolságától, valamint a szerkezet csillapításától függ:

$$n = f(v_{\text{guruló}}, H, L).$$

A 165b ábrán Gedeon [5] méréseiből egy *R—08d Pilis* kigurulása közben gyorsulásmérővel rögzített g értékek változását látjuk az idő függvényében. A repülőtéri talaj egyenetlenségére jellemző, hogy míg a diagram szerint a függőleges gyorsulás értéke általában $1 \dots 2g$ között mozog, a nagyobb egyenetlenségek és gödrök néhány századmásodpercig tartó, $\max 4g$ -s lökést is előidézhetnek. Gedeon különböző típusú vitorlázógépeken számos mérést végzett a leszállás közben keletkező igénybevételek meghatározására. Méréseinek eredményét a 166a, b és c ábra szemlélteti, ahol a földet érés és kigurulás közben mért gyorsuláscsúcsok leszállásonkénti előfordulásainak száma látható $0,5g$ fokozatokban. Az ábrák összterülete a terhelések ismétlődési számával arányos. A *Vöcsök* esetében kis gyorsulások kevésszer ismétlődnek, a kétüléses *Ifjúság* leszállása ezzel szemben nagyobb és lényegesen többször ismétlődő gyorsulásokkal járt. Ez azt jelenti, hogy ez utóbbi szerkezete a nagyszámú igénybevétel hatására hamarabb fárad el.



166. ábra. A leszállás terhelési spektruma

a) *R—07b Vöcsök*; b) *R—08d Pilis*; c) *Z—03B Ifjúság* (Gedeon); d) *SZD—30 Pirat* (Stafiej)

A 166d ábra *Stafiej* munkája alapján az *SZD—30 Pirat* leszállásai közben mért terhelési többeseket és azt szemlélteti, hogy a gyorsulások nagysága a leszállás módjától is függ. A kerék fékezésével pl. a nagyobb n értékek gyakorisága nőtt, míg orral való földet éréskor éppen ezek az értékek csökkentek (legalábbis a függőleges irányú gyorsulások esetében).

A leszállás közben fellépő igénybevételek nagysága és i ismétlődési száma a szerkezet kifáradására lehet döntő jelentőségű. Ezért azoknál a repülőgépeknél, amelyek gyakran szállnak le (pl. iskola-repülőgépek), arra kell törekedni, hogy n és különösen i kicsiny maradjon. Ez kis leszálló- és merülősebességgel és a kis tömegű szerkezettel érhető el.

A leszállás különleges terhelési esetei közé tartozik, amikor a vitorlázó repülőgép csak orrával nagy sebességgel, vagy csak a farokkerékkel (farokcsúszóval) ér földet. Rossz talajon előfordulhat a gép orrának felütődése is. Főként oldalszélben való leszállásnál beperdülhet a vitorlázógép. Ilyenkor a földet érő szárny végén tangenciális irányú, a törzs földet érő részein pedig (futókeréken, farokcsúszón) oldalirányú erők lépnek fel. A gyorsulások ekkor összetettek, ugyanis a lefékezés miatti negatív pályairányú gyorsulás mellett a beperdülés forgó mozgásából szöggyorsulás is létrejön. A keletkező erők a gyorsulásokhoz hasonlóan bonyolult alakulnak.

Mivel a hibátlan leszállástól eltekintve a földi erőkből származó igénybevételek minden más esetben a repülőgépvezető akaratán kívül jönnek létre, azért általában nagyságuk alakulására nézve sincsen befolyása. A repülőgépeket azonban — figyelembe véve alkalmazási területüket is — tervezésük folyamán valamennyi megengedhetőnek ítélt terhelés elviselésére méretezik.

4.3. Egyéb terhelések

A légi és a földi erőkből származókon kívül még többféle terhelési esetet különböztünk meg. Ezek közül itt csak egyet tárgyalunk.

Repülőgépvontatásban vezetési hiba vagy légköri turbulencia miatt előfordul, hogy a *vontatókötél meglazul*. A vitorlázó repülőgépen ezért a vonóerő csaknem teljesen megszűnik, tehát lassulni kezd. A vontatógép ugyanekkor a terhelés nagy részétől megszabadulva gyorsul. Ha a vitorlázógép vezetője nem elég ügyes, a kötélt megfeszül, és a megfeszülés pillanatában a két gép sebessége között nagy Δv különbség lehet. A kötélt tehát nagyot ránt a vitorlázó repülőgépen, a kötélerő jelentősen megnő.

Tegyük fel, hogy a vitorlázógép a vontatógép mögött magasságkülönbség nélkül repül, tehát a kötélerő iránya közel a súlyponton megy át. A *legnagyobb kötélerő* a rántás folyamán:

$$K_{\max} = \Delta v \sqrt{\frac{k}{g}} \sqrt{\frac{G_v G}{G_v + G}},$$

ahol k a kötélt rugóállandója, kp/cm;
 G_v pedig a vontatógép súlya.

A gyakorlatban fellépő sebességkülönbségek elég nagyok ahhoz, hogy néha veszélyes nagyságú kötélerőket hozzanak létre. Ha a vitorlázógép nem pontosan a motoros gép nyomvonalában halad a kötélt megfeszülésének pillanatában, hanem pl. maga-

sabban, akkor a kötélrő kisebb ugyan, de lefelé irányuló komponense miatt a szárnyon a légerők a rántás következtében megnőnek, s ez még nagyobb igénybevételt jelent. Ezért igen fontos, hogy a vontatókötél szakítószilárdsága bizonyos biztonsági határt ne haladjon meg. Acélkötelek esetén okvetlenül indokolt a biztonsági szakadóbetétt alkalmazása vontatáskor is. Elképzelhető ugyan, hogy emiatt (a szakítóbiztosíték szakadásakor) a vontatás egy különleges nagy kötélrántás következtében félbeszakad, de ez még mindig jóval kisebb veszéllyel jár, mintha a túlterhelés a levegőben bekövetkező töréshez vezetne.

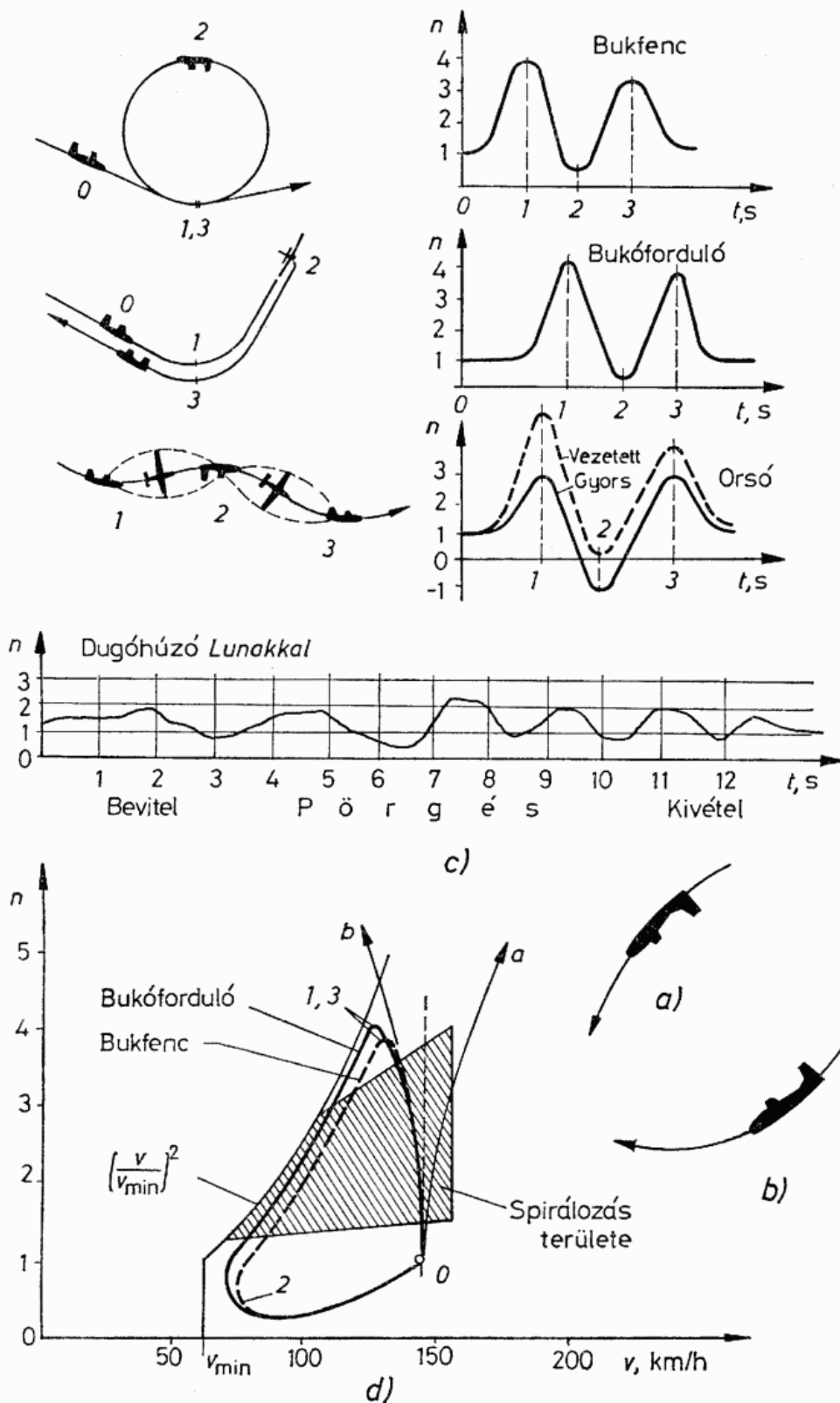
Kender vagy *műanyag* vontatókötél használata ezért az acélénál előnyösebb, mivel ezek lágyabb rugózása és jobb csillapító tulajdonsága miatt — egyébként ugyanakkora sebességkülönbségből származó rántás mellett — lényegesen kisebb kötélrők keletkeznek.

4.4. A vitorlázó repülőgép terheléseinek változása műrepülés közben

A repülés folyamán a különféle terhelési esetek folyamatosan mennek át egyikből a másikba. A leginkább összetett és egyben tudatosan létrehozott legnagyobb terhelések műrepülés közben lépnek fel. Ezek a terhelések a légerőkből származnak, és lényegükben a már ismertetett alapesetekből tevődnek össze. A repülőgép vezetője a terheléseket a különféle műrepülő alakzatok kezdési sebességének megválasztásával, és a végrehajtás elhatárolásától függő gyorsaságával tudatosan hozza létre. Módjában áll tehát azokat a megengedhető határokon belül tartani, vagy esetleges vezetési hibákkal túlterheléseket okozni.

Műrepülés közben az egyik leggyakrabban ismétlődő alapterhelési eset a *felvétel*. Kétféleképpen hajtható végre: a 167. ábrán látható *a* esethez hasonlóan, pl. háton repülésből való lehúzással, vagy a *b* esethez hasonlóan a normál zuhanórepülésből való felvétellel. Az *a* esetben a terhelési többes növekedése (a felvétel mélypontjáig) a sebesség állandó növekedésével jár együtt, míg a *b* esetben annak csökkenésével. Az *a* esetben a terhelési többes gyorsan nő, és legnagyobb értékét a lehúzás megkezdését követő jóval későbbi pillanatban, a zuhanás mélypontján éri el, míg a *b* esetben a maximális terhelési többest a repülőgép már néhány pillanattal a felvétel megkezdése után eléri. Berepüléseknél ezért célszerűbb egy adott terhelési többest a *b* esethez hasonló felvétellel előállítani, mivel *n* értéke ekkor könnyebben szabályozható a sebesség és a felvétel sugarának megválasztásával, mint az *a* esetben, ahol a pillanatnyi pályagörbület és a kezdeti sebességnövekedés is már jó előre befolyásolja a későbbi pillanatban fellépő terhelési többes értékét is.

A 167c és d ábrán *Stafiej* [17] és *Stepniewski* [18] kísérletei alapján a terhelési többesnek a különféle műrepülő alakzatok repülése közbeni változásait szemléltetjük. A c ábra bal oldalán a műrepülő alakzatok nyomvonalát látjuk, jobb oldalán pedig a terhelési többesnek az idő szerinti változását. A jellegzetes, szélső értékeket ábrázoló pontokat mindenütt azonos számozással jelöltük meg. A d ábrán a terhelési többes változását a sebesség függvényében ábrázoltuk. A helyesen végzett bukfenc a b felvételi esethez hasonló lefolyású. A legnagyobb terhelési többes az alsó felvételi pontban jön létre, nagysága általában $n = 3 \dots 4,5$, a legkisebb a felső 2 pontban, ahol



167. ábra. A terhelési többes változása műrepülés közben

a) és b) a felvétel kétféle módja; c) a terhelési többes változása műrepülés közben; d) műrepülés közben fellépő terhelés többes változása a sebesség függvényében

$n = 0,2 \dots 0,5$. A 3 pontban a terhelési többes általában nem nagyobb a kezdeti felvételnél mutatott értéknél, de gépvezetési hibából kifolyólag a bukfenc a 2 ponttól kezdve könnyen átalakulhat a alakú felvétellé, és a terhelési többes ekkor jelentősen megnőhet.

A legtöbb műrepülő alakzat, így a *bukfenc* végrehajtásához is a normális siklási sebességnél nagyobb és elegendő sebességtöbblet szükséges. Az ún. függőleges műrepülő alakzatokban ugyanis a sebességtöbbletből származó mozgási energia alakítható át magassággá. A sebességtöbbletnek tehát van egy még éppen elégséges legkisebb értéke, amellyel a *bukfenc* még éppen végrehajtható. A kezdeti sebesség nagysága a repülőgép felületi terhelésével arányosan nő.

A *bukfenc* kezdetén a sebességtöbblet (kezdeti sebesség) és a felvételi sugár szabja meg a terhelési többes nagyságát. *Bukfenc* közben pedig az a Δt idő (mivel ez a sebességre és a pályagörbületre egyaránt jellemző), amely alatt a *bukfencet* végrehajtják.

Az előzőkben elmondottak nemcsak a *bukfenc* esetére, hanem minden felvétellel járó műrepülő alakzatra érvényesek. A kelletténél nagyobb sebességből kezdett *b* fajtájú felvétel vagy valamely alakzatnak nagy kezdeti sebességnél *a* fajtájúvá válása olyan terheléseket hozhat létre, amelyek a megengedhető terhelést jelentősen meghaladhatják. A vitorlázó repülőgépek szerkezetére és üzemére vonatkozó előírások ezért — a vezetési hibákat is figyelembe véve — általában csak azoknak a műrepülő alakzatoknak a repülését engedik meg, amelyek a repülőgép engedélyezett, legnagyobb siklási sebességénél jóval kisebb sebességgel, általában $0,7v_{\max}$ -mal elkezdve biztonságosan kivitelezhetők.

A *háton repülésből elkezdett bukfenc* viszonyai az *a* fajtájú felvételéhez hasonlóak, és az elmondottak értelemszerűen ezekre is alkalmazhatók.

A *bukóforduló* terhelési viszonyai hasonlóak a *bukfenc*éhez. A *b* fajtájú felvétel hasonló nagyságú kezdeti sebességből megy végbe itt is, majd a terhelési többes rohamosan csökken — miközben a repülőgép emelkedve csaknem átesésig lassul —, hogy a 2 pontot követő zuhanórepülés végén ismét *b* fajtájú felvétel következzen. A terhelési többes változását a sebesség függvényében a 167d ábrán láthatjuk.

A műrepülő alakzatok között *gyors orsót* és *lassú* vagy *vezetett orsót* különböztetünk meg. *Stepniewski* mérései szerint a terhelések az előbbiben nagyobbak, mégpedig a gyors orsó kezdeti, *b* fajtájú felvételében $n = 4,8 \dots 5,2$, szemben a vezetett orsó ugyanezen fázisában mért $n = 1,9 \dots 2,9$ értékkel. A terhelési többes időbeli változása a lassú és gyors orsó folyamán a 167c ábrán látható.

A *dugóhúzó* terhelési viszonyai meglehetősen bonyolultak, és a terhelési többes nagysága igen sok tényezőtől, pl. a pörgési sebességtől, a hosszdőlés mértékétől, a merülősebességtől, a kormányok kitérítésétől stb. függ. Az ábrán a Budapesti Műszaki Egyetem által a *Lunak* típusú vitorlázógépen mért értékeket tüntettük fel az idő függvényében. A terhelési többes nagysága — amely a dugóhúzó jellegénél fogva csak csekély mértékben befolyásolható a repülőgépvezető által — a sebességtől függően általában $n = 1,5$ minimális, és $n = 4$ maximális érték között változik. A dugóhúzóból való kivétel *b* fajtájú és nagy állásszögű felvétel. Gyakran ez a legnagyobb terhelést jelentős fázis.

4.5. A vitorlázó repülőgépek építésének és légialkalmasságának feltételeire vonatkozó előírások

Az előzőkben általánosságban beszéltünk azokról a terhelésekről, amelyek a vitorlázó repülőgépeknél előfordulhatnak. E terhelések különféle megjelenési formáival azonban a különféle feladatokra készített vitorlázó repülőgépek nem egyforma valószínűséggel találkoznak. Az alapfokú kiképzési célokra használt gépek nem végeznek bonyolult műrepülést, viszont gyakran szállnak velük fel és le. A gépek sebessége általában korlátozott lehet, mert a kiképzés folyamán nincs szükség nagy sebességű siklásokra, ezzel szemben fel- és leszálláskor a gyakorlatlan repülőnövendék vezetési hibáival kell számolni. A korszerű teljesítmény-vitorlázógépekkel viszonylag kevesebbszer szállnak fel és le. E gépekkel már gyakorlott repülőgépvezetők repülnek, akik feladatuk teljesítése közben gyakran a megengedhetőség határát megközelítő sebességgel siklanak erős széllesek között is. A vitorlázó repülőgépeket ezért a feladataiknak megfelelő terhelések elviselésére tervezik, és légialkalmasságukat egyéb szempontok mellett szilárdságuk alapján ítélik meg.

A *légialkalmasság* megállapításakor azt határozzák meg, hogy az adott repülőgép szilárdsági és egyéb jellemzői alapján milyen körülmények között való repülésre, ill. milyen repülési mozzanatokra alkalmazható. A repülés biztonsága érdekében a légügyi hatóságok írják elő azt, hogy a különféle feladatú repülőgépeknek feladatuk betöltéséhez milyen feltételeknek kell megfelelniük.

Vitorlázó repülőgépek légialkalmassági feltételeire vonatkozó előírásokat több országban adtak ki, és a különböző országok légügyi hatóságai ezen előírások alapján ítélik meg a repülőgépek légialkalmasságát, ill. repülőgép-tervezők és -gyártók ezek feltételeit figyelembe véve tervezik és alakítják ki szerkezeteiket. Tapasztalati adatok és kísérletek alapján ezek írják elő azon legnagyobb terhelések nagyságát, amelyek elviselésére a vitorlázó repülőgépet méretezni kell, ill. azokat a korlátokat, amelyek a repülés során nem léphetők túl.

Magyarországon 1959-ig régebbi német előírások voltak érvényben. Vitorlázó-gépeink túlnyomó részét ezek szerint tervezték és építették.

A technika általános fejlődése miatt időnként ezeket az előírásokat is felülvizsgálják és korszerűsítik. Néhány, e könyv megjelenésekor érvényben levő előírás:

Magyarországon:

Vitorlázó repülőgépek szilárdsági előírása (VSZE 1959). Közlekedési és Postaügyi Minisztérium Légügyi Főigazgatósága, 31. sz. légügyi előírás. KÖZDOK, 1959. Budapest.

Lengyelországban:

Polish Civil Airworthiness Requirements, Section G—Gliders. Warszawa, 1964.

Angliában:

British Civil Airworthiness Requirements Section E—Gliders. Issue 2. Air Registration Board, Redhill, Surrey. 1960.

Az Egyesült Államokban:

Airworthiness Standards—Normal, Utility and Acrobatic Category Airplanes. FAR Part 23. Federal Aviation Administration, 1969. Washington.

A Német Szövetségi Köztársaságban:

Lufttüchtigkeitsforderungen für Segelflugzeuge (LFS). Vorläufige Richtlinien für den Bau von Segelflugzeugen. Luftfahrt-Bundesamt, 1966. Braunschweig.

Mind a tervezéskor, mind a légialkalmasság megítélésekor egyre inkább felhasználják az *OSTIV légialkalmassági előírásait* is:

OSTIV Airworthiness Requirements for Sailplanes, 1971. Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol à Voile.

Az előírások általában a következőkre terjednek ki:

— *Repülési tulajdonságok.* E részben részletes előírások találhatók a stabilitás és a kormányozhatóság feltételeire, a trimmelhetőségre, a súlypont megengedhető helyzeteire, az átesési és a dugóhúzó tulajdonságokra, a csörlő- és repülőgépvontatásos indítás körülményeire, a kormányszervek működtetéséhez szükséges legnagyobb erőkire, a műszer és egyéb berendezésekre stb. vonatkozólag.

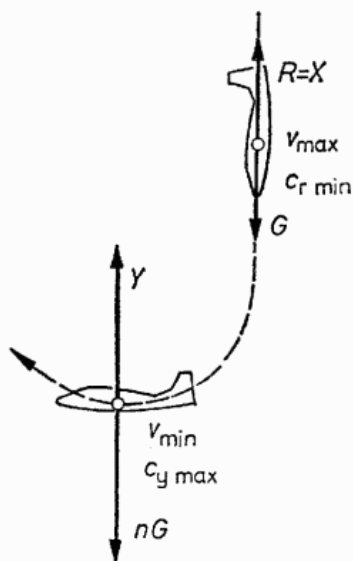
— *Szerkezeti elemek tervezése és méretezése.* Ez a rész előírásokat tartalmaz az építési anyagok ellenőrzésére és felhasználására, a fő szerkezeti elemek, a kormány-szerkezetek, a futómű, a kötélkioldó készülék, a vezetőfülke stb. kialakítására és szilárdsági méretezésére vonatkozólag. A számszerű követelmények mellett általában megadják a földi és a repülési próbák során szem előtt tartandó irányelveket is.

Az építési előírások egyik legfontosabb fejezete az, amelyben a *terhelési esetek feltételei* találhatók. Ezek írják elő a repülőgép szilárdsági méretezésével szembeni követelményeket, vagyis azt, hogy a különféle terhelési esetekre való méretezéskor a repülőgép feladatkörét is figyelembe véve mekkora sebességeket és e sebességeknél mekkora terhelési többségeket kell alapul venni.

Elvben a lehető legnagyobb terhelési többség akkor jön létre, amikor a vitorlázó repülőgépet függőleges zuhanásból (amikor sebessége a lehető legnagyobb) hirtelen mozdulattal a legnagyobb felhajtóerő-tényezőnek megfelelő helyzetbe rántják fel (168. ábra). Mivel a légerők a sebesség négyzetével arányosak, a terhelési többség ekkor

$$n = v_{\max}^2 / v_{\min}^2.$$

Egy korszerű vitorlázó repülőgép terhelési többsége pl. $v_{\max} = 400$ km/h és $v_{\min} = 65$ km/h sebességek esetén $n = 38$ lenne. A terhelés ilyen méretű megnövekedését sem a gép, sem a pilóta nem bírná ki. Erre a terhelésre méretezni a repülőgépet nem lenne ésszerű. Az előírásokban ezért a tapasztalatok és a kísérletek alapján olyan feltételeket írnak elő, amelyek adott feladat betöltésekor elegendő biztonságot



168. ábra. A lehetséges legnagyobb terhelési többség létrejötte

nyújtanak az üzemszerűen létrejövő terhelések elviselésére, de ugyanakkor a szerkezet súlyát sem növelik meg az ésszerű mértéken túl. A feltételektől bármilyen irányban való eltérés alkalmatlan megoldáshoz vezet. A túlságosan könnyített és szilárdságilag nem megfelelő géprészek a repülés biztonságát és így az emberi életet veszélyeztetik. A feleslegesen nehéz szerkezetek ezzel szemben nemcsak a gép repülési tulajdonságait befolyásolják kedvezőtlenül, hanem a repülőgép — legalábbis az adott feladatra való — alkalmasságát is kérdésessé tehetik.

Az előírások többek között a következő jellegzetes terhelési esetekre tartalmazzanak feltételeket (itt és a következőkben az egyes terhelési eseteket jellemző betűindex több helyen eltér a szokásos jelöléstől. Ennek oka, hogy a különféle előírások nem jelölik ezeket egységesen, ezért a logikus sorrendet követtük):

— A durva felrántás, ill. a durva kormánymozdulat megengedett legnagyobb v_A sebessége és e sebesség mellett durva kormánymozdulattal, ill. felrántással előidézett legnagyobb megengedett n_A terhelési többes.

— A számításba veendő v_D legnagyobb siklási sebesség, és az az n_D legnagyobb terhelési többes, amellyel v_D sebességből fel szabad venni a gépet.

— Ugyanezek háton repülésben, azaz a durva felvétel és a kormánykitérítés v_G és n_G , valamint a v_E legnagyobb sebességhez tartozó n_E értékei. Ezek a negatív terhelés esetei.

— A repülőgépnek az a v_B siklási sebessége, amellyel a méretezés alapjául vett legnagyobb függőleges szállókést, ill. az ekkor fellépő n_B terhelési többest a szerkezetnek biztonsággal el kell viselnie.

— A legnagyobb v_D siklási sebességnél elviselendő függőleges szállókés sebessége és a hozzátartozó terhelési többes (n'_D).

— Ugyanezek negatív irányú szállókésre (n'_E , n'_G).

— Az ívelőlap egyes kitérítési fokozataival megengedett legnagyobb siklási sebesség.

— A megengedett legnagyobb v_{NE} siklási sebesség.

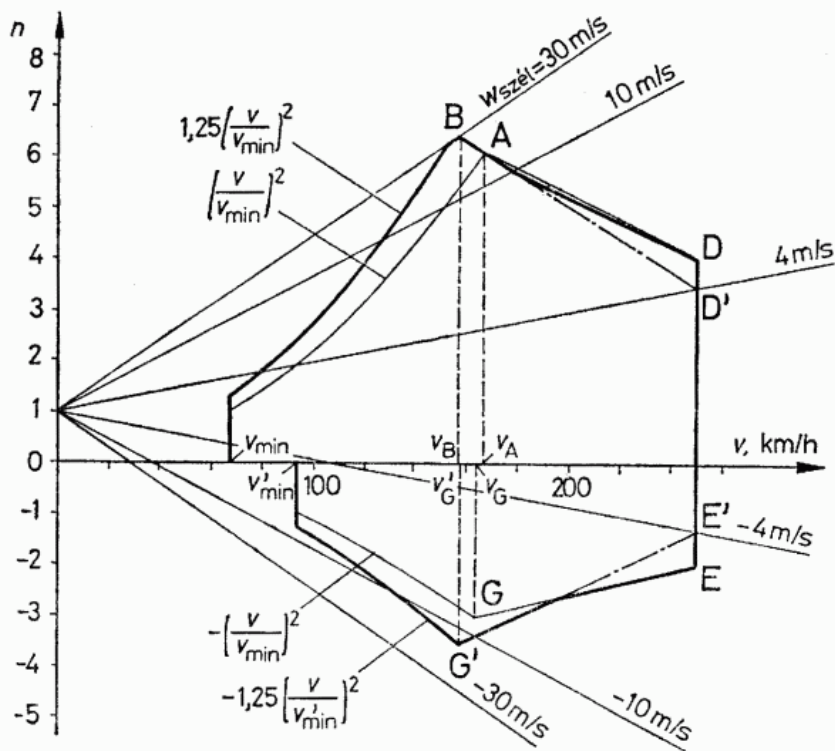
— A repülőgépvontatás legnagyobb sebessége és a repülőgépvontatás közben előforduló szállókések megengedett legnagyobb sebessége.

— A csörlővontatás legnagyobb sebessége azzal a függőleges szállókés-sebességgel együtt, amely mellett a csörlés még megengedhető.

Az így megadott sebesség- és terhelésitöbbes-értékek határértéket jelentenek. Ezek az ún. v — n diagramban ábrázolhatók szemléletesen. A diagramban az A — G pontokat egyenesekkel kötik össze, v_A , ill. v_G -nél kisebb sebességekre pedig a felvétellel kapcsolatban elmondottak értelmében a $c_{y\max}$ -ra jellemző $n = \pm v^2/v_{\min}^2$ parabolikus határt ad. Nyugodt levegőre, azaz szállókésmentes esetekre és szállókéses esetekre külön-külön v — n diagram készíthető. Ez utóbbinál a kis sebességű felvételre

a dinamikus $c_{y\max}$ -mal számolnak, ezért itt $n = \pm 1,25 \frac{v^2}{v_{\min}^2}$. A repülőgép méretezése és megítélése szempontjából a két görbe burkológörbéje mértékadó, mert hol az alapeset, hol pedig a szállókéses eset mutatkozik nagyobbnak, amely terhelés aztán a méretezés alapja. A 169. ábrán az *SZD—32A Foka 5* vitorlázó repülőgép egybe rajzolt v — n diagramjait ábrázoltuk, a burkológörbét vastag vonallal kihúzva.

A v — n görbék méretezési értékeket jellemeznek. A görbe által határolt terület arra a szilárdságra jellemző, amelyet az adott vitorlázó repülőgép szerkezetének el kell érnie. Más szóval a szerkezetnek olyan szilárdságúnak kell lennie, hogy a görbe által határolt terület bármely pontjával jellemzett terhelést biztonsággal el kell viselnie. A repülőgépvezető számára a v — n görbe ezzel szemben azt a határt jelenti, amelynél nagyobb terheléseket a szerkezet biztonsága érdekében a repülőgép vezetése



169. ábra. Az SZD—32A Foka 5 $v-n$ diagramja. A repülési korlátozások alapjai

Széllökés nélkül ———; széllökéssel ———; méretezés határa ———

közben semmiféleképpen sem szabad létrehoznia. Sőt a $v-n$ görbe által jelzett határok nem minden esetben engedélyezettek is egyúttal. Az előírások erre is adnak útbaigazítást, amelyben „Üzemelési korlátozások” címmel azokat a határsebességeket adják meg a hozzájuk tartozó terhelési többesekkel, amelyek létrejötte üzemszerűen még megengedett, de túllépésük már semmilyen körülmények között sem engedhető meg. Ezek a tervezési értékeknél mintegy 5...10%-kal kisebbek.

Az előírások azonban nemcsak a megengedhető terhelések nagyságát írják elő, hanem azt a biztonsági tényezőt is, amellyel a szerkezetnek e terheléseket el kell viselniük. A *biztonsági tényező* a terhelési többessel kifejezve:

$$j = \frac{n_{\text{törő}}}{n_{\text{megengedhető}}}$$

Az a terhelési többes, amelynek elérésekor a szerkezet tönkremehet:

$$n_{\text{törő}} = j n_{\text{megengedhető}}$$

Az előírásokban a biztonsági tényező megkívánt értéke általában egyforma.

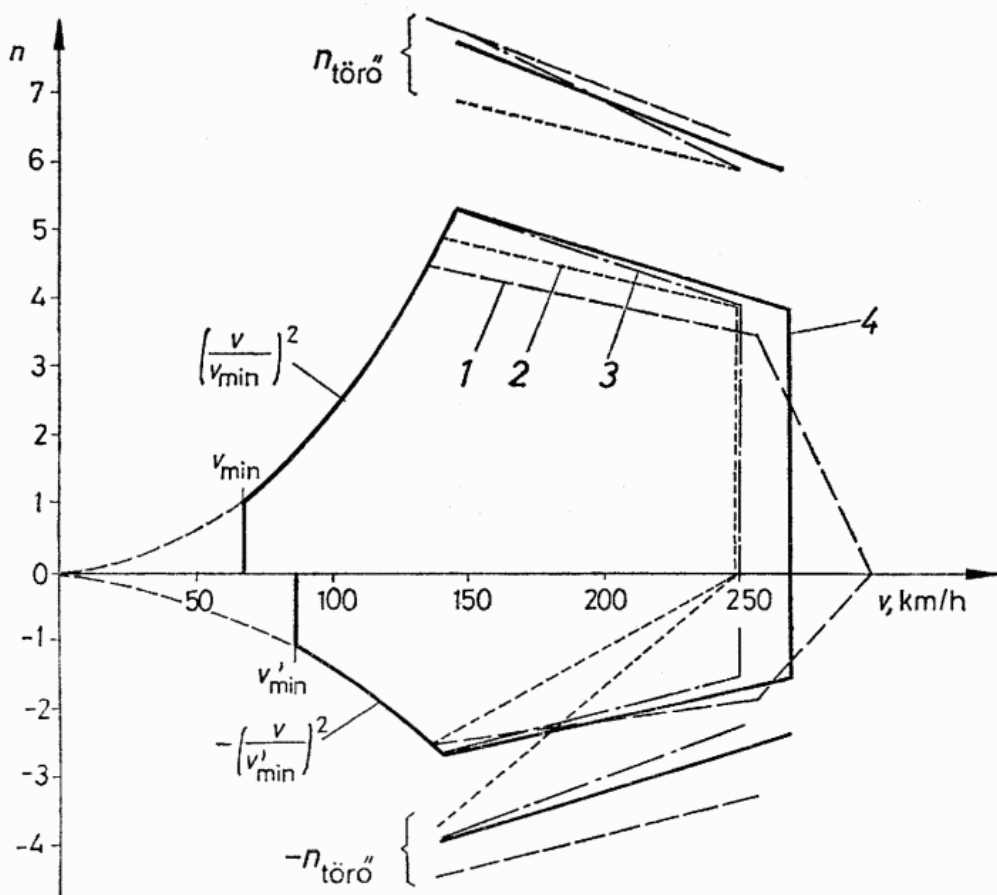
A különféle előírások a vitorlázó repülőgépeket alkalmazási területük szerint *kategóriákba* sorolják, és a velük szemben támasztott szilárdsági követelmények határait ennek megfelelően állapítják meg. A kategóriákra aztán bizonyos repülési mozzanatok a gép szilárdsági foka szerint engedélyeznek vagy megtiltanak. A VSZE 1959 például négy igénybevételi csoportot állapít meg, amelyek közül az elsőbe tartozók csak csörlőindítású kiképzőrepülésre alkalmasak, a repülőgéppel való vontatás számukra tilos. A 2. csoportba tartozó teljesítmény-vitorlázógépek legfeljebb egyszerű műrepülésre és bizonyos megszorítások mellett felhőrepülésre engedélyezhetők, míg a 3. csoportba a műrepülésre méretezett és felhőben korlátozás nélkül repülhetők tartoznak. A 4. csoport a különleges vitorlázó repülőgépeké.

A magyar előírástól eltérően az OSTIV követelmények csak két kategóriát ismernek: általános rendeltetésű vagy műrepülő vitorlázó repülőgépet. Mindkettőbe

tartozó gépek alkalmasak felhőrepülésre, az utóbbi csoportba pedig a magasfokú műrepülésre is alkalmasak sorolhatók.

A különböző előírásokban egy-egy repülési mozzanatra való alkalmasság nincs minden esetben azonos feltételekhez kötve. Már a terhelési esetek felfogásában is mutatkoznak eltérések, így pl. a $v-n$ görbe pontjainak meghatározási módjában. Az előírások legfontosabb pontjai — legalábbis azok, amelyekkel a repülőgépvezető korlátozásként közvetlenül is találkozók — a 7. táblázatban (l. a mellékletben) található kivonatosan. A táblázat alaposabb tanulmányozása képet ad az előírások különbözőségéről. A különbözőségből az a nehézség származik, hogy egy adott országban az ott érvényes előírások alapján tervezett vitorlázó repülőgépek repülési korlátozásait nem fogadják el változtatás nélkül azokban az országokban, amelyekben attól eltérő előírások vannak érvényben. A légügyi hatóságok a külföldről vásárolt vitorlázó repülőgépeket típusalkalmassági vizsgálatnak vetik alá, és a tervezés alapjául vett előírások feltételeit a sajátjaikkal egybevetve a meg nem engedhetőnek ítélt eltérések esetén új üzemelési feltételeket állapítanak meg.

Érdekesen világítja meg a különböző előírások követelményeinek eltérőségét a 170. ábra, ahol az *SZD—38A Jantar 1* vitorlázó repülőgép vízballaszt nélküli adatait felhasználva azokat a $v-n$ görbéket ábrázoltuk, amelyeket a magyar, az angol és az OSTIV előírások — az eredeti méretezési feltételeket legjobban megközelítő osztályainak — kívánalmai szerint számítottunk ki nyugodt levegőt (szellőkésmentes esetet) feltételezve. E görbék tehát azt mutatják, hogy az adott előírások szerint a gépet — eredeti feladatkörének változatlanul hagyása mellett — milyen terhelések elviselése-



170. ábra. Különböző előírások követelményeinek összehasonlítása az *SZD—38A Jantar 1* adatainak felhasználásával

1 Követelmények a magyar VSZE 1959 2. kategória szerint; 2 BCAR felhőrepülő kategória szerint; 3 OSTIV utility kategória szerint; 4 az eredeti méretezési értékek

sére kellene méretezni. Az ábrán a *Jantar 1* tényleges méretezési feltételeit szemléltető $v-n$ görbét is feltüntettük. Rögtön szembetűnő, hogy a pozitív terhelésekre általában a lengyel előírás szerinti értékek a legnagyobbak, és úgy tűnik, hogy a magyar 2. csoport feltételei a legenyhébbek. Megváltozik azonban a kép, ha az ábrán szintén feltüntetett törőterheléseket vizsgáljuk. A biztonsági tényező a magyar előírás szerint $j = 1,8$, az OSTIV, a lengyel és az angol előírás szerint pedig csak $j = 1,5$. Így a magyar előírás bizonyul az itt figyelembe vettek közül e téren a legszigorúbbnak: vagyis az adott üzemelési körülmények között a legnagyobb szilárdságot kívánja, ill. más-ként: az adott szerkezet legalacsonyabb szilárdsági igénybevételét engedi meg.

A negatív terhelések esetében az angol előírás feltételei látszanak enyhének $n_E = 0$ kívánalmával.

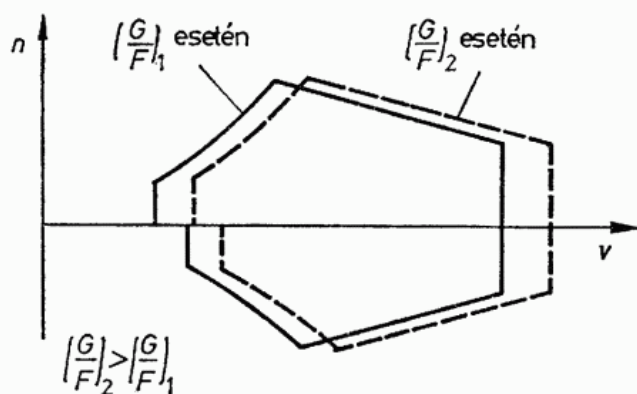
A legnagyobb tervezési v_D siklási sebesség az ábra szerint az OSTIV és az angol előírás szerint a legkisebb, majd a magyar 2. csoport, végül a lengyel előírás következik. Azonban az ábrából nem derül ki a v_{NE} sebesség értéke, amelyet a 7. táblázat szerint kell megítélnünk, ahol az OSTIV és az angol előírás szerint $v_{NE} = 0,95v_D$, a magyar előírás pedig valamivel többet, $v_{NE} = v_D$ értéket enged meg.

A felsoroltakon kívül még számos feltételnek kell eleget tenni egy vitorlázó repülőgép tervezésekor, vagy figyelembe venni üzemi korlátozásainak megállapításakor. A további, részletesebb elemzés azonban e könyv célkitűzésén kívül áll. Mégis meg kell még említenünk az ívelőlap kitérítésének és a vízballaszt alkalmazásának hatását.

A 3. fejezetben láttuk, hogy az ívelőlap kitérítése — akár pozitív, akár pedig negatív irányú — megváltoztatja a szárny aerodinamikai tulajdonságait. Nemcsak a felhajtóerő fesztávolság menti eloszlása változik meg ekkor, hanem egyúttal az egész szárnyra jellemző $dc_y/d\alpha$ érték is. A gép hosszszög-változása következtében létrejövő $\Delta\alpha$ állásszög-változásra így minden ívelőlapállás mellett más Δc_y felhajtóerő-tényező változás jelentkezik, és ez felvételnél és szélleőkés esetén megváltoztatja a viszonyokat az ívelőlap-kitérítés nélküli szárnyhoz képest. Mivel ilyenkor $c_{y\max}$ értéke is más-más, azért v_{\min} értéke is az ívelőlapállás függvénye. Természetesen az ívelőlap kitérítésekor nemcsak a felhajtóerő-tényező, de a szárny más jellemzői (c_x , c_m stb.) is megváltoznak. A repülőgépnek tehát minden ívelőlapállásra más és más tulajdonságai vannak: tulajdonképpen más és más repülőgépnek tekinthető. Jól szemlélteti ezt az 5. táblázat, amelyben ugyancsak az SZD—38A *Jantar 1* gép jellemzőit foglaltuk össze a különböző ívelőlapállások esetére.

Az előírások a kitérített ívelőlappal való repülésre is tartalmaznak utasításokat mind a megengedhető terhelési többszörös, mind a kitérített ívelőlappal való felvétel, továbbá a megengedhető legnagyobb sebesség tekintetében. Mivel így a legtöbb esetben minden ívelőlapkitéréshez más értékek tartoznak, azokat a légiüzemeltetési utasításban gondosan fel kell tüntetni.

A vízballaszt alkalmazása a repülő súlyt és ezzel a felületi terhelést megváltoztatja.



171. ábra. A felületi terhelés változásának hatása a méretezéskor figyelembe veendő igénybevételekre

A megnövekedett felületi terhelés a vitorlázó repülőgép sebességi polárgörbáját a nagyobb sebességek felé tolja el, de ezzel a v_{\min} legkisebb sebesség növekedése is együtt jár (a *Jantar 1* esetében l. ezt az 5. táblázatban). Az előírások a v_A , v_D stb. határsebességeket általában v_{\min} többszörösekként írják elő, ezért a vízballaszt nélküli és a vízballasztos gépekkel szemben különböző szilárdsági követelményeket támasztanak (171. ábra). A vízballasztos, nagyobb felületi terhelésre való méretezés vízballaszt nélkül nagyobb szilárdságot eredményez, de a tervező dolga annak eldöntése, hogy ezt az utat választja-e vagy pedig a vízballaszt alkalmazása esetén korlátozásokat ír elő.

4.6. A vitorlázó repülőgépek részeinek szilárdsági igénybevételei

Az előzőkben igyekeztünk képet adni a vitorlázó repülőgépet repülés közben érő terhelésekről és e terhelések természetéről, megengedhetőségéről, továbbá a vitorlázó repülőgépek szilárdsági tervezésének, valamint megítélésének alapjául szolgáló előírásokról. Eközben a repülőgép teljes egészét tekintettük, s nem foglalkoztunk azzal, hogy a terhelések mely részén hatnak, s milyen szilárdsági igénybevételt okoznak. A következőkben ez utóbbiakat tárgyaljuk.

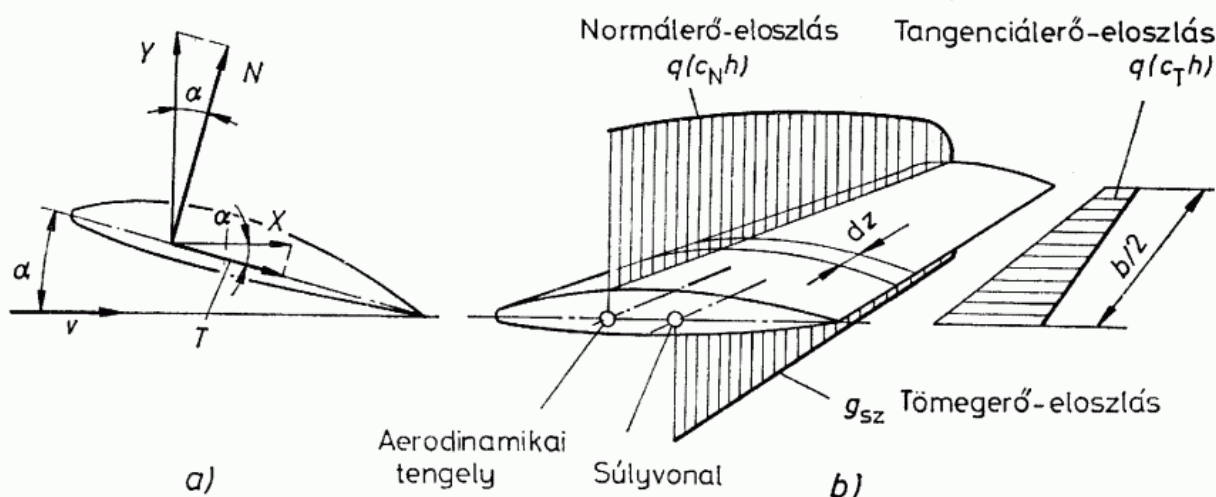
4.6.1. A szárny szilárdsági igénybevételei

A szárnyfelület minden kis elemére megoszló erőrendszerként ható *légerőket* a szárny borítása veszi fel először, majd ez a terhelést továbbadja a belső szerkezetnek (szárnybordáknak, főtartóknak stb.), az viszont a tövasalásokon keresztül a törzshöz közvetíti.

A terhelések a szárnyat hajlításra és csavarásra veszik igénybe, ezenkívül nyíróerők lépnek fel. A szárnyszelvény geometriai alakjából és a légerők természetéből következik, hogy a hajlítói igénybevétel a szárnyak síkjára merőlegesen a nagyobb, azzal párhuzamosan pedig a kisebb. A hajlítói igénybevételek szempontjából tehát az állásszögtől függően változó irányú felhajtóerőnek és ellenállásnak a szárny síkjára merőleges normálerő-összetevője ($N = Y \cos \alpha$, ill. a normálerő-tényező: $c_N = c_y \cos \alpha$) és az érintőleges vagy tangenciális összetevő ($T = X \cos \alpha$, ill. a tangenciális erő-tényező: $c_T = c_x \cos \alpha$) jön számításba.

A légerők fesztávolság menti eloszlása az alkalmazott szárnyszelvény fesztávolság irányú eloszlásának, az elcsavarásnak, a nyilazásnak és főként az alaprajzi alaknak a függvénye. Nyilvánvaló, hogy a légerők normál és tangenciális vetületének eloszlása ehhez hasonló. A légerőkön kívül még a *tömegezők* is befolyásolják az igénybevételek alakulását. Eloszlásuk, amely jó közelítésben a szárny húrhosszához függvénye, hasonló módon szemléltethető a szárny alaprajzához hasonló alakú területtel.

A légerők és a tömegezők egymással ellenkező irányban hatnak, ezért a súly a hajlítónyomatékok létrehozása szempontjából tehermentesíti a szárny szerkezetét: a súlyerő a légerőkből mindig levonódik. Ez a körülmény a vitorlázó repülőgépek szilárdsága szempontjából jelentős, ugyanis a szárnysúly ezeknél az összsúly 1/2...



172. ábra. a) A légerők felbontása tangenciális és normálerőre; b) a szárny terhelésének fesztávolság menti eloszlása

1/3-a, így könnyebb szerkezetet eredményez. Ami az nban a légerőkből származó terhelések elviselése szempontjából itt kedvező, éppen ellenkezőleg hat a rezgési jelenségek alakulására.

Tekintsük most a 172. ábrát, ahol egy szárnyra ható külső és belső erők rendszerét ábrázoltuk. Az ábrához hasonlóan most az egyszerűség kedvéért vegyük úgy, hogy a szárny egy darabból van, s az itt nem látható rész az ábrázolt rész tükörképe. Tekintsünk el a szárnytőben ébredő reakcióerők ábrázolásától is. A fél szárnyra ható megoszló erőrendszer eredői ezután:

$$N = q \int_0^{b/2} (c_N h) dz, \quad \text{ill.} \quad T = q \int_0^{b/2} (c_T h) dz,$$

továbbá a tömegelőké:

$$nG_{sz} = n \int_0^{b/2} g_{sz} dz,$$

ahol g_{sz} a szárny folyómétersúlya, kg/m.

A megoszló, normál irányú erők $N_R = N - nG_{sz}$ eredője által a *szárnytőben ébredett hajlítónyomaték*, amely egyben a legnagyobb is:

$$M_h = N_R a,$$

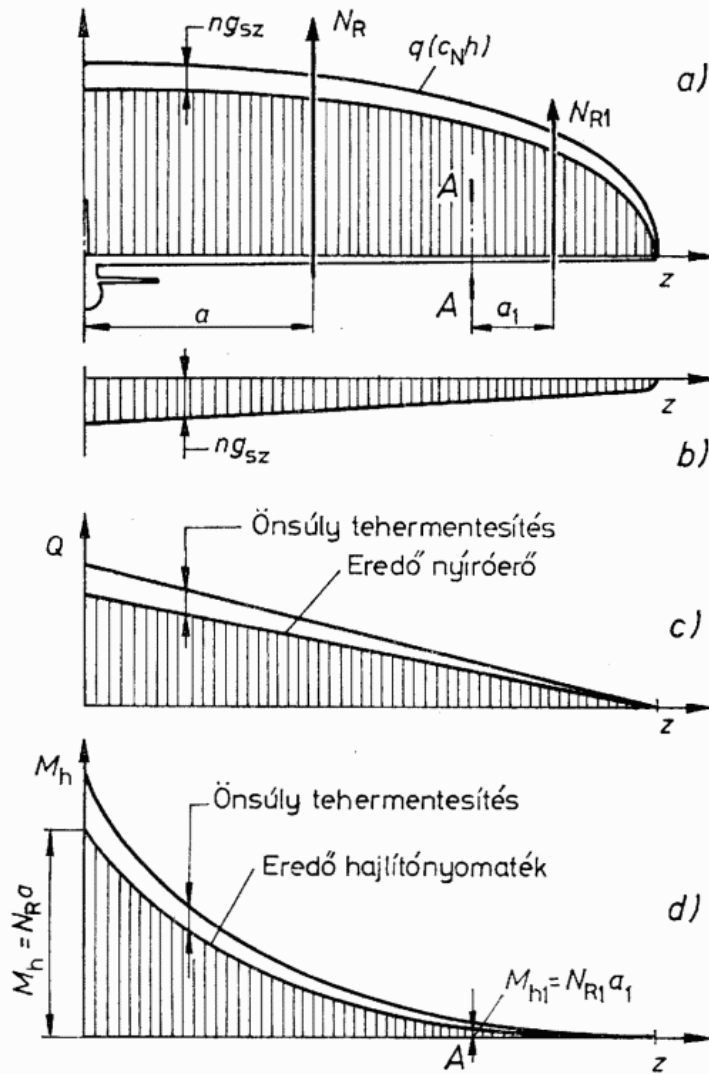
ahol a az eredő erő hatásvonalának távolsága a szárny szimmetriasíkjától.

Ezekután belátható, hogy a szárny valamely $A-A$ keresztmetszetében ébredő hajlítónyomaték (173. ábra) a keresztmetszettől a szárnyvég felé eső szakasz N_{R1} eredőjének, és ezen részerő hatásvonalának a keresztmetszettől vett a_1 távolság szorzatával egyenlő:

$$M_{h1} = N_{R1} a_1.$$

A hajlítónyomaték ezért a tőben mutatott legnagyobb értékről a szárnyvég felé haladva rohamosan 0-ra csökken. Ugyanilyen tulajdonságokat mutat, és hasonlóan számítható a tangenciális erők nyomatéka is.

173. ábra. A szárny hajlításból származó igénybevételei



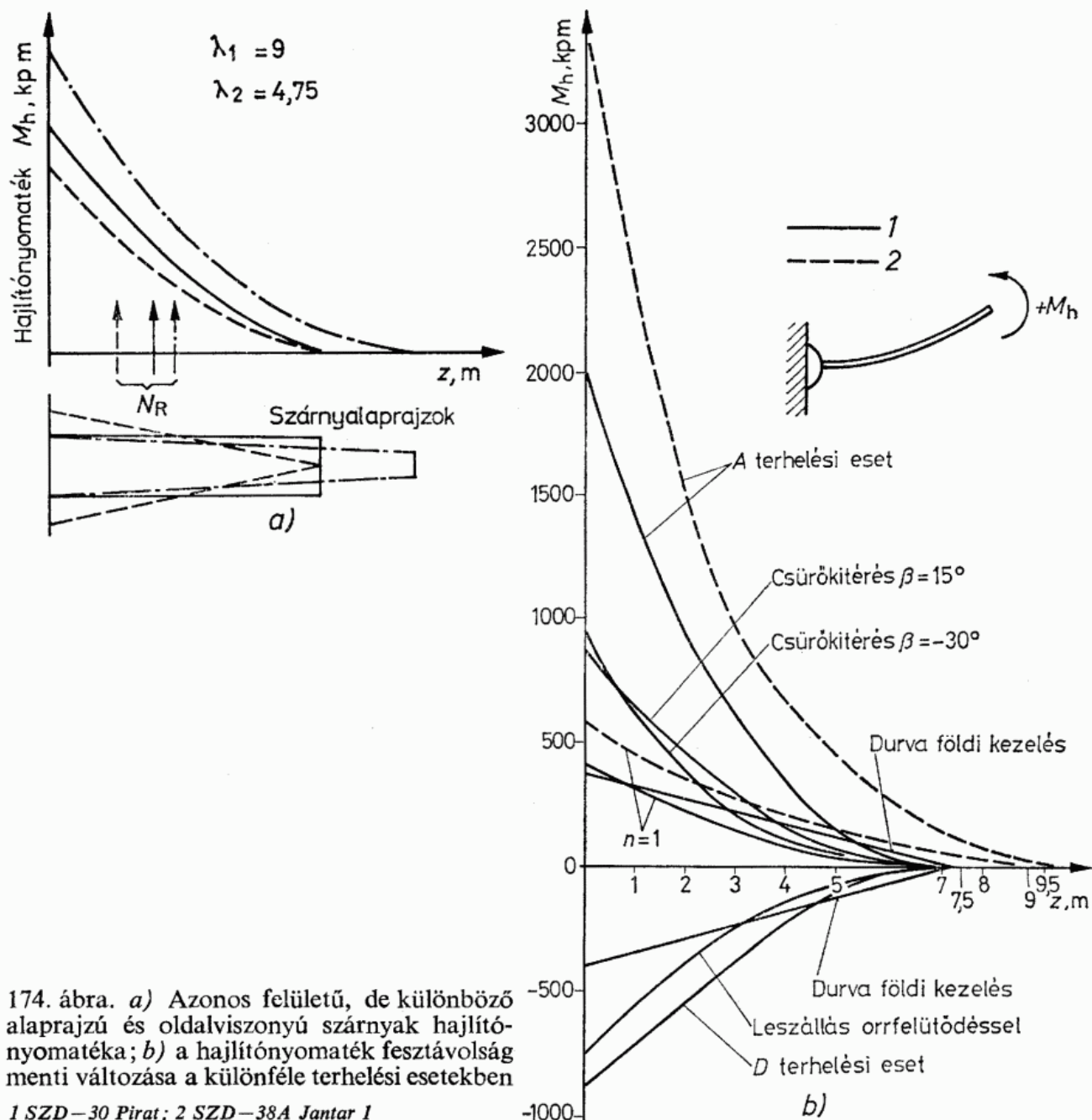
- a) a légerő-terhelések eloszlása a fesztávolság mentén;
 b) súlyeloszlás;
 c) nyíróerők eloszlása;
 d) a hajlítónyomaték változása a fesztávolság mentén

Korábban felsoroltuk azokat a tényezőket, amelyek a terhelések fesztávolság menti eloszlását befolyásolják. Természetesen ezek a hajlítónyomatékok nagyságára is hatással vannak.

A hajlítónyomatékok alakulására különös jelentősége van a különféle, gyorsulással összekötött repülési mozzanatoknak (felrántásnak, szállókésnek stb.). Mint korábban láttuk, ilyenkor $Y = nG$ és ezért a hajlítónyomaték:

$$M'_h = nM_h.$$

A repülőgépszárnyak hajlítói igénybevételét befolyásoló tényezők megvilágítására a 174. ábrán a hajlítónyomaték fesztávolság menti eloszlását különféle típusú vitorlázó repülőgépek szárnyára és különböző terhelési esetekre rajzoltuk fel. Az a ábrán azonos szelvényű és felületű, valamint felületi terhelésű, de különböző alaprajzú szárnyak láthatók: egy téglalap szárny és a vele azonos oldalviszonyú (λ_2), háromszög alaprajzú, továbbá az azonos felületű, de nagyobb oldalviszonyú (λ_1), trapéz alaprajzú. A hajlítónyomatékok görbéje a legmagasabban az utóbbi esetben fut, a legalacsonyabban a háromszög alaprajzú szárnyánál. Látható, hogy az eredő normálerő fesztávolság menti elhelyezkedése igen fontos, és a példaként vett, egymástól csak alaprajz és oldalviszony tekintetében különböző szárnyakon keletkező hajlítónyomatékok nagyságát döntően befolyásolja. Ilyen szempontból kedvezőbbek tehát a nagy trapézviszonyú szárnyak (szélsőséggént a háromszög alaprajz), mint a $h_{vég}/h_{10} = 1$ trapézviszonyú, téglalap



174. ábra. a) Azonos felületű, de különböző alaprajzú és oldalviszonyú szárnyak hajlítónyomatéka; b) a hajlítónyomaték fesztávolság menti változása a különféle terhelési esetekben

1 SZD-30 Pirat; 2 SZD-38A Jantar 1

alaprajzú. Ugyanígy a nagyobb oldalviszonyú szárnyon — egyébként azonos nagyságú erők mellett — nagyobb hajlítónyomaték ébred az eredő hatásvonalának a szimmetriasíktól való nagyobb távolsága miatt, mint a kisebb oldalviszonyúak esetében.

A b ábra az SZD-30 Pirat gép szárnyán különféle terhelési esetekben keletkező hajlítónyomatékok eloszlását szemlélteti. Ha a szárnytőben ébredő maximális értéket vizsgáljuk, azonnal kitűnik, hogy az A terhelési esetben az $n = 1$ -hez tartozó értéknek éppen n_A -szorosa. A D görbe a háton felvétel esetét, a negatív, vagyis a lefelé hajlító nyomatékokat jellemzi. Az ábrán feltüntettük az $n_A/2$ terhelési állapot mellett durván kitérített (felfelé $\beta = -30^\circ$, ill. lefelé $\beta = 15^\circ$) csűrőkkel alakuló nyomatéki görbéket is. Feltűnő azonban a szakszerűtlen és a durva földi kezelésből (pl. a szárnyvég elakadásából) származó lineáris nyomatéki eloszlás, amely a fesztávolság külső negyedének mértékadó terhelését adja. A negatív hajlítónyomatékok különleges esetét tömegerők idézik elő orrfelütődéssel járó leszálláskor.

Az ábrán összehasonlításképpen feltüntettük a 19 m fesztávolságú *Jantar 1* szárnyán a *Pirat* nagy állásszögű (A) felvételi esetével azonos (de egyébként a *Jantar* megengedett nagyságát meghaladó) terhelési többes mellett keletkező hajlítónyomatékok fesztávolság menti eloszlását is. A nagy fesztávolságra és a nagyobb oldalviszonyra jellemző, hogy míg a két gép repülő súlyának aránya $G_{\text{Jantar}}/G_{\text{Pirat}} = 1,12$, addig a hajlítónyomatékok aránya: $M_{\text{h Jantar}}/M_{\text{h Pirat}} = 1,66$, azaz a súlyok arányának 1,48-szorosa.

A hajlítónyomatékok alakulásával kapcsolatban meg kell még jegyeznünk, hogy a vitorlázógépeken alkalmazott vízballaszt célszerűtlen elhelyezése (pl. a törzsben) kedvezőtlenül hathat a szárny szilárdságára. A szárnyban elhelyezett ballaszt ugyanis — amellet, hogy a miatta megnövekedett összsúly a légerőterhelést növeli — a szárny eredő hajlítónyomatékát vízzel megnövelt tömegereje révén csökkenti. Ellenkező esetben, vagyis ha a vízballaszt a törzsben foglal helyet, tömege nem tehermentesíti a szárnyat, így azon a vízballasztos repülő súlynak megfelelő teljes légerőből származó igénybevételek ébrednek.

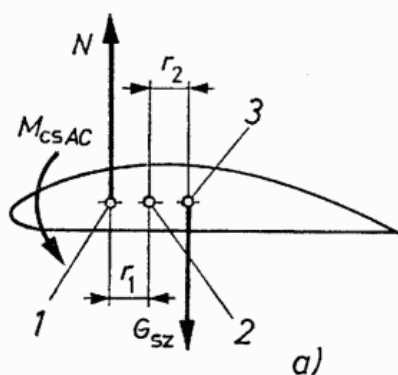
Korábban ismert a szárnyon ébredő légerőknek az a tulajdonsága, hogy az állásszög függvényében az eredő a belépő-, ill. a kilépőél felé vándorol. E tulajdonságuk miatt a légerők a szárnynak nem tiszta hajlítói igénybevételét okozzák, hanem emellett a repülőgép szilárdsága szempontjából el nem hanyagolható nagyságú *csavarónyomatékkal* is terhelik. Ha az R eredő erő egészen elöl, a belépőél előtt hat, az állásszöget növelő értelmű nyomatékot fejt ki, viszont ha helyzete hátra, a kilépőél mögé tolódik el, a csavarás értelme az előbbivel ellenkező lesz. A két helyzet között azonban van egy olyan pont, amelyben a támadó erő a szárnyat egyik irányban sem csavarja el, hanem csak tiszta hajlítónyomatékot ébreszt. Ezt a pontot a *szárnykeresztmetszet csavaróközéppontjának* nevezzük. A szárnyfesztávolság irányában egymás mellett elhelyezkedő metszetek csavaróközéppontjait összekötő egyenes pedig a *szárny rugalmas tengelye*.

A csavaróközéppont helye elsősorban a szárny szerkezeti kialakításától, így a főtartók számától, helyétől, méreteitől és a teherviselő borítás elhelyezésétől és méreteitől függ.

Vizsgáljuk ezután ismét valamely szárnymetszet síkjában ható erőket. A csavarónyomaték nagysága a légerők eredőjének (vizsgálódásunk szempontjából ezt célszerűen helyettesítjük az N normálerővel) AC támadási pontjának helyétől (ez viszont az állásszögtől) és a gyorsulásállapottól, azaz a terhelési többestől függ. A vitorlázó repülőgépek általában az aerodinamikai középpontra vett pozitív $M_{\text{cs AC}}$ nyomatékú profilokkal készülnek, így a 175a ábrán látható helyzet jön létre. A légerők nyomatéka mellett azonban a súlyerő nyomatéka is jelentkezik, mivel a legtöbb esetben a szárny súlyvonala sem a rugalmas tengellyel, sem pedig az aerodinamikai tengellyel nem esik egybe. A súlyerő nyomatéka a súlyvonálnak az adott szárnymetszetben a rugalmas tengelytől mért távolságától és a terhelési többes, azaz a gyorsulás nagyságától függ. A légerők és a tömegerők által okozott csavarónyomaték így, pl. a nagy állásszögű felvétel ($v-n$ diagram A pontja) esetében:

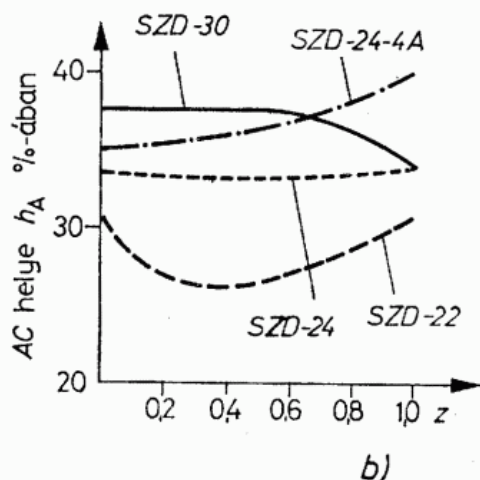
$$M_{\text{cs}} = M_{\text{cs AC}} + Nr_1 - nG_{\text{sz}}r_2.$$

E nyomaték a rugalmas tengely körül igyekszik a szárnyat elcsavarni. Az AC középpont — mint ezt a 175b ábra szemlélteti — a szerkezet kialakítása miatt nem minden vitorlázó repülőgépnél kerül a teljes fesztávolság mentén a húr azonos százaléku mélységébe és ez a csavarónyomatéknak különféle fesztávolság menti eloszlásában jelentkezik.



175. ábra. a) A csavaróigénybevétel keletkezése; b) az AC húrirányú helyének változása a fesztávolság mentén

1 aerodinamikai tengely; 2 rugalmas tengely; 3 súlyvonal



A szárny csavarásának különleges esetét adja a $c_y = 0$ -val való zuhanás. Mint ismeretes, az állásszög csökkentésével a légerők eredője egyre hátrább húzódik a kilépőél felé, sőt azon is túl. Ezt a jelenséget a szárny körüli nyomásviszonyok alakulása eredményezi. $c_y = 0$ esetén ez az 58d ábra szerint alakul, és a szárny feletti és alatti légerők részeredői erőpárként hoznak létre csavarónyomatékot. Ez a jelenség az állásszög csökkenésével folyamatosan jön létre, és a csavarónyomaték állandóan nő, míg legnagyobb értékét a lehetséges legnagyobb sebességgel, azaz $c_y = 0$ -val való zuhanásban éri el.

A megépített repülőgépek közös tulajdonsága, hogy a kedvező fesztávolság menti, felhajtóerő-eloszlás elérésére a szárnyszelvények a tőltől a szárny végig nem egyformák, hanem a fesztávolság külső szakaszán változnak. A különböző profiloknak azonban általában a $c_y = 0$ -hoz tartozó állásszöge sem azonos, ezért a szárny a fesztávolság különböző helyein nem mindenütt egyszerre éri el ezt az értéket. Vagyis akkor, amikor az egész szárnyra érvényes $c_{y\text{ köz}} = 0$, a szárny egyes helyein ennél kisebb vagy nagyobb felhajtóerő-tényezők keletkeznek. A rugalmas tengely húrirányú elhelyezkedésének eltéréseivel együtt ez a csavarónyomaték fesztávolság menti eloszlását bonyolulttá teszi.

A csavarónyomaték alakulásának egy másik, jellegzetes esetét képezi a *csűrők kitérítése*. A felhajtóerő 92. ábra szerinti eloszlása a csűrők egymással ellentétes irányban való kitérítésére jön létre. Amellett, hogy ez az aszimmetrikus felhajtóerő-eloszlás a szárny hajlítóigénybevételének is egyik jellegzetes esete, a légerőknek a felfelé, ill. lefelé kitérített csűrők miatt hátra, ill. előre vándorló eredője a két szárnyfelet egymáshoz képest elcsavarni igyekszik. A csavaró hatást a csűrés következtében a gép hossz tengelye körül fellépő orsózó mozgás szöggyorsulásából, valamint az esetleges felvételi helyzettől és a széllekedésektől eredő függőleges irányú gyorsulásból származó tömegelő az erők egymáshoz viszonyított értelmé szerint növeli vagy csökkenti.

A különböző eredetű erők vagy nyomatékok ilyen módon való összegeződése, azaz a különféle terhelések egyszerre való hatásakor az igénybevételek szuperponálódása a mechanika egyik igen fontos alaptétele. Ez az oka annak, hogy a szilárdsági előírások a túlságosan nagy igénybevételek elkerülésére a durva kormánymozdulatok végzését csak bizonyos sebességgel engedik meg.

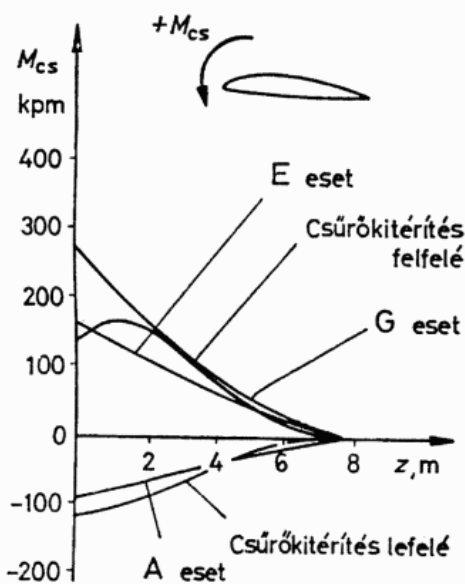
A 176. ábrán az SZD—30 Pirat szárnyán különböző terhelési esetekben keletkező csavarónyomatékok feszítávolság menti eloszlását ábrázoltuk. A legnagyobb pozitív csavaróigénybevétel a $v-n$ diagram G pontjának megfelelő terhelési esetben lép fel, míg a legnagyobb negatív igénybevétel a csűrő erőteljes lefelé való kitérítésekor. Negatív csavarónyomaték ébred a nagy állásszögű felvételnél is az A esetben.

Térjünk most vissza a 175., ill. az ezt kiegészítő 177. ábrához. Ha az egyetlen főtartót a szárny súlyvonalába helyeznénk, és a súlyvonal egyúttal a rugalmas tengellyel és az aerodinamikai középvonallal is egybeesne, csak tiszta hajlításra lenne igénybevéve. Ez így a legritkább esetben lehetséges, ezért a *szerkezet megfelelő kialakításával* kell gondoskodni a csavarónyomaték elviseléséről.

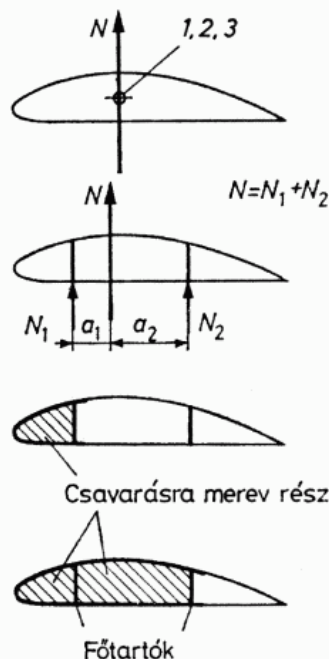
A ma már ritkán előforduló, teherviselő borítás nélküli, vászonnal bevont két-főtartós szárnyak tisztán hajlításra igénybevett főtartói a terhelést olyan mértékben hordták, ahogyan az eredő erő hatásvonala hozzájuk viszonyítva elhelyezkedett. Ahogyan az egyik főtartóhoz közeledett állásszögváltozás miatt az eredő erő, úgy tehermentesült a másik. A csavarónyomatékokat így szintén a főtartók vették fel járulékos hajlítás formájában, az őket összekötő bordák merevségétől függő mértékben. A korabeli szerkezeteknél alkalmazott ún. *diagonál fesztők* a csavaróigénybevétel elviselésében is szerepet játszottak.

A csavaróigénybevételt legjobban a csőszerű szerkezetek viselik el, ezért már a korai, kétfőtartós szárnyakat is csakhamar teherviselő orrborítással látták el, azaz a fából készült szárnyakat a belépőéltől a mellső, néha a második főtartóig is rétegeslemezzel borították.

Egyfőtartós szárnyal legelőször vitorlázó repülőgépet építettek az 1920-as évek elején, és ez az építési mód rohamosan elterjedt a motoros repülőgépek szerkezetében



176. ábra. A csavaróigénybevétel feszítávolság menti változása különböző terhelési esetekben

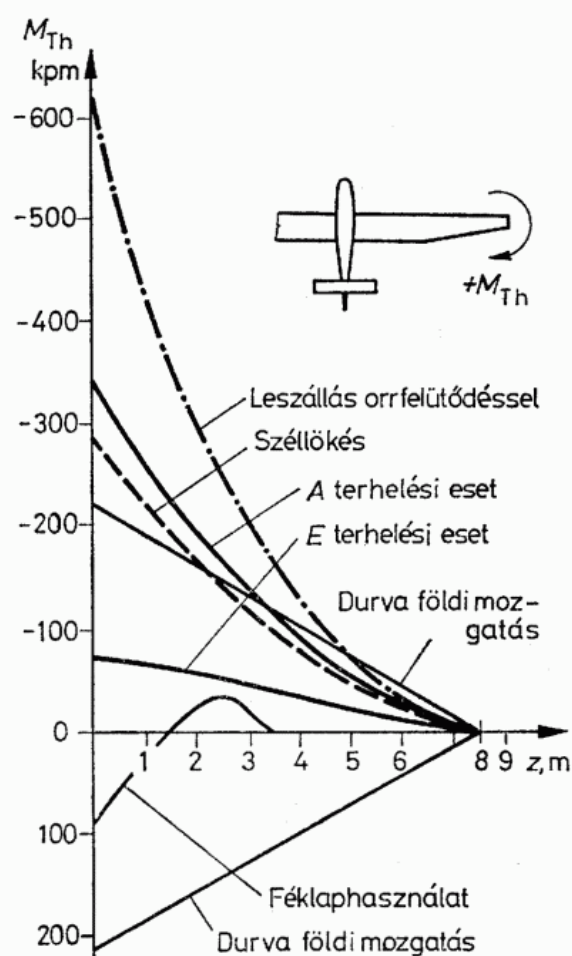


177. ábra. A csavarás elviselésére alkalmas szárny szerkezetek elvi megoldásai

is. Az ilyen szárnyak főtartóját általában a szelvény legnagyobb vastagságának helyén helyezik el, hogy így magassága a lehető legnagyobb, ezzel szilárdsága is a viszonylag kis súllyal az elérhető legnagyobb lehessen. A hajlítói igénybevételből származó húzó- és nyomóerőket a főtartóövek veszik fel, a nyíróerőket pedig a gerinc. A csavarói igénybevételt ekkor is a legalább a főtartó hátsó éléig húzódó, csavarásra mereven kiképzett orrborítás viseli el.

Szólnunk kell néhány szót a szárny tangenciális igénybevételéről is, amely ugyan nagyságára nézve alatta marad a normál irányúaknak, ismerete azonban teljesebbé teszi a szárny terheléséről alkotott képet. A 172. ábrára tekintve könnyen beláthatjuk, hogy a $T = Y \sin \alpha$ tangenciális légerőösszetevő az állásszögtől függően pozitív, vagyis a gép orra irányában mutató, vagy negatív, azaz farok felé mutató irányú lehet. A megoszló erőrendszer által okozott tangenciális hajlítónyomaték fesztávolság menti eloszlása a Pirat gép szárnyára nézve a 178. ábrán látható, amely szerint a légerőtől származó maximális igénybevételt pozitív irányban a nagy állásszögű felvétel okozza.

A vitorlázó repülőgépek repülés közbeni pályairányú gyorsulása egyes esetektől eltekintve nem jelentős. A tangenciális tömegerők szempontjából fontosabbak ennél azok a függőleges tengely körüli legyező mozgásból származó szöggyorsulások, amelyek pl. repülőgépvontatásban a vontatókötél oldalirányú megrántására lépnek fel. Az ábrán a levegőben ébredő igénybevételeken kívül két olyan esetből származót is feltüntettünk, amelyeket földi erők hoznak létre. Az egyik eset a géporral nagy sebességgel való földet éréskor a gyors lefékeződés miatt létrejövő tömegerőkre jellemző. a másik pedig a durva földi kezelés (pl. szárnyvégelakadás) esetét mutatja. Az orrfelütődéses leszállás esetétől eltekintve a fél fesztávolság közepétől a szárnyvég felé ez az eset jelenti a legnagyobb tangenciális irányú igénybevételt.



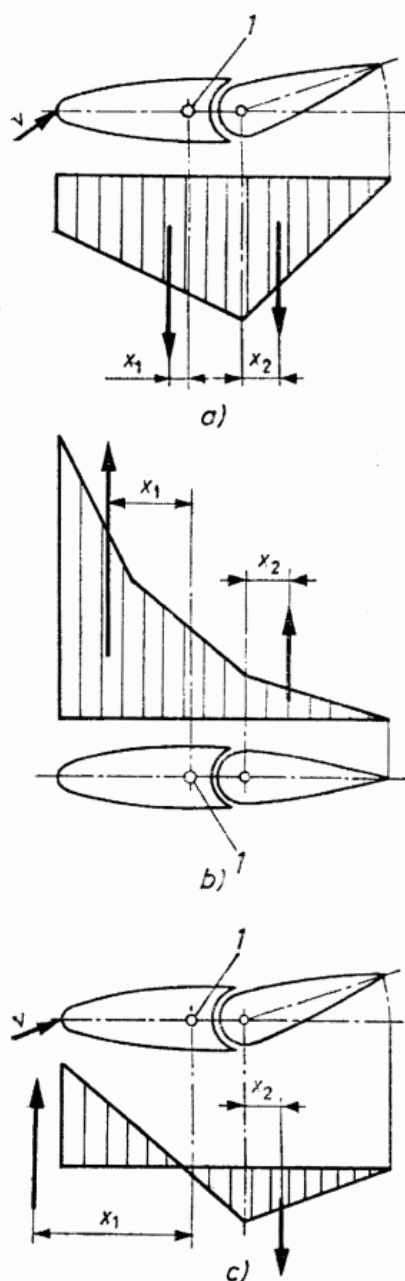
178. ábra. A tangenciális hajlítónyomaték eloszlása a fesztávolság mentén különféle terhelési esetekben

A tangenciális erőt kétfőrtartós szárnyaknál a diagonáltartók vették fel. A teherviselő orrborítással készült egyfőrtartós szárnyak ennek felvételére is alkalmasak, de többen a főrtartót még egy segédrtartóval is kitámasztják. Ezen a szakaszon a teherviselő borítás legalább a segédrtartó hátsó éléig terjed.

4.6.2. A farokfelületek szilárdsági igénybevételei

A vízszintes farokfelület szilárdsági igénybevételei hasonlóak a szárnyéhoz, azzal az eltéréssel, hogy kicsiny terjedtségük folytán tangenciális igénybevételük jelentéktelen. A mértékadó igénybevételek széllekésből és a durva kormánykitérésből származnak. Ezekre az esetekre vonatkozóan a légerők húrirányú eloszlását a 179. ábra szemlélteti.

A függőleges vezérsíkon és az oldalkormányon geometriailag szimmetrikus kiala-



179. ábra. A vízszintes farokfelület igénybevételei

a) kormánykitérés; b) függőleges széllekés; c) kormánykitérés és széllekés együttesen
l rugalmas tengely

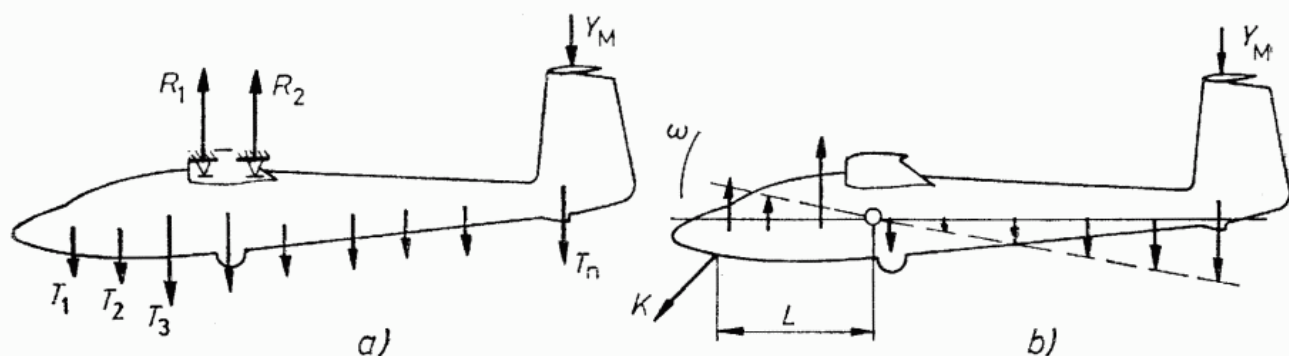
kításuk miatt mindkét irányú kitérésükkor egyforma igénybevétel ébred. A legnagyobb igénybevételek a nagy sebesség melletti durva oldalkormány-kitérésből és oldalirányú széllelésből származnak.

4.6.3. A törzs szilárdsági igénybevételei

A törzs legfontosabb feladata, hogy a repülőgép különböző rendeltetésű alkatrészeit egymással összekösse, s így az egyes alkatrészeken keletkező erőhatásokat egymáshoz vezesse.

Vizsgáljuk először a *légi terheléseket*. Az igénybevételek a farokfelületen keletkező erőkből, valamint a vontatókötéltől származnak. Ezek a szárnyon keletkező légerőkkel tartanak egyensúlyt. Ha a repülőgép gyorsuló mozgást végez, a tömeg-erők is hozzájárulnak a törzs terheléséhez, végül leszálláskor a földi erők a leszállás módja szerint alakuló terhelést okoznak.

A törzset a légerőkből származó igénybevételek vizsgálatakor a szárnyak bekötő vasalásainál felfüggesztettnek tekinthetjük, amelyet a farokfelületeken ébredő Y_M légerők, valamint a törzs hosszában tömegeloszlásának megfelelő nT nagyságú tömeg-erők terhelnek (180a ábra). Ezekkel a szárnybekötő vasalásoknál ébredő $R_1 + R_2 = N$



180. ábra. A törzs tömeg-erőkből származó terhelése

a) függőleges irányú gyorsulás esetén; b) a függőleges síkban a súlypont körül fellépő szöggyorsulás (pl. vontatókötél rántása) esetén

reakcióerők tartanak egyensúlyt. Bár a különféle felvételi esetekben a gép súlypontja körpályán mozog, jó közelítéssel mégis feltételezhetjük, hogy rá csak a pillanatnyi irányára merőleges *lineáris gyorsulás* hat.

A terhelés ilyen eloszlása a törzset függőleges síkban hajlításra és nyírásra veszi igénybe. A legnagyobb hajlítónyomaték a szárnybekötések környékén jön létre, és legnagyobb értékét mind pozitív, mind negatív értelemben a nagy állásszögű felvétel (A és G) eseteivel járó, a vitorlázó repülőgép légi üzemében előforduló legnagyobb gyorsulások okozzák.

Más esetekben a lineáris gyorsuláson kívül a *súlypont körüli szöggyorsulás* is fellép. Ilyen eset pl. vontatásban fordul elő, amikor a K kötélerő és a vízszintes farokfelületen keletkező Y_M légerő hatására a repülőgép pillanatnyi pályáját tartalmazó függőleges síkban lineáris gyorsulással mozog, de ehhez a súlypont előtt L távolságban bekötött K vontatókötél hatására ω szögsebességű forgó mozgás is járul (180b ábra). Az össze-

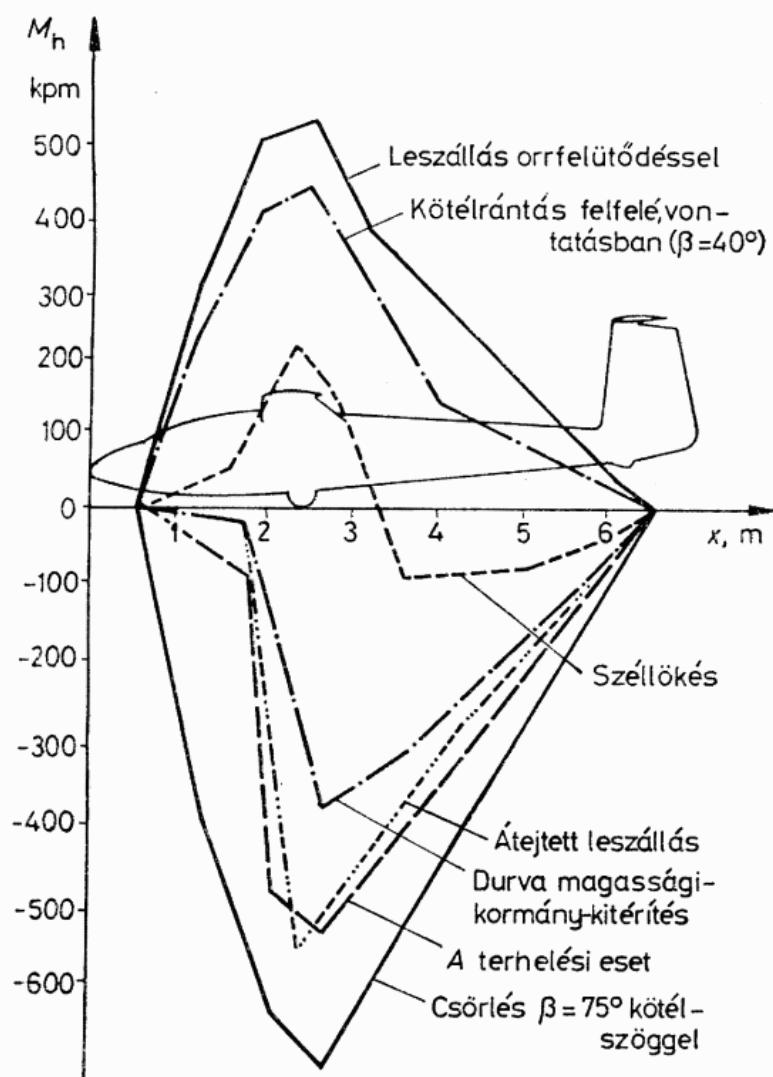
tett mozgás eredményeképpen a tömegek az ábrán látható módon bonyolultan alakulnak. A törzs fő igénybevétele ilyenkor is hajlítás, de a hajlítónyomatékok most a törzs szárnybekötés előtti részének legnagyobb igénybevételét okozzák.

A magassági kormány nagy sebesség mellett való durva kitérítése a törzs szárnybekötés mögötti részének legnagyobb igénybevételét okozza. A terhelés a 180b ábrán látotthoz hasonló azzal az eltéréssel, hogy ekkor a szöggyorsulást a vízszintes farokfelületen keletkező Y_M légerő hozza létre. Az erők egyensúlyát a tömegek állítják helyre.

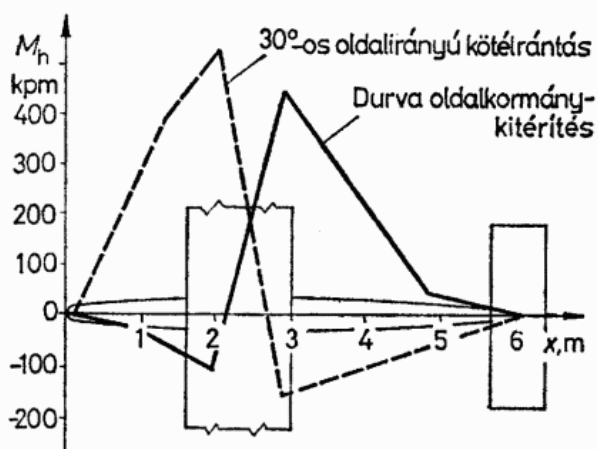
A törzs földi erőktől származó legegyszerűbb igénybevétele a leszállásból származik. Ideális esetben ez a futókerékre történik, de a szilárdsági előírások az elhibázott repülőgépvizelésre (átelejtett leszállás stb.) számítva ilyenkor is viszonylag nagy merülősebességet tételeznek fel. Az OSTIV előírás pl. a méretezés alapjául $w = 1,5$ m/s felütődési sebességet vesz figyelembe úgy, hogy az legalább $n = 4$ terhelési többször okozzon függőleges irányban. Arra, hogy ez a feltételezés egyáltalán nem alaptalan, bizonyíték mindaz, amit a 165. és az azt követő ábrákkal kapcsolatban elmondottunk.

A felütődéskor a keréknél keletkező nG erővel az ng gyorsulás által létrehozott tömegek tartanak egyensúlyt. A legnagyobb hajlítónyomaték ilyenkor a kerék függőlegesében támad. Az egyéb, leszállással kapcsolatos igénybevételek az orral vagy a farokkal való felütkezésből származnak, és értelemszerűen a törzs orr-részének vagy a szárnybekötések mögötti részének legnagyobb igénybevételét jelenti.

A 181. ábrán az SZD—30 Pirat törzsének függőleges síkjában ébredő hajlító-



181. ábra. Hajlítónyomatékok eloszlása a törzsön függőleges síkban, különféle terhelési esetekben



182. ábra. A törzs vízszintes síkú hajlításának főbb esetei

igénybevételek ábráját láthatjuk. Az ábrázolt terhelési esetek közül a legnagyobb pozitív értelmű hajlítóigénybevétel az orrfelütődéses leszállás esetén ébred, és egyúttal ez jelenti a legnagyobb pozitív irányú igénybevételt is. A negatív értelmű hajlítások közül a legnagyobb igénybevételt a csörlés jelenti abban az esetben, ha a csörlőkötél a pillanatnyi repülési pálya irányával $\beta = 75^\circ$ -os szöget zár be.

Eddigi példáinkban a törzs függőleges síkú hajlítóigénybevételeit tárgyaltuk. A fő igénybevétel *vízszintes síkban* is a hajlítás, de a viszonyok itt lényegesen egyszerűbbek. Ezek az esetek a függőleges tengely körüli forgó mozgással vannak összekötve, és így a tömegek vízszintes síkban ébrednek. A 182. ábra ismét a *Pirat* példáján a vízszintes síkú hajlítónyomatékok alakulásának azt az esetét szemlélteti, amikor a vontatókötél oldalirányból 30° -os szögben rántja meg a törzsorrt. A kötélrántás által megbontott egyensúlyi helyzetet a függőleges farokfelületen ébredő légerő és a vízszintes tömegek hozzák helyre. A vízszintes síkú hajlítónyomatékok legnagyobb értéke a szárny mellső bekötése környékén ébred, a terhelési eset a törzs mellső részére nézve jelent maximális igénybevételt.

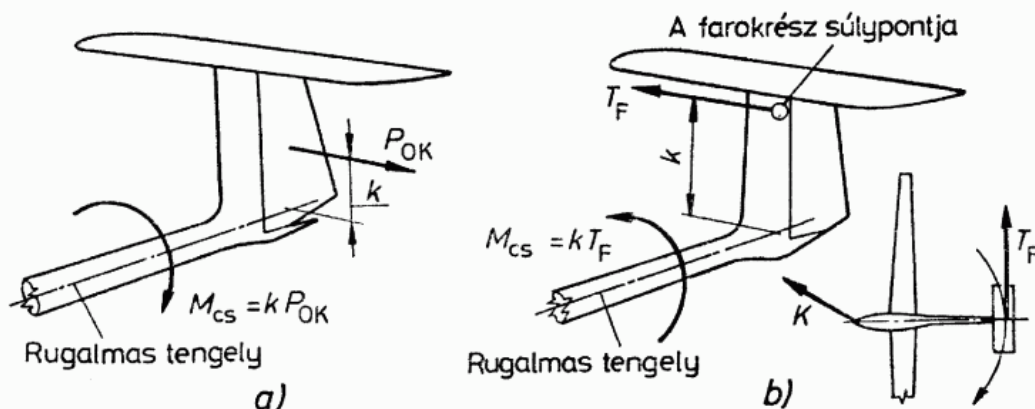
A törzs hátsó részének legnagyobb igénybevétele a durva oldalkormány-kitérítés következtében a szárny hátsó bekötése környékén jön létre (182. ábra).

A törzs igénybevételei között igen jelentős a *csavarás* is. Ennek egy, szinte minden gépnél előforduló esete abból származik, hogy a függőleges farokfelületek a törzs rugalmas tengelyéhez viszonyítva általában nem szimmetrikusan helyezkednek el. A függőleges farokfelületen az oldalkormány kitérítésekor keletkező oldalirányú légerők eredőjének támadási pontját jó közelítéssel a felület súlypontjában hatónak képzelhetjük el. Ha tehát az oldalirányú légerő hatásvonala a törzs rugalmas tengelyének meghosszabbítása felett vagy alatt megy át, akkor $M_{cs} = kP_{OK}$ csavarónyomatékot fejt ki rá. Nagysága a k kar hosszán kívül az oldalkormány kitérítési szögének és a v áramlási sebességnek is a függvénye (183. ábra).

Hasonló okokból a szokásosnál nagyobb csavarónyomatékot fejt ki a törzsre a V elrendezésű farokfelületek oldalkormányzásra való kitérítése is (91b ábra). Az igénybevétel nagyságát növeli az a tény, hogy az ilyen kormányfelületen ébredő Y_v légerőknek csak az oldalirányú $Y_{OK} = Y_v \sin \eta$ összetevője szolgál kormányzásra, ahol η a kormányfelület és a függőleges által bezárt szög.

Az előzőkből az következik, hogy a törzs csavaróigénybevétele minden olyan esetben bekövetkezik, amikor az erők rugalmas tengely körüli szimmetriáját akár kormánykitérítés, akár pedig széllekedés megbontja.

A tömegek hatása különösen az utóbbi időben elterjedten alkalmazott T elrendezésű farokfelületek esetében okozhat a törzsön jelentős csavaróigénybevételt. A farokfelületeknek a törzs rugalmas tengelyétől távol elhelyezett tömegei a gép



183. ábra. A törzs csavaróigénybevételének két jellegzetes esete

a) kormánykitérítés; b) oldalirányú tömegező

súlypontján átmenő függőleges tengelye körüli elfordulás (repülőgépvontatásban kötélrántás, durva oldalkormány-kitérítés stb.) vagy a hossztengety körüli orsózó mozgás következtében vannak gyorsulásnak kitéve (183b ábra).

Amint láttuk, a törzs különféle terhelési esetekből származó igénybevételei is meglehetősen bonyolultak. Ezt a bonyolultságot még az is növeli, hogy az elméleti kezelhetőség kedvéért az „esetekre” egyszerűsített terhelések általában nem külön-külön lépnek fel, hanem egyszerre többféle eredetű is hathat. Így pl. repülőgépvontatásban előfordulhat oldalirányú kötélrántás és az ezt kiegyenlítő durva oldalkormány-kitérítés, miközben éppen ferde irányban (tehát függőleges és vízszintes komponensű) széllekés is éri a gépet. A repülőgép térbeni mozgása miatt a tömegezők is sokkal bonyolultabban jelentkezhetnek, mint az említett néhány alaphelyzetben. A repülőgép tervezésekor ezt az összetettséget a szilárdsági előírások szerint való méretezéssel figyelembe veszik, de ismeretük a repülőgépvezető számára is szükséges, hiszen a terhelések létrejötte nagyrészt tudatos működésének következménye és így annak függvénye.

4.7. A vitorlázó repülőgépek szerkezetének merevsége és rezgésmentessége

Eddig a vitorlázó repülőgépeket merev testként tárgyaltuk, és általában nem vettük figyelembe, hogy alakjuk a terhelés hatására deformálódik. A repülőgépek építéséhez használt anyagok azonban rugalmasak. Rugalmasságuk mértékére a rugalmassági modulus (E , kp/mm²) és a csúsztatórugalmassági modulus (G , kp/mm²) nagysága jellemző. A rugalmas anyagokból készült szerkezeteknek az a tulajdonságuk, hogy erőhatásra alakjukat változtatják, de az erőhatás megszüntetése után (hacsak közben az anyag igénybevétele a rugalmasság határát nem haladta meg) eredeti alakjukat visszanyerik.

A szerkezetek rugalmassága az alkalmazott anyag rugalmassági jellemzőitől és a szerkezet geometriai méreteitől, valamint részletes kialakításától függ. Minél rugalmasabb a szerkezet, annál nagyobb ugyanazon erőhatásra a deformációja. A deformáció — az előző fejezetekben tárgyaltak szerint — a vitorlázó repülőgép szerkezetében főként hajlító- vagy csavaróigénybevétel hatására jön létre. A hajlítónyomatékkal

terhelt tartó (pl. a szárny) az igénybevétel hatására meghajlik, s ezért minden egyes pontja eltávolodik eredeti helyétől f_1, f_2, \dots, f_n távolságra. Az f távolságokat a tartó adott pontban mérhető *lehajlásának* nevezzük. A csavarónyomaték hatására a szerkezet keresztmetszetei eredeti állásukhoz képest $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ szöggel elcsavarodnak. A lehajlás vagy az elcsavarodás annál nagyobb, minél rugalmasabb a szerkezet, ill. minél nagyobb a szerkezetre ható hajlító- vagy csavarónyomaték.

A szerkezetek mechanikájában a rugalmasság helyett általában annak reciprokáról, a *merevségről* beszélnek. Eszerint minél nagyobb egy szerkezet rugalmassága, annál kisebb a merevsége, és fordítva, minél nagyobb a merevsége, annál kisebb a rugalmassága. A merevség mértékére ennek megfelelően hajlítás esetében az az erő jellemző, amely alatt a szerkezetnek az a pontja, amelyben az erő hat, éppen 1 m-t hajlik le:

$$K_f = P/f \quad \text{kp/m.}$$

Hasonlóan: a *csavarómerevségre* az a nyomaték jellemző, amelynek hatására a vizsgált keresztmetszet elcsavarodása éppen 1 rad, azaz:

$$K_{cs} = M_{cs}/\varphi \quad \text{kpm/rad.}$$

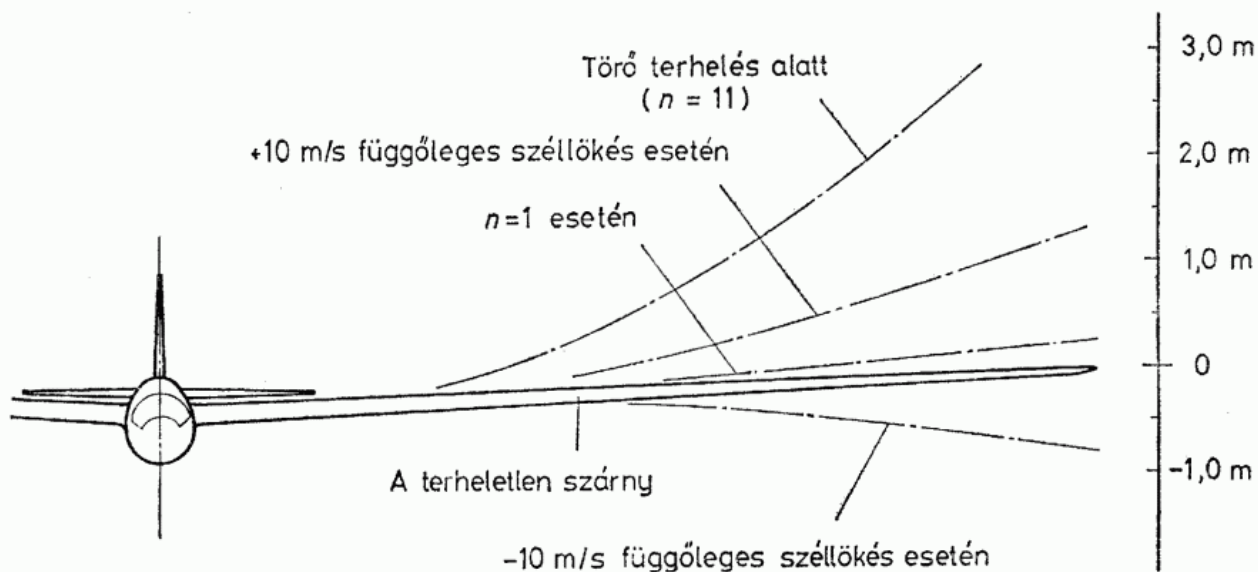
A vitorlázó repülőgépek tervezésekor a tervezőnek azokat a géprészeket, amelyek a különféle terhelésekből származó erők és nyomatékok felvételére vannak, egy olyan külső körvonalba kell beleillesztenie, amelyet a legkedvezőbb aerodinamikai jellemzők elérésére alakított ki. Mivel a vitorlázógép jósága szempontjából az elsőrendű cél éppen a minél tökéletesebb aerodinamikai kialakítás, a kellő szilárdságra és a kis súlyra való törekvés ezzel ellentétes kívánalmakat támaszt.

Tekintsük mindenekelőtt a *szárnyat*. A hajlított tartó súlya akkor lenne adott terhelés esetén kisebb, ha magassága minél nagyobb lehetne. A vitorlázó repülőgépek, különösen pedig az igen nagy oldalviszonyú teljesítménygépek vékony szárnyszelvénye miatt a tartó magassága csak csekély lehet. Hasonló a helyzet a csavarás esetében is. A szilárdsági és a merevségi követelmények a kör keresztmetszetű szerkezeteket kínálják legkedvezőbbként. Ezzel szemben a tervezőnek a lapos, a körtől igen távol álló keresztmetszetű szárnyat kell a csavarásra is merevvé tennie. Ezek a kedvezőtlen feltételek azt okozzák, hogy a szerkezet nehezebbé válik, mint azok, amelyek hasonló igénybevételnek vannak kitéve, de nincsenek alávetve az aerodinamikai kialakítás korlátaiknak. Az aerodinamikai jóság bizonyos esetekben megéri ezt a súlytöbbletet, mégis, a kis súlyra való törekvés a vitorlázógépek szerkezetében a legtöbb esetben olyan kompromisszumos megoldáshoz vezet, amely viszonylag nagy deformációkkal jár, mindamellett, hogy szilárdsága még a megengedhető határokon belül marad, súlya pedig elviselhetően kicsiny.

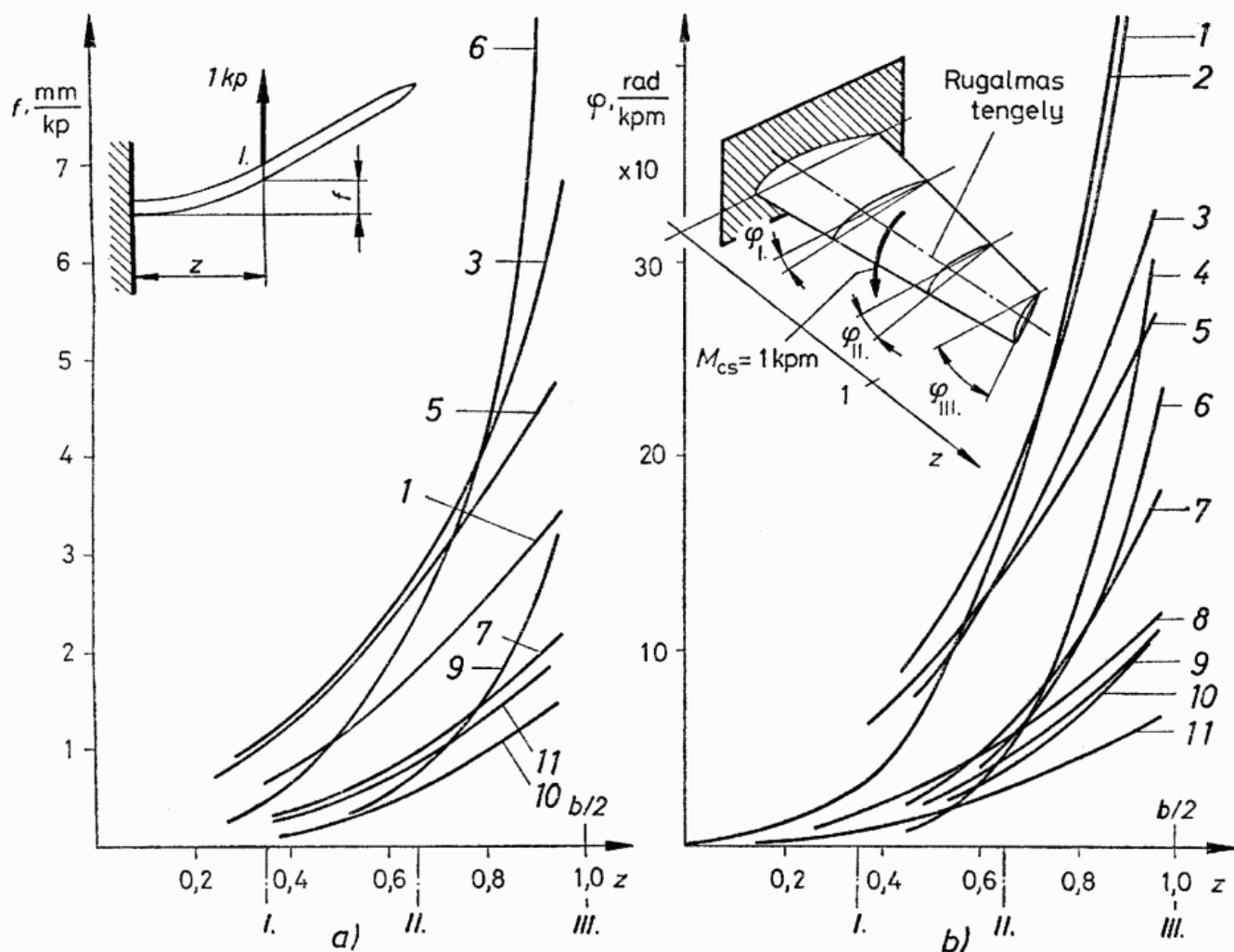
A szerkezetek rugalmassága miatti deformáció bizonyos fokig hasznos, ugyanis belőle a terhelés nagysága érzékelhető. A túlzottan nagy deformáció azonban a repülőgépvezetőre kellemetlen pszichikai hatású. A megszokottnál erősebben deformálódó szerkezetekkel nem szívesen repülnek, bár újabban az üvegszálerősítésű műgyanta építési mód elterjedésével — ahol az anyag rugalmassági jellemzői magyarázzák a szerkezet nagy rugalmasságát — ez is kezd megszokottá válni.

Ezen újszerű szerkezeti anyagra jellemző nagy rugalmasságot jól illusztrálja a 184. ábra, amelyen a *Cirrus* vitorlázógép szárnyának különféle terhelési esetekben fellépő hajlítóigénybevételek hatására mutatkozó deformált alakját szemléltetjük. Fel-tűnő, hogy már $n = 1$ esetében is 0,25 m a szárnyvég felhajlása, de $n = 11$ törőterhelési többlet mellett csaknem 3 m!

Igen érdekes összehasonlításra ad alkalmat a különféle építési anyagú, méretű, szerkezetű és feladatú vitorlázógépek szárnyain a varsói egyetem munkatársai: R.



184. ábra. A Cirrus szárnyának deformációja különféle hajlítógénybevételek alatt



185. ábra. Néhány vitorlázó repülőgép szárnyának hajlítási és csavarási hatásábrája

a) hajlítás; b) csavarás

1 Minimoa; 2 R-22S Június 18; 3 Sohaj; 4 M-22; 5 SZD-12 Mucha 100; 6 SZD-38A Jantar 1; 7 Kranich; 8 L-107 Lunak; 9 SZD-30 Pirat; 10 IS-4 Jastrzeb; 11 R-26S Góbé

Aleksandrowicz és W. Lucjanek [3], továbbá a Budapesti Műszaki Egyetem Repülőgépek Tanszéke által végzett merevségi mérések alapján készült 185a ábra. Ezen a vizsgált szárnyak hajlítási hatásábráját látjuk. Ez azt mutatja meg, mekkora a szárny szimmetriáskijától valamely z távolságra levő *I*, *II*, *III* stb. metszetben a lehajlás, ha ott éppen 1 kp erő hat. A hatására ilyenformán megmutatja a teljes szárny hajlításra deformálódott alakját. Ha ezt az alakot, mint az ábrán tettük, a fél fesztávolság százalékos eloszlásában ábrázoljuk, a különböző fesztávolságú és szerkezetű gépek szárnyainak deformációit és ezen keresztül merevségüket összehasonlíthatjuk.

A definíció szerint a szerkezet merevsége ott nagyobb, ahol f értéke kisebb, ill. a rugalmassága ott nagyobb, ahol f is nagyobb. Az ábrán rögtön feltűnik a *Jantar 1* szárnyának hajlítással szembeni viszonylag csekély merevsége. Ez a *Cirrus*éhoz hasonló építési anyag következménye. A lehajlás a fél fesztávolság 90%-ában levő metszetenél $\left(0,9 \frac{b}{2}\right)$ -nél már több, mint ötszöröse az ábrán az ellentétes, kedvező végletbe tartozó, igen merevszárnyú *R—26S Góbé*nak.

Az ábra szerint a *Góbé* szárnya a legmerevebbek közé tartozik, még az egykori *Kranich* közismerten merev szerkezeténél is valamivel kisebb lehajlásokat mutat. Az itt közöltek közül csak a korlátlanul műrepülhető, $b = 12$ m fesztávolságú *Jastrzeb* szárnya merevebb. Érdekes következtetést vonhatunk le — szárnyának deformációját vizsgálva — a *Piratról* is. Ennek ugyanis szárnyközéprésze mintegy $0,6 \frac{b}{2}$ -ig rend-

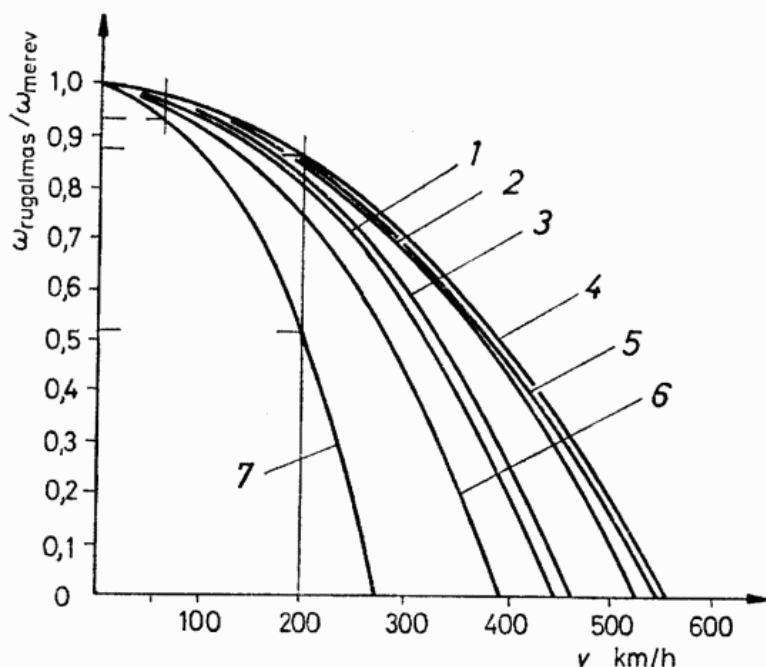
kívül merevnek mutatkozik. A háromrészes szárny külső szakaszai azonban igen rugalmasak és a szárnyvégen látható lehajlás főként ezen a külső szakaszon alakul ki.

Mint a későbbiekben látni fogjuk, a hajlítómerevség mellett a szárny csavarásra való kellő merevsége talán még fontosabb. A 185b ábrán az előbbiekhöz hasonlóan a csavarómerevség hatásábráját szemléltetjük. Ezen az *I*, *II*, *III* stb. metszetekre ható 1 kpm nyomaték hatására bekövetkező φ elcsavarodási szög látható ugyancsak a fél fesztávolság százalékos eloszlásában nagyobbbrészt azon repülőgépek szárnyaira, amelyek hajlítómerevségét már az előző ábrával kapcsolatban vizsgáltuk. Az ábra szerint az *R—26S Góbé* itt is a legkedvezőbb értékeket mutatja, bizonyítva különlegesen domborított szárnyának kiváló tulajdonságait. Az ellentétes végletet csavarómerevség szempontjából az 1951-ből származó *R—22S Június 18* szárnya képviseli a *Góbé* $0,9 \frac{b}{2}$ -nél mutatott elcsavarodási szögének nyolcszorosát is meghaladó értékkel.

A *Góbé* mellett a legmerevebb szárnyúaknak most is a korlátlanul műrepülhető gépek (*Lunak*, *Jastrzeb*) bizonyulnak, de fel kell figyelniük a *Jantar 1* szárnyának jó közepes elcsavarodási szögeire is. Ez utóbbi azt jelzi, hogy bár az üvegszálerősítésű, műgyanta anyagú szárnyak hajlítómerevségével kapcsolatban még lehet kívánni való, csavarómerevségük elfogadhatóvá tehető a különleges szendvicsszerkezet alkalmazásával, amelyre ez az építési anyag igen alkalmas.

A nagy alakváltozások különösen akkor járhatnak kellemetlen következményekkel, ha a deformáció hatására a szerkezetet terhelő külső erők, ill. nyomatékok nagysága megnő vagy kedvezőtlenebbül oszlik el. Mivel a repülőgép terheléseinek túlnyomó része légerőkből származik — és ezek alakulása különösen érzékeny az alakhűsége, ill. az alakváltozásra —, a csavarómerevség vitorlázó repülőgépek esetében különös jelentőségű.

A szárny erős hajlása általában nem káros. Sokkal kedvezőtlenebbül hat a csavarómerevség elégtelensége. Ennek oka, hogy a szárnyprofil igen érzékeny a legcsekélyebb állásszögváltozásra is, és már kicsiny elcsavarodási szögek is a nyomáse-



186. ábra. Néhány vitorlázó repülőgép csűrőhatásosságának a szárny elcsavarodásából származó csökkenése a sebesség függvényében

1 Cinke; 2 Olympia-Meise; 3 Z-04 Béke; 4 L-107 Lunak; 5 Slingsby Sky; 6 M-22; 7 R-22S Június 18

oszlás erős változását vonják maguk után. Ez az érzékenység zuhanórepülésben még fokozódik, ahol az eredő felhajtóerő teljesen vagy közel megszűnik, de ez nem zárja ki az esetleg igen nagy, egymással ellentétesen ható erők jelenlétét.

A szárny elégtelen csavarómerevségének a következményei lehetnek:

a) A csűrőkormány hatásosságának csökkenése. Ez a szárny rugalmasságának természetes következménye. A csűrőkitérítés ugyanis a szárny bizonyos mértékű elcsavarodását vonja maga után, és ez egy adott csűrőkitérítési szög mellett annál nagyobb, minél rugalmasabb a szárny és minél nagyobb a sebesség, ill. a sebességgel négyzetesen változó légerők. A csűrő kitérítése következtében a szárnyon keletkező légerők a kormány hatásosságát csökkentő módon változnak meg, és ezzel a csűrés által a gép hossz tengelye körül létrehozott orsózó szögsebesség is csökken. A 186. ábrán néhány vitorlázógép példáján szemléltetjük a csűrőhatásosságnak a szárny csavarómerevségétől függő csökkenését oly módon, hogy a valóságos, rugalmas szerkezetű szárnyra elért ω_{rugalmas} szögsebesség és a teljesen kitérített csűrővel, de merevnek tekintett szárnyra elérhető ω_{merev} elméleti szögsebesség arányát a repülési sebesség függvényében ábrázoltuk. Az előzőknek megfelelően a csűrőhatásosság legnagyobb romlását a *Június 18* gépnél látjuk, mígy a *Sky*, a *Lunak* és a *Meise* gépek görbéi csaknem egyformán futva a jobb értékeket mutatják. Az üzeminek tekinthető 50...200 km/h közötti sebességtartományban az ábra szerint a csűrőhatásosság a gépeknél 10...48%-ot csökkent.

b) A csűrőkormány hatásának megszűnése, a kormányhatás megfordulása. Ha a szárny csavarásra különösen rugalmas, vagy az igen nagy sebesség mellett kitérített csűrő által létrehozott nyomáseloszlás igen nagy elcsavarodást okoz, előfordulhat, hogy a csűrő hatásossága teljesen megszűnik, sőt az elcsavarodott és az elcsavarodás következtében megváltozott állásszögű szárnyon olyan nyomáseloszlás alakulhat ki, amely a csűrőkitérítéssel előidézni kívánt orsózónyomatékkal éppen ellentétes hatású forgó mozgást hoz létre a gép hossz tengelye körül. Az a sebesség, amelyen ez bekövetkezik, a csűrőreverzalás sebessége.

c) Ha a szárny erősen elcsavarodott, az elcsavarodás miatt megváltozott állásszögek következtében a légerőkből származó csavarónyomatékok lényegesen nagyobbak a deformálatlan szárnyon keletkezőknél. Ezek a nyomatékok az elcsavarodás szögét tovább növelik, amivel természetesen együtt jár a légerők nyomatékának

további növekedése. Az elcsavarodás olyan mértékig nőhet, amikor már a külső erőknek ellenálló belső erők nagysága, azaz az anyag szilárdsága nem elegendő, és a szárny letörik. Ezt az esetet a *szárny aperiodikus* (aperiodikus, mert nem rezgésből származó) *lecsavarodásának*, azt a sebességet pedig, amelynél ez bekövetkezik, *divergenciasebességnek* nevezzük.

d) Az $Y = 0$ eredő felhajtóerőt létrehozó zuhanórepülésben a szárny légerőeloszlása az elcsavarási eloszlással azonos, vagyis a negatív állásszögű szárnyvégeken ébredő jelentős negatív felhajtóerőt a pozitív állásszögű szárnyközép pozitív felhajtóereje ellensúlyozza 0 eredővé. A feszítávolság egy részén felfelé, más részén lefelé irányuló erők jelentős hajlítónyomatékot ébresztenek. Különösen régi, kétfőtartós gépek esetében válhatott szárnytörés forrásává ez az eset, amelyeknél a csavaróigénybevételt is a főtartók vették fel járulékos hajlítás formájában.

e) A szárny elégtelen csavarómerevsége végezetül a flatter jelenségéhez vezethet, amikor a hajlító- és csavarórezgésbe kerülő szárny az áramlástól kölcsönzött energiával gerjesztődik, és igen rövid idő alatt olyan rezgési amplitúdók alakulnak ki, amelyek okvetlenül töréshez vezetnek. A vitorlázógép rezgési és flatter jelenségeivel a következőkben foglalkozunk.

Az előzők képet adnak arról, hogy a szerkezet *kellő merevsége* a szilárdság mellett milyen nagy jelentőségű. Az építési előírások mindegyike tartalmaz utasításokat erre vonatkozóan. Így az előzőkben leírt szélsőséges esetek az előírások betartása esetén a repülés normál üzemi sebességtartományában nem fordulhatnak elő. Különösen a csavarómerevségre kell a tervezőknek nagy gondot fordítaniuk, a nagy hajlítómerevség emellett másodrendű fontosságú. Természetesen a szárnyé mellett a repülőgép egyéb részeinek kielégítő merevsége is fontos. Így a vezérsíkoké és a kormányfelületeké, amelyek tulajdonságai a szárnyéhoz hasonlóak. A hajlításnak és csavarásnak kitett törzs merevsége általában már a geometriai méretek miatt elfogadható, bár a kis ellenállásra való törekvés miatt a szárnyak mögött kis keresztmetszetű csővé kialakított törzsek gondot okozhatnak e téren. Az ilyen megoldású törzsek merevségét régebben úgy növelték, hogy acélsodronyokkal kikötötték a szárnyakhoz (*OKA—19, Koma*). A korszerű gépeken ez a megoldás olyan ellenállástöbbletet jelentene, amely miatt más megoldásokat kerestek.

4.7.1. Néhány szó a rezgőrendszerekről

A rugalmas szerkezeteknek van egy olyan tulajdonságuk, amely bizonyos körülmények között igen kellemetlenné válhat. Ez a tulajdonság a rezgésre való képesség.

Minden rugalmas test és szerkezet elképzelhető elemi tömegekből és a tömegeket összekötő rugókból összetettnek. A tömegek összessége adja a test össztömegét, a rugók pedig rugalmasságát teszik lehetővé. A rugókból és tömegekből álló szerkezeteket *rezgőrendszernek* nevezik. A legegyszerűbb rezgőrendszert, amely egyetlen rugóból és tömegeből áll, egy szárával az asztal lapjára szorított fejesvonalzó szemlélteti. A rugó itt a hajlékony, lapos vonalzó, a tömeget pedig a fej képezi. A száránál így befogott fejesvonalzó hajlítórezgésbe jön, ha fejét kissé lenyomjuk, majd elengedjük. A tapasztalat szerint az egyetlen impulzussal megindított, majd magára hagyott rezgés az anyag belső súrlódása következtében egy idő múlva megszűnik. A rezgéseknek ezt a fajtáját *sajátrezgésnek* nevezzük. A rezgő mozgás fontos jellemzője az A amplitúdó, amely nem más, mint a kilendült tömeg legnagyobb negatív vagy pozitív

irányú kitérése, továbbá a rezgésszám, azaz a tömeg ide-oda lengésének időegységre eső száma.

A rezgésszám a tömegnek és a rugó merevségének a függvénye:

$$n = 9,55 \sqrt{c/m} \quad 1/\text{min},$$

vagyis minél nagyobb a rugó c merevsége az m tömeghez viszonyítva, annál nagyobb a rezgés szaporasága, a rezgésszám. Mivel a például vett rezgőrendszer csak egy tömegből és egyetlen rugóból áll, azért rezgésszáma is csak egy lehet, vagyis az egytömegű rezgőrendszer sajátrezgését mindig egy és ugyanazon rezgésszámmal végzi.

Ha a rezgés megindulta után a rezgőrendszert nem hagyjuk magára, hanem az impulzus szabályos időközönként újra hat a tömegre, *gerjesztett rezgésről* beszélünk. A gerjesztés időegységre eső száma, a sajátrezgésszám és az amplitúdó között fontos összefüggés áll fenn. Minél inkább megközelíti a gerjesztések száma a sajátrezgésszámot, annál inkább nő az amplitúdó, hogy legnagyobb értékét $n_{\text{gerj}} = n_{\text{saját}}$ esetén, rezonanciában érje el. Az amplitúdó nagyságát rezonanciában csak a szerkezetre ható különféle csillapítások (pl. az anyag belső súrlódása) korlátozzák. A gerjesztés szaporaságát a sajátrezgésszám fölé növelve ($n_{\text{gerj}} > n_{\text{saját}}$) az amplitúdó ismét csökken, és egy minimális érték felé közeledik.

A valóságban megépült szerkezetek nem ilyen egyszerűek. Még az egyetlen anyagból készült, és végig egyforma keresztmetszetű, „homogén” egyenes rúd is végtelen sok elemi tömegből és az ezeket összekötő rugókból állónak tekinthető. A valóságos szerkezeteket ezért rezgéstani szempontból n számú elemi tömegből és az őket összekötő $n-1$ számú rugóból álló rezgőrendszerként kezeljük. Az ilyen szerkezetek rezgési problémái az előbbi példánál jóval bonyolultabbak.

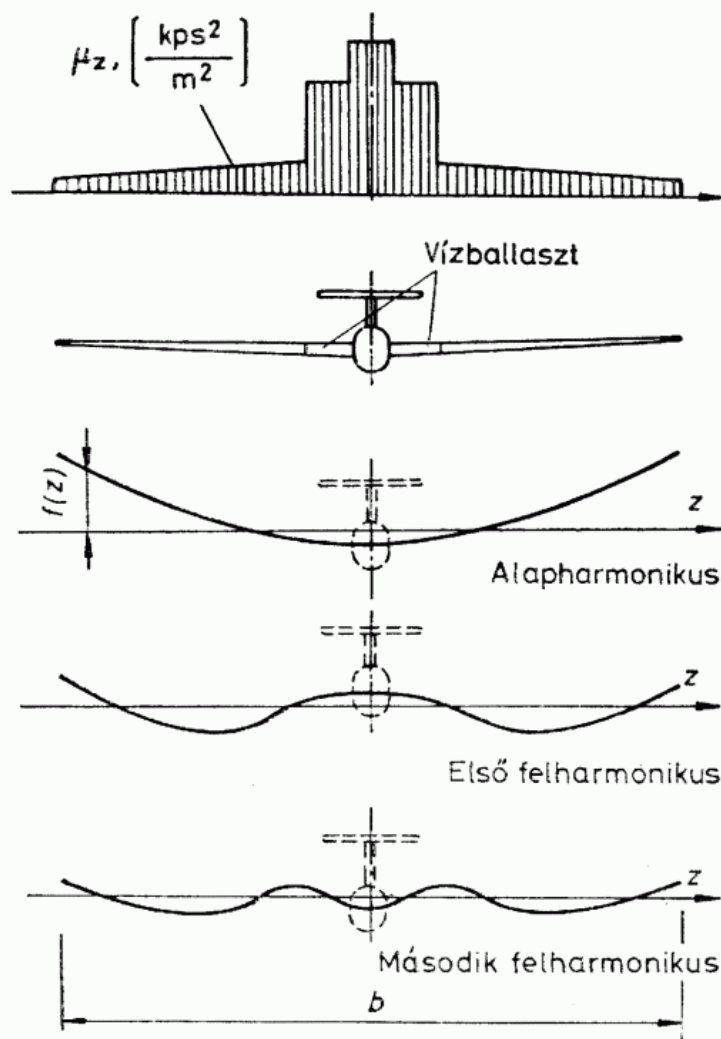
4.7.2. A vitorlázó repülőgép szerkezeti részei mint önálló rezgőrendszerek

4.7.2.1. A szárny

A vitorlázó repülőgép szárnyát rugalmas rúdnak tekinthetjük, amelynek tömeg- és merevségeloszlása nem egyenletes, s amellet többé-kevésbé koncentrált tömegek is csatlakoznak hozzá (pl. a törzs, a szárnyban elhelyezett vízballaszt stb.). A vitorlázó repülőgépek szárnyának merevsége síkjára merőlegesen a legkisebb, ezért ebben az irányban hozható a legkönnyebben hajlítórengésbe. Vizsgáljuk meg először ezt az esetet.

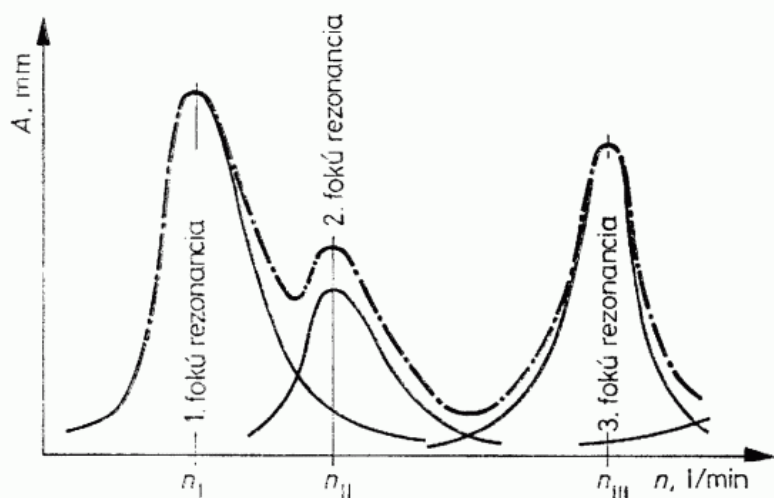
Az egyszerűsítésül rugalmas rúdnak tekintett szárny *végtelen szabadságfokú rezgőrendszer*. Ez azt jelenti, hogy rezgés közben végtelen sokféle, hullámvonalhoz hasonló alakot képes felvenni, de ezek mind más és más sajátrezgésszámmal alakulnak ki. A rezgésszám nagysága és a szárny egyes pontjainak amplitúdója — amelyek összessége végső soron a rezgési alakot adja — a merevség és a tömegek fesztávolság menti eloszlásától és ezek egymáshoz viszonyított arányától függ.

A legkisebb sajátrezgésszámmal, azaz a leglassúbb rezgéssel az egyetlen hullám alakú alaprezgés alakul ki. Sorban ezután mindig nagyobb rezgésszámmal jön létre a kéthullámú első, a háromhullámú második stb. felharmonikus (187. ábra). Ismétlődő gerjesztésre a szárny lényegében úgy viselkedik, mint az egytömegű lengőrend-



187. ábra. A vitorlázó repülőgép tömegeloszlása, és a szárny hajlító rezgésformáinak kialakulása

szer. Ha a gerjesztés szaporasága sokkal kisebb az alaprezgés sajátrezgésszámánál, akkor kialakul ugyan az alaprezgési alak, de az amplitúdók viszonylag kicsinyek. A gerjesztések szaporaságát növelve a rezgőrendszer egyes pontjainak amplitúdói növekednek, és rezonanciában ($n_{\text{gerj}} = n_I$, azaz elsőfokú rezonanciában) maximális értéküket érik el. A gerjesztés szaporaságát tovább növelve az alaprezgésforma amplitúdói — a már ismert módon — csökkennek ugyan, de lassan az első felharmonikus rezgési alakja is kezd kialakulni, amely $n_{\text{gerj}} = n_{II}$, azaz másodfokú rezonancia esetén éri el amplitúdói legnagyobb értékét. A gerjesztés szaporaságát még tovább fokozva



188. ábra. Egy vitorlázó repülőgép szárnyvégének rezgési amplitúdói különböző fokú rezgések esetén

az első felharmonikus amplitúdói is csökkenni kezdenek, de fokozatosan kialakul a második, harmadik stb. felharmonikusok lengésalakja és rezonanciája. A 188. ábrán egy szárnyvég amplitúdóinak változását látjuk gerjesztett rezgés esetén a rezgésszám függvényében. A jellegzetes, kiemelkedő csúcsok a rezonanciát jelzik, amikor az amplitúdókat csak az anyag tulajdonságaiból és a légerőktől származó csillapító hatások korlátozzák. Az ábráról még a rezgéseknek az a tulajdonsága is leolvasható, hogy az egyes rezgési alakok egymásra szuperponálódnak, s a szerkezet adott pontjának eredő mozgása a különböző rezgési alakokból származó amplitúdók eredőinek megfelelően folyik le. Rezonancián kívül ezek határozottabban érvényesülnek, mint rezonanciában, ahol az éppen rezonanciában levő rezgésalak amplitúdóihoz viszonyítva a többi elenyésző nagyságú.

Míg a motoros repülőgépek szárny súly/összes súly aránya 1/10-re tehető, addig ez a viszony vitorlázó repülőgépek esetében 1/2...1/3. Motoros repülőgépeknél ezért általában úgy vehető, hogy a lényegesen nagyobb tömegű törzs a szárny rezgései közben mozdulatlanul marad, azaz a szárny töben mintegy befogva mozog. A vitorlázó repülőgépek súlyaránya miatt a rezgésekben az *egész gép* részt vesz. A mechanika egy törvénye kimondja, hogy a test mozgását súlypontjának mozgása írja le, a rezgés folyamán tehát a test tömegeinek úgy kell pozitív és negatív irányban kilendülniük, hogy az egész test súlypontja közben eredeti helyzetében maradjon. Szemléletes példa lehet erre a nagy sebességű siklásban belengő szárnyú vitorlázógép esete. A gép súlypontjának a lengés ellenére is a siklási pályán kell maradnia, ezért a törzs a függőleges síkban a szárnyakkal ellentétes fázisú lengést végez. Ez a jelenség — a repülőgépvezetési kellemtelenségen kívül — a törzs hajlítórengését is gerjeszti.

A különféle rezgési alakok közül vitorlázó repülőgépek esetében leginkább csak az *alaplengés* jelentkezik figyelembe veendő mértékben. A 8. táblázatban különféle

8. táblázat

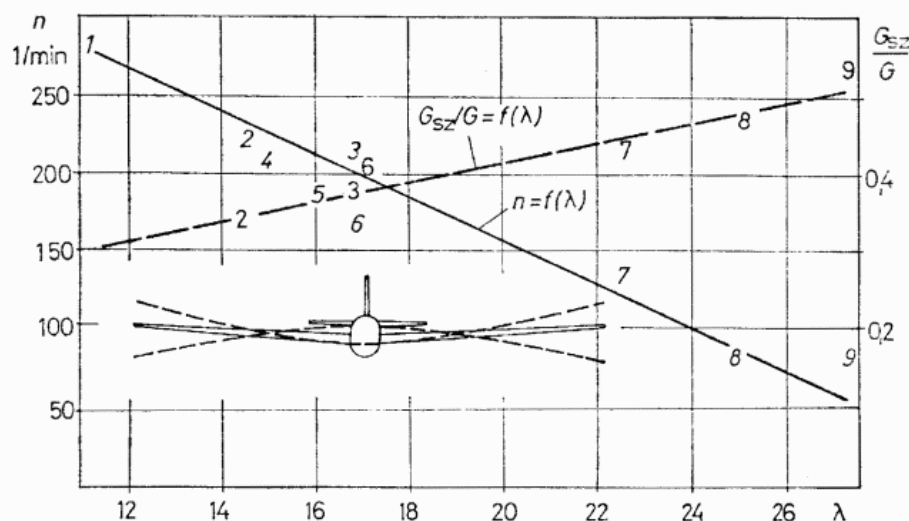
Néhány vitorlázó repülőgép szárnyának hajlító sajátrezgésszáma

Típus	Év- szám	b m	λ	G^1 kp	G_{az}^2 kp	G_{sz}/G	Sajátrezgésszám	
							n_I	n_{II}
							1/min	
<i>Rhönadler</i>	1932	17,0	16,8	250	102	0,408	195	635
<i>Kranich</i>	1935	18,0	14,3	460	175	0,380	228	
<i>Június 18</i>	1951	15,7	18,8	265	100	0,375	215	
<i>Mucha 100</i>	1953	15,0	15,0	240			192	680
<i>R—26S Góbé</i>	1964	14,0	10,9	420	112	0,266	270	630
<i>SZD—30 Pirat</i>	1969	15,0	16,3	370	144	0,388	164	
<i>Cirrus</i>	1968	17,7	25,0	460 ³	210 ³	0,457	105	
<i>St. Cirrus</i>	1969	15,0	22,5	390 ³	170 ³	0,434	150	98
<i>SZD—38A Jantar 1</i>	1973	19,0	26,8	515 ³	279 ³	0,540	98	
<i>SZD—36 Cobra</i>	1969	15,0	19,4	385	140	0,364	200	

¹ Repülősúly; ² szárny súly; ³ vízballasztal.

vitorlázógépek szárnyának sajátrezgésszámait állítottuk össze a [3, 19] és más forrásokban található kísérletek alapján. Feltűnő a 18 m fesztávolságú *Kranich* nagy merevségű szárnyát jellemző elsőfokú sajátrezgésszám nagy értéke, ill. a vele közel azonos méretű *Jantar 1* és *Cirrus* üvegszálerősítésű műgyanta építési anyagára jellemző, az előbbinek felét sem elérő értéke.

Érdekes következtetésekre ad lehetőséget, ha a táblázat adatait diagramba visszük fel (189. ábra). Látható, hogy a rezgésszám és az oldalviszony között lineáris



189. ábra. Vitorlázó repülőgépek szárnyainak rezgési tulajdonságai

1 Gö 4; 2 Kranich; 3 Rhönadler; 4 Mucha 100; 5 Sohaj; 6 SZD-30 Pirat; 7 Standard Cirrus; 8 Cirrus; 9 SZD-38A Jantar 1

összefüggés van, és pedig az oldalviszony növekedésével egyenes arányban csökken a rezgésszám. Más szóval ez is azt fejezi ki, hogy minél merevebb a szárny szerkezete, annál nagyobb a sajátrezgésszáma. Az ábra másik egyenese a G_{sz}/G arány és a rezgésszám közötti ugyancsak lineáris összefüggést szemlélteti, jelezve, hogy az oldalviszony növelésével a szárny súlyának növekedése törvényszerűen jár együtt.

Eddig csak a szárny hajlítórezgéseiről beszéltünk. A szárny azonban csavaróigénybevételek hatása alatt is áll, és rugalmassága, ill. merevsége ezekkel szemben is jelentkezik. A szárny szerkezetek rugalmas tengelyük körüli csavarórezgésekre is képesek. A csavarórezgések amplitúdójaként most a szárny szelvények pozitív és negatív irányban vett legnagyobb elcsavaródását kell értelmeznünk. Az effajta rezgések gerjesztésükkel éppúgy rezonanciába kerülhetnek, mint ezt a hajlítórezgéseknél láttuk. A csavaró sajátrezgésszám alakulására a szárny szerkezetének csavarómerevsége, ill. a szárny tömegének és csavarómerevségének aránya mértékadó. A 185b ábrán néhány vitorlázógép szárnyának fesztávolság menti csavarómerevség-eloszlását jellemző elcsavaródási hatásgörbékét ábrázoltuk. Ennek alapján e szárnyak csavaró sajátrezgésszámaira is vonhatunk le következtetéseket: az elmondottak után a legnagyobb csavarómerevségű Góbé-szárny csavaró sajátrezgésszáma lesz a vizsgált gépeké közül a legnagyobb. Utána sorrendben a Kranich, a Sky, a Lunak, a Béke stb. következik. Érdekes és az üvegszálerősítésű műgyanta szerkezeti anyagból készíthető szendvics héjszerkezetek csavarómerevségére jellemző, hogy míg a Jantar 1 szárnyát hajlítórezgések szempontjából igen lágynak találtuk, ugyanez nem mondható el a csavarómerevségéről, amely a vártnál kedvezőbben alakul.

A szárny csavarórezgése általában nem jelentkezik számottevő mértékben önállóan, de igen kellemetlenül kapcsolódhat a hajlítórezgésekkel. Erről a flutter nevű esetről a későbbiekben még lesz szó.

4.7.2.2. A törzs és a vitorlázó repülőgép egyéb részeinek rezgései

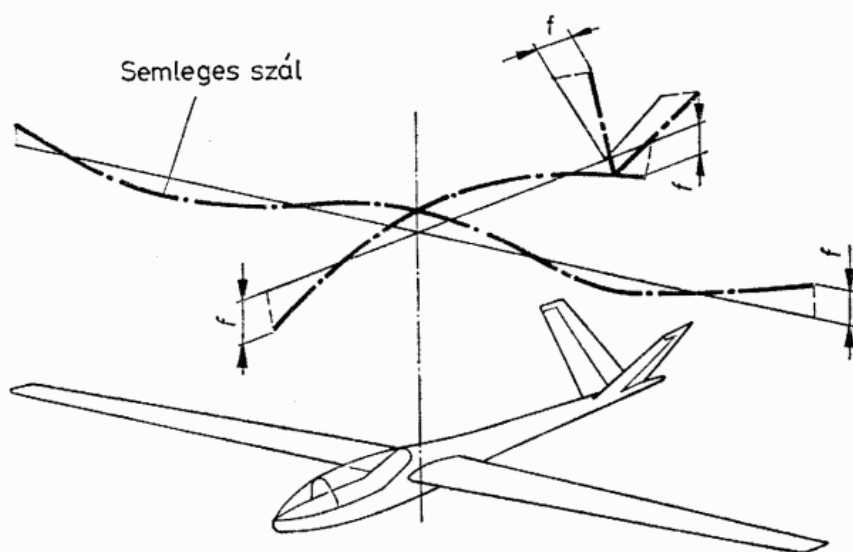
A merevség a vitorlázó repülőgép minden részével szemben fontos követelmény. Bár a törzs hajlítórezgései a szárnyé mellett általában alárendelt fontosságúak (ugyanis a szokványos kialakítású törzsek nagy merevsége miatt sajátrezgésszámuk rendszerint

igen nagy), a csavarórezgések, különösen, ha a törzs szárny mögötti része az ellenállás csökkentése érdekében kis keresztmetszetű csővé van kiképezve, bizonyos körülmények között kellemetlenül jelentkezhetnek.

A repülőgépnek tulajdonképpen minden, erőhatásnak kitett része képes rezgésre, és részt vesz a repülőgép általános rezgésében. Így a vezérsíkok és kormányfelületek a szárnyhoz hasonlóan hajlító- és csavarórezgéseket végezhetnek. Csavarórezgésbe jöhetnek a kormányfelület rugalmas tengelye körül, de a túlságos tömegkiegyenlítés miatt forgáspontjuk körül is. Ez utóbbi esetben a botkormány vagy lábkormány és a kormányfelület közötti közvetítőmechanizmus rugalmassága is fontos szerephez jut.

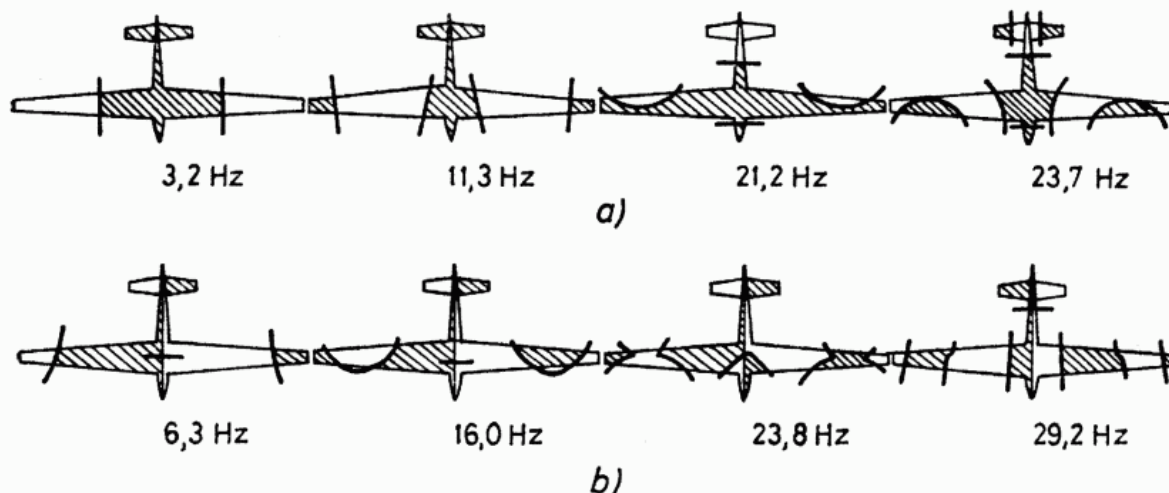
4.7.3. A repülőgép általános rezgései

Már többször utaltunk a vitorlázó repülőgépek szokásos és egyre inkább a nagyobb értékek felé közelítő G_{sz}/G viszonyára. E nagy viszonyszámok miatt a szárny és egyéb részek nem tekinthetők a gép egészétől elkülönült rezgőrendszereknek, amelyek rezgő mozgásukat, mint egy nagyobb tömeghez mechanikai befogáshoz hasonló módon kapcsolódva végzik. Ellenkezőleg, mozgásuk a repülőgép egyéb részeinek állapotát is befolyásolja. Így pl. a hajlítórezgésben levő nagy tömegű szárny súlyának ellensúlyozására a törzsnek vele ellentétes fázisú függőleges rezgő mozgást kell végeznie, hogy a mechanika törvényeinek engedelmeskedve a repülőgép súlypontja az általános mozgás pályájáról ne térjen ki. Ilyesformán a szárnyak rezgése a törzs hajlítórezgését gerjeszti. Amikor ugyanis a szárnybekötéseknél fogva a szárny azt rezgő mozgásában



190. ábra. A vitorlázó repülőgép általános rezgéseiben minden része részt vesz

magával ragadja, a keletkező tömegek a törzs hajlítói igénybevételét okozzák. Ezek ellenében a szerkezet rugalmassága hat, s így végül is kialakul a vitorlázó repülőgép 190. ábra szerinti általános rezgési képe. Az ábrán — ábrázolási nehézség miatt — nem tüntettük fel a csavarórezgéseket. A valóságban jelenlétük a képet tovább bonyolítja. Bonyolultabbá teszi a képet a magasabb fokú rezgések jelentkezése, valamint az aszimmetrikus rezgések esete is. *Szemplinska, Aleksandrowicz és Maryniak* [19] után a 191. ábrán a *Mucha 100* különféle periódusszámú rezgési kísérletei során tapasztalt rezgési képeit szemléltetjük. A rezgési alakokat mutató kis rajzokon vastagabb vonallal a rezgési csomóvonalakat jelöltük. Ezek a szerkezetnek azon helyei, amelyek



191. ábra. A *Mucha 100* rezgési csomóvonalai különböző szaporaságú rezgések esetén
a) szimmetrikus rezgések; b) aszimmetrikus rezgések

a rezgő mozgás folyamán eredeti helyzetükben maradnak, tehát az egyik oldalukon látható, vonalkázással jelzett repülőgéprész éppen ellenkező fázisban mozog a csomóvonal másik oldalán vonalkázatlanul hagyott területtel.

4.7.4. A rezgéseket gerjesztő erőhatások

Háromféle gerjesztő erőhatást különböztethetünk meg:

- aerodinamikai eredetűeket,
- szélleőkésből és
- kormánykitérésből származókat.

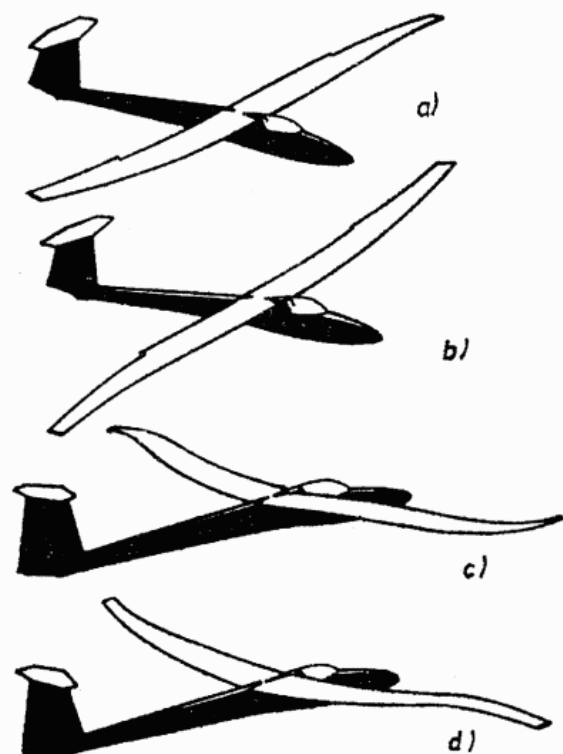
Az aerodinamikai eredetű gerjesztő erőhatások közé elsősorban a repülőgép nem tökéletes kialakításából származó áramlási leválások tartoznak. Leginkább a szárny—tözs átmenetnél vagy a kis sebességekkel túlságosan húzott helyzetű törzs kabinkörnyékéről válnak le örvények, és a vízszintes vezérsík, ill. a farok rezgését okozhatják. Bár az átesés előtt a farok enyhe remegése a gépvezetés biztonsága szempontjából még kívánatos is (az építési előírások az átesés közeledténél jelzését $v = 1,1 v_{\min}$ sebességnél kívánatosnak tartják), a túlzott rezgések mégis kellemetlenek, és szilárdsági problémákat is okozhatnak. Ezeket tehát ki kell küszöbölni a törzs szerkezeti merevségének növelésével vagy az áramlásleválások megszüntetésével.

Az aerodinamikai gerjesztések közé tartozik a nyitott féklap által örvényessé tett áramlás is, ami szintén kellemetlen farokrezgést okozhat.

A szélleőkés ritkán jelentkezik olyan periodikus ismétlődéssel, amely mint gerjesztő hatás a szárny vagy farokfelület sajátrezgésszámával rezonanciába kerülhet. Jelentősége rezgési szempontból elsősorban nem is így mutatkozik meg. A rugalmas szerkezet már egyetlen impulzussal is rezgésbe hozható, és ez a rezgés a szerkezet sajátrezgésszámával csillapodó jelleggel folyik le. Így egyetlen szélleőkés is megindítja a szárny csillapodó sajátrezgését. Az amplitúdó ilyenkor a szélleőkés hatásának pillanatában, azaz a rezgés kezdetén a legnagyobb: akkora, amekkora deformációt az általa ébresztett terhelési többes létrehozott. Ez — a megengedett sebességhatárokon belül — a szárnyat még nem veszi túlzottan igénybe. A szélleőkés akkor válik a rezgések szempontjából veszélyessé, ha a hatására létrejött egyféle rezgések a szerkezet valamely más rezgéseivel kapcsolódnak. Így pl. a hajlítórezgés csavarórezgéssel. Ebben

az esetben egyetlen szélleőkés is kritikus helyzetet teremthet, és adott körülmények között sajátgerjesztéshez, majd a szerkezet töréséhez vezethet.

Hasonló okokból válhat kellemetlen rezgések okozójává — a dolog természete miatt elsősorban nagy sebességek mellett — a *durva kormánykitérítés*, mindenekelőtt a csűrőkitérítés is. Viszonylag kis sebességgel alakult ki a kiegyensúlyozatlan csűrő miatt a 192. ábrán látható aszimmetrikus lengéskép. A csűrőrezgés ez esetben még könnyebben kapcsolódhat a szárny csavarórezgéseivel.



192. ábra. A szárny aszimmetrikus rezgése kiegyenlített csűrő esetén

a) és b) egycsomópontos; c) és d) kétsomópontos rezgés

Tudjuk, hogy a kormányfelületeket úgy alakítják ki, hogy kitérítésükhöz szükség legyen ugyan a kitérítés mértékével arányosan növekvő erőre, de ez a gép vezetése szempontjából még kellemes értéket ne haladja meg. A kormányerőket ezért aerodinamikai úton vagy a forgástengely előtti *tömegkiegyenlítéssel* csökkentik. A tömegkiegyenlítés mértéke a csűrők rezgése szempontjából rendkívül fontos. A túlságosan kiegyenlített csűrő ugyanis könnyen rezgésbe jöhet forgástengelye körül, és a periodikus állásszögváltozásaival változó nagyságú légerő a szárnyat hajlító- és csavarórezgésre gerjesztheti. Az ilyen kapcsolt, csűrőgerjesztésű szárnyrezgés kísérleti gépek vagy prototípusok esetében már vezetett tragikus végű balesetekhez.

Felmerülhet a kérdés: mi a repülőgépvezető teendője, ha repülés közben gépének valamelyik része rezgésbe jön? Ha a gerjesztések természetéről mondottakat figyelmesen olvastuk, erre könnyen választ kaphatunk. Mindhárom eredetű gerjesztés közvetlenül vagy közvetve a sebesség függvénye. Ha tehát az átesést megközelítő kis sebesség mellett lépnek fel rezgések (leginkább a farok ún. lobogása), akkor a sebesség növelésére meg is szűnnek. Éppen ellenkező a teendő a nagy sebesség melletti rezgések esetében. Ekkor ugyanis a sebesség csökkentése vezet eredményre.

4.7.5. A hajlító- és a csavarórezgések kapcsolódása

A hajlító- és csavarórezgések kapcsolódása rendkívül veszélyes, mert kölcsönösen gerjeszthetik egymást. Egy kritikus sebességnél ez a gerjesztés annyira fokozódik, hogy bekövetkezik a szerkezet törése. A hajlító- és csavarórezgés kapcsolódása *tehetetlenségi* vagy *aerodinamikai úton* jöhet létre.

A szárny súlyvonala és rugalmas tengelye általában nem esik egybe. Ez — mint korábban láttuk — azt eredményezi, hogy a szárny gyorsuló mozgás során való hajlításakor a tömegezők csavarónyomatékot is hoznak létre. Ez a tehetetlenségi kapcsolat a szárny hajlítórezgése közben is létrejön, és azzal egyidejűleg csavarórezgéseket is ébreszt (193. ábra).

A csavarórezgés aerodinamikai úton is kapcsolódhat a hajlítórezgéssel. Ha ugyanis repülés közben a szárny valamilyen okból csavarórezgésbe jön, állásszöge a rezgésszámnak megfelelő szaporasággal $\pm \Delta\alpha$ értékkel periodikusan változik. Ez az állásszögváltozás hasonló periodikussággal $\pm \Delta c_y$ felhajtóerő-változást hoz létre, amely viszont a szárny hajlítórezgését okozza.

A kapcsolt rezgések mindkét esetben akkor válnak veszélyessé, ha a hajlító- és csavarórezgésszám megegyezik, és a csavarórezgés a hajlító mögött fázisban késik (194. ábra), vagyis amikor a hajlítórezgés kitérése és az állásszögváltozás között az ábra szerinti kapcsolat alakul ki. A $\Delta\alpha$ állásszögváltozás miatt létrejövő felhajtóerő-változás ekkor mindig éppen a kitérést növelő értelmű: a rezgés önmagát gerjeszti azáltal, hogy a rezgés gerjesztéséhez szükséges energiát az áramlásból szerzi meg. Az egymással rezonanciában levő hajlító- és csavarórezgés kitérései minden határon túlnőnek, és a szerkezet eltörik.

A veszélyes kapcsolódást akkor lehetne elkerülni, ha a súlyvonal, a rugalmas tengely és az aerodinamikai tengely egybeesne. Gyakorlatilag ezt nem lehet teljesen megvalósítani. A helyzeten ezért a hajlító- és a csavarórezgések egymástól való elhangolásával lehet segíteni, ill. a szerkezet merevségének, de mindenekelőtt csavarómerevségének a lehetőség szerinti maximumig való fokozásával. Jó példa a szerkezet eltérő merevségével való elhangolásra a *Jantar 1* esete, ahol az építési anyag által megszabott kis hajlítómerevség a szendvicsszerkezetből származó nagy csavarómerevséggel párosul.

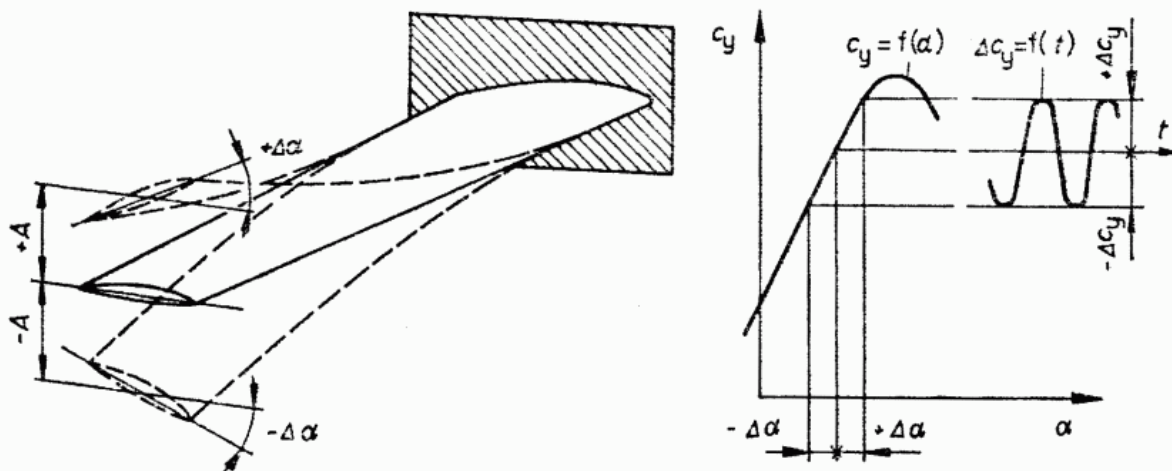
A hajlító- és csavarórezgések kapcsolódása a farokfelületekkel, ill. a törzzsel kapcsolatban is előfordulhat. Ez utóbbi lehetőségét könnyen belátjuk, ha a törzs igénybevételeivel kapcsolatban az oldalkormány-kitérítés által egyidejűleg ébresztett hajlító- és csavarónyomatékokról mondottakra visszagondolunk. A kapcsolódás itt is bekövetkezik tehetetlenségi vagy aerodinamikai úton egyaránt.

Azt a kritikus sebességet, amelyen a csavaró- és hajlítórezgések kapcsolódása várható, *kritikus fluttersebességnek* nevezzük, és $v_{kr} = \sqrt{\frac{K}{abc}}$ képlettel számíthatjuk.

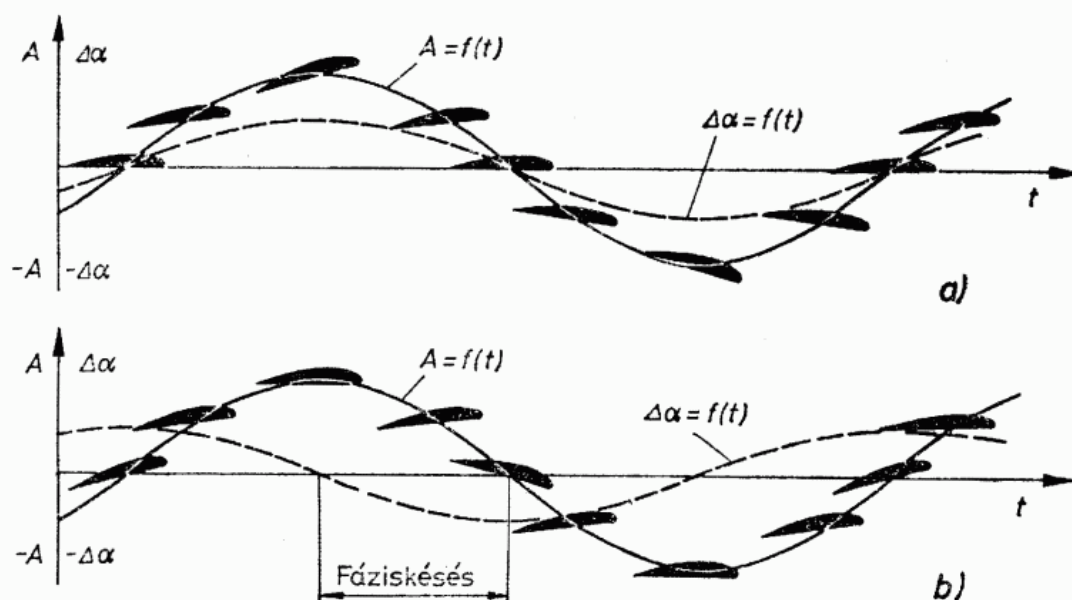
A képletben K a repülőgép vizsgált főrészeének csavarómerevsége, a , b és c pedig a főrészt jellegzetes mérete.

A repülőgép szárnyának kritikus fluttersebességét az előző képlet kibővítésével kapott összefüggésből számíthatjuk ki:

$$v_{kr} = \sqrt{\frac{K}{0,9 \frac{b}{2} h_k^2}} \cdot \frac{1 - 0,83\xi + 0,4\xi^2}{\gamma - 0,1}.$$



193. ábra. A flutter létrejötte



194. ábra. A flutter létrejötte

a) a rezgés és az állásszögváltozás fázisban van; b) az állásszögváltozás a rezgést fáziskéséssel követi

A képletben eddig ismeretlen jelölések: h_k (m) a szárny közepes geometriai húr-hossza, ξ a szárny trapézviszonya, γ pedig a szárny súlyvonalának átlagos elhelyezkedése a belépőéltől a húr-hossz százalékában mérve.

Amikor e fejezetben a vitorlázó repülőgép szerkezetének merevségével és rezgési kérdéseivel foglalkoztunk, mindenütt kritikus sebességekkel találkoztunk, amelyet elérve a repülőgép szerkezetének valamiféle károsodása várható. Ezek a kritikus sebességek általában nem olyan nagyok, hogy vitorlázó repülőgéppel elérhetőek ne lennének. A fejlődés kezdetén és a húszas években nem egy vitorlázó repülőgép pusztulását okozta az ismeretek hiánya miatt nem eléggé mereven kialakított szerkezet törése, annak ellenére, hogy még viszonylag kicsi, legfeljebb a legjobb siklószámhoz tartozó optimális sebességgel repültek.

A vitorlázó repülőgépek fejlődése a minimális merülősebességekre való törekvé-sen kívül ma már sokkal inkább a nagy sebességek mellett is jó siklószámok elérésére irányul. Korábban már szó volt róla, hogy a legújabb vitorlázó repülőgépek gazdasá-gosan kihasználható sebességtartománya milyen mértékben tolódott el olyan nagy se-bességek felé, amelyek már nem egyszer közelállnak ahhoz a kritikus értékhez, amely-

nél a széllökések és a durva kormánymozdulatok következtében fellépő gerjesztő hatás a repülőgép egyes részeinek helyi vagy kapcsolt rezgéseikhez vezethet. A vitorlázó repülőgépek szárnyainak súlya az összsúly egyre nagyobb hányadát teszi ki, így e legfontosabb rezgő tömegek igen nagyok. Ugyanakkor az alkalmazott szerkezeti anyagok kis rugalmassági jellemzői miatt a szerkezetek sajátrezgésszámai olyan kicsik, hogy az aerodinamikailag egyébként igen fejlett, korszerű teljesítménygépek maximális sebességét — amelyhez pedig még mindig igen jó siklószám tartozik — általában nem a repülőgép teljesítményeinek erős romlása, hanem a flatterveszély korlátozza.

Az építési előírások mindegyike tartalmaz kikötéseket arra vonatkozólag, hogy a v_{Flutter} sebesség az üzemi sebességtartományon kívülre kerüljön. A BCAR előírás és a VSZE 1959 egyformán 120%-os biztonságot kíván, azaz $v_{\text{Flutter}} > 1,2v_D$ kell legyen. A vitorlázó repülőgépek tervezése során e feltétel teljesülését számítással kell igazolni, de ezenkívül a megépült prototípus rezgésmentességét földi és repülési próbával kell ellenőrizni.

5. A vitorlázó repülőgépek szerkezete

Az előző fejezetekben megismertük azokat a szempontokat, amelyek szerint a vitorlázó repülőgépeket a levegőben rejlő energiák minél jobb hatásfokú kihasználása érdekében kialakítják. Megismerkedtünk a különféle repülési mozzanatok közben ható erők alakulásával, a terhelési esetekkel, és ezekkel kapcsolatban ismertettük a vitorlázó repülőgép fő részeinek szilárdsági igénybevételeit.

E könyvnek nem feladata a különféle szerkezeti megoldások részletes ismertetése. Ezt nem is tehetnénk meg teljes alaposággal, mert egy ilyen vállalkozás terjedelménél fogva túlmenne e könyv keretein. Mégis a vitorlázó repülőgépekről alkotott kép teljessége kedvéért a következőkben áttekintést kívánunk nyújtani a szerkezet kialakításának főbb irányvonalairól.

Vegyük mindenekelőtt sorra a vitorlázó repülőgép szerkezetével szemben támasztott legfontosabb követelményeket:

1. A szerkezetnek az építési előírásokban meghatározott biztonsággal el kell viselnie a repülőgépre a megengedhetőség határain belül ható valamennyi igénybevételt.

2. A szerkezetnek biztosítania kell a vitorlázó repülőgép külső alakjának változatlanóságát valamennyi megengedhető nagyságú igénybevétel esetében is annak érdekében, hogy aerodinamikai tulajdonságai az igénybevételek hatására ne változzanak meg repülés közben.

3. A vitorlázó repülőgép szerkezetének a kellő szilárdság mellett a lehetőség szerint könnyűnek is kell lennie. A kis súly nemcsak a repülési teljesítményeket befolyásolja kedvezően, hanem a szilárdságot is.

4. A különféle anyagok szilárdsága a terhelések ismétlődésének a hatására csökken, az anyag kifárad. A vitorlázó repülőgép célszerű kialakításával, a szerkezet és az alkalmazott anyag helyes megválasztásával *élettartama* befolyásolható.

5. A vitorlázó repülőgépeket tároláshoz, valamint a repülőtéren kívüli leszállások után szállításhoz gyakran szerelik szét, ill. össze. A gyakori szerelésnek kitett fő részeket a szerelést megkönnyítő, egyszerű, minimális segéderőt igénylő összekötő-szerkezettel kell készíteni.

6. A vitorlázó repülőgépekhez alkalmazott építési anyagok különféleképpen reagálnak a hőre (napsütésre), a nedvességre. Az időjárás viszontagságainak kitett alkat-

részeket és szerkezeti elemeket ezért megfelelő *felületvédelemmel* kell ellátni az élettartam növelése érdekében.

7. A vitorlázó repülőgépek szerkezetének mindezen kívül olcsón gyárthatónak és könnyen javíthatónak kell lennie, és kívánatos, hogy karbantartása se legyen költséges és bonyolult. A nehezen megmunkálható anyagok, a bonyolult alkatrészek és az alkalmazott anyagok különleges kezelése (pl. hőkezelése) a gyártás és a javítás költségeit igen megnövelhetik. Márpedig e könyv egy másik helyén már utaltunk arra, hogy a vitorlázó repülőgépek ára az elmúlt, mintegy hatvan év folyamán milyen rohamosan emelkedett. Bár az áremelkedést a szerkezet folyamatos fejlődése és használati értékének növekedése (a teljesítmények növekedése, a gépek sokoldalúsága) nagyrészt indokolja, a felhasználó szempontjából mégis nem elhanyagolható tényező.

Mivel a felsorolt követelményeken kívül tulajdonképpen a repülőgéppel szemben támasztott minden követelményt — tehát a jó repülési teljesítményeket, a könnyű vezethetőséget stb. — a repülőgép szerkezetének megfelelő kialakításával kell biztosítani, valamennyi igény kielégítése nem mindig sikerül egyformán egy-egy repülőgéptípussal. Gyakran a jó teljesítmények érdekében háttérbe szorul pl. a szerkezet egyszerűsége vagy az olcsó gyárthatóság igénye. Máskor éppen ellenkezőleg — pl. a kiképzés céljára szolgálóknál —, az olcsóság, és a könnyen, nagy sorozatban való gyárthatóság érdekében a repülési teljesítmények terén tesznek szükség esetén engedelményeket. Valamennyi követelmény együttes kielégítése a tervező szaktudásától, leleményességétől, és a rendelkezésre álló eszközöktől függ. Természetesen a repülés biztonságát érintő szilárdsági feltételeknek minden esetben elsőbbséget biztosítanak. A tervező az, aki — miután a gép aerodinamikai és repülési tulajdonságait a külső kialakítással létrehozta (de gyakran ezzel egyidejűleg) — az építési anyag és a terhelések elviselésére az adott esetben leginkább alkalmas statikai elrendezést és a lehetséges legkisebb súlyú, de kielégítő szilárdságú szerkezetet megalkotja. A különféle anyagok ugyanis a sokoldalú követelményeknek nem egyformán felelnek meg, és gyakran egy-egy szerkezeti megoldás is meghatározott anyaghoz kötött. A vitorlázó repülőgépek tervezésekor ezért — a sokoldalú, egymásnak nem egyszer ellentmondó követelmények minél teljesebb kielégítése érdekében — gyakran kompromisszumos megoldáshoz kell folyamodni.

5.1. A vitorlázó repülőgépek szerkezetének általános elrendezése és osztályozása

A repülőgépek szerkezetének fejlődése során egyre inkább arra törekedtek, hogy lehetőség szerint minden szerkezeti elemet bevonjanak a terhelések hordásába. A fő szerkezeti elemek: a szárny, a törzs, a vezérsíkok és a kormányfelületek. Ezek az elemek rendszerint könnyen szerelhetően, *vasalásokkal* kapcsolódnak egymáshoz.

A *szárny* egyik legfontosabb igénybevétele a hajlítás. Ebből a szempontból kezdetben a vékony szárnyprofilok — a bennük elhelyezhető tartók kis szerkezeti magassága miatt — nagy nehézségeket okoztak. Éppen ezért a szárnyszerkezeteket eleinte kívülről merevítették. Ilyenek voltak a huzallal merevített egy- és kétszárnyú gépek, majd a dúccal *merevített szárnyú* gépek (l. az 1. fejezetet). Később a nagyobb százalékos vastagságú profilok alkalmazásával, továbbá a gépek aerodinamikai fejlődésével

járó nagyobb teherviselőképességgel lehetővé vált a merevítő nélküli, ún. *szabadonhordó* szárnyszerkezet kialakítása. Ma már ez a megoldás az általános.

A repülőgépszárny szerkezeti elemekből tevődik össze. A legfontosabbak:

— A hosszirányú merevítőelemek jellemzője, hogy a feszítávolság irányában futnak. Ilyenek a *főtartók* és a *segéd tartók* és egyes megoldásoknál a szárnyszelvény körvonala mentén elosztott *hosszmerevítők*. Rendeltetésük a hajlítónyomaték felvétele.

— A keresztirányú (húrirányú) merevítőelemek, *bordák* és egyéb merevítések a szárnyszelvény alakhűségét biztosítják és a borítást kötik össze. Egyes megoldásokban a hosszirányú elemekkel és a borítással együtt a csavaróigénybevétel felvételére is alkalmas dobozos szerkezetet alkotnak.

— A hossz tartókból és a keresztirányú merevítőkből álló vázszerkezet külső *borítása* biztosítja a szárny aerodinamikai alakját, elsődlegesen felveszi a légerőkből származó terheléseket, továbbá vastagabb anyagból készült borítás esetén egyesíti a többi szerkezeti elemet és ezáltal velük együtt a hajlítónyomatékok és a csavarónyomatékok elviselésében is részt vesz.

Vitorlázó repülőgépeken a szárnyszerkezeteknek két fő csoportját különböztethetjük meg:

— Az olyan szerkezeteket, amelyekben a *borítás nem vesz részt* jelentősen a terhelés viselésében. Ilyenekkel a vitorlázórepülés legelső időiben találkozhattunk, és a hajlítóigénybevételeket felvevő, általában két főtartót ún. diagonálkötésekkel tették alkalmassá a csavaróigénybevétel felvételére is. A rendszerint vászonból készült borítás szerepe ezekben a szerkezetekben csupán az volt, hogy a légerők megoszoló terhelését a bordákra, ill. a főtartókra továbbítsa, de a terhelés viselésében egyáltalán nem vett részt. Ma már ilyen megoldással nem találkozunk.

— A szárny szerkezetek másik fő csoportját azok alkotják, amelyekben a borítás a *terhelés viselésében számottevő módon részt vesz*, és azt a terhelés viselésére alkalmas módon alakították ki. Ismét két megoldás lehetséges:

a) A borítás csak a csavarónyomaték elviselésében vesz részt. Ez a megoldás a legelterjedtebb a vitorlázó repülőgépek körében, és általában úgy van kialakítva, hogy a hajlított tartóként, tehát alsó és felső övlécekkel (ezek veszik fel a hajlításból származó húzó- és nyomóerőket), valamint gerinclemezzel (ez a nyíróerőket veszi fel) készült főtartó előtt levő szárnyrészt fa rétegeslemez vagy fémlemezborítással látják el. A borítás és a főtartó gerinclemeze által alkotott csőszerű szerkezet, az ún. *torziós orr* a szárnyat terhelő csavarónyomaték teljes egészében való felvételére alkalmas.

A torziós orr méreteit, ill. a lemezborítás vastagságát illetően a következő összefüggés mértékadó:

$$s = \frac{M_{cs}}{2A\tau} \text{ cm,}$$

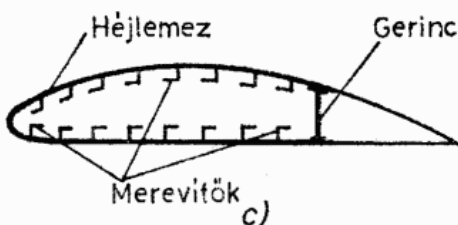
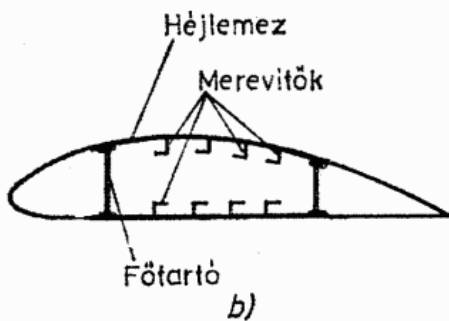
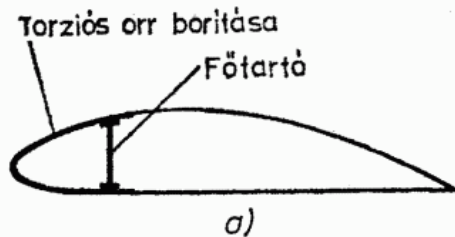
ahol M_{cs} a terhelő csavarónyomaték;

A a borítással és a főtartógerinc által közrezárt terület nagysága;

τ a borítólemezben megengedhető nyírófeszültség nagysága;

s a borítólemez vastagsága.

Az összefüggésből az derül ki, hogy a borítólemez vastagsága akkor lehet vékonyabb, ha az A terület nagy, ill. minél kisebb az A terület, annál vastagabb lemezből kell készíteni a torziós orr borítását ugyanakkora M_{cs} csavarónyomaték adott megengedhetőségű τ feszültség ébredése mellett. Mivel a szárny főtartóját a lehető legnagyobb tartómagasság elérésére a szelvény legnagyobb vastagságának helyén helyezik



195. ábra. Szárnyszerkezetek elvi megoldásai

a) egyfőtartós, torziós (csavarómerev) orral; b) kétfőtartós csavarómerev középrésszel; c) héjszerkezet

el, a szükséges csavarómerevséget általában elfogadhatóan kis súllyal valósítja meg a torziós orral kialakított szerkezet (195a ábra).

A torziós orrborításnak az aerodinamikai kialakítás által megkívánt pontos alakját a belsejében elhelyezett *orrbordák* adják meg. A csavaróterhelés szempontjából a legkedvezőbb keresztmetszeti alak a kör, ill. a cső. Ha tehát a csavarásra merevvé tett orr-rész ettől az alaktól jelentősen eltér (pl. a főtartó igen hátul van vagy a relatív szelvénymagasság kicsi), a csavarásból jelentős igénybevétel adódik át az orrbordákra. Ebben az esetben a szárny szerkezete túlságosan nehézvé válhat.

Meg kell itt jegyeznünk, hogy ennél a szárnyszerkezetnél a borítás szerepe a hajlítóterhelés elviselésében nem jelentős, egyedül a normál irányú hajlítónyomatékhoz viszonyítva jelentéktelen nagyságú tangenciális nyomaték felvételére alkalmas.

b) A *héjszerkezetekben* a borítás teljes egészében be van vonva a teherviselésbe.

Itt is kétféle megoldást különböztetünk meg. Az egyik megoldásnál a főtartók szükséges méretű övét részben vagy teljes egészében megfelelő keresztmetszetű hossz-merevítők formájában elosztják a teherviselésre alkalmas borítólemez belső oldalán, a szárnymetszet kerületén. A burkolólemez és a hossz-merevítők együttműködését a szokásosnál általában erősebb, de ritkábban elhelyezett bordák teszik lehetővé. A héjszerkezeteknek ebből a fajtájából a főtartó még nem marad el teljesen, különösen gerinclemeze van szükség a dobozszerkezet lezárására (195b ábra). Az így kialakított héjszerkezet húzó-, nyomó-, hajlító- és csavaróigénybevétel felvételére alkalmas.

A héjszerkezetek másik csoportjába azok tartoznak, amelyekből teljesen hiányoznak a koncentrált övű főtartókhoz hasonló hossz-tartók, és ezeket a viszonylag sűrűn elhelyezett kisebb keresztmetszeti felületű hossz-merevítők helyettesítik. Emellett a szerkezetet hosszában egy vagy több gerinclemez osztja rekeszekre (195c ábra).

A *vezérsíkok* és a *kormányfelületek* szerkezeti megoldásai hasonlóak a szárnyakéhoz, ezekkel ezért itt nem foglalkozunk külön részletesebben.

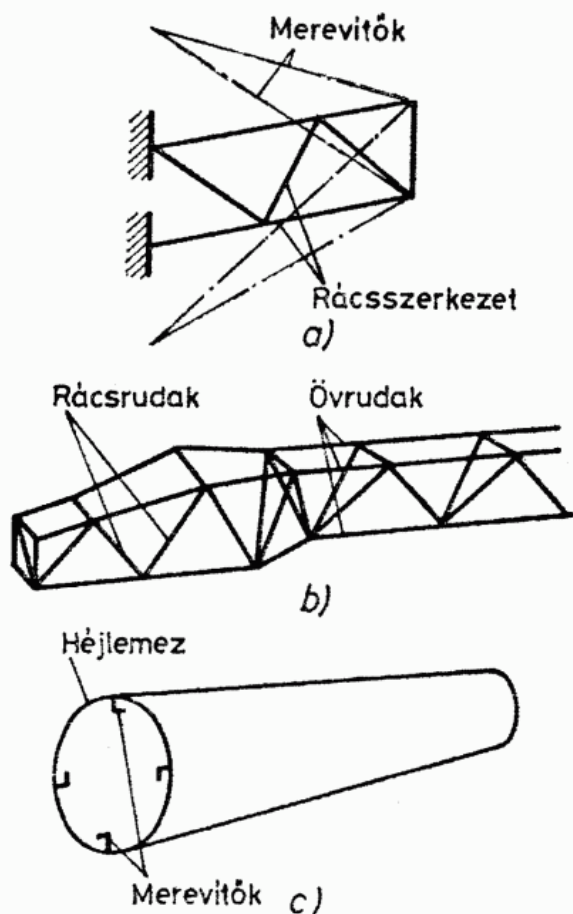
A vitorlázó repülőgépek *törzsének* szerkezete talán még a szárnyszerkezeteknél is nagyobb változatosságot mutatott a fejlődés folyamán.

A legegyszerűbb törzs síkbeli *rácsos szerkezetű*. Ez tömör vagy üreges rudakból (csőből) úgy van összeállítva, hogy a rudak végei csomópontokban találkoznak. Felül és alul övrudak húzódnak, ezeket függőlegesen oszloprudak kötik össze, majd ezek között csomóponttól csomópontig rácsrudak húzódnak. A szerkezetre — amely a síkjában ható húzó-, nyomó- és nyíróerők, valamint hajlítónyomaték felvételére alkalmas — csak a csomópontokban hathat erő. Síkjára merőlegesen nem terhelhető, ezért a síkbeli rácsszerkezetű törzseket huzalokkal merevítik ki a szárnyhoz (196a ábra).

Síkbeli rácsos szerkezetű törzse volt pl. az 1921-ben épült *F. S. 3.* gépnek (25. ábra), majd így alakították ki az egyszerűség és a súlycsökkentés érdekében az *R—07b Tűcsök* és *Vöcsök* (142. és 143. ábra) iskolagépek törzsét is.

A repüléstechnika fejlődése során a törzsrácsot, amelyet a későbbiek során térbeli szerkezetként alakítottak ki, a légellenállás csökkentése céljából áramvonalazó borítással látták el. Így ezek két részből: a teherviselő vázból és az áramvonalazó burkolatból állnak. A térbeli rácsszerkezet, amely legalább három hosszanfutó övrúddal és az ezeket összekötő oszlop- és rácsrudakkal készült, hajlító- és csavarónyomatékok felvételére is alkalmas (196b ábra). Előnye, hogy könnyen gyártható és javítható. A borítás, mivel a teherviselésben nem vesz részt, könnyen eltávolítható, és így a szerelés és a javítás, valamint az ellenőrzés egyszerű. Hátránya viszont, hogy a rácsszerkezet az aerodinamikai körvonaladta teret nem használja ki teljesen, és a rácsrudak akadályozzák a belső tér jó kihasználását. A síkbeli rácsszerkezethez hasonlóan csak csomópontokban terhelhető. Mivel a borítás és tartószerkezete nem teherviselő, a gép súlyát károsan növeli. Hátránya az is, hogy néhány, de gyakran már egyetlen rácsrúd sérülése is az egész gép tönkremenetelét okozhatja.

Fa rácsos szerkezetű törzset (ekkor a borítás rétegeslemezből készül) találunk a



196. ábra. Síkbeli (a) és térbeli (b) rácsos, valamint héjszerkezetű törzs (c) elvi elrendezése

kezdeti idők legtöbb gépén, de ilyen volt a *Grunau Baby* és az *R—11 Cimbora* törzse is. Acélcsőből készült rácsszerkezetet (borítása vászon) találunk számos teljesítményvitorlázógépen még az ötvenes években is (pl. *Zugvogel*, *Spatz*), de gyárthatósági előnyeiért leginkább iskolagépeken alkalmazták (*Pionyr*, *Doppelraab* stb.).

A héjszerkezetű törzs szerkezeti felépítése elvileg a héjszerkezetű szárny kialakításához hasonlít. Az egyes szerkezeti elemek és teherviselő szerepük megegyezik a szárny teherviselő elemeivel és azok teherviselő szerepével. Az ilyen törzsszerkezetekben a bordákat a *törzskeretek* helyettesítik. Ezeket a törzs hátsó részében általában négy hosszanfutó merevítő köti össze (196c ábra), de találkozunk teljesen hosszmerevítő nélküli szerkezetekkel is.

A vékonyfalú héjszerkezetekben körülményes az erőbevezetés. Ezért a törzsek előrészein és a szárnyak bekötéseinél sűrűbben helyezik el a törzskereteket, és szerkezetük erősebb. Az erőbevezetéseket (pl. szárny- vagy futóműbekötés) a keretekre vagy a közöttük húzódó hosszmerevítőkre erősített vasalások képezik. Az így bevezetett erőket — mivel itt most a lemezborítás a fő teherviselő elem — rövidebb-hosszabb hosszmerevítők és keretdarabok osztják szét a héjba.

A héjszerkezetben alkalmazott nyílásoknál, kivágásoknál az erőfolyam megszakad, az élesebb sarkok feszültséggyűjtő helyeket képeznek. Ezért az erők elosztásáról a kisebb nyílások környezetében alkalmazott vastagabb borítólemezzel gondoskodnak, az olyan nagy méretű nyílásokat pedig, mint pl. a repülőgépvezető kabinja, a nyílást körülvevő erős keretekkel „váltják ki”.

A héjszerkezetű törzsek igen jól alakíthatók az aerodinamikailag megkívánt külső alakhoz, és mivel a teherviselésben minden alkatrészük részt vesz, súlyuk is kicsi lehet. Számos előnyös tulajdonság miatt a korszerű vitorlázó repülőgépeken szinte kivétel nélkül ezt a megoldást találjuk meg.

Utaltunk arra, hogy a törzsek kialakításában rendkívül változatos megoldásokkal találkozunk. Így gyártási okokból előfordul, hogy a törzsnek a vezetőülést magában foglaló mellső részét térbeli rácisos szerkezetként alakítják ki, a törzsvéget pedig héjszerkezetként.

A kis súlyra és az egyszerű gyárthatóságra való törekvés különösen a kiképzés céljaira szolgáló gépeknél nyilvánul meg jellegzetesen. Mivel e gépeknél — korábbi felfogás szerint — a jó teljesítmények nem lényegesek, a *Greif VDSG* kétüléses iskolagép (kb. 1955) törzsét egyetlen gerendatartóként alakították ki, és áramvonalazását sem tartották szükségesnek (146. ábra).

Ugyanebből a megfontolásból alakult ki az *R—15 Koma* kétüléses gép szerkezete is, ahol a törzset minimális darabszámú alkatrészből építették fel, amelyben az erők felvételére szolgáló gerendatartók és keretek egyúttal a jó áramvonalazást is szolgálják. E szerkezetre a későbbiekben még visszatérünk.

5.2. Építési anyagok

5.2.1. Faanyagok

A vitorlázó repülőgépek klasszikus építési anyaga a fa. Igen fontos tulajdonsága a viszonylag csekély fajsúly mellett is elég nagy szilárdsága. Megmunkálása könnyű, és nem igényel az egyszerű asztalosműhelyben megszokottaknál bonyolultabb és költségesebb szerszámokat.

A faszerkezet javítása egyszerű és gyors, a gyártáshoz hasonlóan csekély felszereléssel, kézi szerszámokkal végezhető.

A fa előnyös szilárdsági tulajdonsága, hogy az ismételt terhelések hatására nem fárad ki úgy, mint a fémek, sőt — a Budapesti Műszaki Egyetem Repülőgépek Tanszéke által e téren végzett kísérletek tanúsága szerint — a faszerkezetek kifáradásával tulajdonképpen nem is kell számolni.

Mindezen előnyös tulajdonságok mellett igen fontos tényező a fa viszonylagos olcsósága is, bár ezt hátrányosan befolyásolja az a körülmény, hogy a legtöbb hulladék a fa feldolgozásakor keletkezik. Ennek ellenére a faszerkezetek korában az egyik legfontosabb előnynek olcsóságát tekintették.

A faszerkezetek hátrányos tulajdonsága, hogy kevésbé időjárásálló, és különösen a nedvességgel szemben érzékenyek. Az időjárás viszontagságainak kitett faszerkezetű repülőgép hamar elgombásodik és így tönkremegy. Ragasztásait a nedvesség kikezdi, így szilárdsága csakhamar csökken. A faanyagok kedvező szilárdsági tulajdonságait éppen ezért csak gondos hangározással és állandó karbantartással lehet elérni.

A faszerkezetek hátrányos tulajdonságai közé tartozik még az is, hogy töréskor a szilánkos törési felületek a gép személyzetén igen súlyos sérülést ejthetnek.

A fa építési anyagokkal szemben az előírások igen szigorúak. Nagy súlyt helyeznek az anyag minőségére. Kiválasztásakor a legnagyobb gondossággal kell eljárni. Csomók, repedések, gyanta- és féregjáratok a repülőgép építésére szánt faanyagban nem fordulhatnak elő. A füledt, korhadt és emiatt kagylós törésű fa szintén alkalmatlan. Még a szálirányt is figyelni kell, és csak párhuzamos szálirányú, teljesen egészséges, sűrű erezetű fa használható fel.

Beépítéskor ügyelnek arra, hogy a faanyagok szilárdsága a száliránnyal párhuzamosan nagyobb, mint arra merőlegesen.

A különféle fafajtákat a vitorlázó repülőgépek szerkezetében lécek és rétegeslemez formájában használják fel. A száliránnyal gondosan párhuzamosan vágott lécek keresztmetszeti méretei $5 \times 10 \dots 10 \times 20$ mm között változnak. Ennél nagyobb keresztmetszetet a lécek egymáshoz ragasztásával hoznak létre. A léceket hosszában $1 : 15 \dots 1 : 30$ arányban rézselt lapolással toldják.

A repülőgépek gyártásához felhasznált rétegeslemez három vagy a lemez vastagságától függően több, szálirányával egymáshoz képest 90° -kal elfordított rétegből van összeragasztva. A rétegeslemez használatos vastagsága $0,5 \dots 3$ mm között változik.

A faalkatrészek egymáshoz való kötésére a repülőgépiparban kizárólag az *enyvezést* használják. Az állati eredetű, ún. melegenyt, amit az asztalosiparban általánosan használnak, a repülőgép-alkatrészek kötéséhez nem használják, mivel a nedvesség hatására a kötés szilárdsága jelentős mértékben csökken. A repülőgépgyártásban az ún. *hidegenyt* használják, mégpedig részben a tejből mint legfontosabb alapanyagból előállított *kazeinenyt*, újabban pedig a műgyantából készített enyveket. Ezek teljesen nedvességálló, kötési idejük kisebb, szilárdságuk pedig nagyobb, mint a kazeinenyves kötés.

A repülőgépiparban használatos legfontosabb faanyagok a következők:

A *lucfenyőt* általában nagy igénybevételű helyeken, lécek vagy pl. vasalások alatti betétekként tömbökben alkalmazzák.

Az *erdeifenyő* felhasználási területe a lucfenyőével azonos.

A *kőrisfa* nagy szilárdságú keményfa. Igen rugalmas és kopásálló, ezért kopásnak kitett alkatrészek készülnek belőle.

A *hársfa* csak töltőanyagként használatos, mert szilárdsága kicsi. Ezzel szemben igen egyenletes eloszlású, könnyen megmunkálható anyag.

Megnevezés	γ p/cm ³	σ_B kp/mm ²	σ_{ny} kp/mm ²	σ_B/γ km	σ_{ny}/γ km	E kp/mm ²	E/γ km	$\sqrt[3]{E/\gamma}$	G kp/mm ²	G/γ km	$\sqrt[3]{EG/\gamma}$
<i>Főtartóanyagok</i>											
Lucfenyő	0,51	8	4	15,7	7,8	1 100	2 160				
Durál	2,8	42	42	15	15	7 250	2 590				
Rovingerősítésű műanyag	1,75	50	30	28,6	17,1	3 000	1 715				
Grafitzsal	1,75	320		183		25 000	14 300				
<i>Héjszerkezeti anyagok</i>											
Réteglemez (fa) ¹	0,9	9		10		1 000	1 100	420	100	111	
Réteglemez (fa) ²	0,9								350	390	
Durállemez	2,8	45		16,1		7 250	2 590	320	2 900	1 005	
Üvegszöveterősítésű műanyag	1,5	40	25	26,6	16,7	1 800	1 200	375	275	172	
Üvegszöveterősítésű műanyag	1,5								550	344	
<i>Támasztóanyagok</i>											
Balsafa	0,11	0,3		2,7							
Poliuretánhab	0,045...0,12						10...40			5...20	250...600
Polisztirolhab	0,016...0,03						10...35			5...17	400...500
Papír méhsejt	0,01...0,055						350...550			200...300	2500...4000
<i>Acélanyag</i>											
30 XICA	7,85	60	60	7,6	7,6	21 000	2 680				

¹ Szállirányban; ² diagonál

A hársfához hasonlóan csak töltőanyagként használatos a *balsafa* is, amely a repülőgépipítésben ismert anyagok közül a legkisebb fajsúlyú. Szilárdsága rendkívül kicsiny.

A *nyírfából* rétegeslemezt készítenek.

A vitorlázógépek építéséhez használatos anyagok fajsúlya és néhány szilárdsági jellemzője a 9. táblázatban látható.

5.2.2. Fémek

A vitorlázó repülőgépek építésében általános szerkezeti anyagként a fémek közül az *acélt* és a *durált* alkalmazzák.

A repülőgépipítésben egyik legfontosabb elv a kellő szilárdság mellett minél kisebb súlyra való törekvés. Ha tehát a szerkezeti anyagokat a repülőgépipítésre való alkalmasság szempontjából össze akarjuk hasonlítani, a törőszilárdság és a rugalmassági tényező mellett a fajsúlyt is figyelembe kell venni. Az anyagok igen fontos jellemzője ebből a szempontból a σ/γ = szakítószilárdság/fajsúly, ill. az E/γ = rugalmassági modulus/fajsúly, továbbá a G/γ = csúsztatórugalmassági modulus/fajsúly arányuk. A táblázat szerint az anyagok a különféle igénybevételek esetében eltérő súlyú szerkezeteket adnak. Húzott alkatrészeknél pl. a törőszilárdság és a fajsúly aránya lényeges, nyomásnak kitett alkatrészeknél, amelyek kihajlásra vannak igénybe véve, a rugalmassági tényező és a fajsúly aránya ad alkalmas összehasonlítási alapot.

A hagyományos anyagok közül húzóigénybevétel esetén a fa adja a legkönnyebb szerkezetet, majd sorrendben a durál és az acél. Ha ellenben az igénybevétel nyomóerő hatására lép fel, azaz kihajlás esetén az acél a legelőnyösebb és a durál csak utána következik, míg a fa ebből a szempontból a legutolsó helyen áll.

Ezek azok a tulajdonságok, amelyek az acélanyagok felhasználási területét megszabják a vitorlázó repülőgépek építésében. A repülőgépek fő részeit összekötő vasalásokon, futóműszárakon és tartóbakokon kívül rácsos szerkezetű törzsek készítéséhez alkalmazzák.

A vékonyfalú acélcsöveket a rácsos szerkezetek csomópontjaiban hegesztéssel erősítik egymáshoz, és ugyancsak hegesztéssel, esetleg bilincsekkel erősítik fel a rácsrudakra az alaktartó borítást felfogó elemeket. A hegesztés következtében azonban a hidegen húzott varrat nélküli acélcső szilárdsága eredeti értékéről 4...6 kp/mm²-rel csökken. Az anyag szilárdságának növelése ötvözetlen acéloknál a hegesztés rovására megy.

Az acélcsőből készült rácsos szerkezetek hátrányos tulajdonsága, hogy hegesztéskor gyakran deformálódnak, így utólagos egyengetésükre van szükség. Ennek megelőzésére a törzsrácsot általában *készülékben* építik, és a hegesztésből származó, elhúzó-dásveszélyt jelentő feszültségkülönbségeket hőkezeléssel egyenlítik ki.

A készülékben való építés egyébként a fém építési anyagból készült repülőgépek gyártásának közös jellemzője. Fémből csak készülékekben, sablonok és gyártószerszámok felhasználásával lehet a szerkezeti elemeket előállítani. Ez a szükségszerűség azonban egyúttal a sorozatgyártás lehetőségét is megteremti. További előnye, hogy az azonos szerszámokkal, készülékekben épített elemek egymás között (pl. sérülés esetén, javítás céljából) cserélhetők, mert csatlakozóméreteik igen nagy pontossággal készíthetők. A gyártás ezen előnyös tulajdonságai miatt gyakran választották az acél rácsos szerkezeteket nagyobb sorozatban épülő, főként kiképzőgépek törzséhez.

A készülékben való gyártás nagy hátránya, és ez a fém szerkezeti anyagokkal kapcsolatban ismét közös jellemző, hogy a szerszámok és a készülékek igen költségesek, sőt ezt a fém építési anyag által igényelt különleges kezelési eljárások (hőkezelés, felületvédelem) költségei még tovább növelik. A fém repülőgépek gyártása általában csak nagy darabszámban fizetődik ki.

A fémszerkezetű repülőgépek legfontosabb építési anyaga a *durál* nevű alumínium-ötvözet. Az alumínium szerkezeti anyagként való alkalmazásához csekély szilárdságát rézzel és magnéziummal ötvözve növelik. Az így kapott durál szilárdsága — kb. egyharmad súly mellett — a közönséges szénacélok szilárdságát éri el.

A durál nagy szilárdságát a benne levő réz okozza, a magnéziumnak más tulajdonságát: az önedzést köszönheti. A repülőgépgyártásban a durált főként 0,2... 2,0 mm vastagságú lemezek formájában, kisebb részben vékonyfalú, 10...30 mm átmérőjű csőként alkalmazzák. A forgácsmentes alakításhoz (hajlítás, sajtolás) ezt az anyagot ki kell lágyítani, mert különben repedezik. A lágyítást 360 °C-ra való hevítéssel, majd utána lehűtéssel végzik. Ebben az állapotban lesz legkisebb a szilárdsága, és ezért ebben az állapotban alakítható a legkönnyebben. Alakítás után ismét nemesíteni kell az anyagot, ezért ekkor 505 °C-ra hevítik, majd ismét lehűtik. E nemesítés után a durál szilárdsága fokozatosan nő, és 5...6 nap múlva minden további beavatkozás nélkül eléri eredeti szilárdságát. Ez az önedzés.

A durálban levő és annak szilárdságát növelő réz-ötvöztető igen kellemetlen tulajdonsága, hogy a korrózióállóság szempontjából szinte tökéletesnek mondható alumínium alapanyagot a korrózióra igen érzékennyé teszi. Az időjárás viszontagságainak kitett durálszerkezet — megfelelő felületvédelem nélkül — igen rövid idő alatt tönkremegy. A korrózióállóság javítására a durálból készült alkatrészeket *eloxálják*, vagyis a felületen levő oxidhártyát galvanikusan mesterségesen vastagítják. Sajnos az eloxálás sem ad tökéletes felületvédelmet. A szabad levegőnek kitett durálszerkezeten a korródálási folyamat először fehéres foltok, majd fekete, szálkás körvonalú pontok formájában egy-két hónap, de gyakran néhány hét alatt is megindul. A durálból készült vitorlázógépeket tehát gondos hangározással, és állandó, alapos karbantartással kell a repülés biztonságát is veszélyeztető korróziótól óvni.

Gyárthatóság szempontjából a durál legnagyobb hátránya, hogy nem hegeszthető, ezért a belőle készült alkatrészeket csak szegeccseléssel vagy csavarozással lehet egymással összekötni. A durálból készült szegecseket — alkalmazásuk előtt — a lemezanyagokhoz hasonlóan hőkezelní kell.

A fémből — tehát acélból vagy durálból — készült szerkezetek további, igen hátrányos, közös tulajdonsága, hogy az ismételt terhelések alatt *kifáradnak*, eredeti szilárdsági tulajdonságaikat elvesztik. A fém repülőgépek élettartamát ezért mindig meg kell adni, e célból gyakran ún. fárasztási kísérleteket végeznek egy — az eredeti kivitel-lel mindenben megegyező — szerkezeten.

5.2.3. Műanyagok

A különféle műanyagokat kis szilárdsági jellemzőik és a hőre való érzékenységük miatt a repülőgépek szilárdságilag jelentős igénybevételű helyein nem alkalmazzák. Szerepük a vitorlázó repülőgép építési anyagai között is alárendelt. Leginkább a kabin-tető átlátszó burkolatához használatos plexiüveg (polimetakrilát), továbbá a kormány-

mozgatások fogantyúinak burkolataként alkalmazott bakelit és PVC anyagok terjedtek el.

A második világháború óta egyre nagyobb jelentőségre tesznek szert a nem homogén felépítésű, anizotróp szerkezetű anyagok. Ezekre az jellemző, hogy egyik komponensük igen nagy szilárdságú, szálal erősítőanyag, másik komponensük az erősítőszálakat összekötő, azokat magába foglaló kötőanyag. Az ilyen szerkezetű anyagokat „kompozit”-nak (összetettnek) nevezik. Ezek közé tartoznak az üvegszálerősítésű műanyagok, amelyek az utolsó másfél évtizedben rohamosan tért hódítottak a vitorlázó repülőgépek építési anyagai között.

Az üvegszálerősítésű műanyagok esetében az anyag teherviselő részét 0,010... 0,012 mm átmérőjű üvegszálak képezik, amelyeket az őket körülvevő műgyanta (poliészter, etoxilin vagy epoxigyanta) foglalja össze szilárd szerkezeti egységgé. Az erőhatásokat a kötőanyag veszi fel és adja át a nagy szilárdságú, teherviselő üvegszálaknak. Az ilyen anyagokkal a fémek szakítószilárdságát is el lehet érni, sőt azt meghaladni. Fajsúlyuk mindemellett az acélokénak csak egynegyede.

Az anyag szilárdsága az üvegszálak átmérőjének csökkentésével (mivel ekkor azok szakítószilárdsága nagyobb) és a kötőanyagba ágyazott üvegszál mennyiségével növelhető. Az üvegszálakat a kötőanyagban az elviselendő igénybevétel jellegétől függően párhuzamosan szálkötegekként vagy különféle szerkezetű szövetek formájában helyezik el. A szálkötegek neve: *roving*.

Az üvegszálerősítésű műanyagok kedvező szilárdsági tulajdonságai és kis fajsúlyuk mellett a vitorlázó repülőgépek építése szempontjából előnyös, hogy a belőlük készült szerkezetek a nedvességre nem érzékenyek, nem korrodálnak, és a hőmérsékletváltozás hatására méretüket nem változtatják meg számottevő mértékben, tehát különösképpen az, hogy nem vetemednek és alaktartók. Ehhez járul az a páratlan felületi simaság, amelyhez hasonlót más anyaggal a vitorlázórepülőgép-építés területén még nem sikerült elérni. Az üvegszálerősítésű műanyagok más előnyös tulajdonsága, hogy a kompozit anyag elkészítése tulajdonképpen a belőle készített szerkezet elkészítésével azonos művelet, és belőlük még a legkomplikáltabb térbeli hajlatokkal is egyszerűen készíthetők el nagy felületek is.

A 3. fejezetben láttuk, hogy a lamináris szárnyszelvények alkalmazása a lehető legnagyobb profilhűséget és a felület kiváló minőségét kívánja meg. A lamináris szárnyszelvények alkalmazásának egyáltalán csak akkor van értelme, ha a megfelelő technológia a hullámmentességgel és profilhűséggel szemben támasztott nagy követelményeket teljesíteni képes. Ezeket a feltételeket — felsorolt előnyös tulajdonságaikkal — az üvegszálerősítésű műanyagok teljesítik: alkalmazásukkal a kellő szilárdság mellett aerodinamikailag a legtokéletesebb formák készíthetők el.

Hátrányuk — jelenleg még viszonylagos drágaságuk mellett — kis rugalmassági modulusuk és csekély hőállóságuk. Az előbbi következményei közé tartozik, hogy az üvegszálerősítésű műanyagból készült szerkezetek terhelés alatti alakváltozása — a megfelelő szilárdsági tulajdonságok ellenére — meglehetősen nagy. Hőállóságukkal kapcsolatban a szilárdsági előírás előírja, hogy e kompozit anyagnak szilárdsági tulajdonságai legalább +54 °C hőmérsékletig kielégítőek legyenek. (A +54 °C abból adódik, hogy a +38 °C hőmérsékletűnek vehető legmelegebb nyári napon a fehér színű vitorlázó repülőgép felülete a közvetlen napsugárzás hatására a környezeténél 16 °C-kal magasabb hőmérsékletűre melegszik fel.)

Az üvegszálak kis rugalmassági modulusával szemben a grafit- vagy szénszálaké minden más ismert szálalanyagét messze meghaladja, ugyanakkor szakítószilárdságuk sem marad el mögöttük, fajsúlyuk viszont a legkisebb. Grafit- és szénszálak esetében 7... 10 μ átmérőjű, kb. 2500...3000 °C-on hőkezelt poliakrilonitril szálakról van szó, ame-

lyek a gyártási eljárás során grafitszerkezetűvé alakulnak át. Ezek az üvegszálhoz hasonlóan kötőanyagba ágyazva a repülőgépipítés szempontjából kiváló mechanikai tulajdonságú anyagot képeznek. A kötőanyag itt is epoxigyanta lehet, de mivel a grafitszálok 1000 °C-ig igénybe vehetők, fémekkel együtt (pl. alumíniumba keverve) is alkalmazhatók.

A grafitszállal erősített műanyagok kedvező tulajdonsága, hogy a dinamikus igénybevételnek igen jól ellenállnak. Végeztek kísérleteket, amelyeknél 2000 kp/cm² előfeszítést ± 1500 kp/cm² értékkel 20 milliószor változtattak az anyag károsodása nélkül. Hátrányuk ma még rendkívül drága voltak. Ennek ellenére már vitorlázó repülőgépeken is alkalmaztak grafitszálat, mégpedig a 29 m fesztávolságú és $\lambda = 36,6$ oldalviszonyú, kétüléses *SB—10* gép szárnyszerkezetében, továbbá a *Sigma* és az *FS—29* kísérleti vitorlázó repülőgépek szerkezetében.

5.3. Faszervezetű vitorlázó repülőgépek

A 197. és 198. ábrán a fából készült vitorlázó repülőgépek jellegzetes szárny- és törzs-szerkezetét láthatjuk az 1939-ben épült *R—08d Pilis* példáján.

Az együléses, magas szárnyú gyakorlógép (fesztávolsága 13,6 m) orr- és súlypont-csörlésre, repülőgépvontatásra, egyszerű műrepülésre (bukfenc, bukóforduló és dugóhúzó) volt alkalmas. Legnagyobb megengedett sebessége $v_{NE} = 180$ km/h volt.

Az áramvonalazott keresztmetszetű, dúccal merevített szárny egyfőtartós szerkezetű, torziós orrborítású. A főtartó mögött a borítás anyaga vászon.

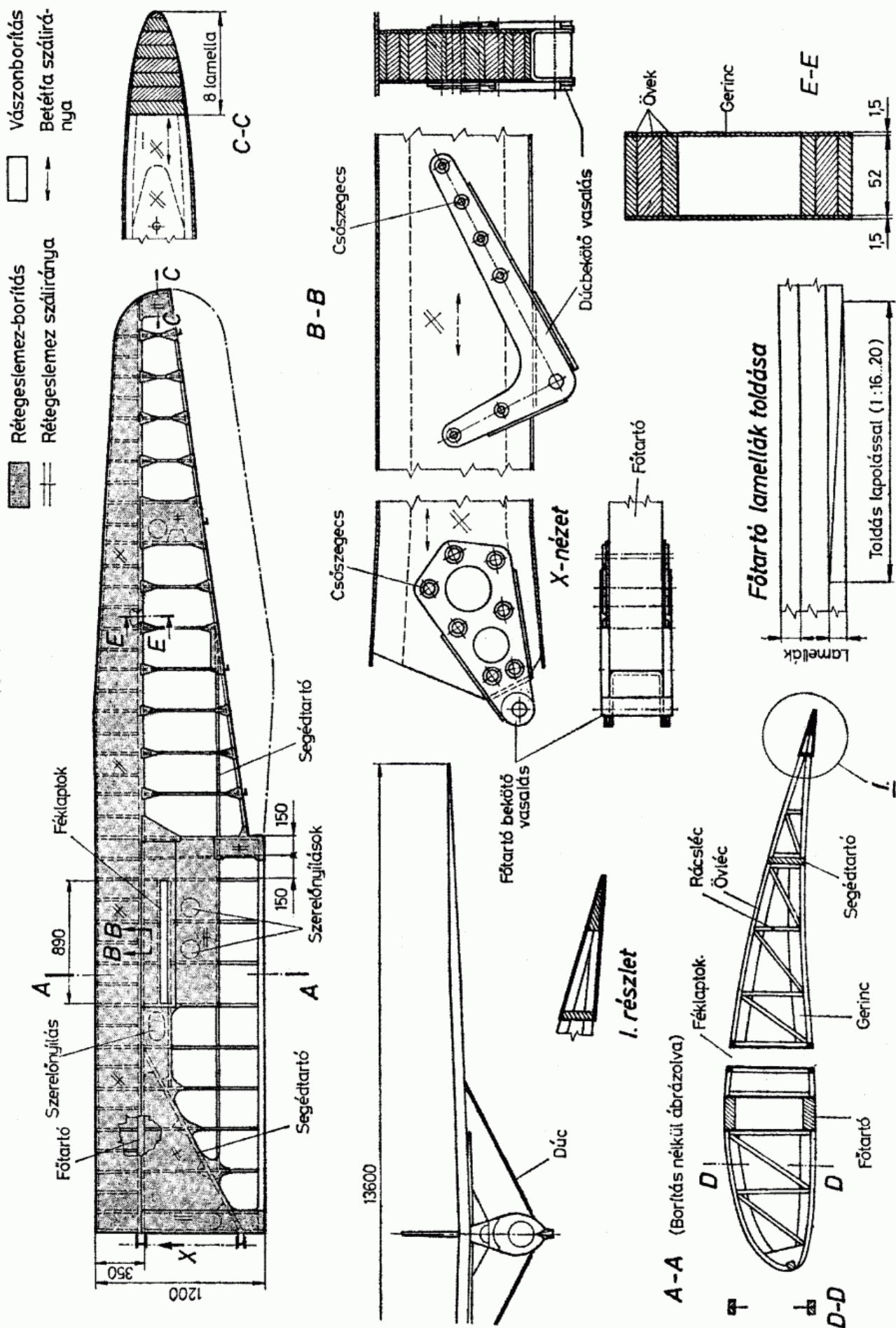
A legegyszerűbb főtartó egyetlen, élére állított deszkatartó. A régebbi, és főként az egyszerűbb, kisebb igénybevételnek kitett vitorlázó repülőgépek főtartói (pl. *Tücsök*, *Vöcsök*) így készültek. Ez a szerkezet azonban nem tette lehetővé az anyag belsejében található hibás részek kivágását, és az üzem közbeni ellenőrzést sem. A korszerűbb vitorlázógépek ezért a *Pilis*éhez hasonlóan „lamellázott”, vagyis kis keresztmetszetű lécekből összeragasztott és a hajlítói igénybevételnek leginkább megfelelő alsó és felső gerinccel (lucfenyő), valamint rétegeslemez gerinclemezzel készültek. A főtartó lehetett egy-, két- vagy pl. az *OE—01* gép (139. ábra) esetében éppen hat gerincű, és a keresztmetszet szerkezete a főtartó hosszában is változott a változó igénybevételnek megfelelően.

A szárnybordák egyik fontos szerepe a terhelésnek a borítástól a főtartóra való közvetítése, de emellett a bordák biztosítják a szárnyszerkezet aerodinamikailag megkívánt alakját is. A bordák tehát hajlított tartóknak tekintendők, és fagépek esetében a *Pilis*éhez hasonlóan lécekből készült rácsszerkezetként alakították ki őket. A faszervezetre jellemző, hogy az olyan erőátadási helyeket, mint pl. a bordák és a főtartó csatlakozása kicsiny, rétegeslemez-ből készült, és a bordák rácsléceinek csatlakozásánál is látható „pillangókkal” merevítették.

Azokat a szárnybordákat, amelyek nagyobb terhelést kapnak, pl. a csűrőlap csapágycsúcsait hordják, két gerinclemezzel *szekrényes tartóként* alakították ki.

A *Pilis* szárnyszerkezetében a tangenciális erővel szembeni megtámasztásra, továbbá a csavarónyomatéknak a törzshöz való továbbítására *segéd tartót* alkalmaztak. A főtartó és a segéd tartó köze alul-felül a torziós orr kiterjesztését képező rétegeslemez-borítással volt ellátva.

A *Pilis* szerkezetében a nagyobb helyi igénybevételeknek kitett részeket, mint pl.



197. ábra. Az R-08d Piliš faszervezetű szárnya

Rétegeslemez-borítás
 10x10
 10x8
 Orrcsúszó
 A-A
 B-B
 1
 4
 12x30
 20x12
 C
 Kerékszekrény
 D
 D
 E-E
 Farokcsúszó
 Rögzítőgyűrű
 C-C
 15x10
 2
 3
 3
 A-A
 3
 2
 2
 Padlólemez
 Törzsgerinc
 D-D
 2
 2
 F-F
 Acél csőszegcsek
 1
 3
 B-B
 2
 2
 F
 F
 G-G
 3
 5
 Acél csőszegcsek
 G
 G

The drawing consists of two parts. The top part is a longitudinal section of the hull, showing the internal structure with labels 1, 2, 3, 4, and 5. The bottom part is a transverse section labeled A-A, showing the internal layout with labels 1, 2, 3, 4, 5, and 6.

258

a szárnyvég lekerekítése vagy a kilépőél, lamellázott léckerettel, ill. a 197. ábra C metszetén látható szerkezettel erősítették meg.

A dúcos szárnymerevítés által létrehozott nagy befogási méret a főtartón és segéd tartón igen egyszerű és kis súlyú bekötővasalások alkalmazását tette lehetővé. A vasalások alatt a jó erőátvitel érdekében nagyobb tömör fabetéteket alkalmaztak.

A faszerkezetű szárnyaknak a *Pilis*éhez hasonlóan megoldott borítása a korbelteljesítményigényeknek még megfelelt. Az áramlástanilag kényesebb szelvények alkalmazásakor, de főleg a lamináris áramlásra való törekvés érdekében ez a megoldás már nem felelt meg. A tökéletesebb körvonalat a bordák sűrítésével, a felület hullámmentességét pedig a vastagabb rétegeslemez alkalmazásával, sőt egyes gépeken teljesen rétegeslemezzel borított szárnyal igyekeztek megoldani. Sajnos nemcsak a vászon húzódott be a bordák között a körvonal hűségét tönkretéve, hanem a rétegeslemez is, ezért azt gyakran különféle kittekkel vagy parafareszelékekkel simították el (pl. az 1954-ben kifejlesztett *R—22sV* esetében). Ez a járulékos kezelés a gép súlyát károsan megnövelte. Igen jó megoldásnak bizonyult az *SZD—32A Foka 5* szárnyszerkezete (199. ábra), amelyben a teljes felületre kiterjedő többrétegű lemezborítás alá helyezett több, feszítávolság irányú merevítőléc nemcsak a borítás hullámosságát akadályozta meg a helyi szilárdság növelésével, hanem ezek a szárny hajlítónyomatékának felvételében is részt kaptak, s ezáltal a főtartó méretei és súlya volt csökkenthető. A szerkezetet a héjszerkezethez való közelítésnek tekinthetjük.




A 198. ábra a *Pilis* törzsének szerkezetét szemlélteti, amelyet lucfenyőlécekből enyvezett törzskeretekre ragasztott rétegeslemezről héjszerkezethez alakítottak ki. Az ábrán látható, hogy az olyan koncentrált erőbevezetési helyeken, mint pl. a futómű vagy az ülés és a bekötő vasalások, az erők elosztását a héjlemez alá ragasztott lécekkel és betétfákkal oldották meg.

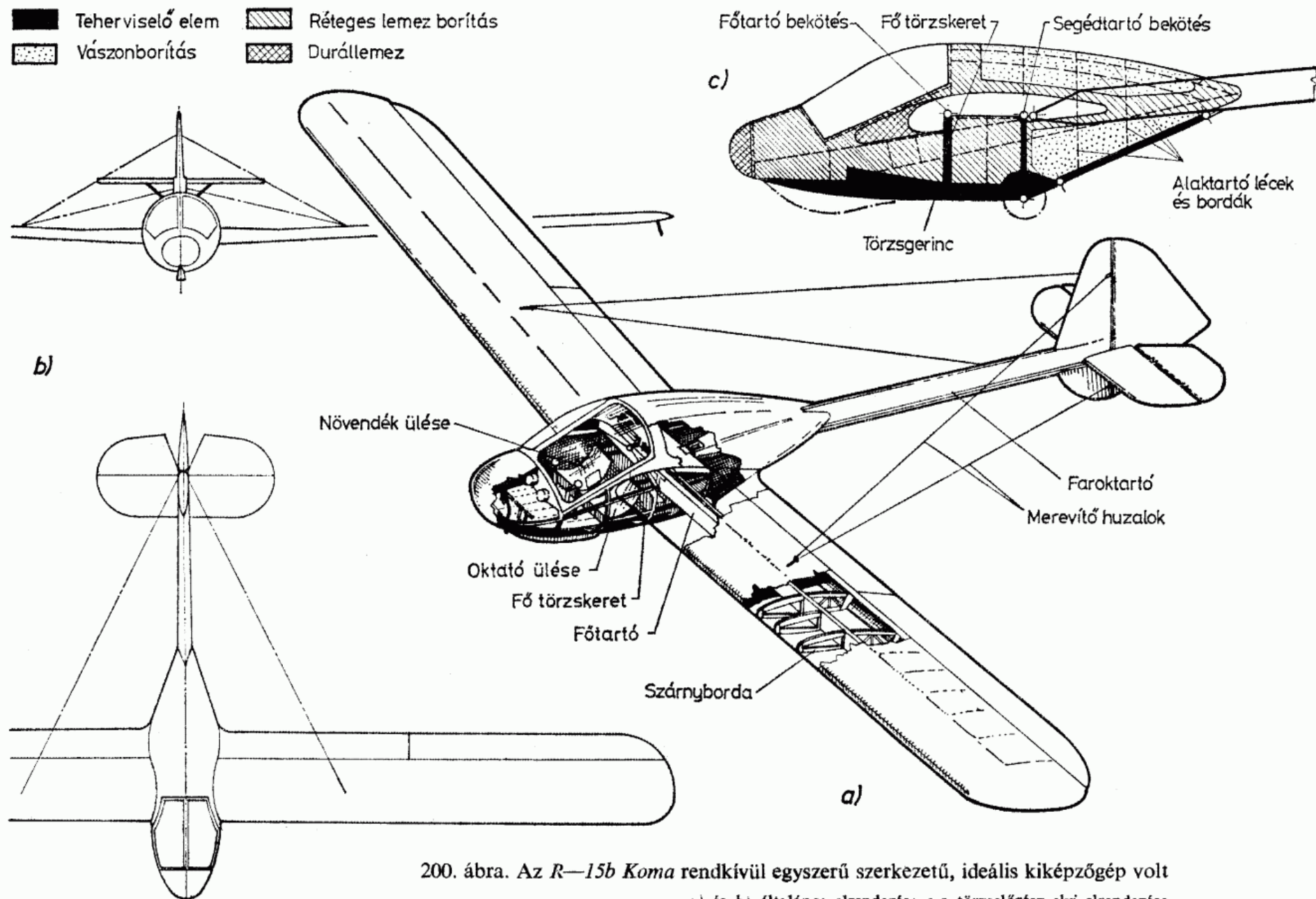
A *Pilis* vezérsíkjainak és kormányfelületeinek szerkezete a szárnyéhoz volt hasonló. Az előbbieket borítása rétegeslemez, az utóbbiaké vászon.

5.4. Két különleges szerkezetű vitorlázó repülőgép

Említettük, hogy a faszerkezetű gépek gyártása egy szokásos asztalosüzem felszerelésénél nem igényel bonyolultabb szerszámokat és készülékeket. Ez a tény okvetlenül hozzájárult a vitorlázórepülés elterjedéséhez, mivel így a jól sikerült típusokat klubok vagy egyének is megépíthették. Ez a törekvés tulajdonképpen napjainkban is fennmaradt. Az elv alkalmazásának az is feltétele, hogy a szerkezet a lehető legkevesebb alkatrészből álljon, és ezek az alkatrészek is a lehető legegyszerűbbek legyenek. Ezzel nemcsak a gyárthatóság igényeinek teszünk eleget, hanem a gép súlyát is csökkenteni lehet a nélkülözhető alkatrészek elhagyásával.

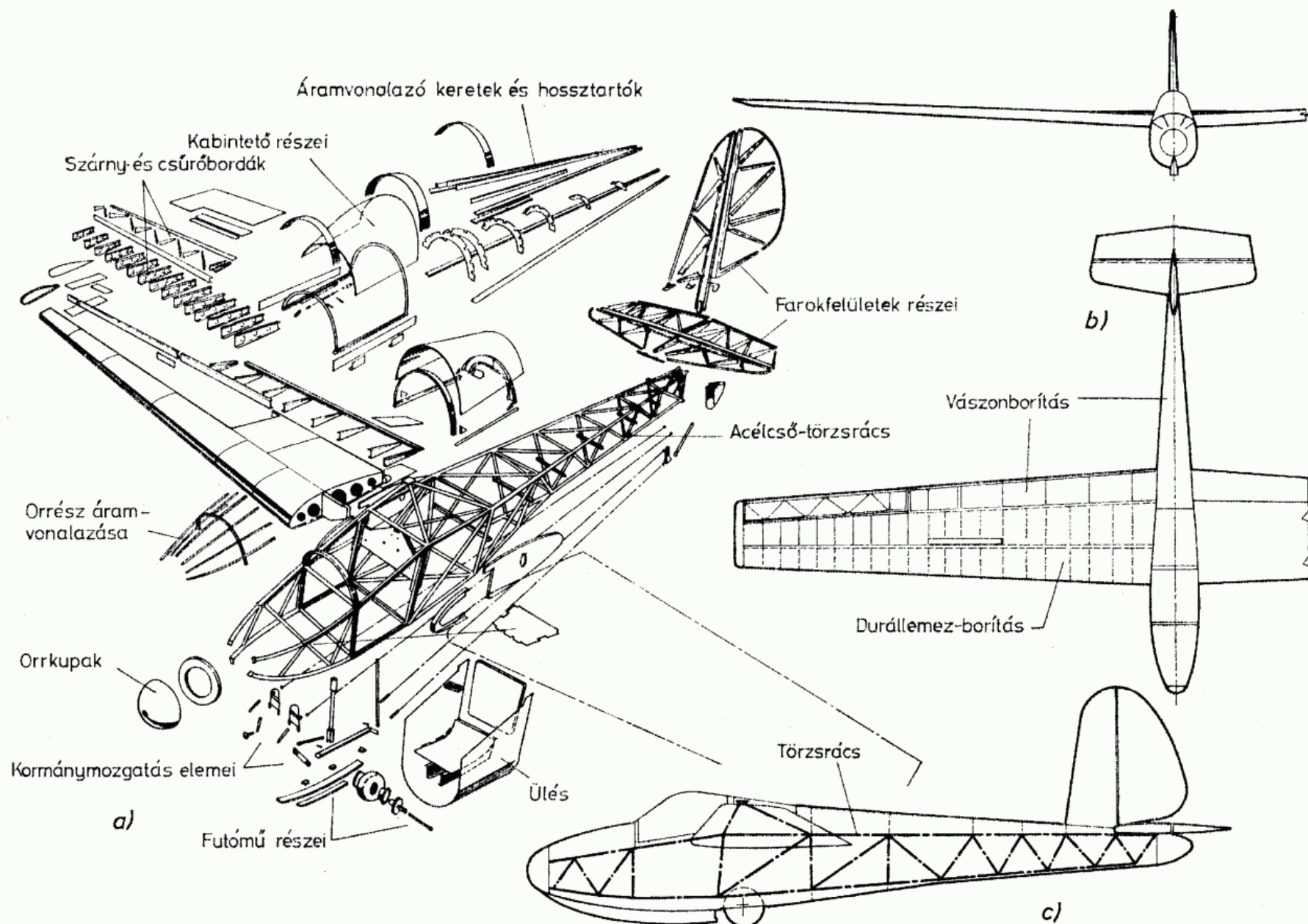
Magyarországon az ötvenes évek elején újfajta kiképzési módszert vezettek be a vitorlázórepülésbe. Ez az ún. *kétkormányos kiképzés*, amelyet akkoriban egyedül a leginkább gazdaságosnak bizonyult csörlőindítással folytattak. Ahhoz, hogy a kiképzés eredményesen legyen folytatható, egy-egy felszállásból minél hosszabb időt kell a levegőben tölteni. Ezért a csörlés mint a kiindulás magassága igen fontos tényező. A csörlés magasságát pedig elsősorban a repülőgép súlyának csökkentésével lehet növelni.

- | | | | |
|---|------------------|---|-----------------------|
|  | Teherviselő elem |  | Réteges lemez borítás |
|  | Vászonborítás |  | Durállemez |



200. ábra. Az R—15b Koma rendkívül egyszerű szerkezetű, ideális kiképzőgép volt

a) és b) általános elrendezés; c a törzselőrész elrendezése



201. ábra. A vegyesépítésű Schweizer 1—26 építőszekrényből is összeállítható
 a) félkész alkatrészek; b) nézeti rajzok; c) a törzs fő teherviselő eleme acélcső rácsszerkezet

Ezek a gondolatok indították *Rubik Ernőt* 1950-ben az *R—15b Koma* megtervezésére. A gépen a legfeltűnőbb szerkezeti különlegesség az, hogy alkatrészeinek számát a minimálisra csökkentették (200. ábra).

A faszerkezetű gép teherviselésében a szárny még a szokásos elemekkel vesz részt (bár ezekben is több újítást alkalmaztak), a törzsön azonban rögtön feltűnik az ellipszis keresztmetszetű csőként kialakított faroktartó. Ez mellső végén a szárnybekötést is hordozó törzs-főkerethez csatlakozik, alul pedig egyetlen durálcső támasztja ki. Az egyszerű faroktartót a szárnyhoz huzalokkal merevítették. A törzs szilárdságilag jelentősebben igénybe vett része a gerinc volt még, amely a futóműtől és a levegőrugózású csúszótól származó erőhatásokon, valamint a pilóták súlyának hordozásán kívül a fő darabok közötti összekötőelem szerepét is játszotta. A törzs ezeken a teherviselő elemeken kívül csak néhány alaktartó keretből állt. Borítása vászon volt.

A *Pilissel* kapcsolatban láttuk, hogy a lécekből álló szárnybordák meglehetősen munkaigényes szerkezetet alkotnak. A *Koma* szárnyának orrbordái marással könnyített tömör falemezekből állottak. Ugyancsak egyszerűsítést jelentett a szárny szerkezetében a munkaigényes, sok darabból álló fa segéd tartó helyett alkalmazott acélcső triéder is. A csűrők, az ívelőlapok és a magassági, valamint az oldalkormány durálcsőre felszegecselt vékony durállemezből készült bordákból állt.

A *Koma* szerkezetében kialakított számos újítás a gép súlyát igen erősen csökkentette: a 15 m fesztávolságú gép üresen mindössze 160 kg-ot nyomott. Ez olyan kis súly, amelyet kétüléses géppel elérni még csak ritkán sikerült. A kis súly kicsiny tömegereket is eredményez. Ennek és a szellemesen megoldott szerkezetnek tulajdonítható, hogy a *Koma* élettartama a hasonló feladatú egyéb gépekének többszörösére adódott.

A klubokban vagy egyénileg való vitorlázógép-építést rendkívül megkönnyíti, ha legalább a komplikáltabb alkatrészek jól felszerelt műhelyben vagy éppen gyárban készülnek el. Az ún. *kit-rendszerrel*, vagyis építőszekrény-elvvel ezen a nehézségen igyekszik segíteni a Schweizer Aircraft Co., amelynek *I—26* jelű, igen elterjedt kis gépének szerkezetét a 201. ábrán látjuk.

A szerkezet fő részét az acél csőszerkezetű törzs alkotja, amelyet a gyár készen szállít. Ezenkívül valamennyi alkatrész megtalálható a „kit”-ben összeállításra kész, sajtolt, előrehajlított, lyukasztott stb. állapotban. A megrendelő feladata a kit-ben ugyancsak megtalálható kötőelemekkel a leginkább időt rabló munkának, az alkatrészek összeállításának az elvégzése.

5.5. Fémépítésű vitorlázó repülőgépek

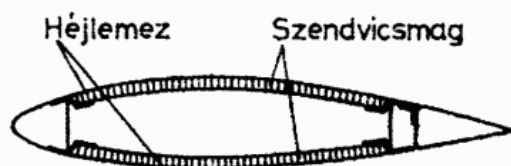
A repülőgépek szerkezetéhez alkalmas, megfelelő minőségű faanyag Magyarországon csak importból szerezhető be. Ez volt az oka annak, hogy az ötvenes évek közepétől hazánkban áttértek a könnyűfém vitorlázó repülőgépek építésére. A kevésbé sikeres *Ifjúság* gépek után, amelyeknek különben is csak a törzse készült fémből (*Z—03A*: törzselőrése acélcsőrácsból, a törzshátsórész pedig durál héjszerkezetű; *Z—03B*: a törzselőrése is durál héjszerkezetű), az *R—23 Gébics*, majd a nagysorozatban épült *R—26S Góbbé*, újszerű szerkezetével a vitorlázógép-építésben egészen új utat mutatott.

A fémből készült szerkezeteknek van egy igen kellemetlen tulajdonságuk. Az ugyanis, hogy nagy szilárdságuk és kedvező egyéb szilárdságtani tulajdonságaik

a vitorlázógép-építésben előforduló nagyságú terhelések és szerkezeti méretek mellett igen vékonyfalú szerkezetet eredményeznek. Vagyis pl. a hajlításra méretezett főtartó övei viszonylag kis keresztmetszetűekre, a gerinclemezek pedig vékonyakra adódnak. Hasonlóan: a tiszta csavarónyomaték elviselésére méretezett torziós orr borítása durállemezből meglehetősen vékonyra adódik. A vékony lemezeknél azonban stabilitási problémák merülnek fel.

Ha pl. egy vékony durállemezt — mint a főtartó gerince — a síkjában ható nyíróerővel terhelünk, a lemez, bár elvileg képes lenne a nyíróerő elviselésére, vékonysága folytán mégis kihajlik, az erőhatás alatt hullámosodik. A rétegeslemeznek a durálénál kisebb szilárdsága miatt a fa főtartóhoz viszonylag vastagabb gerinclemezt alkalmaznak. Ott tehát ez a probléma kevésbé áll fenn. A durából készült gerinclemezt azonban emiatt úgy kell kiképezni, hogy e hullámosodás ne következhesen be. A súlycsökkentés érdekében a vastagabb lemez alkalmazása itt nem jöhet szóba, helyette a vékony lemezt részegecselt profillemekkel merevítik, vagy gyakran még célszerűbb a súlycsökkentést is szolgáló peremes lyukak alkalmazása.

Hasonló a helyzet a könnyűfém-ből készült torziós orrborítás lemezénél is, bár itt az aerodinamikai kialakítás adta íveltség és a torziós orrban az alakhűség kedvéért sűrűn (általában kb. 15 cm-enként) elhelyezett bordák a lemez stabilitását növelő merevítő hatást nyújtanak.



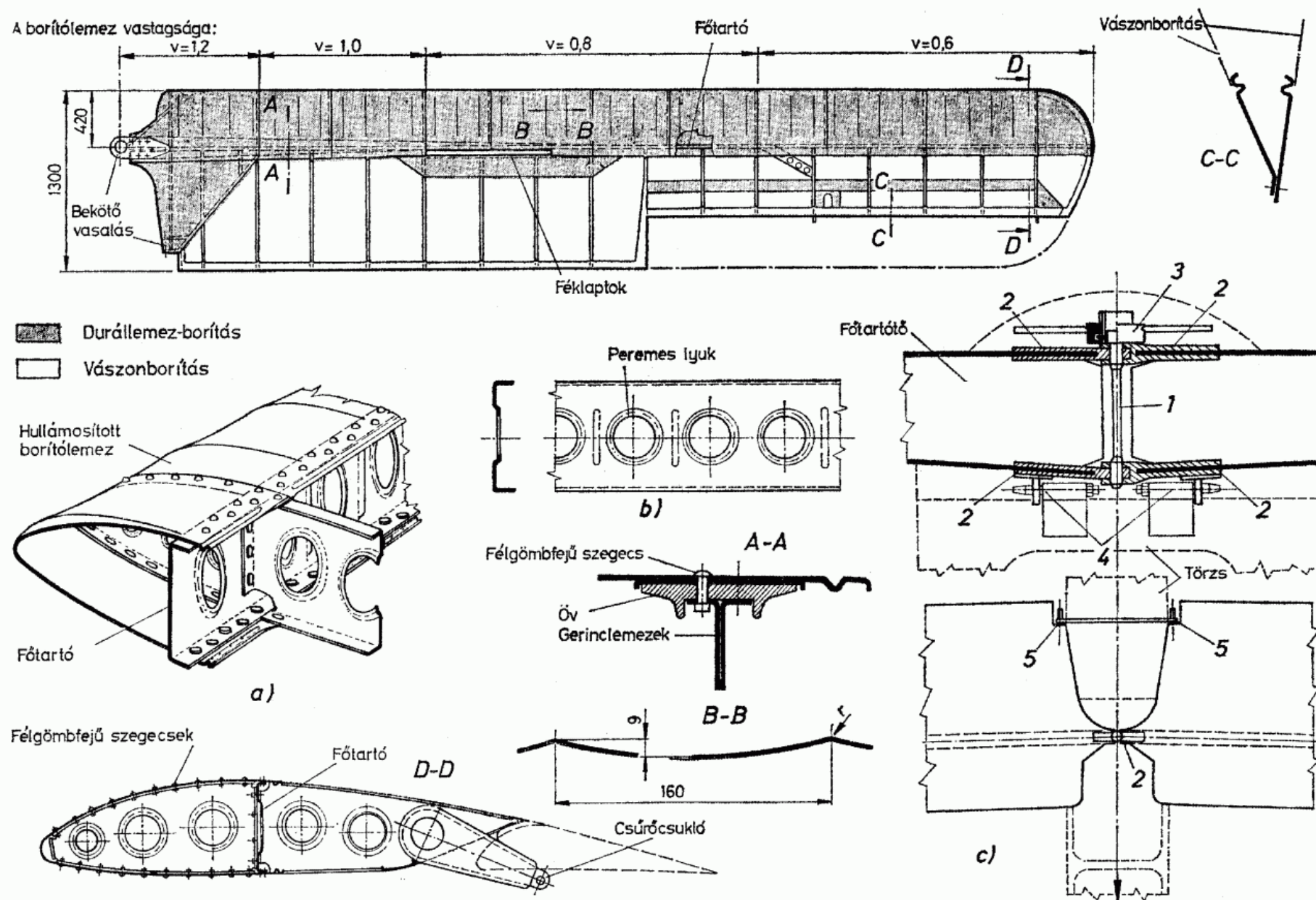
202. ábra. A HP gépek szendvicsszerkezetű fémszárnyának metszete

A vékony lemezszerkezetek ilyen problémáját pl. a HP gépeken ún. szendvicsszerkezet alkalmazásával oldották meg (202. ábra), amikor a vékony héjlemezre belülről kis fajsúlyú, de vastag támasztóréteget ragasztottak. Ezekre a megoldásokra az 5.6. szakaszban még visszatérünk.

Az *R-26S Góbé* kétüléses kiképzőgépnél a tervező *Rubik Ernő* más megoldást választott. A torziós orrban alkalmazott bordák szaporítása a súlyt növelte volna, továbbá a darabszám növekedésével járó egyéb költségek mellett a szegecseleési munka megszorodásával újabb többletköltségek keletkeztek volna. A szegecseléssel — még a süllyesztett fej alkalmazása esetén is — fennáll egyébként az a veszély is, hogy a szegecsfejek a leggondosabb kivitelezés esetén is kiállnak néhány tized millimétert a felületből, és ezzel a szárny aerodinamikai jóságát jelentős mértékben leronthatják. Éppen ezért a tervező ebben az esetben a bordák számát csökkentette, és csupán két-két lemeztábla találkozásánál hagyott meg egyet-egyet, a torziós orr borítólemezt viszont térbeli görbülettel látta el (203. ábra). A terjedelmes szerkezethez viszonyítva aránylag kicsiny igénybevételekhez igazodva ez a megoldás egyesíti a héjszerkezetekre jellemző súly- és anyagkihasználási előnyöket, de a borító héjlemez nyújtóhúzással (a sajtolás egyik fajtája) való előállításának egyszerűsége, simasága és merevsége vetekszik a legjobb szendvicsszerkezetekkel is.



A szárny minden pontjában térbeli görbületű orrborítása a csavarónyomatékokat és a szárny síkjába eső tangenciális erőket, a főtartó pedig a hajlítást és a nyíróerőket veszi fel ebben a megoldásban. A szárny javítása egy-egy borítóelem cseréjével igen egyszerűen megoldható. A függőleges és vízszintes vezérsík a szárnyéhoz hasonló térbeli görbületű lemezszerkezettel készült.

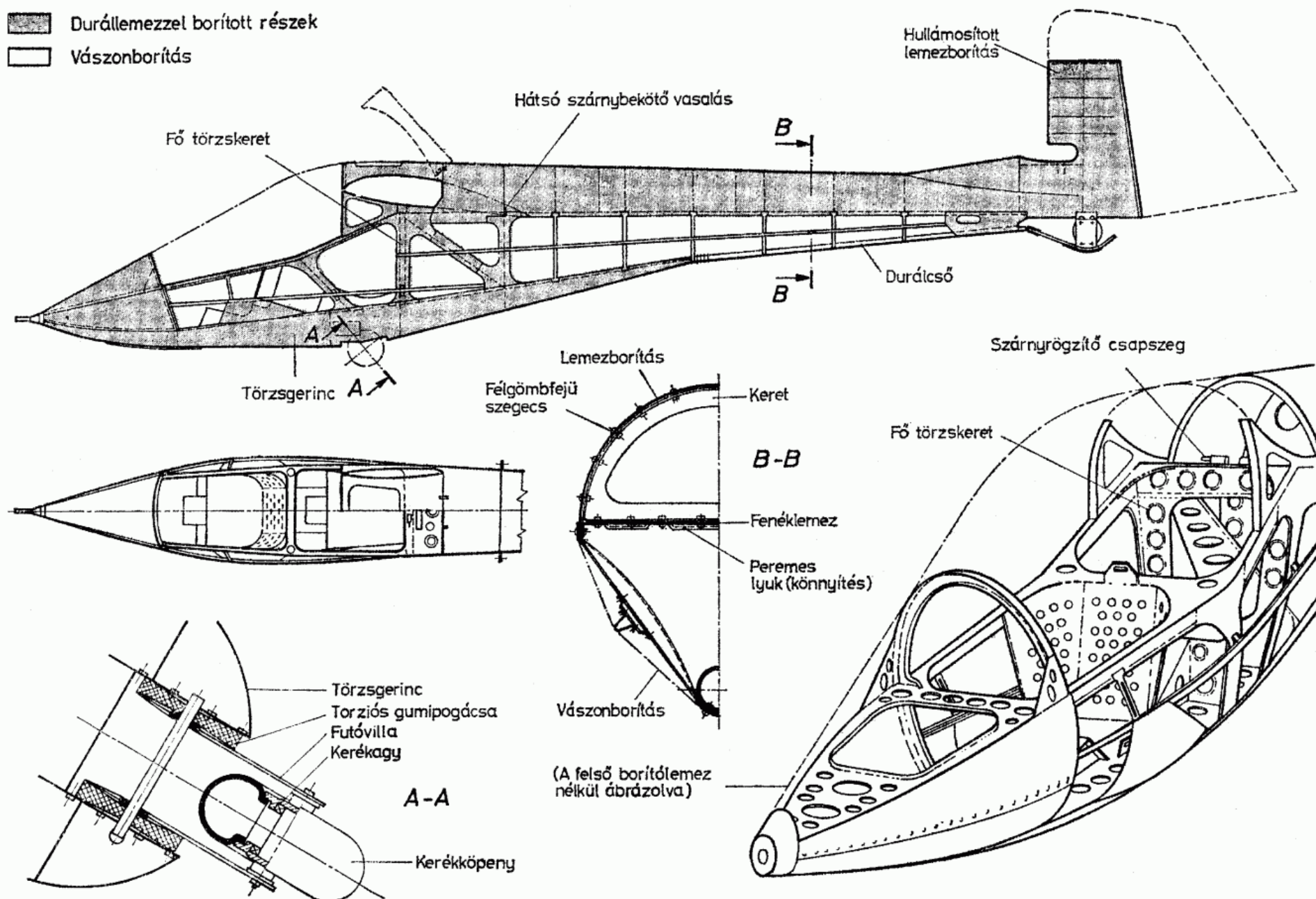
A megoldás hátránya, hogy a terjedtség menti hullámosság a szárny körüli áramlást kissé módosítja.



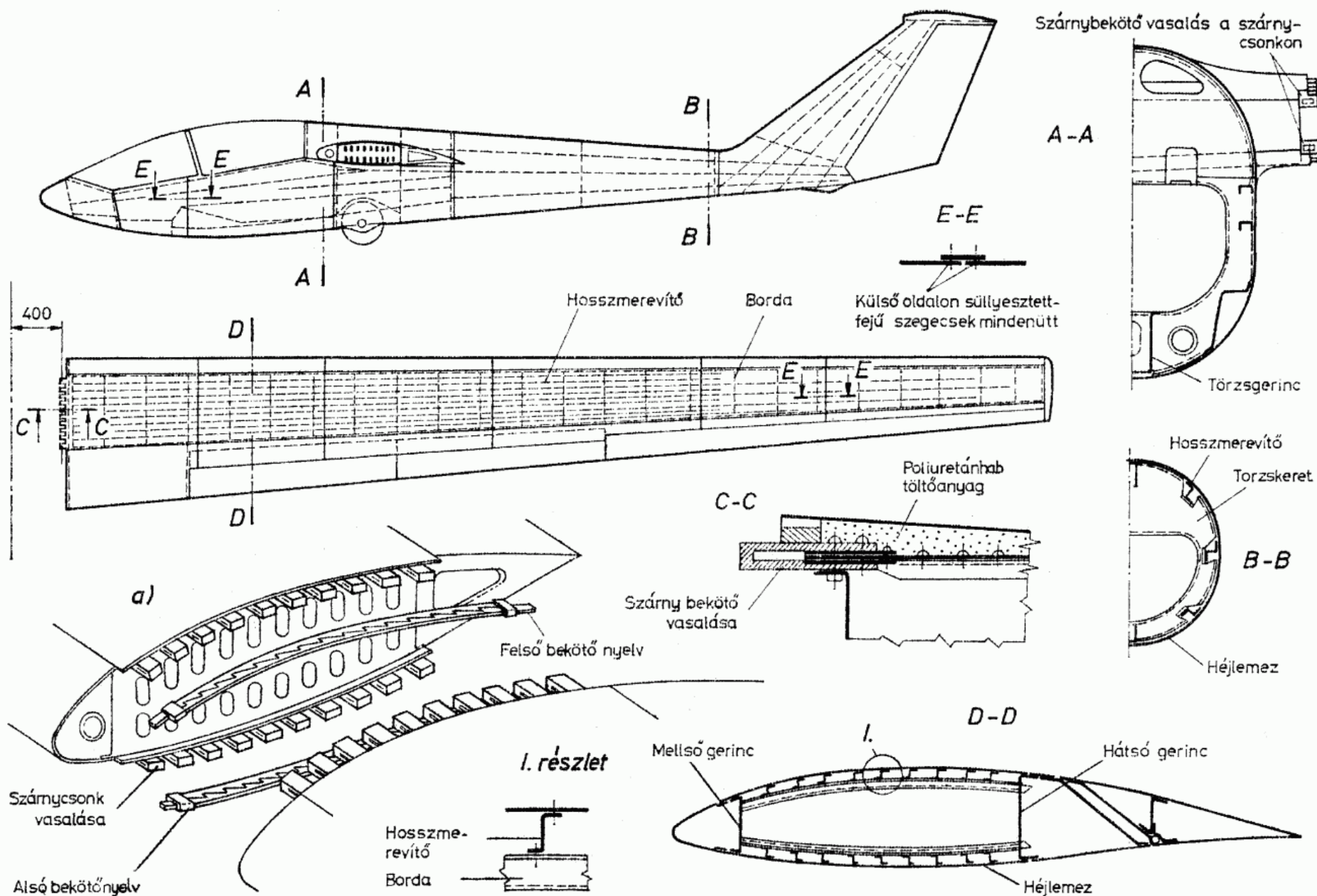
203. ábra. Az R—26S Góbé fémszerkezetű szárnya

a) a Rubik-féle hullámosított torziós orrborítás; b) főtartóelem; c) a szellemes megoldású szárny – törzs összekötés könnyen szerelhető (1–5 összekötő elemek)

-  Durállemezrel borított részek
 Vászorborítás



204. ábra. Az R-26S Góbé fémszerkezetű törzse



205. ábra. Az EV-1K Fecske hagyományos héjszerkezetű törzse és szárnya

a) a szárny-törzs összekötés villámvázis megoldása

A *Góbé* törzse a 204. ábrán látható. A csekély darabszámú alkatrész és az egyszerű szerszámokkal való gyárthatóság elvét a tervező ennél is szem előtt tartotta. Igen egyszerű gyártástechnológiával sikerült a terhelésekhez messzemenően igazodó, a könnyűfém kedvező alakíthatósági tulajdonságait kihasználó, az erők játékát igen jól követő törzsszerkezetet kialakítani. A szerkezet távoli rokonságban áll a fából készült *Komáéval*, ugyanis a törzs mellső része alatt húzódó lemezből készült gerinc veszi itt is fel a földi erőkből és a repülőgépvezetők súlyából származó igénybevételt, a törzs hátsó részének fő teherviselő eleme pedig a nagy könnyítőlukakkal ellátott, vízszintes alsó gerincű, félkör keresztmetszetű, felülről vékony durállemezzel borított tartó. Ezeket a szárnybekötést és a torziós gumirugózású futóművet hordó fő törzs-keret és a vezetőüléseket kiváltó ferde keret köti egymással össze.

A lemezből készült szerkezetek közös jellemzője, hogy az alkatrészek merevségét számos kisebb-nagyobb perem, görbület adja. Kezdetben a lemezzakma művészei kézzel dolgozták ki az ilyen felületeket. A sorozatgyártás azonban már a termelékenyebb gépi megmunkálást alkalmazza. A kisebb lemezek térbeli alakítását, bordák, keretek stb. alakra sajtolását gumipárnás szerszámmal több száz, sőt több ezer tonna sajtolóerejű hidraulikus sajtókon végzik. A *Góbé* esetében ezen kívül a nagy méretű, vékony borítólemezek térbeli alakítására az ún. nyújtó-húzó gépet alkalmazták.

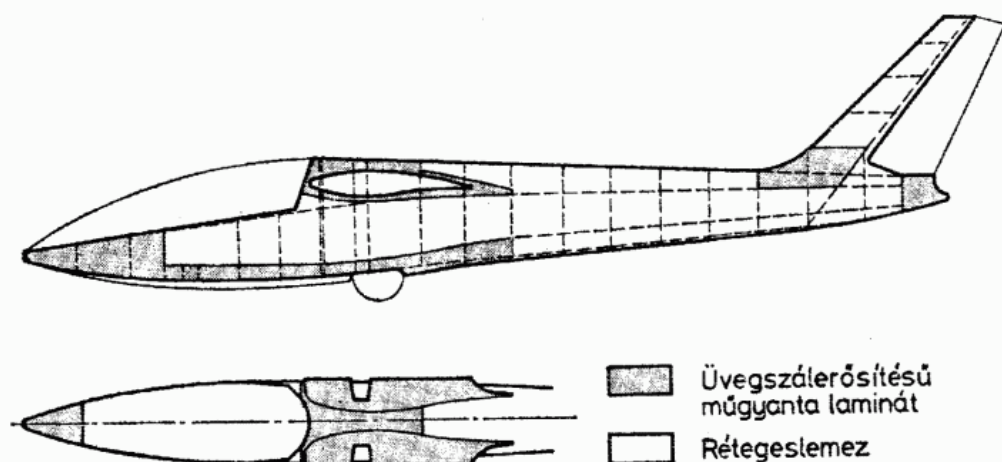
A fémszerkezeteknek egy hagyományosabb változatát szemlélteti az *EV—IK Fecske* 205. ábrán látható szárnya és törzse. A szárny durállemezből készült, sokmerezvítés, valódi héjszerkezet két gerinccel, és viszonylag ritkán elhelyezett bordákkal. A megoldással járó nagyszámú szegecs a felületet óhatatlanul hullámossá tette, ezért azt vékony műanyagréteggel vonták be a tökéletes simaság elérésére. A *Fecske* törzse szintén jellegzetes héjszerkezet, amelynek bonyolultnak tűnő kereteit hidraulikus sajtóval sajtolták, így a bonyolult alakot egyetlen munkamozzanattal készítették el. Rendkívül érdekes a szárny és a törzs eredeti megoldású összekötése (205a ábra).

5.6. Üvegszálerősítésű műanyagból készült vitorlázó repülőgépek

5.6.1. Üvegszálerősítésű műanyag repülőgépszerkezetek szilárdsági problémái

Az *SZD—32A Foka 5* törzsének csekély szilárdsági igénybevételű, de erősen görbült felületű részeit üvegszálerősítésű poliészter műgyantából készítették, mivel ezek ebből az anyagból — az ún. laminálási eljárással — toldások nélkül egy darabból könnyűszerrel előállíthatók (206. ábra). Ennek az anyagnak azonban nem ez az igazi rendeltetése. Fajsúlya a szokásos faanyagokénak két-háromszorosa, ezért kizárólag burkolatként alkalmazni, anélkül, hogy a teherviselésben részt venne, nem célszerű. Ha tehát akár a felületi simaság javítása érdekében, akár pedig gyártástechnológiai egyszerűségéért alkalmazzák ezt az anyagot, gazdaságosabb, ha együtt hordó, de még inkább egyedüli teherviselőként alakítják ki.

Napjainkban a legjobb teljesítményű vitorlázó repülőgépeket már szinte kizárólag üvegszálerősítésű műanyagból készítik. A különféle típusokból több ezer darab



206. ábra. Az SZD—32A Foka 5 törzsének egyes részeit műanyag laminát borítja

üzemel, és a belátható jövő ezé az anyagé. Ezért kissé bővebben foglalkozunk jellegzetes szilárdsági problémáival.

Induljunk ki a szárnyból. A főtartókhoz használatos szokásos hajlított tartó súlyát általában a húzásra és nyomásra méretezett övek súlya szabja meg. A főtartóöv hosszegységére eső súlya a fajlagos húzószilárdság és a fajlagos nyomószilárdság reciprok értékeinek összegével arányos.

A műanyag főtartókat üvegszálkötegek (roving) felhasználásával készítik. Hasonlítsuk össze egy ilyen főtartó anyagjellemzőit a fából készültével. A 9. táblázatban különböző anyagok jellemző adatait hasonlítottuk össze. Mint láttuk, a grafit-száltól eltekintve a rovingnak van a legnagyobb fajlagos húzószilárdsága, de ugyanakkor a legkisebb rugalmassági modulusa is. Ez azt jelenti, hogy egy üvegszálerősítésű műanyag főtartó — azonos terhelést és szerkezeti magasságot feltételezve — csak fele olyan nehéz lesz, mint egy lucfenyőből készült, de lehajlása éppen két és félszer akkora, ha szilárdságra méretezzük. Mivel az üvegszálerősítésű szerkezet keresztmetszeti felülete kisebb lehet a fáénál, viszonyai az előzőknél még kedvezőbben alakulnak, mivel a szerkezeti magasságot emiatt még jobban ki lehet használni, mint a fa főtartók esetében. A viszonylag csekély merevség miatt ezeknél a szárnyaknál azonban rugalmassági és rezgési (flutter) problémák léphetnek fel, ezért gyakran inkább merevségre méretezik őket, ami a szükségesnél nagyobb szilárdságot (és súlyt) ad, ill. a kellő merevség érdekében az anyag szilárdsága ekkor a megengedettnél kevésbé van kihasználva.

Nézzük ezután a különböző anyagokból, de azonos geometriai méretekkel készült szerkezetek csavarómerevségét. Azonos csavarónyomatékot és ennek hatására azonos elcsavarodási szöget feltételezve, a csavarásra merev burkolat súlya fordítva arányos a fajlagos csúsztatórugalmassági modulussal. A 9. táblázatban a különböző anyagok csúsztatórugalmassági modulusának értékét is láthatjuk. A rétegeslemez és az üvegszálerősítésű műanyag fajlagos értékei nem különböznek egymástól jelentősen, és az értékek mindkettőnél nagyobbak diagonális irányban, mint hosszanti száliránnyal. Különösen vékony torziós borítás készíthető durából, de a vékony lemez stabilitási problémákat vet fel. (Az üvegszál szerkezet stabilitási problémáiról még a következőkben szólunk.)

Térjünk azonban vissza az üvegszál szerkezet fajlagos csúsztatórugalmassági modulusához. A táblázat szerint ez még hosszanti szálelrendezésnél is meglehetősen nagy. Az ilyen szálelrendezés tehát csavarónyomaték elviselésére is kihasználható. A hosszanti szálelrendezés azonban elsősorban a húzó- és nyomóerők felvételére

alkalmas. Ha tehát az anyagot nem főtartószerűen kis keresztmetszetre koncentrálni alkalmazzuk, hanem zárt, vékonyfalú héjrétegben, akkor olyan — hajlítónyomaték felvételére alkalmas — szerkezetet kapunk, amelynek egyúttal jelentős a csavarómerevsége is. Ezekután már csak diagonális szálirányú szövetréteget kell még alkalmazni, hogy a szerkezet a szükséges csavarómerevséget elérje.

Ez igen fontos lehetőség. Üvegszövetet ugyanis félkészárúként 1,5 m szélességig (ennél a vitorlázó repülőgépek szárnyának húr hossza általában nem nagyobb) és tetszőleges hosszban gyártanak. Különböző hosszúságú és szálirányú szövetrétegek egymásra laminálásával egy munkamenetben készíthetők olyan héjszerű alkatrészek, amelyek vastagsága hossz- vagy keresztirányban tetszőlegesen változtatható. Ehhez a faanyagoknál szokásos toldási vagy a könnyűfémek kötéséhez nélkülözhetetlen szegecselési munkára nincsen szükség.

Egy kitüntetett irányban nagy húzó- és nyomószilárdság elérésére egyirányú, mégpedig hosszirányú szövetet kell alkalmazni. A szövési technológia által létrehozott hullámosság miatt az üvegszövet erősítésű szerkezet mechanikai jellemzői kisebbek, mint rovinggal való erősítéskor. Ezért párhuzamos rovingkötegekből igen kevés keresztirányú szál felhasználásával is készítenek szövetet. Ezzel az üvegszálakat gyakorlatilag hullámmentesen lehet a laminátba beépíteni, ami a nyomószilárdság elviselése szempontjából igen fontos, mert a hullámosság a belső kihajlási szilárdságot rontja. Az egyes üvegszálkötegek az előhajlítottaknál nagyobb terhelés alatt hajlanak csak ki. Ennek jelentőségét később, a héjszerkezet stabilitásának vizsgálatakor látjuk meg.

A 9. táblázat alapján hasonlítsuk ismét össze az egyirányú üvegszövet- és a roving-erősítésű műanyag jellemzőit. Látható, hogy az eltérések nem nagyok, de a kisebb fajsúly az előbbi oldalára billenti a mérleget.

Lássuk ezekután, milyen az anyag optimális eloszlása az üvegszálerősítésű műanyag héjszerkezetben?

Mindenekelőtt a legkevesebb anyagfelhasználással elérhető legnagyobb csavarómerevséghez két feltételt kell teljesíteni:

1. A szerkezet K kerülete a körülzárt felülethez viszonyítva lehetőleg kicsiny legyen. (Ne feledjük: legkedvezőbb a kör keresztmetszetű cső.)

2. Az egész kerületen érvényesülnie kell a következő szabálynak: az egyirányú szövetszerkezet G csúsztatórugalmassági modulusának az s falvastagsággal való szorzata és a diagonálszerkezet hasonló szorzatának összege állandó legyen:

$$(Gs)_{\text{egyir}} + (Gs)_{\text{diag}} = \text{áll.}$$

Ideális esetben ekkor ilyen lenne az anyageloszlás:

A hajlítónyomaték felvételére a szerkezet legnagyobb szerkezeti magasságának környékén hosszirányú szövetszerkezetű laminát, mégpedig az eltérő húzó- és nyomószilárdság miatt a felső oldalon vastagabb rétegben, mint az alsón. Ezt a csavarómerevséget biztosító diagonálszerkezet egészíti ki, amely viszont az alsó részen vastagabb, mint a felsőn. Minden esetben úgy, hogy az alkalmazott anyagok Gs szorzatainak összege állandó maradjon. A gyakorlatban ettől az elrendezéstől általában kissé eltérnek, pl. az egyirányú szövetréteget a be- és a kilépőélen is átviszik.

Lássuk ezután a helyes anyageloszlást annak érdekében, hogy a csavarómerevség a fesztávolság irányában is optimális eloszlású legyen, vagyis a szárnyvég terhelés alatti elcsavarodása a lehető legkevesebb anyag alkalmazása esetén se haladjon meg egy megengedhető értéket. Ennek érdekében a következő feltételt kell teljesíteni:

$$(Gs)_{\text{egyir}} + (Gs)_{\text{diag}} = k \frac{\sqrt{M_{cs}}}{A},$$

vagyis az alkalmazott anyagok G_s szorzatainak összege olyan elosztású legyen a fél fesztávolság mentén, mint a helyi csavarónyomaték négyzetgyöke és a körülzárt felület hányadosa. Ezt a feltételt általában a G_s szorzatok összegének a fesztávolság mentén állandó értéken való tartásával lehet teljesíteni.

Az ilyen vékonyfalú héjszerkezetek tehát kellő szilárdságúra és az anyag optimális elosztásával hajlításra és csavarásra kellő merevségűre is készíthetők, emellett súlyuk kicsiny. A vitorlázó repülőgépek megközelítőleg kör keresztmetszetű törzséhez ez a szerkezet számos esetben elegendő is lehet. A szárnyaknál azonban a korábban kitűzöttek közül még nem minden feltétel teljesült. Például a héj kerülete itt a közrezárt felülethez viszonyítva nagy, ezért a merevség kérdése sem annyira egyértelmű. A nagy oldalviszonyú és ezért kis profilvastagságú szárnyakból a nyíróerőket felvevő gerinc ritkán maradhat el. De a szerkezet helyi stabilitása is megkívánna a vékony héj sűrűbb alátámasztását.

A vékonyfalú szerkezetek stabilitási problémáira már az előzőekben felfigyeltünk. Láttuk, hogy egyes esetekben a vékony fémlamezt hullámosítással tették merevvé (*Rubik-féle szárnyborítás*), máskor könnyű anyaggal megtámasztva szendvicsszerkezetet képeztek (HP gépek). A szendvicsszerkezetek kialakítására a műanyagok különösen alkalmasak, és ezeket főként a szárnyszerkezetekben elterjedten alkalmazzák is.

A szendvicsszerkezet elvben két nagy szilárdságú fedőrétegből (ezek viselik a terhelést) és közöttük igen kis fajsúlyú, a teherviselő rétegek megtámasztására szolgáló magból áll (207. ábra). Minél nagyobb a mag h_m vastagsága, annál biztosabban viseli el a szerkezet a felületére merőleges erőhatásokat is. Mivel azonban a fő igénybevételek szempontjából a mag csak ritkán játszik szerepet, ezért minél kisebb fajsúlyú anyagból kell készülnie, hogy a repülőgép súlyát ne növelje meg túlzottan. Vizsgáljuk meg tehát, hogy milyen tényezők befolyásolják az alkalmazandó szendvicsmag vastagságát, ill. milyen anyagok alkalmasak erre a célra. Mivel a szendvicsszerkezetet a vékony lemez instabilitásának csökkentésére alkalmazzák, induljunk ki abból, hogy kétféle igénybevételnek kell ellenállnia.

1. Az egész szendvicsszerkezet kihajlása az alátámasztások (pl. bordák) között.

2. A fedőrétegeknek a szerkezet egészétől független helyi meggyűrődése.

Mindkét eset nyomóerő vagy csavarónyomaték hatására jön létre.

1. Vegyük először az alátámasztások közötti kihajlás esetét. Az a *kritikus nyomóerő*, amelynek hatására a szendvicsszerkezet kihajlik, a következő:

$$P_{\text{krit}}^{(1)} = P_E k_1 = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \frac{1}{1 + \frac{P_E}{G_m h_m}},$$

ahol P_E az Euler-féle összefüggés, amely a fedőrétegeket veszi figyelembe;

k_1 a mag jellemzőit figyelembe vevő korrekciós tényező;

E a fedőlemezek rugalmassági modulusa;

l a támaszköz;

G_m a szendvicsmag csúsztatórugalmassági modulusa;

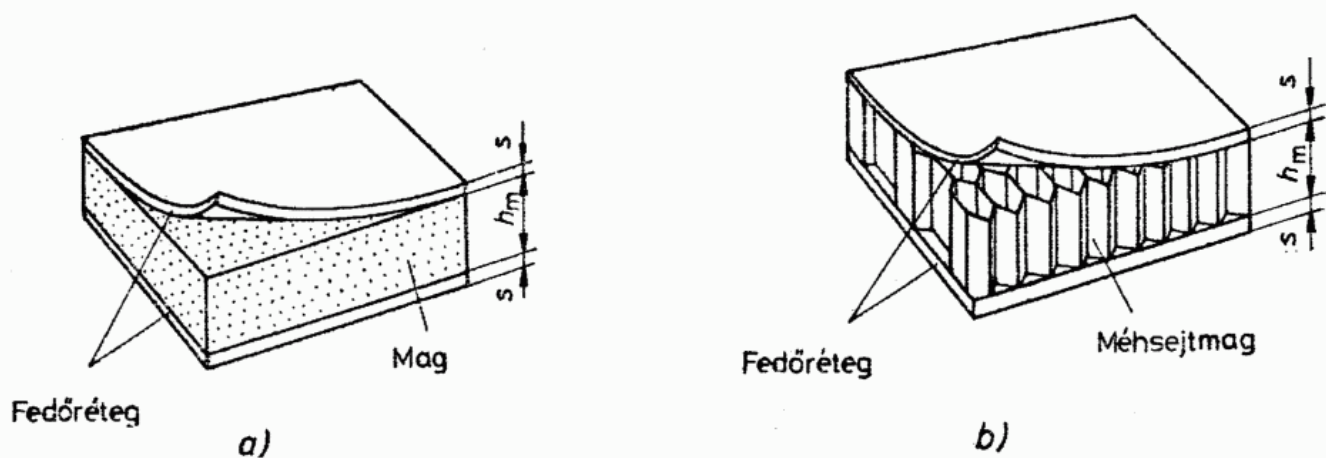
h_m a szendvicsmag szerkezeti magassága.

2. A fedőrétegek gyűrődését okozó *kritikus kihajlítóerő*:

$$P_{\text{krit}}^{(2)} = 1,6s \sqrt[3]{EE_m G_m},$$

ahol az egyetlen geometriai méret a fedőréteg s vastagsága;

E_m a mag rugalmassági tényezője.



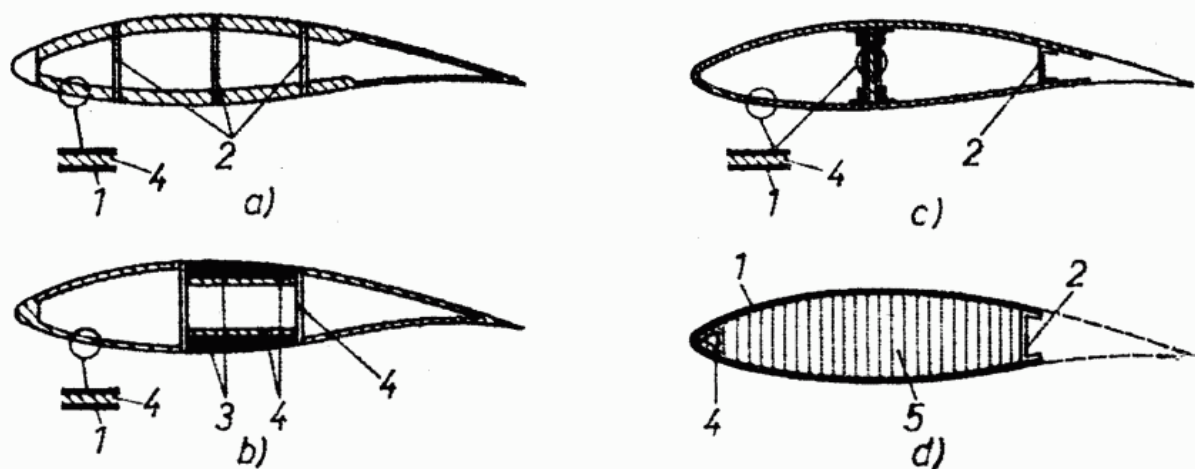
207. ábra. Szendvicsszerkezetek

a) habanyagból készült maggal; b) méhsejtmaggal

Mindkét képletből az tűnik ki, hogy a szendvicsszerkezet stabilitását a fedőlemezek és a mag anyagának rugalmassági jellemzői szabják meg, és pedig minél nagyobbak ezek az értékek, annál nagyobb P_{krit} erő szükséges kihajlításukhoz vagy meggyűrődésükhöz. A szerkezet súlyát a jellemzők fajlagos értékei befolyásolják, mégpedig a kihajlásra méretezett szendvics esetében a mag E_m/γ_m és G_m/γ_m értéke, gyűrődésre való méretezéskor pedig $(E_m G_m)^{1/3}/\gamma_m$. Hasonlóan: a héj kihajlásra való méretezése esetén E/γ értékével fordítottan arányos, gyűrődésre méretezéskor pedig $E^{1/3}/\gamma$ a mértékadó.

A 9. táblázatban néhány szendvicsmagként alkalmazható támasztóanyag jellemzőit is látjuk. A balsafát ezek közül magként a *Phönix* és *SB-6* gépek szárnyszerkezetében alkalmazták (208a és b ábra). Előnye, hogy a szendvicsszerkezetben szálával feszítávolság irányban elhelyezett balsamag, mivel rugalmassági modulusa szálirányban viszonylag nagy, a hajlítógénybevétel elviselésében is számottevően részt vesz. Balsát alkalmaztak a *H-30 Libelle* szárnyának szendvicsszerkezetében is (208c ábra). E fafajta alkalmazásakor azonban számolni kell meglehetősen változó mechanikai jellemzőivel, ezenkívül feldolgozása a műanyagtechnológiához viszonyítva nem gazdaságos, mert sok hulladékkal jár.

A 9. táblázatban igen kedvező mechanikai jellemzőivel a papír-méhsejt tűnik ki mint a legkisebb súlyt biztosító szendvicsmag-anyag. Üvegszálerősítésű epoxi-



208. ábra. Üvegszálerősítésű műanyag szárnyszerkezetek

a) *Phönix*; b) *SB-6*; c) *H-30*; d) *D-34d*

1 üvegszálerősítésű műgyantaréteg; 2 fa rétegeslemez; 3 műgyantába ágyazott rovingkötegek; 4 balsafabetét; 5 papírméhsejt

gyanta fedőrétegek között elhelyezett, 24 kp/m^3 térfogatsúlyú papírméhsejt-szendvicsmag alkalmazásával már a tiszta üvegszálás szerkezet kb. 25 kp/mm^2 értékét is meghaladó nyomószilárdságot értek el.

A papír-méhsejt alkalmazásával a *D—34d* gép szárnyszerkezeténél még további súlymegtakarítást is elértek. Ugyanis a következőből indultak ki: ha a szendvicsmag vastagságát olyan nagyra választják, hogy felső fedőrétege a szárny felső kontúrját adó héjréteggel, az alsó fedőréteg pedig az alsó kontúr adó héjréteggel legyen azonos, akkor két belső fedőréteget megtakarítanak. Az egyetlen fedőréteg hosszirányú és diagonál üvegszövettel készült laminát, amelynek kihajlását a szárny alsó és felső részén egyaránt meggátolja a belsejét teljesen kitöltő papír-méhsejt támasztóanyag (208d ábra). A papír-méhsejt szendvicsmagként való alkalmazása — mechanikai előnyei mellett — technológiai nehézségekkel járt, ugyanis közvetlenül az üvegszálás héjréteghez nehézkesen és ellenőrizhetetlenül ragasztható. Egy közbelső, műanyag- és üvegszálból készített átlátszó rétegre volt szükség. Először ezt ragasztották a méhsejtek peremére (átlátszósága folytán a ragasztási varratok rajta keresztül ellenőrizhetők voltak), majd az így burkolt szendvicsmag teljes felületét ragasztották az üvegszálerősítésű fedőréteghez.

Bár a különféle, pl. PVC műanyaghabok mechanikai jellemzői a méhsejthez viszonyítva jelentősen alacsonyabbak, az alkalmazásukkal járó technológiai könnyebb-ség (és nem utolsósorban az, hogy nagy felületen, könnyen és biztonságosan ragaszthatók a fedőrétegekhez) indokolja elterjedtségüket a vitorlázó repülőgépek szendvicsszerkezeteiben. Így többek között a *Cirrus*, *SZD—38A Jantar 1*, *PIK 20* stb. vitorlázó-gepeken.

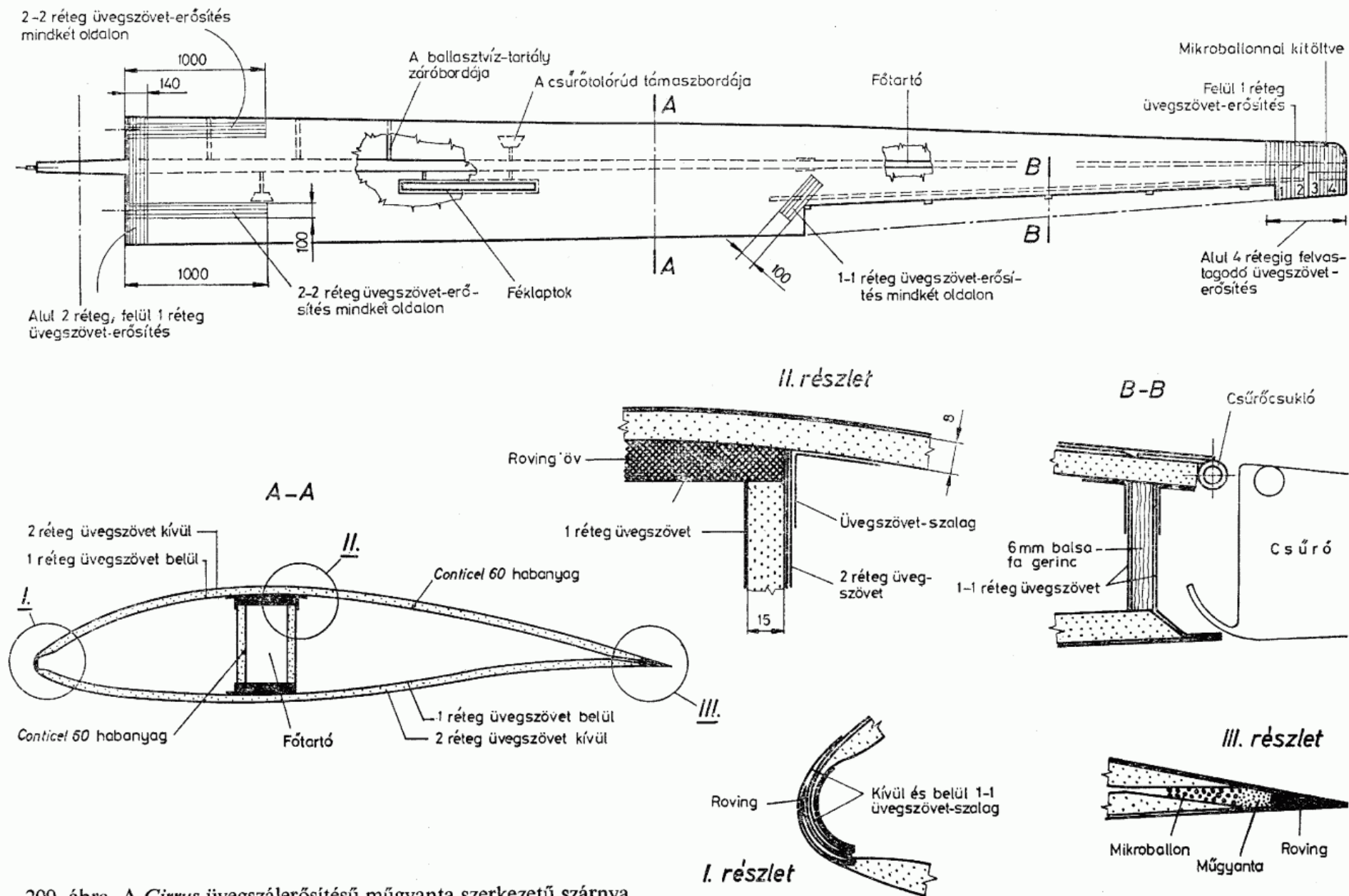
5.6.2. Az üvegszálerősítésű műanyag vitorlázó repülőgép szerkezete és gyártása

Az üvegszálerősítésű, műanyag építésű vitorlázó repülőgépek szinte valamennyi, korábban felsorolt követelményt kielégítenek. Mint az előző pontban láttuk, szerkezetük és helyi súlyelosztásuk igen jól hozzáigazítható az igénybevételekhez, így a gép súlya elfogadhatóan kicsi lesz. Bár rugalmassága a fa és fém vitorlázógépekéhez viszonyítva szokatlanul nagy, szilárdsága felülmúlja azokét. Az építési anyag egyszerű technológiával való feldolgozása a legbonyolultabb térbeli felületek elkészítését is lehetővé teszi. A külső felületek pedig — minden fáradságos utókezelés nélkül is — olyan simák és hullámmentesek, hogy a lamináris áramlás körülöttük valóban nagy szakaszon képes kialakulni.

A *K. Holighaus* által tervezett *Cirrus* üvegszöveterősítésű műanyagszerkezete iskolát teremtett. Szárnya (209. ábra) két fedőréteg közé fogott, kb. 8 mm vastag PVC-hab szendvicsmaggal készült tiszta héjszerkezet. Bordát a tervező csak a szárnytőben, az erőbevezetésnél alkalmazott a bekötő vasalások viselésére. Ezenkívül csak kisebb, a kormánymozgatás belső szerveit (tolórudakat és szögemelőket) megtámasztó csonka bordákat találunk a szerkezetben.

A főtartó a héjba épített rovingövekből áll, gerinclemeze 8 mm vastag PVC-hab vagy balsafa lehet. Az alkatrészek csatlakozásai az ábrán láthatók. Az átmeneteket rovingkötegekkel és üvegszövetcsíkokkal oldották meg.

A héjszerkezet külső és belső fedőrétegei hossz- és diagonál elhelyezésű üvegszövettel készültek. Az erőbevezetési helyeken (törzsfelfüggesztő vasalásoknál) és



209. ábra. A Cirrus üvegszálerősítésű műgyanta szerkezetű szárnya

a kiváltásoknál ezenkívül megfelelő irányban erősítő szövetdarabokat ágyaztak be. A szárnyvég a helyi igénybevételek elviselésére többrétegű erősítést kapott.

Igen érdekes és szerkezetileg egyszerű megoldású a csűrők felfüggesztése, amelyet néhány, szövetrétegekkel felragasztott csuklóval oldottak meg. A csuklók ilyen elhelyezése lehetővé tette a csűrő előtti rés leragasztását az átáramlás megakadályozására. A csűrőlapok szerkezete: alsó és felső fedőréteg közé ragasztott tömör PVC-hab.

Hasonlóan kevés alkatrészből áll a *Cirrus* vékony héjszerkezetű törzse (210. ábra) is. A viszonylag kisebb igénybevételek miatt ez egyetlen, hosszanti és diagonál elrendezésű üvegszövettel erősített műanyaghéj, amelyet a szárnyétól eltérően nem képeztek ki szendvicsszerkezetté. (Meggjegyezzük azonban, hogy más gépek, pl. a *PIK 20* törzsén is szendvicsszerkezetet alkalmaznak.)

Az erőbevezetések helyén — akár a szárnyánál — a törzsön is az üvegszövetréteg kettőzését vagy rovingkötegek bedolgozását találjuk.

Törzskeretet a mellső és hátsó részben egyaránt keveset találunk, és fő feladatuk csak a helyi merevítés.

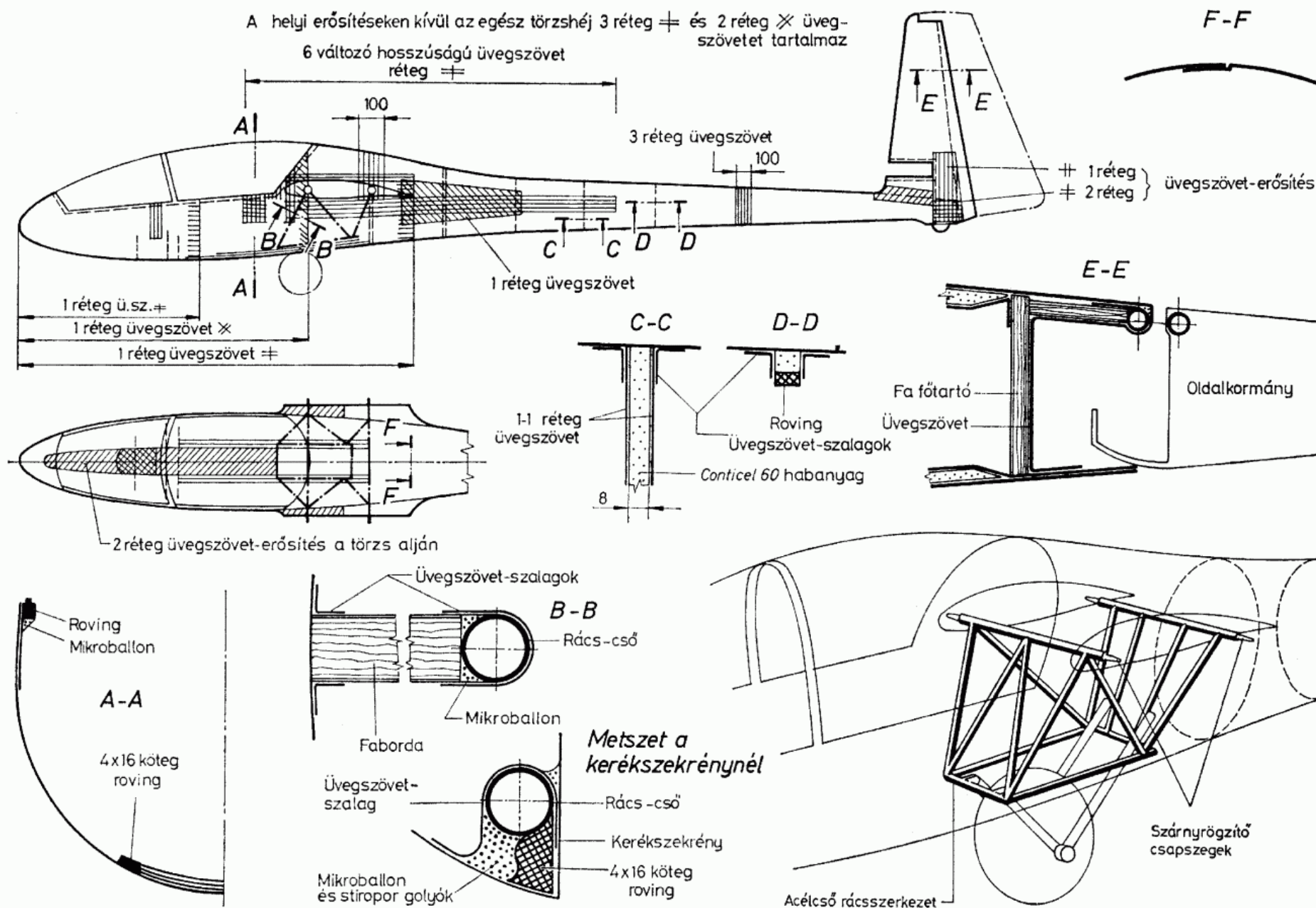
Már többször említettük, hogy a héjszerkezetek esetében a koncentrált erők bevezetése gondot okoz, és a szerkezet ezeken a helyeken általában bonyolulttá válik. Az üvegszálerősítésű műanyag vitorlázó repülőgépeken ezt a nehézséget általában igen szellemes — alapgondolatában a mi *Kománk* szerkezetével rokon — megoldással oldják meg. A szárny és a törzs ugyanis e gépeknél összeszerelés után sem képez komplex szilárdsági egységet. A szárnyak jellegzetes, villás főtartóösszekötése ugyanis a szárnyat mintegy „átmenő” tartóként önmagában hordóvá képezi ki. A törzs a szárnyra viszonylag kis igénybevételű, mereven elhelyezett, tehát szereléskor automatikusan kapcsolódó csapszegekkel van felfüggesztve. Azonban ezek a csapszegek sem a törzs héjszerkezetéhez csatlakoznak, hanem az abba beépített és a koncentrált erők felvételére alkalmas acélcsőből készült rácsszerkezethez. Ennek két alsó csomópontjában van a behúzható futószerkezet, sőt a *Cirrus* esetében igen szellemes módon a vezetőülés is bekötve. A törzs héjszerkezetét ilyen módon csak a faroktól származó terhelések és tömegerők veszik igénybe.

Az üvegszöveterősítésű műanyag vitorlázó repülőgépek gyártása is lényegesen különbözik a fa- vagy fémszerkezetűekétől. Míg azoknál a dolgozó az alkatrészeket és fődarabokat a raktárból vételezett, bevizsgált minőségű anyagból készíti, a műanyag repülőgépek építésekor a munkadarab elkészítésével egyidejűleg megy végbe anyagának létrehozása is. Ennek a technológiának ez az egyik legkényesebb mozzanata. A két komponensből kikevert műanyag önkeményedő, ezért igen rövid időn belül (általában 20 perc alatt) fel kell használni, mert ezután már a kötés megindul. A műanyagot és az üvegszövetet a *laminálás* folyamán dolgozzák össze, de ez egyúttal a munkadarab elkészítésének fázisa is. A gyártás menete nagy vonalakban a következő:

Mindenekelőtt elkészítik a repülőgép *negatív sablonjait*, mégpedig a szárnyét a belépő- és kilépőél mentén osztva egy alsó és egy felső félből, a törzsét pedig szimmetriasíkjában megosztva jobb és bal oldali darabból. A függőleges vezérsík sablonja a törzsével együtt készül, a vízszintesé pedig a szárnyéhoz hasonló.

A negatív sablonok fából vagy nagy darabszám esetén betonból készülnek. Pontos kialakításuk rendkívül fontos, mert ez az aerodinamikailag megkívánt körvonalat egyedül meghatározó szerszám. Rendszeresen ellenőrzik.

A gyártás ezután a laminálással folytatódik. Ekkor a negatív sablonokba ecsettel felhordják a megfelelő mennyiségű műanyagot és helyről-helyre elhelyezik a megfelelő mennyiségű üvegszövetet, majd ecsettel nyomogatva szálai közé is besajtolják a műanyagot. Az így elkészített külső fedőrétegre (szendvicsszerkezet esetén) elhelyezik



210. ábra. A Cirrus üvegszálerősítésű műgyanta héjszerkezetű törzse

a magot képező támasztóanyagot, majd ezt belülről újabb üvegszöveterősítésű fedőréteggel látják el. A ragasztást vákuumsajtóval végzik. A ragasztandó munkadarabot egyszerű fóliával borítják le, amelyet szegélyein légmentesen leszorítanak. A fólia alól kiszivattyúzzák a levegőt, és a ragasztáshoz szükséges sajtolóerőt a munkadarabra a fólián keresztül ható légköri nyomás adja.

A műanyagtechnológia érdekessége, hogy a szerkezet valamennyi belső elemét a negatív sablonokban építik be, így a különféle vezetékeket és a kormányok mozgató-elemeit (tolórudakat, szögemelőket stb.) is. Ezeket tehát nagy pontossággal kell előregyártani, mert az összeállítás után nincs lehetőség — a fa- és fémgépek gyártásánál megszokott — végszerelő munkára.

A negatív sablonokban elkészült fődarabokat ezután gondosan összeragasztják. Ez ismét olyan folyamat, amely rendkívüli gondosságot igényel egyrészt az elhúzóadások elkerülése, másrészt a biztonságos kötés érdekében.

A műgyanta 24...36 óra alatt köt meg teljesen. Egyes műanyagokat ezután még 50...60 °C hőmérsékleten hőkezelní, vagyis öregbítení kell.

Bár az üvegszöveterősítésű műanyagszerkezetek felülete általában további kezelés nélkül is alkalmazható a vitorlázórepülésben, mégis célszerű a tökéletes körvonalhűség érdekében utólagos óvatos (a szövet szerkezetét meg nem sértő) csiszolásuk, majd festésük. Mivel a műanyagok a magas hőmérsékletre érzékenyek, csak fehérre szabad festeni felületüket, hogy az eltérő színek alatti hőelnyelés a szilárdság megváltozását ne okozza.

Irodalom

Idézett irodalom

- [1] *Abrial, G.*: Les efforts français pour le vol sans moteur. Vortrage der 1. Internationalen Wissenschaftlichen Segelflugtagung in Darmstadt. München, 1930.
- [2] *Ahlborn, F.*: Über die Stabilität der Flugapparate. Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins Hamburg. 15. kötet. 1897.
- [3] *Aleksandrowicz—Lucjanek*: Pomiarzy sztywnosci szybowcow. Technika Lotnicza, 1958. 6. sz.
- [4] *Brütting, G.*: Die Berühmtesten Segelflugzeuge. Stuttgart, Motorbuch Verlag, 1973. 3. kiadás.
- [5] *Gedeon J.*: Vitorlázó repülőgépek igénybevétele leszálláskor. Járművek és Mezőgazdasági Gépek, 1964. 6—7. sz.
- [6] *Gymnich, A.*: Der Gleit- und Segelflugzeugbau. Berlin, Carl Schmidt & Co., 1925.
- [7] *Kronfeld, R.*: Die Methodik des Leistungssegelfluges. Veröffentlichungen des Forschungsinstitutes der Rhön-Rositten Gesellschaft e. V. München, R. Oldenburg, 1929. 4. sz.
- [8] *Lanchester, F. W.*: Aerodynamics. London. Constable and Co. Ltd, 1907.
- [9] *Lilienthal, O.*: Fliegesport und Fliegepraxis. Prometheus. 1895. 322/323 füzet. 186. p.
- [10] *Lilienthal, O.*: Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Berlin, R. Gaertner, 1889.
- [11] *Lippisch, A.*: Das „Nur-Flügel“-Flugzeug. Veröffentlichungen des Forschungs-Institutes der Rhön-Rositten Gesellschaft e. V. München, R. Oldenburg, 1929. 4. sz.
- [12] *McFarland, M. W.*: The Papers of Wilbur and Orville Wright. New York, 1953.
- [13] *Nickel, K.*: Die günstigste Geschwindigkeit des Streckenfluges. Aero Revue, 1949.
- [14] *Olenski, M. Z.*: Höhengewinn durch Kreisen. Vortrage über Motorlosen Flug. Mitteilungsblatt Nr. 7 der Internationalen Studienkommission für den motorlosen Flug. 1939.
- [15] *Rotter, L.*: From Berlin to Kiel. A Hungarian Pilot's Goal Flight. The Sailplane and Glider. 1936. 12. sz. 253. p.
- [16] *Späte, W.*: Beste Reisegeschwindigkeit beim Segelflug. Handbuch des Segelfliegens. Herausg. W. Hirth. Stuttgart, Franckh'sche Verlag. 1953.
- [17] *Stafiej, W.*: Flight Measured Load Factors. Aero Revue, 1973. 9—10. sz.
- [18] *Stepniewski, W.*: L'approfondissement des bases theoretiques et experimentales du reglement polonais de la construction des planeurs. Mitteilungsblatt Nr. 5 der Internationalen Studienkommission für den motorlosen Flug. 1937.
- [19] *Szemplinska—Aleksandrowicz—Maryniak*: Próby rezonansowe szybowców. Technika Lotnicza, 1958. 6. sz.
- [20] *Thomas, E.*: Der Einfluss der aerodynamischen Entwurfgrößen auf die Leistungen von Segelflugzeugen. D. Aerokurier, 1971. 12. sz.

- [21] *Винокуров—Новицкий*: Советский планеризм. Досааф, Москва, 1955.
- [22] *Wortmann, F. X.*: Drag Reduction in Sailplanes. Soaring, 1966. 6—7. sz.
- [23] *Wortmann, F. X.*: Some Laminar Profiles for Sailplanes. Soaring, 1964. 1. sz. 14—18. p.

Felhasznált irodalom

- Albin, K.*: Szybownictwo na swiecie. Wyd. Komunikacyjne, Warszawa, 1960.
- Dickinson*: Stability and Control for Pilots and Engineers. McGraw-Hill, New York, 1963.
- Dubs, F.*: Aerodynamik der reinen Unterschallströmung. Birkhauser, Basel, 1954.
- Jacobs, H.*: Werkstattpraxis für den Bau von Gleit- und Segelflugzeugen. Verlag Maier, Ravensburg, 1941.
- Jereb G.*: A vitorlázórepülés aerodinamikája és mechanikája. Teljesítményrepülők könyve. Budapest, Kossuth Könyvkiadó, 1957. 32—109. p.
- Jereb—Szalma*: Vitorlázórepülők iskolája. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1963.
- Forejt, M.*: Koncepcie moderních větroňů. Letectví kosmonautika. 1973. 1—26. sz.
- Кан, С*: Прочность самолета. Оборонгиз, Москва, 1955.
- Планерный спорт, Досааф, Москва, 1955.
- Rácz E.*: Repülőgéptervezés. Tankönyvkiadó, Budapest, 1955.
- Rácz E.*: A repülés mechanikája. Tankönyvkiadó, Budapest, 1953.
- Rubik E.*: Repülőgépek. (Alumínium a járműiparban. Szerk.: *Baránszky-Jób I.*). Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1964.
- Rubik E.*: Faszervezetű repülőgépek gyártása. Egyetemi jegyzet, Budapest, 1950.
- Wilkinson*: Design of Sailplanes for High Performance. Aircraft Engineering. 1951. 9. sz.
- Riegels*: Aerodynamische Profile. München, R. Oldenbourg, 1958.

Név- és tárgymutató

A, Á

A—15 107, 165, 166, 169
aerodinamikai kialakítás, vitorlázórepülőgépe 73—75
— középpont, szárnyszelvényé 83
Ahlborn 37
Aleksandrowicz 232, 239
állásszög, α 81
általános rezgések, repülőgépe 239
Antonov, O. K. 52
— gépei 57
áramlás, test körüli 77
Arceulov 40, 43, 45
ASW—12 157, 158
átejtett leszállás 205
átesés 136, 137
átlagsebesség 143
átváltási pont 77

B

balanszkormány 91, 125, 136
barogram 56, 61, 142
Beatty—Johl BJ—3 175—177
belépőél 13
belső súrlódás 76
Beniczky Lajos 171
Bikle, P. 157
biztonsági tényező 214
Blume 49
BP—3 192

borítás 247
Bréguet 901S 165
bukfenc 200
bukóforduló 210
Burevestnyik 65

C

CAGI—I 59
Calif A—21 egyesített ívelő- és féklapja 170
Chanute, O. 34
— — gépei 35
Charlotte, farok nélküli 45, 46
Cirrus 107, 140, 165, 232, 237, 238, 272—275
— szárnyának deformációja különféle hajlítógénybevételek miatt 231
Cobra 15 113
Czerwinski, W. 66
C.W. 5/35 farokmegoldása 136

Cs

csavarási hatására 231
csavarógénybevétel keletkezése 222
csavaróközéppont, szárnykeresztmetszeté 221
csavarómerevség 230
csavarórezgések, szárnyé 238, 242
Cseranovszkij, B. 40, 54
Csernov 203
csörlés közbeni szélleőkés erőviszonyai 204
csuklónyomaték 131
csupaszárny vitorlázó repülőgép 54, 183—193

csűrő 133

— -kitérítés 222, 223

— -hatásosság csökkenése 233

— -kormány 128

— -lapok 13

— -nyomaték 130

— -reverzálás sebessége 233

D

D—30 Cirrus 64, 65, 70

D—34d 271, 272

diagram a megengedhető érdesség meghatározására 158

diffuzorhatás 167, 168

dimenzió nélküli erőtenyezők 75

dinamikus hossz-stabilitás 114—116

— oldalstabilitás 123

dinamikus vitorlázás 40

dinamikusan indifferens hossz-stabilitású repülőgép 115

— instabil repülőgép 115

divergenciasebesség 234

dőlésszög, σ 17

dugóhúzó 138, 140, 210

durállemez 252—254

E, É

egyenértékű szárny 111

egyensúlyi helyzet megváltoztatása 109

egyfőtartós szárny torziós orral 248

elcsavarás, szárnyvégeké 139

ellentétes fordulónyomaték l. csűrőnyomaték
előírások, vitorlázó repülőgépek építésének és
légialkalmasságának feltételeire vonatkozó
211—216

előrenyilazott szárny 186, 187

emelkedési szám 101

EMESE B és C gyakorlógép 68

Entre kacsagép 46

enyvezés 251

EPB—1 Flying Plank 194

építési anyagok 250—256

erdeifenyő 251

érdesség hatása 157

—, megengedhető 158

erőtenyezők, dimenzió nélküli 75

Etrich 38, 183

EV—IK Fecske 266, 267

F

faanyagok 250—252

farok nélküli gép 45, 183—193

farokfelület szelvényei 74

— szilárdsági igénybevételei 225

faroknehéz nyomaték 103

faszerkezetű vitorlázó repülőgépek 256—259

fedőréteg 270, 271

fejnehéz nyomaték 103, 105

félklapok 170

felhajtóerő, Y 14

— fesztávolság menti eloszlása 94, 96, 97

— létrejötte 81

— -tényező, c_y 84

— -t növelő szerkezetek 159

felületi terhelés 147

— — változása 1921—1975 között 69

felvétel különböző esetei 198, 199

fémek 253, 254

fémépítésű vitorlázó repülőgépek 262—267

fesztávolság 13

figoidlengés 115

Flat Top változat 168, 169

flutter 243

— -sebesség, kritikus 242

Foka 4 140

Fokker, A. 40

— -féle kétüléssel 43

forduló 16

— -ban ható erők 198

— -poláris 19

Fowler-lap 161

főtartók 247

— anyagai 252

Friese-csűrő 130, 133, 134

F.S.3. 45

függőleges farokfelület 117, 119, 120, 140

— hőmérsékleti gradiens 23

függősíkló 40, 41

FX szelvények 150

G, Gy

gazdaságos sebesség 16

Gedeon 206

G Nr. 7 63, 64

Góbé 107, 113, 119, 140, 183, 231, 237, 263—
265

Góra, T. 66

Göttingen 441 jelű szelvény 46, 49
 grafitcsál 252, 255, 256
 Gribovskij, V. K. 40
 Groszev 63
 Grunau Baby 65
 Gymnich 41, 49
 gyakorlógép 180
 Győr 2 165

H

H—30 Libelle 271
 hajlítási hatására 231
 hajlító- és csavarórezgések kapcsolódása 242—
 244
 — -nyomaték feszítávolság menti változása
 220
 — sajátrezgésszám, repülőgépszárnyé 237
 Hankin 39
 hársfa 251
 hasznos súly 13
 határréteg 76
 háton felvétel 200
 hátranyilazott szárny 186—188
 Hawk 34
 héjszerkezeti anyagok 252
 héjszerkezetű szárny 248
 — törzs 249, 250
 Hentzen 40, 49
 hidegenyv 251
 Hirth 58—60, 65
 Ho—VI 166
 Hoerner 155
 Holighaus, K. 272
 holland orsó 123
 Horten I 191
 — -féle gépek elrendezése 190
 hossz-stabilitás, dinamikus 114—116
 —, kacsagépé 195
 — mértéke 109
 —, statikus 103—114
 HP—15 107, 165
 — gépek szendvicsszerkezetű fémszárnya 263
 hullámosság 159
 hullámvitorlázás 22

I

Idrac, P. 39
 indifferens egyensúlyi helyzet 102

indukált ellenállás 94, 95, 97
 — ellenállási tényező 97
 — örvények 95
 instabilitás 102
 irányfelületek 13
 irány-instabilitás 116
 iránystabilitás 116—119
 iskola-vitorlázógépek 179—183
 IS—4 Jastrzab 231
 IS—5 Kaczka 195
 ivelőlap 160

J

Jacobs 66
 Jakovlev, A. 40
 Jancsó Endre 67, 68
 Jemeljanov 62
 Johl, W. 175
 Jugyin 57
 Jumasev, A. V. 40
 Június 18 237

K

Ka—6 165
 kabintető kialakítása 164
 kacsá vitorlázógépek 46, 193—195
 KAI—14 166
 KAI—19 165
 Kármán Tódor 43
 káros ellenállás 99
 — ellenállási tényező 99
 kétfőtartós szárny 248
 kétkormányos kiképzés 259
 kétüléses vitorlázógép 62
 kiképzőgépek 183
 kilépőél 13
 — -féklap 170
 Kirby-sorozat gépei 66, 67
 Klepikova 63
 Klemperer 0,43
 Koktyebel 169
 Konsul 51
 kormányerők 131—136
 — kiegyenlítése 133
 — megengedett nagysága az OSTIV előírásai
 szerint 132
 kormányfelület 13, 91

kormányfelület aerodinamikája 91—93
 — hatásossága 92
 kormányhatásosság 125
 kormányozhatóság 124
 kormányzás 124
 — elve és hatásossága 125
 — repülőgép hossz tengelye körül 128
Koroljov 40, 55
 kőrisfa 251
 közepes aerodinamikai húr (KAH) 111, 112
 középszárnyú repülőgép 121
Kranich 66, 231, 237, 238
Krasznaja Presznja 43, 45
Kria törzse 164
 kritikus kihajlítóerő, fedőréteg gyűrődését okozó 270
Kronfeld 51, 53, 55, 56
Ku—4 Austria 52, 53
Kupper, A. 52
 különleges vitorlázógépek 183

L

L—107 Lunak 231
 labilitás 102
 laminálás 274, 276
 lamináris és turbulens határréteg 77
 — határréteg vastagsága 78
 — szárny szelvények 89, 90
 — szelvények jellemzőinek összehasonlítása 150
Lanchaster 40
 légerőkből származó terhelések 197
 légerőtani jellemzők az állásszög függvényében 84
 légialkalmasság 211
 legyezőnyomaték 117
 lejtővitorlázás 21, 22
 leszállás 205
 — terhelési spektruma 206
 leszállólap 170
 leválasztólap 134
Levasseur—Abrial 43, 45
Lilienthal siklógépei 33, 34
 — -féle polárdiagram 85
Lippisch 40, 57
 lucfenyő 251, 252
Lucjanek, W. 223

M

M—22 67, 68, 231
M—30 Fergeteg 171—173
 madarak repülése 39
Madelung, G. 40, 49
 magassági kormány 13, 125
 magasszárnyú repülőgép 121
Maneyrol 44
Martens 40, 49
Maryniak 239
McCready, P. B. 71
 mélyszárnyú repülőgépek 121
 merevített szárnyú gépek 246
 merevség, vitorlázógép szerkezetéé 229, 230
 merülősebesség 15, 101
Meteor 156, 165
Minimoa 58—60, 231
Moazagotl 58, 69
Moffat 142
 motor nélküli gépek a huszas évek kezdetéről 43
Mucha 100 237, 239, 240
Muttray, H. 40
 — kétszárnyú siklógépe 42
 — és *Seifert* szárnykormányzásos gépe 47
Mouillard 39
 műanyagok 254—256

N, Ny

NACA szelvények 151
 negatív sablon 274, 276
 — terhelési esetek 200
Nemere 60—62, 141
Nimbus 70
Nimführ, R. 38
Nyevcsadin, V. 65
 nyílazott szárnyú repülőgép 185—190
 nyomásközéppont, szelvényé 81, 82
 — vándorlása 82
 nyomatéki tényező, c_m 83
 — —, m_z , dimenzió nélküli 104

O, Ö

OE—01 107, 165, 173—175
OKA gépek 52, 57, 58
 oldalkormány 13, 125, 126, 140
 oldalstabilitás 120—123

oldalviszony 152, 153
Olympia—Meise 51, 107
 orsó, gyors, és vezetett 210
 orsózó mozgás 122
 — -nyomaték 129
 OSTIV követelmények 132, 211—216
 önmagában repülő szárny problémái 184
 örvénysó 156

P

pályalengés 115
 papír-méhsejt 272
Papp Márton 173
Parabola 54, 184
Pelzner függősiklógépe 41
Pénaud 39
Peyret tandemszárnyúja 43, 44
Phönix 271
Pilcher, P. S. 34
 pillangófarok 59
 pillangókormány 127
 polárgörbe, repülőgépe 99, 100
 —, szárnyé 98
Professor 51
 profilellenállás 80, 97
Pröll, A. 40
Püsnov, V. 40
PWS—101 66, 67

R

R—04 Szittya 67, 68
R—07 Tücsök 181
R—07b Vöcsök 180, 181, 206
R—08d Pilis 206, 256, 257
R—11b Cimbora 111, 183
R—12 Kevély 67, 68
R—15b Koma 181, 182, 260
R—16 Lepke 182
R—22S Futár 107, 156
R—22S Június 18 165, 231
R—23 Gébics 170
R—26S Góbbé 107, 113, 119, 140, 183, 231, 232, 237, 263—265
Reiher 66
 repülés függőleges légáramlatokban 20
 — hidegfront előtt 56
 — lehetősége 14
 repülési tulajdonságok 101

— — kis sebességekkel 136
 repülőgép általános rezgései 239
 — polárgörbéje 99, 100
 — -szárny szerkezeti elemei 247
 — -vezető képességeinek szerepe 144
 réselt csűrő 133
 rés nélküli csűrő 133
 rétegeslemez 252
 rezgéseket gerjesztő erőhatások 240
 rezgésmentesség, vitorlázógép szerkezetéé 229
 rezgésszám, n 235
 rezgőrendszerek 234, 235
Reynolds-szám 75, 77, 78, 150, 151
RF—4 58
Rhönadler 66, 237, 238
Rhön-sorozat gépei 66, 67
Rot Front 57, 58, 63
Rotter Lajos 60, 141
 roving 255
Rubik Ernő 173, 180, 182, 263
 — — gépei 67

S

sajátrezgés 234
Schempp—Hirt féklap 170
Schlegel und Eisen 43, 48, 49
Schneider 65, 66
Schulz, F. 45
Schwarzer Teufel 43, 44, 49
Schweizer I—26 261
 sebességi görbe 16, 17, 146
 — vitorlázógépek 62
 segéd tartók 247
Seremetyev, B. gépei 65
 —, *P.N.* 40
Sigma I 65, 107, 161, 165, 177—179
 síkbeli rácsos szerkezetű törzs 249
 siklási sebesség 100, 145
 siklószám, ϵ 15, 141
 siklószög 14
 sirályszárny 57, 123
Slingsby, F. 66
Sohaj 231
 spirál-instabilitás 123
 spirálozás 17
 stabilitás 102
 — elengedett kormányval mutatott 134, 135
Stafiej 206—208
 standard osztály 72

statikai iránystabilitás 116
 statikus hossz-stabilitás 103—114
St. Cirrus 237, 238
Steiger, C. 34
Stepniewski 208
 súlypont megengedhető szélső helyzetei 113
 — -vándorlás megengedhető határai 112, 113

Sz

szabad osztály 72
 szárny alaprajzi alakja 153—155
 — aperiodikus lecsavarodása 234
 — aszimmetrikus rezgése 241
 — csillapítása orsózó mozgásban 122
 — -elcsavarás 153, 154
 — és törzs közötti átmenet kialakítása 167, 168, 169
 — -felület 13
 szárny hajlításból származó igénybevételei 219
 — kialakításának szempontjai 147
 — -kormányzós rendszerű gépek 46, 47
 — mint önálló rezgőrendszer 235—238
 — -mélység 13
 — nyílazása 185—190
 — nyomatéka 104
 — polárgörbéje, véges terjedtségű 98
 — -ra ható erők és nyomatékuk 80
 — S-profilokból 184
 — szilárdsági igénybevételei 217
 — tangenciális igénybevétele 224
 — terhelésének fesztávolság menti eloszlása 218
 — V-állása 117
 —, változtatható alakú 159
 — -végek kialakítása 155
 szárnyszelvény 75, 86, 148
 — aerodinamikai tulajdonságai 85—90
 — geometriai jellemzői 86
 —, hagyományos 87
 —, lamináris 87
 szárnyszerkezetek, csavarás elviselésére alkalmas 223
 — elvi megoldásai 248
SZD—8 Jaskolka 165
SZD—8b Jaskolka Z 107
SZD—12 Mucha 100 107, 231
SZD—20X Vampir 2 192
SZD—22 Mucha 156

SZD—24—4 Foka 165
SZD—29 Zefir 3 165
SZD—30 Pirat 107, 155, 201, 206, 228, 231, 237
SZD—32A Foka 5 107, 136, 197, 199, 258, 259, 267, 268
SZD—36 Cobra 237
SZD—36A Cobra 15 107, 165
SZD—38A Jantar 1 107, 140, 155, 160, 197, 215, 216, 231, 232, 237, 238
 szállókés, függőleges szélről 203
 — gradiense 201
 —, vízszintes szélről 202
 szelvényvastagság 87
 szélzástól stabilitás 117—119
Szemplinska 239
 szendvicsszerkezet 263, 270, 271
 szerkezet általános elrendezése és osztályozása, vitorlázógépeké 245, 256
 szilárdsági igénybevételek 217
Szokolay András 67, 68
Sztahanovec 62, 63, 111

T

támasztóanyagok 252
 tangenciális hajlítónyomaték eloszlása a fesztávolság mentén 224
Tansky, Cz. 34
 távrepülés 55, 143
 teleszkópikus szárny 153, 161, 162
 teljesítményadatok 100, 101
 teljesítmény-vitorlázógépek 141
 terhelés, földi erőkből származó 205, 206
 —, repülőgépvontatásból származó 204
 terhelések, vitorlázógépre ható 196—207
 — változása műrepülés közben 208—210
 terhelési többes 197—199
 — — létrejötte, lehetséges legnagyobb 212
 — —, szállókésből származó 202
 — — változása műrepülés közben 209, 210
 térbeli áramlás véges terjedtségű szárny körül 94
 — rácsos szerkezetű törzs 249
 termik 23
 — -kémény 24
 — kihasználása 144
 — -profilok 25
 termikus feláramlás 23

termikus távrepülés 27
 — vitorlázás 23
 testek ellenállása 77
 testellenállás 79
Thermikus szárnykormányzós gép 46, 47
 törzs 74
 — aerodinamikai kialakításának három jellegzetes csoportja 165
 — csavaróigénybevételének jellegzetes esetei 229
 — és az egyéb részek rezgései 238
 — földi erőkből származó igénybevétele 226
 — kialakítása 162
 — mellső részének kiképzése 162, 163
 — -orr körüli nyomásviszonyok 163
 — -szerkezetek 249
 — szilárdsági igénybevételei 226
 — tömegerőkből származó terhelése 226
 — vízszintes síkú hajlításának főbb esetei 228
 troposzféra 11

U, Ü

US—5 (OKA—32) 65
 utazósebesség 16
 üres súly 13
 üvegszálerősítésű műanyag 252, 255
 — — -ból készült vitorlázó repülőgépek 267—276
 — — repülőgépszerkezetek szilárdsági problémái 267—272
 — — vitorlázógép szerkezete és gyártása 272—276

V

Vampyr 49, 50, 70
 vasalások 246
 véges terjedtségű szárny 94
 — — — polárgörbéje 98
 vezérsík 13, 91
 vezetőfülkék 166
 vitorlázó repülőgép szilárdsága 196
 — — története 31
 vitorlázórepülő-világrekordok 27, 28
 vízballaszt 148
 vízszintes farokfelület 104—108, 140
 — — igénybevételei 225
v—n diagram 213—215
 vontatókötél 207, 208
Vrjagov—Iljin 59

W

Weihe 66
Wels 38, 183
Wien 51, 169
Wortmann-féle szelvények 149
Wright testvérek 35—39
 — — gépei 36, 37

Z

Z—03B Ifjúság 206
 zuhanósebesség 101
 zuhanóspirál 123

Műszaki vezető: Hegedűs Ernő — Műszaki szerkesztő: Bagi Miklós
 Az ábrákat rajzolta: Jereb Gábor
 Borítót és a kötést tervezte: Sedelmayer István
 A könyv formátuma: B5 — Ívterjedelem: 25,25 (A5)
 Ábrák száma: 210 — Példányszám: 7550
 Papír minősége: 80 g ofszet — Betűcsalád és méret: New Times, gm/gm
 Azonosítási szám: 41 625 — **MŰ: 2389-i-7779**
 Készült az MSZ 5601—59 és 5602—67 szerint
 77/4530 Franklin Nyomda. Felelős: Vágó Sándorné igazgató

48 Ft

