

Bera József – Pokorádi László

Helikopterzaj elmélete és gyakorlata



Bera József – Pokorádi László

***Helikopterzaj elmélete
és gyakorlata***

***Campus Kiadó
Debrecen
2010.***

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás és a mű bővített, vagy rövidített változatának kiadási jogát is.

A Szerzők előzetes írásbeli hozzájárulása nélkül sem a teljes mű, sem annak bármilyen részlete semmilyen formában nem sokszorosítható.

Szerzők:

Bera József

okleveles mezőgazdasági gépészmérnök, mezőgazdasági környezetvédelmi okleveles szakmérnök, zaj- és rezgésvédelmi szakértő
I.; II.; VII.; VIII. fejezetek

Pokorádi László

egyetemi tanár
okleveles (repülő)gépészmérnök, helikopter sárkány-hajtómű üzemmentartó
üzemmérnök,
dr. univ., PhD (műszaki tudományok), a műszaki tudomány kandidátusa, dr. habil.
III.; IV.; V.; VI. fejezetek

Lektorok:

Bite Pálné dr.

Pro Silentio díjas zaj- és rezgésvédelmi szakértő, környezetvédelmi szakmérnök, az Európai Akusztikusok Névsorába bejegyzett szakértő, EUR-mérnök
I.; II.; VII.; VIII. fejezetek

Szelestey Gyula

okleveles (repülő)gépészmérnök, mérnöktanár
nyugállományú főiskolai docens
III.; IV.; V.; VI. fejezetek

ISBN 978-963-9822-10-8

© **Bera József, Pokorádi László**

Campus Kiadó
4028 Debrecen, Kassai út 26.
Telefon: 52-420-492
Felelős vezető a kiadó ügyvezető igazgatója

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A könyv megjelentetését támogatta:

a *Magyar Tudományos Akadémia Debreceni Területi Bizottsága* (DAB) és a „*Tudomány a régióban*” Alapítvány;

a *KG-Filter Kft. Környezetvédelmi Mérnökiroda*;

a *LAWAND Mérnöki Iroda Kft.*;

az *AIRPORT-DEBRECEN Kft.*

Szerzők ezúton köszönik meg az általuk nyújtott önzetlen támogatást, valamint

Bite Pálné dr. és Szelestey Gyula

lektorok segítő észrevételeit.

Debrecen, 2010. december 6.

*Bera József
Pokorádi László*

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	1
I. KÖRNYEZETI ZAJVÉDELEM	3
I.1. Bevezetés	3
I.2. A hang és zaj összefüggései	4
I.3. A zajvédelem rendszere	8
I.4. Felhasznált irodalom	14
II. HANGTANI ALAPOK	17
II.1. Hang, hanghullámok	17
II.2. Hangtér jellemzői	24
II.3. Hangforrások	30
II.3.1. Pontszerű hangforrások	32
II.3.2. Vonalszerű hangforrások	33
II.3.3. Felületi hangforrások	35
II.3.4. Helikopter, mint hangforrás	36
II.4. Mérőszámok	38
II.4.1. Műveletek szintekkel	41
II.4.2. Hangforrások és szintek közötti összefüggések	43
II.4.3. Egyadatos mérőszámok	44
II.5. Hangterjedés	47
II.5.1. Levegő csillapító hatása	48
II.5.2. Növényzet, hangvisszaverődés és talaj hatása	50
II.5.3. Meteorológiai hatások	51
II.6. Felhasznált irodalom	54
III. A HELIKOPTEREKRŐL ÁLTALÁBAN	55
III.1. Bevezetés	55
III.2. Mi a helikopter?	55
III.3. A helikopterek csoportosítása	60
III.3.1. Egyforgószárnyas helikopterek	60
III.3.2. Kétforgószárnyas helikopterek	62
III.3.3. Kombinált helikopterek	64
III.3.4. Konvertiplánok	65
III.4. A helikopterek rövid története	66
III.4.1. A hősor	66
III.4.2. A modern helikopterfejlesztés nagyjai	67
III.4.3. Magyarok a helikopterek történetében	69
III.4.4. A helikopterek alkalmazásainak története	71
III.5. A levegő állapotjelzői	72

III.6.	Felhasznált irodalom	74
IV.	A FORGÓSZÁRNY AERODINAMIKA ALAPJAI	77
	A FORGÓSZÁRNY MOTOROS ÜZEMMÓDJA	
IV.1.	Bevezetés	77
IV.2.	A fejezetben alkalmazott jelölések	77
IV.3.	Áramlástan alapok	78
IV.3.1.	Az aerodinamikai felhajtó erő	78
IV.3.2.	Az aerodinamikai ellenállás	80
IV.3.3.	A poláris	81
IV.3.4.	Szárnyprofil-körüli nagysebességű áramlás	83
IV.4.	A forgószárny geometriai, és üzemmód jellemzői	84
IV.5.	A forgószárny impulzus elmélete	88
IV.5.1.	A forgószárny impulzus elmélete tengelyirányú átáramlás esetén	88
IV.5.2.	A légpárna-hatás	91
IV.5.3.	A forgószárny örvénygyűrű üzemmódja	92
IV.5.4.	A forgószárny impulzus elmélete ferde átáramlás esetén	92
IV.6.	A forgószárny lapелеlmélete	93
IV.6.1.	A forgószárny lapелеlmélete tengelyirányú átáramlás esetén	94
IV.6.2.	A forgószárny reakció nyomatéka	95
IV.6.3.	A forgószárny lapелеlmélete ferde átáramlás esetén	97
IV.6.4.	A vízszintes csukló szükségessége	99
IV.6.5.	A függőleges csukló szükségessége	103
IV.7.	Következtetések	104
IV.8.	Felhasznált irodalom	105
V.	AZ AUTOROTÁCIÓ	107
V.1.	Bevezetés	107
V.2.	A fejezetben alkalmazott jelölések	107
V.3.	A forgószárny autorotációja	108
V.3.1.	A forgószárny lapелеlmélete autorotációs állapotai	108
V.3.2.	A forgószárny autorotációs zónái	111
V.4.	A helikopter autorotációs repülése	113
V.4.1.	Az autorotációra történő átállás	113
V.4.2.	Az állandósult autorotáció kialakulása	113
V.4.3.	Az autorotációs leszállás	114
V.4.4.	A helikopterek veszélyes repülési tartományai	115
V.5.	Felhasznált irodalom	117
VI.	A HELIKOPTER REPÜLÉSI ÜZEMMÓDJAI	121
VI.1.	Bevezetés	121
VI.2.	A fejezetben alkalmazott jelölések	121
VI.3.	A helikopter vízszintes repülése	121
VI.4.	A helikopter felszállási módjai	126
VI.4.1.	Helikopterszerű felszállás	127

VI.4.2.	Helikopterszerű felszállás légpárnahatás felhasználásával	128
VI.4.3.	Repülőgépszerű felszállás	128
VI.4.4.	Helikopterszerű függőleges emelkedéssel	129
VI.5.	A helikopter leszállási módjai	130
VI.5.1.	Helikopterszerű leszállás	131
VI.5.2.	Repülőgépszerű leszállás	132
VI.5.3.	Helikopterszerű leszállás függőleges süllyedéssel	132
VI.6.	Következtetések	133
VI.7.	Felhasznált irodalom	134
VII.	HELIKOPTERZAJ SZABÁLYOZÁSA	135
VII.1.	Bevezetés	135
VII.2.	Határértékek és követelmények	136
VII.2.1.	Jogszabályok és műszaki előírások	136
VII.2.2.	Határértékrendszer	141
VII.3.	Helikopterzaj jellemzői	147
VII.3.1.	Helikopter zajkibocsátás meghatározása	147
VII.3.2.	Zajkibocsátás egyszerűsített vizsgálata	156
VII.4.	Helikopterzaj kezelése	163
VII.5.	Felhasznált irodalom	166
VIII.	HELIKOPTERZAJ VIZSGÁLATA	169
VIII.1.	Bevezetés	169
VIII.2.	Helikopterzaj mérése	169
VIII.2.1.	Ahogy a zajmérés kezdődik	172
VIII.2.2.	Zajmérés elmélete	174
VIII.2.3.	Zajmérés gyakorlata	178
VIII.3.	Helikopterzaj számítása	182
VIII.3.1.	Zajszámítás elmélete	183
VIII.3.2.	Várható zajterhelés számítása	185
VIII.4.	Zajcsökkentés gyakorlati kérdései	188
VIII.5.	Zajvédelem jövőbeni feladatai	190
VIII.6.	Felhasznált irodalom	192

BEVEZETÉS

A szakterületen jelenleg megtalálható, a környezethasználat és a környezetvédelem követelményeit egységesen kezelő szakirodalom szűkös. Üzemeltetők és beruházók, illetve tervezők és szakértők számára ugyanakkor szükséges a repülési zaj, így a helikopteres repüléstől származó zajterhelés kezeléséhez, a gyakorlatban megjelenő feladatok végrehajtásához a megfelelő ismeretek összefoglalása. Ezek jelenleg csak több forrásból, nehezen érhetők el a tervezési és szakértői feladatok megfelelő szintű elvégzéséhez.

A helikopter sajátos zajforrás a többi közlekedési eszközt tekintve a légi jármű jellege, ezen belül is főleg a forgószárny összetett működésének következtében. Ezért a zajforrás jellegzetességeinek megértéséhez elengedhetetlen a forgószárny aerodinamikai működésének, az abból fakadó szerkezeti sajátosságainak ismerete. Szintén a forgószárny aerodinamika bizonyos szintű ismeretét igényli a helikopter lehetséges repülési, ezen belül főleg a fel- és leszállási, üzemmódjainak megértése.

Szerzők szándéka szerint a környezeti zajvédelem és a helikopteres repülés, mint környezethasználat, közötti kapcsolatban jelenleg meglévő hiány pótlása a cél ezen könyv megírásával, mely átfogó képet nyújt a problémáról, elemzi az okokat és az összefüggéseket, ugyanakkor a megoldáshoz is segítséget ad. A könyv az elméleti alapok bemutatásával, valamint gyakorlati példákon és vizsgálati eredményeken keresztül kívánja a helikopterzaj kialakulásának összefüggéseit feltárni, ezzel a légi közlekedés és a környezetvédelem szakembereit segíteni a gyakorlati feladatok megoldásában.

KÖRNYEZETI ZAJVÉDELEM

I.1. BEVEZETÉS

A környezet védelme az emberi tevékenységek kiterjedését és összetettségét tekintve napjainkban megoldásra váró feladatok sorát jelenti az élet számos területén. Az ember saját létfenntartásán túl a folyamatos fejlődés céljából egyre nagyobb igénybevételnek teszi ki a Földet, a természeti értékkel rendelkező területeket és a természetes élőhelyeket, az épített környezetet és önmagát egyaránt. Ennek okaként fokozódik az a környezeti terhelés, amivel számolni kell a mindennapokban, de nem hagyhatjuk figyelmen kívül a negatív hatásokból eredő és a jövőben várható, egészséget és élhető környezetet befolyásoló változásokat sem.

A hatások következményeit tekintve a társadalom számára a környezetvédelem a gazdasági szempontokat tekintve stratégiai kérdésként jelenik meg. Egy jól működő gazdaságnak ugyanis tartósan jó kondícióban lévő, egészséges és kipihent humán erőforrással kell rendelkeznie. Ha a lakosság egészségi állapota és közérzete rossz, vagy a naponta munkába járó emberek valamilyen környezeti hatás miatt nem képesek kipihenni magukat, és nem képesek felkészülni tevékenységük ellátására, az a munkavégzés és az életvitel minőségi romlásához vezet, ami közvetve kihat a gazdaságra. De stratégiai kérdés a tényleges emberi tevékenységeken kívül eső természeti értékek védelme is, hiszen az ember által hasznosított területeken túl elhelyezkedő környezet is része a Földünknek, az ott élő növény- és állatvilág számára a kedvező állapot megőrzése létkérdés. Mindemellett az emberek többsége a szabadidő eltöltéséhez előtérbe helyezi a természetes, vagy ahhoz közeli állapotban lévő területeket, sokan a természetbe járnak pihenni és kikapcsolódni, azaz mindenkinek szüksége van a tiszta, rendezett és csendes környezetre.

A csend és nyugalom érdekében mind többen hagyják el hosszabb-rövidebb időre lakóhelyüket, mivel számukra egyre fontosabb, hogy kiszakadjanak a zajos környezetükből. Lakás, vagy pihenés céljából új területek beépítésére is sok esetben annak okán kerül sor, hogy a legkevesebb zavaró tényező, a lehető legkisebb zaj lépjen fel a védendő területen. Emiatt fokozódik az igény a zaj elleni védelem szempontjából az elfogadható és élhető környezetet megteremtésére.

Ugyanakkor ma már létfontosságú a közlekedési eszközök használata, termékek szállítása, vagy az emberek napi és eseti utaztatása. A közlekedés vonatkozásában megnövekedett az igény a légi járművek használata iránt, ami további zajvédelmi problémák kialakulását jelenti. Ebbe a problémakörbe tartozik a helikopteres repülés is, mivel a leszállóhelyek működtetése és az egyre gyakoribb kismagasságú repülés az élet számos területén megszokott tevékenységgé vált, esetenként szorosan kapcsolódik létesítmények működéséhez (pl. kórházak, sportlétesítmények, stb.). Ezért meg kell tanulnunk a helikopterzaj kezelését és a rendelkezésre álló lehetőségek helyes alkalmazását, azzal együtt, hogy el tudjuk fogadni környezethasználat szempontjából szükséges korlátozásokat vagy a lehetőségekből adódó feltételeket.

Ennek első lépése a helikopter, mint környezeti zajforrás megismerése, a helikopteres repüléstől származó zaj jellemzőinek áttekintése és az alapvető akusztikai összefüggések elsajátítása. Ezért könyvünk első fejezetében a zaj fogalmát, a zajvédelem rendszerét, majd a helikopteres repülés e rendszerben elfoglalt helyét ismerheti meg a Tisztelt Olvasó. Az alapokhoz tartoznak még a zajforrások jellemzői, a hangtér, a hangterjedés és a zajterhelés kialakulásának összefüggései is. Mindezt a környezeti zaj kezeléséhez szükséges tényezők ismertetésével olyan mélységben tárgyaljuk, amennyire a zajvédelem kérdéseinek megértéséhez szükséges.

I.2. A HANG ÉS ZAJ ÖSSZEFÜGGÉSEI

Épített környezetben, vagy az emberi tevékenységekkel érintett területeken és azok közelében fokozott minőségi tényezőt jelent a zaj és rezgés, mivel átélve a kellemetlen zavaró hatást az érintettek azonnal jelzést adnak az életkörülményeikben beállt negatív változásról. Ezzel összefüggésben kell kezelnünk az infrastruktúra fejlesztését, tervezését, építmények kialakítását és a közlekedési létesítmények működtetését, amikor újabb és újabb zajforrásokat létesítünk, ezzel megváltoztatva az eredeti vagy korábban kialakult és megszokott állapotot.

A **HANG** valamilyen rugalmas közegben létrejövő rezgés. Környezetünket tekintve a hang sok helyről származhat, esetenként a forrás helyét vagy a hanghatás okát nem is lehet szubjektív észleléssel azonosítani. A **fül**, tehát az a szerv, amivel a hangot az ember érzékeli. A fül egy kifinomult műszer, segítségével elsődleges jelzést kapunk a körülöttünk bekövetkező változásokról. De nem kizárólag a fülünkkel érzékeljük a hangokat, hanem a **csonthallás** segítségével is. Csontvázunk ugyanis kiválóan vezeti a rezgéseket, ami jelentős mértékben befolyásolja a szubjektív hangélményt. A tényleges hatást tehát a fül, mint hallószervünk, valamint testünk és csontjaink, mint a rezgéseket vezető szerkezet közvetíti az idegrendszer számára. De hogyan lesz a hangból zaj, milyen összefüggés van a két fogalom között?

A **HANG** szó három jelentéstartalmat hordoz. Sokak számára a hang esztétikai, értelmi és informális tartalommal bír, ebből a szempontból hangélménynek nevezzük. Az iparosodást megelőzően, azaz a XVIII. század előtt az információ hordozása és továbbítása volt az elsődleges szerepe. Ebben az értelemben a hang jelentéshordozó, az adat agyi megfejtéssel válik információvá. Másik tartalom szerint a hang jelentése a hallható, füllel érzékelhető külső inger. Ekkor a hang élettani hatása kap jelentőséget az ember számára hallható frekvenciatartomány vonatkozásában. Végül a hangot, mint fizikai jelenséget értelmezzük, ebben az esetben valamely rugalmas közeg zavarási állapota, ami az energiaközlés helyén rezgés formájában jelentkezik és a rendelkezésre álló közegben terjed tovább.

A **ZAJ** olyan hang, amelynek jelentéstartalma a zavarás és a kellemetlenség, illetve időszakos hatás alapján ártalom. Elsődlegesen az emberi megítélés különbözteti meg a két fogalmi kört, vagyis a zavaró kellemetlen hatás miatt lesz a hangból zaj.

Fizikai meghatározás és méréstechnikai szempontból a hang és a zaj teljesen azonos fogalmak. A zajjal szemben áll azonban az informatív hang, ami a zavarással szemben élményt vagy valamilyen jelzést hordoz, így sok esetben keletkezése és továbbítása is direkt módon valósul meg.

Mint bemutattuk, a hangból elsődlegesen az ember részéről adott szubjektív értékelés miatt lesz zaj. Az emberre gyakorolt hatást az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

1. beszédérthetőség és figyelem zavarása;
2. alvást és pihenést zavaró hatás;
3. testi és lelki folyamatokra gyakorolt hatás;
4. halláskárosodás.

A **beszédérthetőség és a figyelem zavarása** emberek közötti kommunikáció idején jelentkezik, amikor beszélgetés vagy előadás során a zaj miatt felemeljük hangunkat, hangosan és ingerülten beszélünk, esetleg fokozott koncentrációt igényel a hallott információ megértése. Ez természetesen nagyobb energia befektetését is igényli részünkről, ami más tevékenységek végzését hátráltatja, valamint kimerültséget és fáradtságérzést okoz.

Az **alvás- és pihenés zavarása** miatt fáradékonyság jelentkezik, nagy zajban nyugtalan az alvás és a pihenés, vagy hirtelen felébredünk, ami szintén a szervezet fokozott terhelését eredményezi.

A **testi és lelki folyamatokra gyakorolt hatás** fáradtságot és kimerültséget okoz. A vegetatív idegrendszer irányítása alatti szervek működése megváltozhat, anyagcsere fokozódása, szájszárazság és testhőmérséklet csökkenése jelentkezhet. Idegrendszerre gyakorolt hatás miatt fejfájás és feszültségérzés keletkezik. A zajból fakadó ártalmakat kiegészítve a rezgés okozhat gerincbántalmakat, légzési- és szívritmus zavart.

A **halláskárosodás** a hallásküszöb időszakos vagy végleges megemelkedése, másképp a középfülben elhelyezkedő érzékelő sejtek megerőltetése és kifáradása, amelyeket az erős hangok miatti igénybevétel okoz. Végleges esetben egy hirtelen fellépő erős hang hatására az érzékelő sejtek részlegesen elpusztulnak.

Látható, hogy az emberre gyakorolt hatások meghatározó szerepet játszanak abban, hogy az adott hangjelenséget vagy a mesterségesen gerjesztett hangot milyen módon minősítjük, illetve hogyan értékeljük a hanghatást. Ennek jelentőségét azért célszerű figyelembe venni, mert a zaj elleni védelemnél a követelményértékeket és az intézkedéseket is ennek szellemében fogalmazták meg [I.1]. Pedig nem minden hanghatás származik emberi tevékenységtől, sok esetben a természet (pl. madarak, szél, stb.) okoz olyan hangjelenséget, amit jellemzői alapján a természet zajának minősítünk. Ennek megfelelően a környezetünkben fellépő hangjelenségeket az alábbiak szerint is csoportosítjuk:

1. természetes forrásból eredő hanghatások;
2. humán eredetű, emberi tevékenységek okozta hanghatások.

Természetes hangforrások közé soroljuk többek között a földrengés, tájfun és erős szél, vagy mennydörgés idején, a vízfolyások és a hullámverés, vagy a dús lombú fák és az erdő közelében észlelt hangjelenségeket.

Humán eredetű hangforrás az ember által használt gép működése, de ide tartoznak az üzemek, a szórakoztató és zenei eszközök, vagy a közlekedés.

Mindemellett az ember önmaga is lehet olyan hangforrás, amit a környezetében élők a hang jellege és erőssége miatt zajforrásnak minősítenek.

Annak ellenére, hogy a zaj megítélését az emberi érzékelés szempontjából tartjuk elsődlegesnek, beszélni kell a zaj állatokra gyakorolt hatásairól is. Ennek oka, hogy az ember nem szakadhat el teljes egészében a természetes környezettől, az általa okozott zaj kihat az élővilágra, illetve az állatokra, növényekre is. Számos kutatás eredménye igazolja, hogy a humán eredetű zajok befolyásolják az állatok viselkedését, valamint történtek megfigyelések a zaj által okozott károsodásra is.

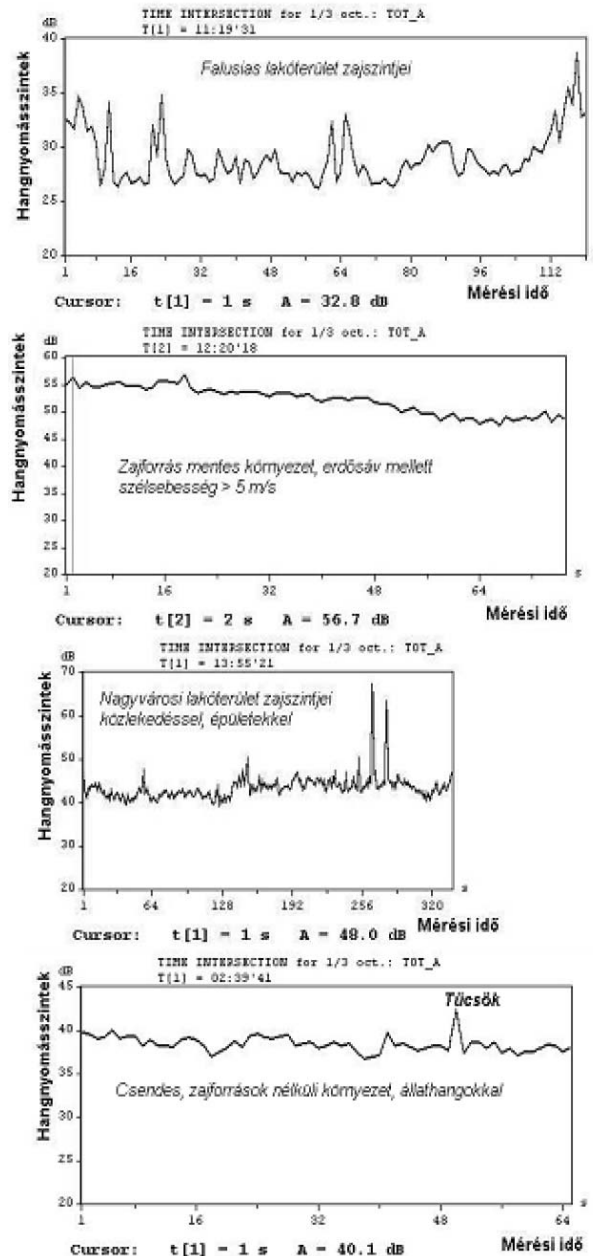
Az állatok hallása jóval kifinomultabb, mint az embereké, ezért érzékenyebben és gyorsabban reagálnak az ártalmas zajokra. Ráadásul állatok esetében túlélésük szempontjából, vagy a táplálkozó hely megtartása miatt is kulcsfontosságú lehet a hangok érzékelése. Számukra a hang információtartalmának van jelentősége, így a szokásostól eltérő humán eredetű hangok zavart okozhatnak viselkedésükben. Különösen az ember számára nem hallható infra- és ultrahangok jelenléte fontos számukra, ami az egymás közötti kommunikáció miatt sokszor kulcsfontosságú szempont.

Vadon élő állatokra gyakorolt hatás a menekülési reakció előidézése. Számos faj esetében egy hirtelen bekövetkező hanghatás elég ahhoz, hogy sikertelen legyen a szaporodási ciklus, egyes fajoknál táplálkozási rendellenesség és pánik reakció léphet fel zaj hatására. Haszonállatok esetében hasonló reakciót figyeltek meg a kutatók, az állatoknál jelentkező halláskárosodás mellett fejlődési rendellenességet mutattak ki. A zaj állatokra gyakorolt hatásának szempontjából megbízható adatok gyűjtéséhez több éves, hosszú távú megfigyelések szükségesek, amelyek a kutatásokat tekintve a jövőben állnak majd rendelkezésünkre. Azonban bizonyított, hogy az állatok hallása rendkívül kifinomult, pl. a galamb hallása a 10 Hz alatti frekvenciatartományban 50 dB-lel (a decibel meghatározását lásd. II.4. fejezetben) érzékenyebb, mint az emberé. Háziállatok, így kutyák, macskák esetében is mindenki tehet hasonló megfigyeléseket az állat viselkedése nyomán.

A különböző hangok észlelése és az arra adott válaszreakció mellett az állatok esetében is jelentőséggel bír a testhang-vezetés, illetve a rezgések érzékelése. Erre mutat példát az a megfigyelés, amely szerint az afrikai elefántok néha hirtelen különös módon viselkednek, egy-egy csorda tagjai időnként megmerevednek és előredőlnek, és a súlyukat mellső lábukra helyezik. Ebben a helyzetben néha felemelik egyik lábukat. A megfigyelt csorda minden tagja egyszerre tett így, túlságosan összehangolt volt a jelenség ahhoz, hogy véletlen legyen. Kiderült, hogy az elefántok hallgatóznak, lábaikkal ugyanis képesek megérezni a legkisebb földmozgást is, és csordájuk tagjainak jelzéseit kilométerekről meg tudják különböztetni más elefántokétól. Az állatok ugyanis a tőlük nagy távolságra lévő társaikkal alacsony frekvenciájú rezgések segítségével kommunikálnak, ezek a rezgések azonban nemcsak a levegőben, hanem a talajban is terjednek. A szeizmikus kommunikáció (talajban terjedő hangok, rezgések) tehát a rágcsálók és a rovarok mellett a nagyobb testű emlősökre is jellemző, az ember ezeket nem érzékeli ennyire kifinomultan.

Bármilyen megközelítésben vizsgáljuk a hang és a zaj összefüggését — az ember részéről adott értékelés vagy állatokra gyakorolt hatás, természetes vagy humán eredetű hanghatás — a hang zaj szempontú megítélését a zavarás adja. Ennek a

magyarázata egyrészt abban rejlik, hogy a hang jelentéshordozó tartalma és a jelentés pontos megismerése fontos az élőlények számára. Másik szempont, hogy zavarmentes környezetben is körülvesz minket egy olyan nyugalmi hangtér, ami kis mértékben, alig észlelhető módon változik, és ez a megszokott hangtér nem tartalmaz kellemetlen hangtani összetevőket, tehát csendes környezetnek minősítjük.



I. 1. ábra Hangnyomásszint értékek eltérő környezetben
forrás: Szerző saját mérései

Ugyanakkor a hang által közvetített információ fogadásához és feldolgozásához szükséges a folyamat akadályozása, valamint a hang jellegében vagy a hangerősségben bekövetkező változások zavart okoznak, amely fokozza a koncentrációt és beindítja a védekezési mechanizmust. Ez újabb energiaráfordítást igényel az észlelő részéről. A ZAJ fogalmát az eddigiekben elmondottak alapján a következők szerint célszerű rögzíteni, követve a vonatkozó műszaki szabványban foglaltakat:

A **zaj** olyan hang, amely nem kívánatosnak, azaz zavarónak, kellemetlennek vagy károsnak minősül [I.1].

A helyzetet bonyolítja, hogy az eltérő környezetben fellépő, azonos jellegű hanghatások más-más megítélés alá esnek, vagyis az eltérő helyzet miatt nem egyezik meg az értékelésük. Egy nagyvárosi területre jellemző, de az adott környezeti adottságok miatt csendesnek mondott hangnyomásszint érték a falusias beépítettség mellett már zavaró jelleggel bír és zajnak minősül.

Az állathangokat például adott helyzetben vagy a természetes környezetben kedvező hanghatásnak minősítjük, de ugyanazokat a hanghatásokat csendes környezetben, mint a tücsök ciripelését, a madárrajok csiripelését vagy a kutyaugatást már zavaró hangként értékeljük. A nap eltérő időszakaiban, aktuális teendők során is másnak ítéljük meg a természet hangjait. Például hajnalban vagy munka közben zavaró lehet a madárcsicsergés, de evés közben, délután vagy este a teraszon kellemes hallgatni őket. Különböző hanghatások zajszint értékeire mutat példát az I.1. ábra.

I.3. A ZAJVÉDELEM RENDSZERE

A környezetszennyezés — természetes forrásból származik vagy humán eredetű — a hatással érintett környezeti elemek eredeti, természetes tulajdonságát változtatja meg. A környezetkárosítás a szennyezés minőségét vagy mennyiségét tekintve már olyan mértékű, hogy az életkörülmények romlását okozza. A környezetkárosítás reverzibilis (helyreálló) vagy irreverzibilis (visszafordíthatatlan) állapot kialakulásához vezethet.

A környezetszennyezés és a környezetkárosítás bizonyos, a környezetünkben lévő anyagok vagy energiaformák elsajátításával, elmozdításával, illetve a környezet elemeibe való behelyezésével, bejuttatásával összefüggő folyamatok következménye.

A környezetszennyezés anyagi vagy energia jellegű lehet. A zaj jelentéstartalma szerint: nem kívánatos kellemetlen hang, a hang: valamilyen közegben energia közlése miatt létrejövő rezgés, ezért a zaj energia jellegű környezetszennyezésnek minősül. A hangtér megváltozása ebben az esetben valamilyen külső (pl. mechanikai eredetű) energiaközlés hatására következik be. Az energiaközlés a tér bármely pontján és bármely időpontban megtörténhet, emiatt időben, térben és a különböző források miatt jellegében is különböző hangkeltésről beszélhetünk.

Környezetszennyezés vonatkozásában különbséget kell tennünk az informatív hang és a zaj között. Sok esetben a hangélmény (pl. előadás, koncert, stb.) vagy a hang általi információ továbbítása a cél (pl. tűzjelző sziréna, stb.). Nem tekintjük tehát zajnak azokat a hangokat, melyek pl. figyelemfelhívás és figyelmeztetés miatt keletkeznek, de ezzel megzavarják a nyugalmi hangteret, vagyis zavart okoznak a környezetben. Hasonló módon a természet hangjai is információt adnak a környezet

valamilyen állapotváltozásáról, a mennydörgés a viharra való felkészülésben segít, a talajban terjedő rezgések egy esetleges földmozgásra utalnak.

Zajnak minősül ugyanakkor, ha egy hanghatás kisebb-nagyobb mértékben zavarja, esetleg hangelfedés miatt akadályozza az információt hordozó, vagy élmény tartalommal bíró hangok észlelését. Ilyen eset akkor lép fel, amikor egy koncert vagy előadás hallhatóságát rontja valamilyen külső gépzaj vagy a közlekedés zaja, de az állatok számára fontos hangok észlelését is akadályozhatják az idegen eredetű hangok és rezgések. Erre vonatkozóan az eddigi tapasztalatokat felhasználva általános érvényű megállapításokat tehetünk.

Hangtérnek nevezzük környezetünk részét, amelyben a hanghullámok terjednek [I.1]. A zavarási állapot a közvetítő közeg tulajdonságainak függvényében térben és időben is ingadozik egy korábban kialakult egyensúlyi helyzet körül. Kedvező esetben stabil, hosszabb ideig fennálló egyensúlyi helyzet alakul ki. Amikor a mechanikai zavarási állapot jelentős energiaközléssel jár, a hatás a nyugalmi hangtér megbomlásához vezet.

A **nyugalmi hangtér** ugyanakkor nem azonos a csendesnek tartott környezettel, mivel állapotjellemzőjét a környezeti levegő nyomása mellett a vizsgált tér különböző részeiről származó, időben és minőségben is eltérő hangok összessége adja. Ezek a hanghatások egyszerűbb esetben egy, összetett helyzetben több forráshoz vezethetők vissza, de legtöbbször több eltérő helyzetben lévő forrást kell figyelembe vennünk, ha a környezet helyzetét szeretnénk megadni és minősíteni. Ezért szükséges a hangtér kialakulását befolyásoló tényezők, valamint a hangjelenségek, mint zaj rendszerezése, amit a következő alapelv szerint teszünk meg:

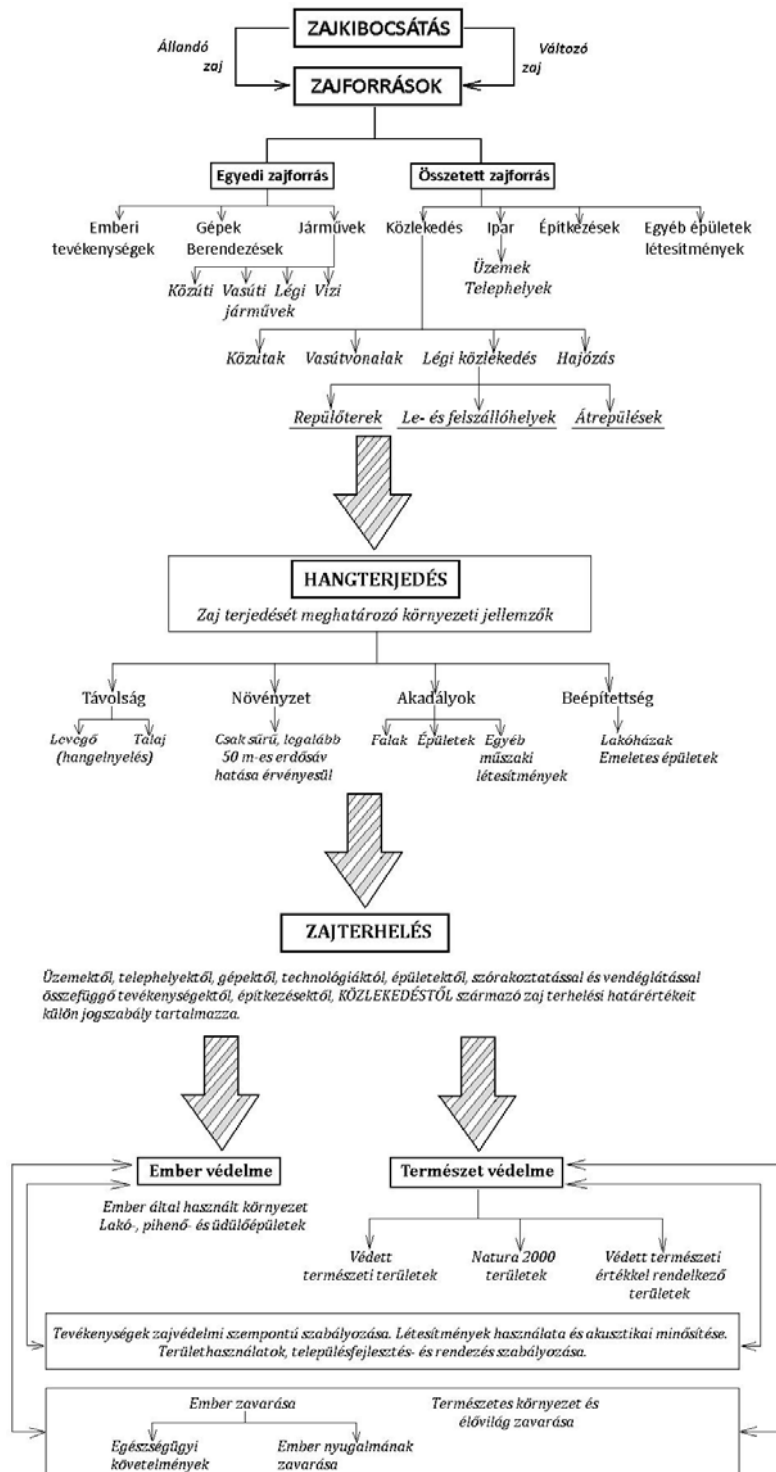
1. hangjelenség származtatása, emberi tevékenységek alapján;
2. hangforrások jellemzői alapján;
3. hangtér kialakulását befolyásoló környezeti tényezők alapján;
4. védendő területek, objektumok és élőlények besorolása alapján.

Az I.2. ábra a zajvédelmi szempontú rendszerezést mutatja, az összefüggések is a zaj keletkezése és terjedése, illetve a zaj elleni védelem vonatkozásában alakulnak ki. A felosztás és a logikai kapcsolat alapján határozzuk meg a későbbiekben a vizsgálatok módszerét és tartalmát (pl. mérés helyszíne és időtartama, mért jellemzők értékelése), a határértékeket és a követelményértékeket (pl. vonatkoztatási idő, napszak szerinti bontás), valamint a forrás és védendő közötti függőségi viszonyt (pl. változás mértéke), azaz, hogy mekkora zavarást okozhat a zajforrás a környezetben.

A zaj keletkezését és a környezetbe való kibocsátást, vagyis a térben okozott zavarás mértékét és jellegét elsődlegesen a forrás határozza meg. Ennek jelentőségét azért hangsúlyozzuk, mert ez a tény egyben azt is jelenti, hogy a zaj csökkentését — a műszaki megvalósíthatóságot és az eredményességet, valamint a költséghatékonyságot szem előtt tartva — a forrásnál célszerű elkezdeni. A kibocsátott zaj csökkentéséhez ismerni kell a források azon műszaki és technológiai adatait, amelyek szükségessé és egyben lehetővé teszik a zajcsökkentést. Ez a feltétel azonban csak akkor teljesül, amennyiben a zajforrásokat is felosztjuk a következők szerint [I.2]:

1. egyedi zajforrások;
2. összetett zajforrások.

I. Környezeti zajvédelem



I.2. ábra A zajterhelés kialakulását befolyásoló tényezők logikai kapcsolata

Minden esetben, amikor zajforrásról beszélünk, környezetvédelmi szempontból meghatározott kategóriába soroljuk az adott technikai eszközt, jelen esetben a légi járművet, illetve a helikoptert vagy a helikopteres repülést. Ebben a vonatkozásban hangsúlyozzuk, hogy nem minden gép, technikai eszköz vagy tevékenység minősül zajforrásnak. Csak az olyan hangforrásból lesz zajforrás, amelynek hangja valamilyen szempontból zajnak minősül, pl. a védendő környezetben kellemetlen, zavaró és szubjektív észleléssel is jól elkülöníthető zavaró hatást okoz. Ebből következik, hogy a természeti jelenségekhez köthető hangokat nem minősítjük zajkibocsátásnak.

Egyedi zajforrások az emberi tevékenységek, gépek és berendezések, valamint közlekedési eszközök és azok részegységei. A helikopterek esetében is van lehetőség az egyedi zajcsökkentésre. Konstruktív fejlesztésre mutat példát a bemutatott egyforgószárnyas NOTAR (No Tail Rotor) helikopter (lásd III.3.1. fejezet), amelynek kialakítása révén egyik fő előnye a kisebb zajkeltés és fedélzeti vibráció. Az a tény, hogy napjainkban a légi jármű szerkezete, vagy a hajtómű zajcsökkentett módon kerül megtervezésre és megépítésre, illetve, hogy a működési elvben bevezetett változások kisebb zajkibocsátással járó üzemvitelt eredményeznek, önmagában is mutatja a járműfejlesztésben rejlő zajcsökkentési lehetőségeket. Üzemeltetési szempontból a zajforrás műszaki állapota, az elhasználódásból vagy a karbantartás hiányosságai miatt bekövetkező műszaki állapot romlás is okozhatja a zajkibocsátás növekedését. A helikopter, mint környezeti zajforrás műszaki színvonala és működése során bekövetkező műszaki állapotváltozás együttesen határozza meg a környezetben okozott zajterhelést. A légi közlekedésben, mint ahogy más szakterületeken is komoly lépéseket tettek a környezetvédelem érdekében. Hazai (lásd VII.2.1. táblázat) és nemzetközi jogszabályok szigorúan előírják a követelményeket. Ezek vonatkoznak a repülőterekre, valamint a légi jármű gyártásban már a megelőzés szempontjából a zajvédelmi és környezetvédelmi előírások alapján kell tervezni.

Összetett zajforrások az ipar, építkezések, egyéb létesítmények, a közlekedés, azon belül a közutak, a vasút és a hajózás, valamint a légi közlekedés. Helikopteres repülésre és a lakóterületek felett végzett repülési műveletekre a növekvő igények miatt egyre gyakrabban kerül sor, ezzel együtt a beépített területeken helikopter leszállóhelyek létesítését és működtetését (pl. kisebb városi repülőterek, gazdasági társaságok leszállóhelyei, mentő helikopter leszállóhely) is meg kell oldani. A leszállóhelyek működtetését azonban erőteljesen korlátozza, ha a létesítményt olyan települési környezetben kívánjuk elhelyezni, ahol a szomszédos építmények zaj elleni védelmét is biztosítani kell. A legtöbb ország az egyéb zajokhoz képest magasabb zajterhelési határértéket határoz meg repülőterek és leszállóhelyek környezetében az átlagos üzemi zajokhoz képest (lásd VII.2.2. táblázat). Ez felveti azt a kérdést, hogy mekkora lehet a megengedett legmagasabb határérték, valamint a zavaró hatást mérlegelve mekkora és milyen jellegű zajterhelést engedünk meg az adott létesítmény környezetében? Ehhez a közlekedési létesítményt, pl. egy helikopter leszállóhelyet, mint összetett zajforrást kell vizsgálni, mert a repülési tevékenység is több rész-műveletből (pl. leszállás, állóhelyi üzem, felszállás, kismagasságú átrepülés) áll. Egyedi és összetett zajforrásra mutat példát az I.3. ábra. A leszállóhelyet egy időben akár több helikopter is használhatja (pl. egyik érkezik, a másik indul) így a repülési művelet és a létesítménytől származó zajkibocsátás is összetett lehet a vizsgálati

időben.

A **hangterjedési viszonyokat** a távolság, a növényzet, az akadályok és a beépítettség határozza meg. A repülési- és helikopterzaj vonatkozásában a zajforrás és az észlelési pont közötti távolság hatására bekövetkező zajcsökkenésnek van jelentősége, emellett a környezeti adottságokkal összefüggésben a hangelnyelés, illetve hangvisszaverődés megszüntetése segíti a kisebb zaj kialakulását.

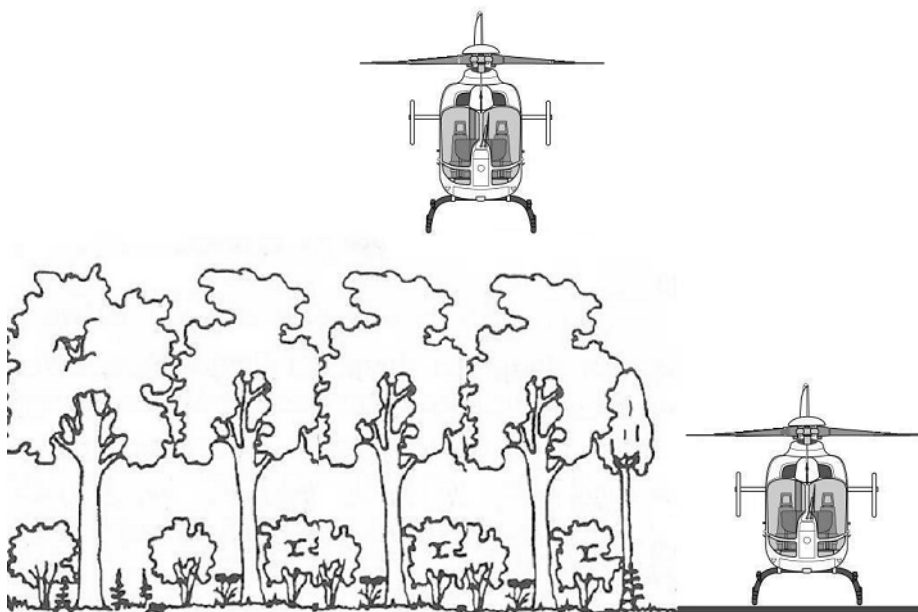


I.3. ábra Egyedi és összetett zajforrás
forrás: Szerző fotója

Növényzet telepítése vagy fenntartása hozzájárul a térfelületek hangelnyelő képességének javításához, de növénytelepítéssel kimutatható zajcsökkentést abban az esetben érünk el, amennyiben a növényzetben megtett hangút számára legalább 40-50 m-es, kifejtett lombozattal és aljnövényzettel rendelkező erdősávot biztosítunk. Tehát fásor, vagy cserjeültetvény és a hangterjedés akadályozása között nincs összefüggés, nem várható kedvezőbb helyzet kialakulása. Erre mutat példát az I.4. ábra, amely az erdő feletti átrepülést és az erdősáv melletti leszállóhely igénybevételét szemlélteti.

Lakott területeken, illetve épített környezetben épületek és burkolt felületek hatására tapasztalatok szerint kisebb mértékű hangelnyeléssel számolhatunk, egyes esetekben jól megfigyelhető a hangvisszaverődés, ami az észlelési pontokban

kialakuló zavaró hanghatás növekedését eredményezi. Ezért repülési útvonalak kijelölésénél célszerű törekedni a beépítetlen területek feletti átrepülésekre, amelyek sok esetben a távolság növelését is magával hozza. E két hatás együttesen már kimutatható eredményre vezet.



I.4. ábra Helikopteres repülés növényzet felett

A ZAJTERHELÉST a zajforrás, a hangterjedési viszonyok és a területi adottságok együttesen határozzák meg. Mivel energia jellegű környezetszennyezésről beszélünk, az észlelési pontban kialakuló hatásra a zajterhelés kifejezést alkalmazzuk, az észlelési hely, pedig, a terhelési pont. A ZAJTERHELÉS fogalmát a következők szerint célszerű rögzíteni, követve a vonatkozó műszaki szabványban foglaltakat Hivatkozás.

Zajterhelés a zajforrások által okozott fizikai hatás meghatározott helyen, rendszerint az ember tartózkodási helyén [I.3].

Zajterheléssel összefüggésben kell kezelnünk az ember és a természet védelmét. Az ember által használt környezet, illetve a huzamos emberi tartózkodásra kijelölt területek és épületek védelmét tekintjük elsődlegesnek, kiemelve az egészségügyi-, üdülő- és lakókörnyezetet. Azonban a környezet védelme túlmutat az ember védelmén, a fogalomkör értelmezését szélesebb vertikumban kell megtennünk.

Emellett gondoskodni kell a védett természeti területek, és a természeti értékkel rendelkező területek zaj elleni védelméről is, hiszen az állatok számára a zaj, mint zavaró hang az élőhelyen bekövetkezett negatív változást jelenti, ahogy erre rámutattunk a hang és zaj összefüggéseinek tárgyalásánál.

A magyarországi szabályozásban — könyvünk megírásakor hatályban lévő jogszabályok (lásd VII.7.2. táblázat) alapján — az emberi környezetre vonatkoztatunk határértékeket, melyek megállapítása nagyszámú ember bevonásával elvégzett

kísérleten alapul. Ebből következik, hogy a zajhatás megítélése az emberi fül érzékenységét követi, a **határérték**, pedig, egy olyan érték, amelyet az emberek többsége még elviselhetőnek tart, és a kialakuló hanghatás nem okoz egészségkárosodást.

DECIBEL ÉS ZAJFORRÁSOK

A hangforrások bemutatása és a hangtér leírása során az adatok kezelhetősége céljából az akusztikában alkalmazott eljárást követjük, így az I.1. ábrán is látható módon, hangnyomáásszintekkel (lásd: hangnyomáásszint-idő függvény), valamint a szintértékekből eredően minden esetben **decibel [dB]** mértékegységben számolunk. A további fejezetekben szereplő **zajszintek** meghatározását és jelentését, illetve a *decibel* mértékegység bevezetését az ehhez szükséges összefüggések ismertetését követően részletesen a II.4. fejezet tartalmazza.

A zajkibocsátást ugyanakkor kapcsolnunk kell a zajforráshoz, mivel a kettő között az I.2. ábrára tekintve ok-okozati összefüggés áll fenn. Zajszintek kiértékelése ezért nem választható el a zaj forrásától, a zajcsökkentést tehát — szem előtt tartva a környezetvédelmi érdekeket — a forrás és kibocsátás, illetve a hangterjedés jellemzőinek hármass összefüggése alapján kell megkezdni.

I.4. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [I.1] Tarnóczy Tamás: Akusztika. Hangnyomás, hangosság, zajosság, Akadémia Kiadó, Budapest, 1984.
- [I.2] Bera József: Repülőtér-használat és zajterhelés összefüggései a repülőképzésben, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2010., www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2010_cikkek/Bera_Jozsef.pdf
- [I.3] MSZ 18467-83 műszaki szabvány, Akusztikai fogalom meghatározások, Zaj.

- **FZF típ. zajárnyékoló falak**
- **FHZS típ. hangcsillapító zsaluk**
- **FAT típ. akusztikai tokozatok**
- **FHR típ. hangcsillapított rácsburkolatok split klíma kültéri egységeihez**
- **FHA és FHH típ. négyszög keresztmetszetű kulisszás és hengeres hangcsillapítók**



MÉRÉS, TANÁCSADÁS, SZAKÉRTÉS ÉS KIVITELEZÉS

 **KG-FILTER[®] Kft.**
KÖRNYEZETVÉDELMI MÉRNÖKIRODA
1027 Budapest, Margit krt. 64/B., Tel: (+36 1) 356 1649, 214 6882,
Fax: 224 0068, E-mail: kg-filter@kg-filter.hu, Web: www.kg-filter.hu



LAWAND MÉRNÖKI Iroda Kft.

1031 Budapest,
Vízimalom sétány 8. 2.em 6.
2013 Pomáz, Nyár utca 5.
Telefon: 26/526-146
Fax: 26/526-147
www.lawand.hu
lawand@lawand.hu



Szakértői, felülvizsgálati szakterületek
felszínalatti víz minősége
földtani közeg védelme
talaj- és termőföld-védelem
felszíni vizek védelme
hulladékok káros hatása elleni védelem
levegőtisztaság-védelem
zaj- és rezgésvédelem

Tervezői szakterületek
magas- és mélyépítés
mérnökgeológia
kőzetmechanika
környezetvédelem geotechnikai kérdései
víztermelő telepek
hulladéktároló és kezelő telepek
talaj- és talajvíz tisztítás
geodézia

Műszaki ellenőri tevékenység

Felelős műszaki vezetői jogosultságok
vízi létesítmények
mélyépítési műtárgyak

HANGTANI ALAPOK

II.1. HANG, HANGHULLÁMOK

A HANG rugalmas közegben fellépő, energiaközlés hatására létrejövő rezgés. A rezgés időben megvalósuló, periódikusan ismétlődő változás, ami anyaghoz kötődik, illetve olyan közegben létesül, amely a zavarási állapotot képes továbbítani. Akusztikai szempontból közegben kialakuló hullámterjedésről beszélünk, a tér egy pontján közölt energia ettől válik hallható hanggá. A rezgés a közeg elemi részecskéi között fennálló kölcsönhatás miatt tovaterjed, az egyes részecskék a térben nem vándorolnak, viszont az energia a hullámmal terjed. Hangterjedéskor a közeg szerint megkülönböztetjük:

1. léghangot;
2. folyadékhangot;
3. testhangot.

Léghang esetében a vivőközeg gáz halmazállapotú anyag, a legtöbb esetben a levegő. Hangterjedéskor a mozgásállapot terjed, egy rezgő tárgy a levegő részecskéit mozgásba hozza, amelyből akkor lesz számunkra érzékelhető hang, ha a rezgőmozgás a levegő közvetítésével fülünkbe jut, vagy a testfelületet éri.

Folyadékhang esetében a vivőközeg folyadék, leggyakrabban víz. Ebben a vonatkozásban régóta ismert jelenség a folyóvizek és a tófelületek hangvezetése, amire az egymással szemközti parton álló halászok is felfigyeltek, és a vízfelület fölé hajolva beszélgettek.

Testhang esetén a vivőközeg valamilyen szilárd test, ami akár egy felület is lehet, a környezetünkben elhelyezkedő építmények falai és a burkolatok kialakítástól függően jó hangvezetők. Az emberi test is részt vesz a hangok vezetésében, a halászok vízbe merített evezőlapátot tartottak a foguk között, és így figyelték a halak mozgását.

Gázokban és folyadékokban longitudinális (hosszanti) hullámok, amíg szilárd testekben longitudinális hullámok mellett más hullámtípusok, úgynevezett. haránt-, nyomási-, hajlító-, csavaró- és felületi hullámok keletkeznek.

Az eddigiekben lényegében csak a rugalmas közeg nyugalmi állapotának megzavarásával jellemeztük a hangot. Azonban a térben okozott szerkezettorzulásnak olyan fizikai paraméterei vannak, amelyek alkalmasak a kialakuló hangtér leírására, illetve a hanghatások mérésére és értékelésére. Megismerésükhöz át kell tekintenünk azokat az összefüggéseket, amelyek az akusztikai hullámmozgás leírására, a közeg által továbbított zavarási állapot mérésére rendelkezésünkre állnak.

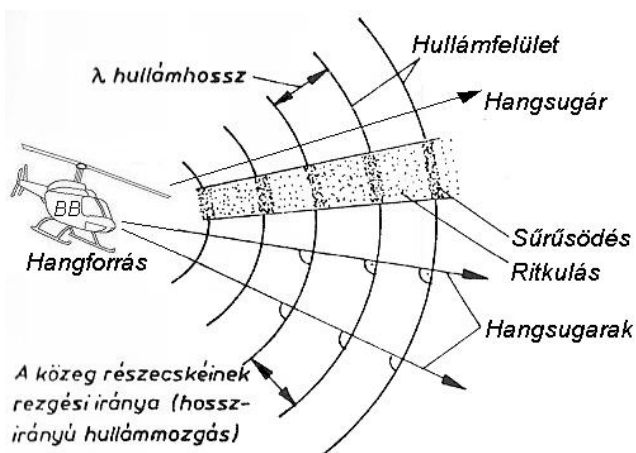
Az akusztikai hullámmozgás a közeg periodikus sűrűsödésében és ritkulásában jelentkezik, a terjedés irányát a hangsugár adja meg. A hullámmozgás a hangforrástól hullámsíkokban terjed, amelyek adott időpontokban a hangtér azonos állapotú pontjait foglalják magukba. A hangsugár a hullámsíkokra mindig merőleges. A szabad térben megvalósuló hullámmozgást az II.1.1. ábra szemlélteti.

Egyszerű hangok esetében a nyugalmi állapothoz viszonyított nyomás növekedés és csökkenés időbeli lefolyását — a hullámmozgásból adódó periodikus jelet követve — a szinuszgörbével ábrázolhatjuk, amely az II.1.2. ábrán látható. A szinuszjel mindig a meghatározó jellemzők valamelyikének időbeli lefolyását mutatja, a jellemző és az idő közötti összefüggést a (II.1.1) egyenletfejezi ki:

$$A = A_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (\text{II.1.1})$$

ahol:

- A — vizsgált jellemző pillanatnyi értéke;
- A_{\max} — vizsgált jellemző legnagyobb értéke;
- ω — körfrekvencia, ami $2 \cdot \pi f$;
- φ — fázisszög.
- t , — idő.



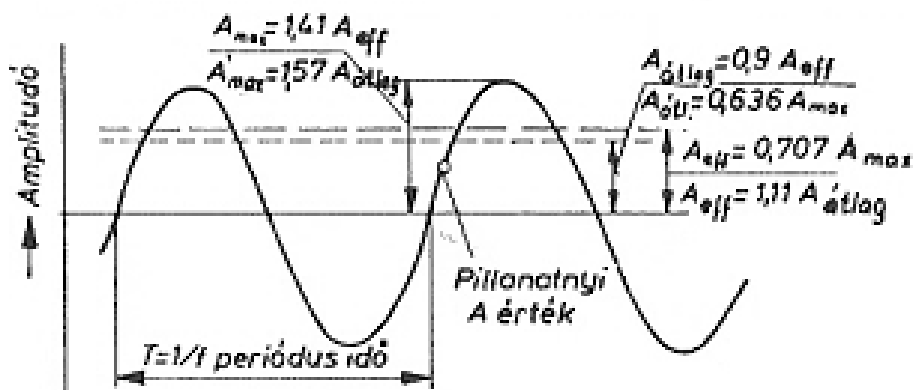
II.1.1. ábra Hullámsíkok és hangsugarak
([II.2] alapján)

A gyakorlatban szokásosan alkalmazott számításokhoz nem használjuk a legnagyobb értékeket, helyettük mindig az effektív értékeket alkalmazzuk, amelyek a továbbított energia mértékét jelentik, a következő összefüggéssel határozzuk meg:

$$A_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T \int_0^T (A)^2 dt}} \quad (\text{II.1.2})$$

ahol:

- T — periódusidő ($1/f$), [s].



II.1.2. ábra Szinuszos rezgés jellemzői

forrás: [II.2]

Összetett hangnak nevezünk minden hangot, amely nem szinuszos lefolyású. Ennek jellemzésére használatos az idő függvényében ábrázolt összetett periodikus jel, amelynek adott időtartamú része periódikusan ismétlődik, vagyis az időfüggvény harmonikus függvényének összegeként fejezhető ki. Ebből következik, hogy az általános periodikus jel felbontható több szinuszos jelre, és az egyes összetevők pillanatnyi értékének összegzésével kapjuk az összetett jel értékét. Az alkalmazott *harmonikus elemzés* a Fourier-tételre alapul. Ebből kiindulva a legkisebb frekvenciájú jelet *alapharmonikusnak* nevezzük, a többi hangösszetevő, pedig, az alapharmonikus frekvenciájának egész számú többszöröse, amelyeket felharmonikusoknak nevezünk. Különleges esetben az alapharmonikus hiányozhat, vagy végtelen számú összetevőt tartalmazhat, ami a gyakorlati méréseknél a folytonos spektrum fogalmához vezet.

Az összetett periodikus jel leírásának és összetevői megismerésének azért tulajdonítunk jelentőséget, mert a hangból eredő zavaró hatást, vagyis a zajt a hangnyomás értéke és a frekvenciajelleg együttesen határozza meg, így a kettő együttes értékelésére van szükség.

Hangtérnek nevezzük a tér azon részét, amelyben a hullámok terjednek. A *hangtér* a hely és az idő függvényében két mennyiséggel írható le, a *részecskesebességet*, a *részecskekitérést* és a *hangnyomást* adjuk meg jellemzőként. A **részecskesebesség** a vivőközeg elemei részecskéinek változó sebessége, amellyel azok nyugalmi helyzetük körül rezegnek. A szomszédos részecskék rezgőmozgásuk közben átadják egymásnak az energiájukat, ami a hullámterjedést adja. A hangtér mérhető adata a *hangnyomás*, amit a gyakorlatban felhasználunk a méréseknél.

Részecskekitérés az a távolság, amely a hanghullámok terében a vivőközeg részecskéinek egyensúlyi és pillanatnyi helyzete között kialakul. Állandósult részecskesebesség esetében ez a kitérés annál nagyobb, minél kisebb a vizsgált jel frekvenciája. Kifejezésére a (II.1.3) összefüggést használjuk.

$$\xi = (y) = \frac{v}{\omega} = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (\text{II.1.3})$$

ahol:

- ζ — részecskekitérés nagysága, [m];
 v — részecskesebesség értéke, [m/s];
 ω — körfrekvencia, ami $2 \cdot \pi \cdot f$, [Hz].

A **részecskesebesség** vektoriális mennyiség, tehát nagysága és iránya van. Azt a sebességet fejezi ki, amellyel a vivőközeg rezgő részecskéi a hangnyomás ritmusában mozognak, gáz vagy folyadék közegben a hanghullámok terjedési irányában alakul ki. A részecskesebesség jele: v , mértékegysége: m/s . A részecskesebesség effektív értéke a következő:

$$v_e^2 = \frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \quad (II.1.4)$$

ahol:

- T — integrálási idő, vizsgálatoknál időállandó [s].

Hangnyomás a hang terjedésekor a légköri nyomásra szuperponált váltakozó nyomás, a légköri nyomás nyugalmi értékétől való eltérést fejezi ki. A hangnyomás skaláris mennyiség, nagysága által, az iránytól függetlenül meghatározott jellemző. Fizikai szempontból a részecskesebesség a hangnyomással egyenértékű jellemző, azonban a hangtér leírására a hangnyomást használjuk.

Méréstechnikai szempontból a hangenergia által gerjesztett közegelmozdulás, részecskesebesség, illetve a sűrűség- vagy nyomásingadozás vizsgálata a kicsi értékek miatt bonyolult, mérések nehézségekre ütköznek. A hangtér állapotjellemzői közül a hangnyomás a legkönnyebben mérhető adat, emellett ez a tényező a szubjektív észlelés jellemzésére is alkalmas. A gyakorlatban — alkalmazva a (II.1.2) összefüggésben leírtakat — mindig a *hangnyomás* adott időtartamra vonatkoztatott p_e effektív értékét adjuk meg, azonban a p_e jelből elhagyhatjuk az „e” indexet, és hangnyomáson annak effektív értékét értjük. Az effektív hangnyomást a következő egyenlettel fejezzük ki:

$$p_e^2 = \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \quad (II.1.5)$$

ahol:

- T — integrálási idő, vizsgálatoknál időállandó [s];
 p — hangnyomás pillanatnyi értéke, [Pa].

Szinuszos tisztahang esetén az effektív érték:

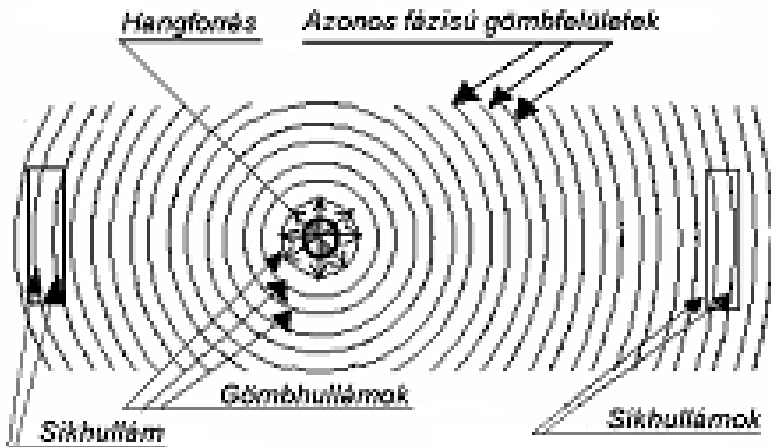
$$p_e = \frac{p_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (II.1.6)$$

ahol:

p_{max} . — hangnyomás legnagyobb pillanatnyi értéke, [Pa].

A nyugvó légkör nyomása $p_{légkör} = 10^5 \text{ Pa}$, amit a nagyon kicsi érték miatt elemi nyomásingadozásnak nevezhetünk. Az a hangnyomás érték, amit egy normális hallású ember még észlelni képes, a **hallásküszöb**, értéke $p_{küszöb} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$. A legnagyobb hangnyomás, ami már fájdalmat is okoz a **fájdalomküszöb**, értéke $p_{fájdalom} = 20 \text{ Pa}$. A fájdalomküszöb értéke durván 10^4 -szerese az atmoszférikus értéknek.

Gömbhullámok jönnek létre, amikor a hangforrás pontszerű, és a szabad térben a hang minden irányban akadálytalanul terjed. Kellően nagy távolságra a forrástól az azonos fázisú gömbfelületek már alig görbülnek, így ezeket már **síkhullámnak** tekintjük. Gömbhullám és síkhullám kialakulását szemlélteti az II.1.3. ábra.



II.1.3. ábra Gömbhullám és síkhullám kialakulása

Szabad síkhullám esetén egydimenziós terjedés mellett sík hullámfrontok alakulnak ki. Síkhullám esetén a *hangnyomás* és a *részecskesebesség* azonos fázisban van. A hullámfrontok c sebességgel akadálytalanul haladnak a térben egy adott irányban. A szabad síkhullámot a következő egyenlet írja le:

$$\frac{\delta^2 p}{\delta x^2} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\delta^2 p}{\delta t^2} \quad (\text{II.1.7})$$

A (II.1.7) másodrendű parciális differenciálegyenlet (hullámegyenlet) megoldása adja azt a hangnyomás és részecske sebesség függvényt, amely teljesíti az alábbiakat:

$$p(x, t) = p_{max} \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (\text{II.1.8})$$

$$v(x, t) = v_{\max.} \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (\text{II.1.9})$$

ahol:

- $p_{\max.}$ — hangnyomás csúcsértéke;
- $v_{\max.}$ — részecskesebesség csúcsértéke;
- ω — körfrekvencia, ami $2 \cdot \pi f$;
- k — hullámszám, ami $\frac{\omega}{c} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}$.

Gömbhullám legegyszerűbb esete a térfogatát periódikusan változtató lélegző gömb. A térben minden irányban terjedő *gömbhullám* esetében a hangnyomás t időben a forrás középpontjától számított r távolságban:

$$p(r, t) = \frac{A}{r} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (\text{II.1.10})$$

ahol:

- A — hullámra jellemző amplitúdótényező, [N/m].

Gömbhullámnál a hangnyomás amplitúdója a távolság függvényében változik, a hangforrás középpontjától számított távolsággal fordítva arányos. A részecskesebesség gömbhullámnál a hullámhosszhoz viszonyítva csak a hangforrástól számított nagyobb távolságban, a *távoltérben* kerül a hangnyomással fázisba. A hangforrás és a távoltér határa közötti térrészt *közel térnek* nevezzük. Részecskesebesség közel térben:

$$v(r, t) = \frac{A}{r \cdot \rho \cdot c} \cdot \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) \quad (\text{II.1.11})$$

ahol:

- ρ — közeg sűrűsége, [kg/m³];

Gömbhullámoknál az intenzitást az alábbi összefüggés írja le:

$$I(r) = \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{II.1.12})$$

ahol:

- P — hangforrás teljesítménye, [W].

Fajlagos akusztikai impedanciának, vagy **akusztikai keménységnek** nevezzük a közeg nyugalmi sűrűségének és a hullám sebességének szorzatát, amit a következő egyenlettel írunk le:

$$Z_0 = \frac{p}{v} = \rho_0 \cdot c \quad (\text{II.1.13})$$

ahol:

- Z_0 — fajlagos akusztikai impedancia, [Pa·s/m];
 ρ_0 — közeg nyugalmi sűrűsége, [kg/m³];
 c — hangsebesség, [m/s].

Az akusztikai impedancia fontos jellemző, mivel a hangnyomás és a részecskesebesség viszonyát adja meg, ami a hangforrástól nagy távolságban kialakuló síkhullám esetén a hullámellenállással egyenlő.

Hangtér intenzitása a hanghullám terjedési irányára merőleges egységnyi felületen áthaladó hangenergia, ami a hangnyomás és a részecskesebesség szorzatának időbeli átlagával egyenlő (a felülvonás az időbeli átlagolást jelenti):

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} \quad (\text{II.1.14})$$

ahol:

- I — hanghullám intenzitása, [W/m²].

A síkban terjedő hullámmozgásra, amikor a hanghullám terjedésének nincsenek akadályai — hangforrástól számított kellően nagy távolságban —, vagyis szabad térben végzett méréseknél az (II.4.14) összefüggés érvényes. Ennek alapján határozták meg a hangintenzitás küszöbértékét vagy vonatkoztatási értékét, ami $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

Az intenzitás és a hangnyomás közötti összefüggés síkhullám esetén:

$$I = \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c} \quad (\text{II.1.15})$$

A (II.1.15) alapján látható, hogy az intenzitás és a hangnyomás között négyzetes összefüggés, ami nagy értéktartományhoz, és jelentős nagyságrendet eredményez.

A **hangteljesítményt** a hangforrást körülvevő teljes felület és az intenzitás szorzata adja a következő egyenlet szerint:

$$P = \int I ds = \int \overline{p(t)v(t)} ds \quad (\text{II.1.16})$$

ahol:

- P — hanghullám teljesítménye, [W].

Az egységnyi felületen áthaladó teljesítmény:

$$P = I \cdot S = \frac{p^2}{\rho_0 \cdot c} \cdot S \quad (\text{II.1.17})$$

Légi járművek esetében a hangforrás szabad térben helyezkedik el, azonban a földre helyezett hangforrás, pl. a leszállóhelyen tartózkodó helikopter féltérbe (fél hangtér) történő kisugárzását kell figyelembe venni, vagyis az S felületet ilyenkor félgömbnek tekintjük. Felépítéséből adódóan a helikopter összetett zajforrás, a meghatározó részegységei nem egyenletesen sugároznak, amit iránytényezővel vagy irányindex segítségével lehet jellemezni. Egyes hangforrások átlagos hangteljesítményét a II.1.1. táblázatban adjuk meg.

Hangforrás	Hangteljesítmény
Suttogás	$1 \dots 5 \cdot 10^{-8} \text{ W}$
Társalgás	$5 \dots 8 \cdot 10^{-6} \text{ W}$
Kiabálás	$1 \dots 3 \cdot 10^{-3} \text{ W}$
Zongora	$0,1 \dots 0,3 \text{ W}$
Fúvós hangszerek	$0,3 \dots 0,4 \text{ W}$
Gépjármű kürt	$3 \dots 5 \text{ W}$
Riasztó hangsugárzója	1 kW
Repülőgép	10 kW

II.1.1. táblázat: Hangteljesítmény értékek
forrás: [II.2]

II.2. HANGTÉR JELLEMZŐI

A szabad hangtér kialakulása feltételezi a hangenergia korlátlan terjedését minden irányban. A hangtér alakját és a hullámfelületeket a terjedés útjában elhelyezett akadályok módosítják. A hanghullámok terjedés közben bekövetkező változásait a hangtér jellemzői, valamint a hang terjedését befolyásoló körülmények határozzák meg.

A **hangsebesség** a hanghullám terjedési sebessége az adott vivőközegben, a hangsugár irányában. A c hangsebesség a vivőközeg tulajdonságaitól függ, gázokban a következő összefüggéssel adjuk meg:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot p_0}{\rho_0}} \quad (\text{II.2.1})$$

ahol:

- κ — fajhőviszony;
- p_0 — közeg statikus nyomása, $[p_a]$;
- ρ_0 — közeg nyugalmi sűrűsége, $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

Környezetvédelmi szempontból a levegő a legfontosabb közvetítő közeg,

melyben a hangsebesség az abszolút hőmérséklet függvényében az alábbi:

$$c = 20,05 \cdot \sqrt{T} \quad (\text{II.2.2})$$

ahol:

T — levegő abszolút hőmérséklete, [K].

A hangterjedés sebessége levegőben elsősorban a hőmérséklettől és a relatív nedvességtartalomtól függ. A hangsebesség nagyságát és értékét különböző hőmérsékletű levegőben, a II.2.2. táblázatban adjuk meg. A gyakrabban előforduló gázokra és folyadékokra vonatkozó hangsebesség adatokat a II.2.2. táblázat tartalmazza, ami jól szemlélteti a jelentős különbségeket is az anyagok szerinti bontásban.

Vivőközeg	Hőmérséklet, [°C]	Hangsebesség, [m/s]
Levegő	-50	299
	-10	325
	0	331
	+10	337
	+15	340
	+20	343
	+50	360

II.2.2. táblázat Hangsebesség értékek levegőben

Vivőközeg	Hőmérséklet, [°C]	Hangsebesség, [m/s]
Szén-dioxid	+20	268
Oxigén	+20	326
Nitrogén	+20	337
Metán	+20	445
Hélium	+20	1005
Hidrogén	+20	1305
Benzin	+20	1120
Higany	+20	1440
Víz	+20	1480

II.2.3. táblázat Hangsebesség értékek gázokban és folyadékokban

Szilárd testekben a hangsebesség elsősorban a hullám típusától függ. Legnagyobb sebességgel a tiszta longitudinális hullámok terjednek, sebességük rudakban:

$$c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (\text{II.2.3})$$

ahol:

- c_L — hangsebesség longitudinális hullámokra, [m/s];
 E — anyag rugalmassági modulusa, [Pa];
 ρ — anyag sűrűsége, [kg/m³].

Az anyagjellemzőket, így a hosszanti hullámok sebességét néhány gyakrabban előforduló fémre és építési anyagra a II.2.4. táblázatban adjuk meg.

Anyag megnevezése	Sűrűség, ρ [10 ³ kg/m ³]	Rugalmassági modulus, E [10 ⁹ N/m ²]	Hosszanti hullámok sebessége, c_L [m/s]	Veszteségi tényező, η [10 ⁻³]
Alumínium	2,7	72	5,2	0,03...0,1
Acél	7,8	210	5,2	0,02...0,3
Réz	8,5	95	3,3	~2
Ólom	11,3	17	1,2	2...30
Gipsz	1,2	7	2,4	~6
Beton	2,3	26	3,4	4...8
Tégla	1,8...2,0	~16	2,5...3,0	10...20
Tölgyfa	0,7...1,0	2...10	1,5...3,5	10
Fenyőfa	0,4...0,7	1...5	>>2,5	8
Üveg	2,5	60	4,9	0,6...2
Plexi	1,2	5,6	2,2	20...40

II.2.4. táblázat Anyagjellemzők szilárd anyagokban

A **frekvencia** a (II.1.8) és (II.1.9) összefüggéseknél tárgyaltak szerint a periodikus jelenség időegység alatti változásainak számát fejezi ki, mértékegysége a Hertz [Hz].

A **periódusidő** a frekvencia reciprok értéke, az a legrövidebb idő, amely alatt a rezgés periódikusan ismétlődik, jele: T . A hang **frekvenciája** tehát az egy másodpercre eső teljes rezgések száma, amit a következő egyenlettel írhatunk fel:

$$f = \frac{1}{T} \quad (\text{II.2.4})$$

ahol:

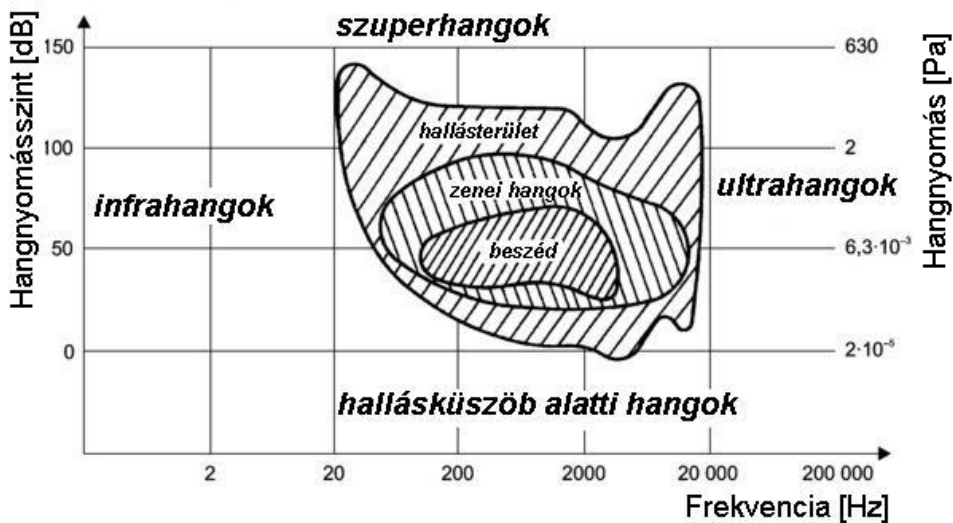
- f — hang frekvenciája, periódusidő reciproka, [Hz];
 T — periódusidő, frekvencia reciprok értéke, [s].

A **hang frekvenciája** fontos adat, mivel a hangforrás jellemzőjeként a legtöbb esetben a hangforrás azonosítására is alkalmas, emellett a hallásérzékenység és a hangok észlelése komplexen függ a hang frekvenciájától és a hangnyomástól. Emiatt szükséges a hang frekvencia alapján történő csoportosítása.

Az ember hallószerve a 16 Hz és 20 kHz frekvenciatartományba eső hangokat érzékeli, amit a **hallható hangok tartományának** nevezünk. A 16 Hz-nél alacsonyabb

frekvenciájú hangok az **infrahangok**, a hallástartomány feletti hangok az **ultrahangok**. Az érzékelésnek ugyanakkor a frekvencia-függőség mellett nyomáskorlátai is vannak, így az infra-, a hallható- és az ultrahang tartományokat intenzitásuk és a (II.1.14) egyenlet alapján a hangnyomás is jellemzi.

A hallható hangok tartományát kellően magas létszámú kísérleti alannyal elvégzett statisztikus felméréssel állapították meg, az elvégzett felmérés eredményét a II.2.1. ábra szemlélteti, ami egyben az azonos hangérzetet jelentő egyenlő hangosság szintek görbéit is feltünteti. Az alsó határgörbe az úgynevezett **hallásküszöb**, ami szintén frekvenciafüggő és a frekvencia csökkenésével növekvő intenzitású. Stabil pontja 1 kHz-nél 10^{-12} W/m², legkisebb értékét 3 kHz-en éri el.



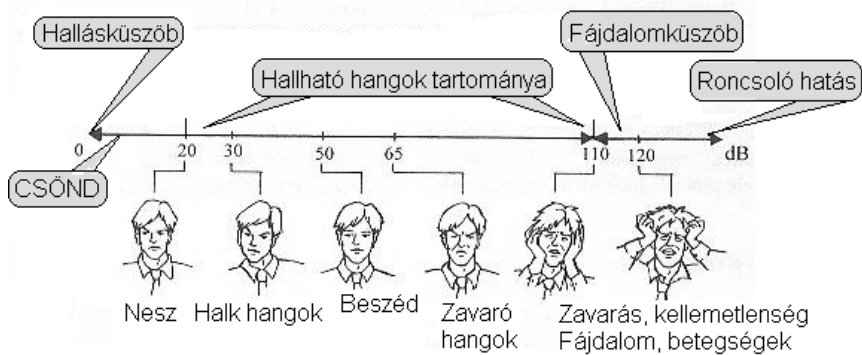
II.2.1. ábra Hallástartomány és határterületek

Fájdalomküszöbnek nevezzük a felső határgörbét, mivel az ennél nagyobb hangintenzitás az észlelőben már fájdalomérzetet kelt. Szintén frekvenciafüggő, de változása már lényegesen kisebb. A hangerőség változásainak hatását a II.2.2. ábra foglalja össze.

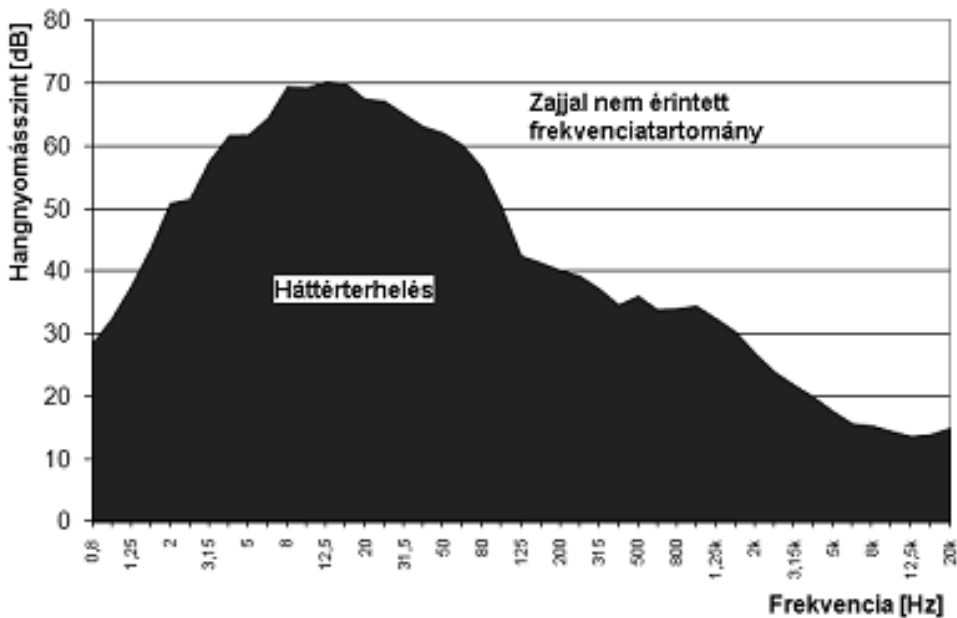
A II.2.1. ábrán feltüntetett hallható hangok tartományán kívül eső rezgéseket az emberi szervezet nem a hallásra kifejlődött szerv segítségével érzékeli, hanem a beérkező ingerek jellemzőinek függvényében működési rendellenességgel jelzi.

Az infrahangokat a lágy szövetállomány (pl. agy, máj, szív), amíg az ultrahangokat a szilárd szövetállomány (pl. csontok, csontváz, csontthártya, fogazat) érzékeli, amennyiben azok meghaladják a küszöbértéket. Egyéb élő szervezetek, így az állatok is képesek érzékelni az infra- és az ultrahangokat, egyes fajok tájékozódása és kommunikációja, pedig, ezen hangok észlelésén vagy kibocsátásán alapul.

A különböző környezetben észlelt hangok frekvencia jellegét háttérterhelés mérés értékek alapján szemlélteti a II.2.3. ábra.



II.2.2. ábra Hangnyomásszint változásainak hatása



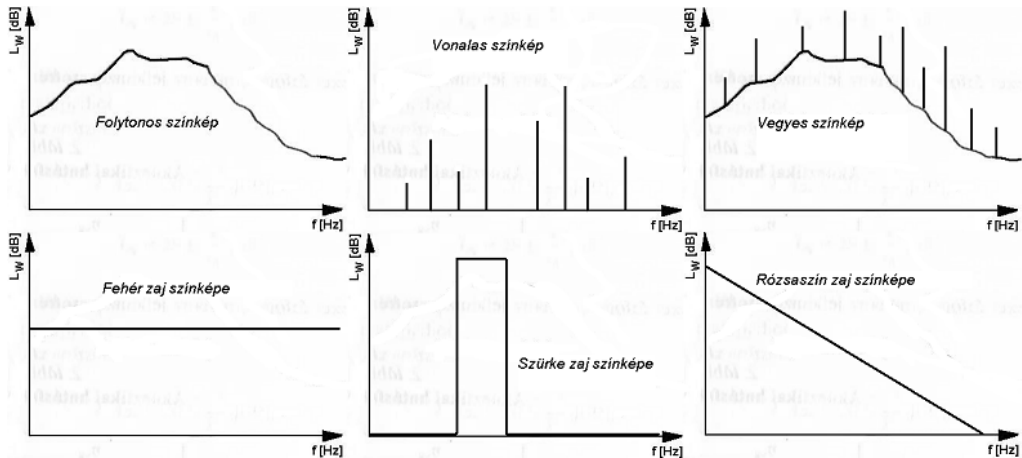
II.2.3. ábra Háttérzaj frekvencia jellege

A hangteljesítmény vagy bármely más egyenértékű jellemző sem a hangforrást, sem a besugárzott hangteret nem képes leírni, mivel önmagában, illetve a frekvencia jelleg nélkül csak a hang erősségére utal. Ezért bevezették a $P(f)$ függvényt, amit színeképnek nevezünk. A színekép jellegét tekintve lehet:

1. folytonos;
2. vonalas;
3. vegyes.

A színekép *folytonos*, ha a hangforrás valamennyi frekvencián sugároz, *vonalas*, ha a sugárzás csak meghatározott frekvenciasávokban történik, *vegyes*, ha a

folytonos és vonalas színekéből összetett. *Fehér zaj* színeke folytonos, és a frekvencia függvényében a teljes tartományban egyenletes intenzitású. Ezt tekintjük a természet alapzajának. A *szürkezaj* színeke a hangfrekvenciás tartomány valamely sávjában folytonos és egyenletes, a *rózsaszín zaj* a természetes közegben nem fordul elő, műszerbeállításokra használjuk. A színeképeket a II.2.4. ábra szemlélteti.



II.2.4. ábra Színeképek a $P(f)$ függvény alapján

A **hang hullámhossza** a hangsebességből és a frekvenciából számítható a következő összefüggés szerint:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{II.2.5})$$

ahol:

- λ — hullámhossz, [m];
- c — hang terjedési sebessége, [m/s];
- f — frekvencia, [Hz].

A II.2.5. táblázatban tájékoztató adatokat adunk meg levegőben és más közegben terjedő hanghullámokra. A közölt adatok a jellemzők hang terjedésére gyakorolt szerepét is szemléltetik.

Amikor a hangtér valamely részén kettő vagy több hullám találkozik, *interferencia* következik be. Azonos frekvenciájú és amplitúdójú, azonos fázisban terjedő hullámok találkozásánál az amplitúdó megkétszereződik. Amennyiben a fáziskülönbség 180° , a két hullám eredője nulla lesz, azaz kioltja egymást.

Az interferencia gyakori esete, amikor hangvisszaverődés következtében két azonos frekvenciájú, ellenkező irányban haladó hullám találkozik. Ilyenkor ún. *állóhullám* jön létre, melynek $\lambda/2$ távolságokban helyhez kötött maximum értékei és ezek között nullapontjai vannak.

Közeg	Hangsebesség [m/s]	Frekvencia [Hz]	Hullámhossz [m]
Levegő, 20 °C	343	1000	0,343
		5000	0,069
		200	1,660
Nyersgumi	60	1000	0,060
		5000	0,012
		200	2,500
Víz, 10 °C	1440	1000	1,440
		5000	0,288
		200	0,300

II.2.5. táblázat Hangtér jellemzők eltérő vivőközegben

II.3. HANGFORRÁSOK

Első megközelítésben a **hangforrás** fogalmának meghatározása egyszerűnek tűnik, de a gyakorlatban számos tényezőt kell figyelembe venni, amikor a térbeli elhatárolásra vagy a kisugárzott hang jellemzőivel való összefüggések értékelésére sor kerül. Ahogy az I.3. fejezetben is említettük, a hangforrások általában összetettek, a működésüktől származó hangok nem egyetlen forráshelyről származnak, hanem a technológia vagy a működési elv szerinti kapcsolatban álló mechanizmusok egymásra hatásából erednek. Összetett hangforrás a helikopter és egy leszállóhely is.

Adott térrészben működő hangforrások azonosítása azért is okozhat nehézséget, mivel azokat az eszközöket is hangforrásnak tekintjük, amelyek a rezgési energiát csak átveszik és kisugározzák, de a gerjesztés máshol történik. Ilyen eset lép fel, amikor egy gépház által lesugárzott vagy a helikopter lemezbóritásától származó hangot kell azonosítanunk.

A környezetbe kisugárzott hangenergia szempontjából az sem mindegy, hogy a hangforrás gerjesztő energiája pillanatnyi vagy folyamatos. A hangjelenségeket a környezetben okozott *időtartam és időbeli lefolyás* szerint is csoportosíthatjuk, ami a későbbiekben meghatározza a hangok értékelését és minősítését is. A hangjelenségek ilyen jellegű csoportosítása a forrásra is utal, hiszen a hang jellege összefüggésben van azzal, hogy milyen forrásból ered, illetve a hangforrásra jellemző felépítés és működési körülmények függvénye.

IDŐTARTAM SZERINTI CSOPORTOSÍTÁSBAN MEGKÜLÖNBÖZTETÜNK:

1. hanglökés vagy impulzus hang, amelynek időtartama 10 ms-nál rövidebb;
2. rövid idejű hang, amelynek időtartama 10 ms és 1 s között van;
3. tartós hang, amelynek időtartama hosszabb 1 s-nál;
4. hosszú idejű hang, amelynek időtartama 60 s-nál hosszabb.

IDŐBELI LEFOLYÁS SZERINTI CSOPORTOSÍTÁSBAN MEGKÜLÖNBÖZTETÜNK:

1. állandó hang, ami jellegét megtartó rövid idejű vagy tartós hang;

2. változó hang, ami jellegében változó hang;
3. szakaszos hang, amikor a hangjelenséget szünetek szakítják meg;
4. egyszeri hang, amikor hosszabb ideig nem lép fel a hangjelenség.

A hangvezető közeg is lehet hangforrás, ha a tér egy adott része adottságait tekintve megfelelő helyzetbe kerül. Ilyen pl. a repülőgépek orra és farok része körüli torlódási hely, vagy technikai berendezéseknél, esetleg azok részegységeinél kialakuló légörvény. Korábbiakban tárgyaltuk, hogy a rugalmas közeg nyugalmi állapotának megzavarása a vivőközeg által meghatározott körülmények között a rendelkezésre álló térben tovaterjed. A legtöbb esetben átlagos körülmények mellett léghangot észlelünk, ilyenkor a hangot levegő közvetítésével, hallószervünkkel vagy csontvezetési hallással érzékeljük. De a léghang a forrástól az észlelési pontig különböző utakat jár be, keletkezhet szilárd testben vagy folyadékban, keletkezhet levegőben. Sokszor előfordul, hogy a léghang testhangba megy át, majd a szilárd közeg valamilyen felületen vagy forgó mozgást végző részegységen keresztül újra kisugározza a levegőbe.

A II.2.1. és II.2.3. ábrák alapján következik, hogy a frekvenciafüggőség is meghatározza az észlelt hang tulajdonságait, illetve számolni kell azzal, hogy a hallható hangtartományon kívüli frekvencia sávokban, az úgynevezett infrahang- és ultrahang tartományokban is számos forrástól származó hang érvényesül.

Infrahangforrások lehetnek a természeti jelenségek (pl. légköri turbulencia, szél, mennydörgés, vízesés vagy víz hullám, stb), illetve a technikai eszközök és építmények (pl. gépjárművek, metróalagútban légáramlás, magas épületek kilengése, stb). Káros hatásuk az agyi bioáramokra gyakorolt hatásban, és idegrendszeri zavarokban nyilvánul meg.

Az **ultrahangforrások** alapvetően technikai eredetűek. Házi kedvenceink, a kutyák is jól hallanak az ultrahang tartományban, amit jelez, ha a tömegközlekedési járműveken megváltozik viselkedésük, de idomításukra vagy irányításukra is alkalmazhatók az úgynevezett ultrahang sípok.

A kialakuló hangjelenségek szempontjából a hangforrás tulajdonságai és működése mellett a hullámterjedésnél tárgyalt törvényszerűségeket is figyelembe kell venni, mivel a gömbhullám vagy síkhullám kialakulása a forrásra vezethető vissza.

A **gömbhullám** az egyik leggyakrabban tapasztalható hangterjedés, ami homogén és izotróp (minden irányban azonos tulajdonságú) közegben jön létre. Jellemzője, hogy a hang energiája a távolság négyzetével azonos arányban csökken. Gömbhullám terjedés a nehezen megvalósítható feltételek miatt csak ritkán valósul meg, mivel ehhez **„pontoszerű” hangforrásra** van szükség, ami szabad térben helyezkedik el. A pontoszerűség kis terjedelem mellett nagy hullámhosszat (mély hangot) feltételez, azonban a kicsi hangforrás mindig magas hangot eredményez. A zajmentes, teljesen szabad tér biztosítása a gyakorlatban nem oldható meg.

A **síkhullámú** hangterjedés a gyakorlat számára már jobban követhető, ebben az esetben a hanghullám kizárólag a közeg elnyelése miatt veszít energiájából terjedés közben, a veszteség arányos a távolsággal. Ebben az esetben a feltétel a nagy, **síkfelületű hangforrás** és a szabad féltér. Síkfelületű hangforráshoz viszonylag nagy felület és kicsi hullámhossz kell.

Szabad térnek akusztikai szempontból — a pontszerű hangforrás és a síkfelületű hangforrás feltételeit is tekintve — az olyan teret nevezzük, ahol a hullámterjedést nem zavarja akadály, vagyis a hanghullám a *forrástól* a tér minden pontjába törés, visszaverődés nélkül jut el. A szabad tér ilyen megfogalmazása erős absztrakció és a valóságban nem létezik, azonban sok probléma megoldható a szabad tér tulajdonságainak feltételezésével. A szabad térben nincs akadály, a hullámformát maga a forrás szabja meg.

A hangforrások három alapvető típusát különböztetjük meg, amelyekből az összetett sugárzók felépíthetők:

1. pontszerű hangforrások;
2. vonalszerű hangforrások;
3. felületi hangforrások.

A hangforrásokra jellemző hangteljesítmény és az észlelt hangnyomás érték, valamint a kialakuló hangtér közötti kapcsolatot döntően meghatározza a hangforrás alakja és felépítése, illetve a hangforrás térben elfoglalt helyzete. Emellett figyelembe kell venni, hogy a hangforrás a hangteljesítményének mekkora részét sugározza a tér különböző részeibe, és a lesugárzás irányítottsága időben milyen módon változik. Légi járműveknél, így a helikopteres repülésnél is meghatározó, hogy a hangforrás a térben mozog, a repülési módozat és útvonal függvényében különböző pályán mozog. Ettől csak abban az esetben mutatkozik eltérés, amikor a leszállóhelyen állóhelyi üzemmódban működik a helikopter és ilyenkor féltérbe sugároz.

II.3.1. PONTSZERŰ HANGFORRÁSOK

A pontszerű hangforrás idealizált sugárzó, legegyszerűbb modellje a lélegző gömb. Ezt nulladrendszerű gömbsugárzónak nevezzük, ahol az egész gömbfelület radiálisan kifelé és befelé azonos fázisban mozog, a térfogat periódikusan változik és a forrás gömbhullámok alakjában sugározza ki a hangenergiát. Ilyenkor minden irányban egyenletes teljesítményt leadó forrásról beszélhetünk, ha a térben nincs akadályoztatás a hullámfrontok koncentrikus gömbfelületen helyezkednek el. Ekkor az intenzitás a forrástól r távolságban számítva:

$$I = \frac{P}{4 \cdot r^2 \cdot \pi} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (\text{II.3.1})$$

ahol:

- P — hangteljesítmény, [W];
 p — hangnyomás, [Pa];
 ρ — közeg sűrűsége, [kg/m³];
 c — hangsebesség, [m/s].

A legtöbb esetben a hangforrás által kisugárzott hangenergia nem minden irányban terjed azonos intenzitással. A teljes gömbszerű terjedéstől való eltérés

jellemzésére vezették be a D irányítási tényezőt, amit a következőképpen fejezünk ki:

$$D = \frac{I}{I_g} \quad (\text{II.3.2})$$

A D irányítási tényező alkalmazásával a hangforrástól r távolságban mérhető p hangnyomás érték négyzetét viszonyítjuk annak a p_g hangnyomás érték négyzetéhez, ami akkor lenne mérhető, ha az azonos P hangteljesítményű hangforrás minden irányban azonos intenzitással sugározna. Az irányítási tényező értékeit a II.3.1. táblázatban adjuk meg.

Hangforrás jellege	Irányítási tényező
gömbsugárzó	$D = 1$
félgömbsugárzó	$D = 2$
negyed térbe sugárzó	$D = 4$
nyolcad térbe sugárzó	$D = 8$

II.3.1. táblázat Irányítási tényező értékei
forrás: [II.3]

Az intenzitás az irányítási tényező figyelembe vételével:

$$I = D \cdot \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{II.3.3})$$

II.3.2. VONALSZERŰ HANGFORRÁSOK

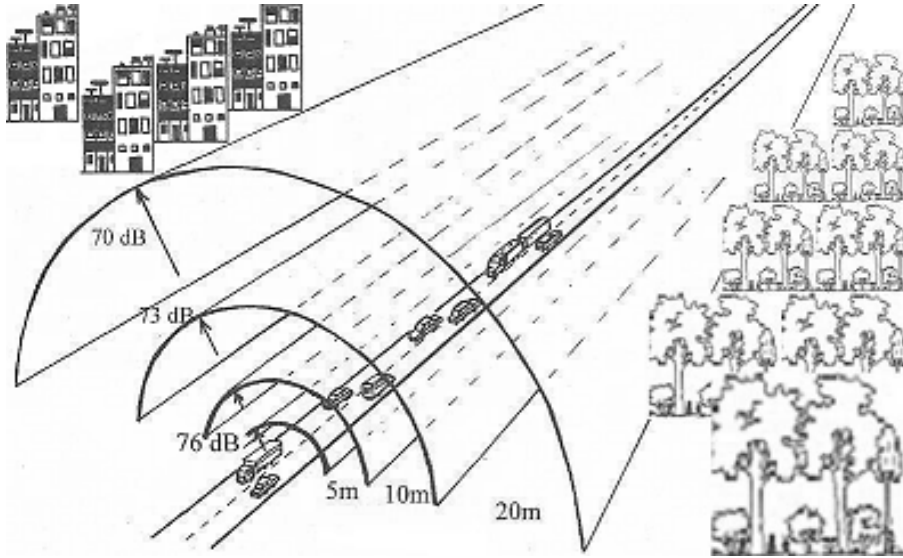
A pontsugárzó kiterjedése elvileg mindhárom irányban végtelen kicsi. Feloldva a korlátozást, végtelen hosszú, vonalszerű sugárzót kapunk, amit a II.3.1. ábra szemléltet.

Ha végtelen hosszú sugárzó minden eleme azonos fázissal és amplitúdóval rezeg, úgynevezett *koherens vonalsugárzóról* beszélünk. Ilyenkor a hullámfrontok koncentrikus hengerek, és a forrás egy olyan, a sugarát periódikusan változtató hengerrel modellezhető, amelynek tengelye a vonalforráson van. Az egységnyi vonalszakasz által lesugárzott hangteljesítmény a vonalra merőlegesen, hengerszimmetrikusan terjed. Az r sugarú hengerpaláston az intenzitás:

$$I = \frac{P' \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot L} = \frac{p^2}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{p}{\rho \cdot c} \quad (\text{II.3.4})$$

ahol:

- P' — egységnyi hosszú vonalszakasz hangteljesítménye, [W];
- L — vonalforrás hossza, [m];
- p — hangnyomás, [Pa];
- ρ — közeg sűrűsége, [kg/m³];
- c — hangsebesség, [m/s].



II.3.1. ábra Vonalszerű hangforrás

*Inkoherens vonalsugárzó*nak nevezzük az egyidejűleg nem azonos fázisban sugárzó elemi gömbsugárzók vonalszerű végtelen sorát vagy halmazát. Mivel ugyanabba az észlelési pontba több forrásból is érkezik energia, a hangtérben kialakuló hangnyomásszint a korábban leírtakhoz képest módosul. A Δx hosszúságú P' forrásteljesítményű elemi sugárzó szakasz által r távolságban létrehozott intenzitás a II.3.2. ábra alapján:

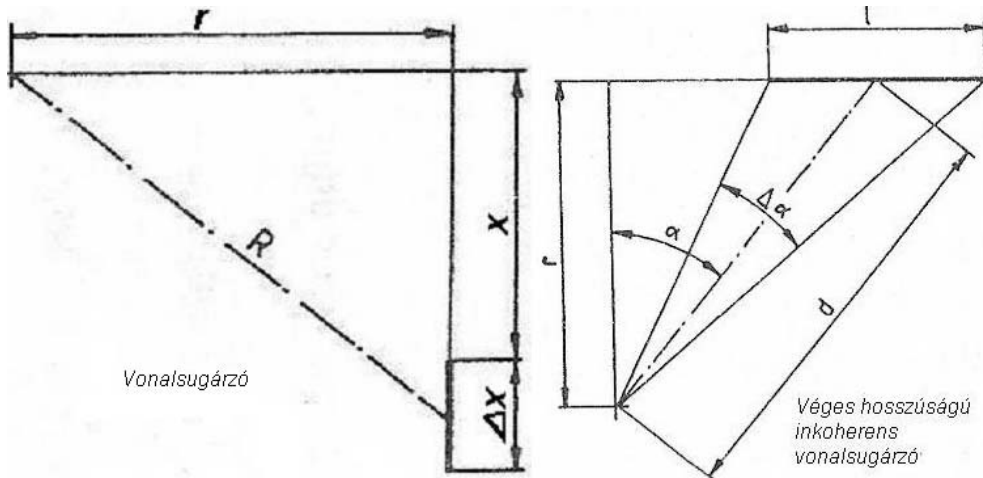
$$\Delta I = \frac{P'}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\Delta x}{r^2 + \left[x + \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \right]^2} \quad (\text{II.3.5})$$

Határesetben a $\Delta x = dx$, ezzel a nevezőben a $dx/x \approx 0$, ezért:

$$I = \frac{P'}{4 \cdot \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dx}{r^2 + x^2} = \frac{P'}{4 \cdot \pi} \left[\frac{1}{r} \operatorname{arctg} \frac{x}{r} \right]_{-\infty}^{+\infty} = \frac{P'}{4 \cdot \pi \cdot r} \left[\frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{2} \right) \right] = \frac{P'}{4 \cdot r} = \frac{p^2}{\rho \cdot c} \quad (\text{II.3.6})$$

A pontsugárzóhoz hasonlóan az irányítási tényező itt is értelmezhető, így az összefüggés esetenként módosul. Véges hosszúságú inkoherens vonalsugárzó esetében az intenzitás a II.3.2. ábra alapján:

$$I = \frac{P' \cdot l}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (\text{II.3.7})$$



II.3.2. ábra: Vonalsugárzó és véges hosszúságú inkoherens vonalsugárzó számítása ([II.4] alapján)

A gömbsugárzókhoz hasonlóan a vonalsugárzóknál is be lehet vezetni az irányítási tényezőt. Így a forrás elhelyezkedésének függvényében:

1. henger sugárzónál $D = 1$;
2. félhenger sugárzónál $D = 2$ ($10 \cdot \lg D = 3$);
3. negyed henger sugárzónál $D = 4$ ($10 \cdot \lg D = 6$).

Ahogy pontszerű és vonalszerű hangforrást definiáltunk, úgy annak sincs akadálya, hogy inkoherens sugárzókkal borított felületektől adott távolságra az intenzitást vagy a hangnyomást meghatározzuk. Ebben az esetben is az egyedi hangforrások hatását kell integrálni.

II.3.3. FELÜLETI HANGFORRÁSOK

A *felületi sugárzók* nem tartoznak szorosan a helikopteres repülési zaj témakörébe, azonban a hangforrások teljes körű bemutatása érdekében említést kell tenni róluk.

Abban az esetben beszélünk felületi sugárzásról, amikor a hang nagy felületen, szabad nyíláson, épület ablakán vagy vékony falon keresztül jut a környezetbe. A számítások során feltételezzük, hogy a felület egyenletesen elosztott, független zajforrásokból áll, és a hangenergiát véletlenszerű fázisban félgömbszerűen sugározzák szét. Ilyenkor a megfigyelési pontban a hangintenzitást úgy kapjuk meg, hogy integráljuk a kibocsátó pontokból kisugárzott hangenergiát. *Kör alakú felületi sugárzó és derékszögű felületi sugárzó* geometriai jellemzőit a II.3.3. ábra szemlélteti.

Kör alakú felületi sugárzók — a zajforrás egy R sugarú körfelület — esetében az intenzitás a kör középpontjára merőlegesen álló egyenesen lévő megfigyelési pontban a következő egyenlettel fejezhető ki a II.3.3. ábra alapján:

$$I = \int_S \frac{P' dS}{2 \cdot \pi (d^2 + x^2)} \quad (\text{II.3.8})$$

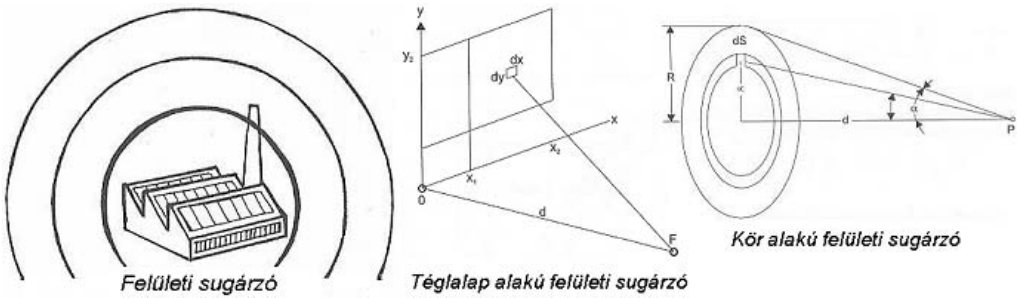
$$I = \frac{P'}{2} \ln \left\{ 1 + \left(\frac{R}{d} \right)^2 \right\} \quad (\text{II.3.9})$$

ahol:

P' — egységnyi felületre jutó hangteljesítmény, [W];

R — körfelület sugara, [m];

d — távolság a hangforrás középpontjától, [m].



II.3.3. ábra Kör alakú és derékszögű felületi sugárzó
([II.3] alapján)

Derékszögű felületi sugárzó esetén a hang keletkezésétől r távolságban elhelyezkedő észlelési pontban az intenzitás a II.3.3. ábra alapján:

$$I = \iint_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \frac{P' dx dy}{2 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{P'}{2 \cdot \pi} \iint_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \frac{dx dy}{d^2 + x^2 + y^2} \quad (\text{II.3.10})$$

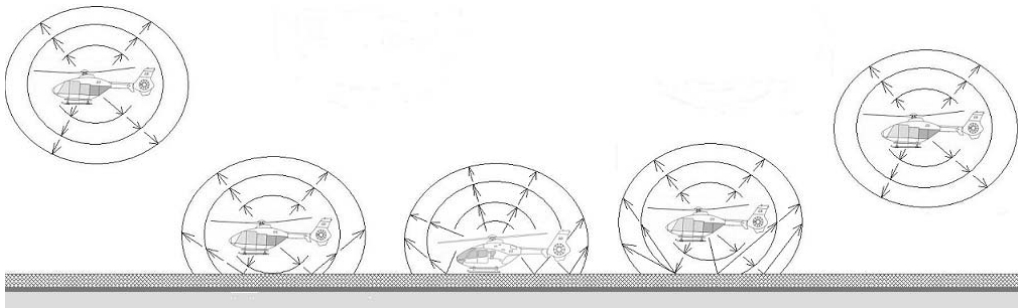
ahol:

P' — egységnyi felületre jutó hangteljesítmény, [W].

II.3.4. HELIKOPTER, MINT HANGFORRÁS

A hang terjedése szempontjából az adott forrás gömbsugárzó, valamint pontszerű vagy vonalszerű jellegére irányuló meghatározásnak kitüntetett szerepe van. Jó közelítéssel egy helikoptert elsődlegesen pontszerű hangforrásnak tekinthetünk, amennyiben a távolság a forrás és az észlelési hely között elegendően nagy. A légi járművek azonban $v_{\text{forrás}}$ sebességgel mozognak, ami az észlelési helyen mérhető hangnyomás időbeli változását okozza.

Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy a leszállóhelyen üzemelő helikopter már sík, hangvisszaverő felületre helyezett gömbsugárzóként viselkedik, és emiatt féltérbe sugározza ki a hangenergiát.



II.3.4. ábra Helikopter, mint hangforrás

Helikopter, mint gömbsugárzó vázlatát szemlélteti a II.3.4. ábra.

Pontszerű forráson az eddig elmondottakat figyelembe véve olyan hangforrást értünk, amelynek kiterjedése az észlelési távolsághoz képest kicsi. A helikopter esetében ezt akkor jelenthetjük ki, amikor a felszállás után vagy a leszállóhely megközelítése előtt, illetve átrepüléskor (szinten repülés) a helikopter kellően nagy távolságban van.

Ugyanakkor a leszállóhelyen tartózkodó helikopter és a környezetében kijelölt észlelési pont közötti távolság a hangterjedés szempontjából kicsi, a forrástól származó hangnyomást kis távolságokban vizsgáljuk, így a terjedést és a méréssel kimutatható hangnyomás értékeket a környezet tulajdonságai kevésbé befolyásolják, a hangforrás jellege lesz a meghatározó. Ilyenkor a forrás sebessége $v_{\text{forrás}} = 0 \text{ m/s}$, tehát állóhelyen tartózkodáskor a helikopter *félgömbsugárzóként* viselkedik.

Vonalszerű forrásról a korábban elmondottak szerint csak akkor beszélünk, amikor a pontszerű források sűrűn egymás mögött, vonal mentén helyezkednek el. Ennek feltétele helikopteres repülés esetében az lenne, hogy több helikopter egymás mögött mozogjon lehetőleg azonos — a repülési magasság, az emelkedési szög, az oldalirányú eltérés egyezzen meg — repülési pályán, és a felszállás vagy leszállás időben folyamatos legyen. A gyakorlatban ez a feltétel soha sem teljesül, mivel mindig egy repülési műveletre kerül sor, illetve a ki- és berepülések időben elhúzódnak, az egymást követő helikopterek soha sem alkotnak sort. Emellett a repülési pálya is minden esetben eltér, nem mondható ki a teljes azonosság.

Az állóhelyi üzemmód és a felszállás közötti időben az emelkedési fázis a hajtómű teljesítménye és a jármű térben elfoglalt helye, így a helikopter, mint hangforrás viselkedése szempontjából átmeneti állapotnak tekinthető. Ilyenkor a forrás sebessége még kicsi, de a sík hangvisszaverő felületről elemelkedve a lesugárzott hangenergiával érintett tér jellege már megváltozik.

Ahhoz, hogy a forrás sugározta hangteljesítmény minden irányban azonos intenzitással terjedjen, feltétel, hogy a hullámfrontok koncentrikus körök legyenek, vagyis a hangterjedés útjában ne legyen akadály, esetleg visszaverő felület. Felszállás után a repülési pályán mozgó helikopter már térben mozgó gömbforrásként modellezhető, amikor a forrás sebessége $v_{\text{forrás}} > 0 \text{ m/s}$. Ekkor a repülési pályának megfelelő térben mozgást végző elemi gömbsugárzóról beszélhetünk, amelynek

sebessége a helikopter típusjellemzői mellett a repülési módozattól függ, amit minden esetben az adott tevékenység alapján kell megítélnünk. Sok esetben előfordul azonban, hogy teher beemelésekor vagy megfigyelésnél függeszkedő üzemmódban történik a repülés, ekkor a hangforrás elegendően nagy magasságban, de kicsi sebességgel mozog, esetleg a helikopter vízszintes irányú sebessége $v_{\text{forrás}} = 0 \text{ m/s}$ is lehet.

Fentiek alapján a helikopter leszállás – állóhelyen tartózkodás – felszállás üzemmódjának megfelelően olyan **hanglesugárzási határsávot** kell kijelölnünk, amely a forrás helyének és mozgásállapotának időbeli változását tükrözi. Erre azért van szükség, mert a hangforrás és a lesugárzás változása a forrás és az észlelési pont közötti kis távolság esetén a hangteljesítmény és a hangtér módosulását okozza, ami eltérő terjedési viselkedést eredményez. Ez a későbbi zajvizsgálatra, a zajcsökkentési tevékenységre, illetve a lehetséges műszaki megoldásra hatással lesz.

A helikopter a leszállóhelyen tehát félgömbösugárzóként, majd a repülési művelet során térben mozgó gömbösugárzóként viselkedik, az észlelt hangjelenséget az egyedi repülési eseményre vonatkoztatva írhatjuk le. Ebben a fázisban figyelembe kell azonban venni, hogy az elemi hangforrás sugárzási karakterisztikája irányonként eltérő jelleget mutat, amit az egyes rész-zajforrások dominanciája és kibocsátási jellemzői magyaráznak. A hanglesugárzás irányítottsága tehát a részegységek működésével, így pl. a hajtómű teljesítmény megváltozásával összefüggésben a repülési művelet során időben módosul. A hangtér és az észlelt hangnyomás ilyen jellegű változása miatt a repüléssel összefüggésben egyetlen hangforrás elhaladásakor a zajesemény leírására az energia szerinti összefüggést célszerű használni a következők szerint:

$$E = \frac{1}{v \cdot p_0^2} \int p^2 dx \quad (\text{II.3.11})$$

ahol:

x — vizsgált pályahossz, $x = v \cdot t$;
 v — forrás sebessége, [m/s];

Mozgó pontforrás (észlelési pont és forrás közötti kellően nagy távolságnál) esetében a hang nyomáshullámainak terjedésviselkedési tulajdonságai már állandóak maradnak a távolság abszolút és relatív nagyságától függetlenül. A rész-zajforrások hanglesugárzásban betöltött szerepe ilyenkor már nem befolyásolja érdemben a terjedési viselkedést.

II.4. MÉRŐSZÁMOK

A hangforrás és a hangtér leírásához használt jellemzők nagy értéktartományt fognak át. Hangforrások teljesítménye a II.1.1. táblázatban szereplő értékeket tekintve W -ban kifejezve 15 nagyságrend tartományban mozog, a hangnyomás gyakorlatban előforduló értékei Pa -ban 10^6 nagyságrend különbségűek.

Ilyen széles tartományban nehéz mérni és számításokat végezni, ezért célszerű a logaritmikus skála bevezetése, így a mindennapi életben az adatok kezelhetősége és a számítások egyszerűsítése céljából a hang mennyiségeit nem természetes egységben

adjuk meg, hanem a *tízes alapú logaritmust* alkalmazva **szintekkel** számolunk.

Két teljesítmény jellegű mennyiség hányadosának *tízes alapú logaritmus*a szintkülönbségként a nagyságrendi különbséget fejezi ki, amit a következő egyenlettel adunk meg:

$$\lg \frac{P_1}{P_2} = \lg P_1 - \lg P_2 \quad (\text{II.4.1})$$

A (II.4.1) egyenlet alapján bevezetett szintskála mértékegységét A. G. BELL tiszteletére **bel**-nek nevezzük. A gyakorlatban a *bel*-skála két hangteljesítmény érték közötti különbség érzékeltetéséhez nem elég érzékeny. Például legyen $P_1 = 10^{-3}$ W és $P_2 = 10^{-6}$ W, ezek szintkülönbsége 3 bel. Ezért az akusztikában bevezetésre került egy tízszer kisebb egység, a **decibel (jele: dB)**. Ekkor (II.4.1) a következőképpen fejezhető ki:

$$10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \cdot \lg P_1 - 10 \cdot \lg P_2 \quad (\text{II.4.2})$$

A (II.4.2) egyenlet alkalmazásával a fentiekben bemutatott példa a következők szerint alakul, amennyiben $P_1 = 10^{-3}$ W és $P_2 = 10^{-6}$ W:

$$10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \cdot \lg \frac{10^{-3}}{10^{-6}} = 10 \cdot \lg 10^{-3} - 10 \cdot \lg 10^{-6} = 30 \text{ dB} \quad (\text{II.4.3})$$

Minden fajta teljesítmény jellegű vagy más, a teljesítménnyel arányos fizikai mennyiség kifejezhető decibelben. A decibel skála azonban mindaddig viszonyító, azaz **relatív értéket** tükröz, amíg nincs rögzítve a számításnál egy előzetesen megállapított alapérték. *Relatív szint* esetében az egyértelműség miatt mindig meg kell adni a decibel után annak értékét is (pl. dB/1 W). Az akusztikában a decibel értékeket nem viszonylagos szintként, hanem valamely rögzített alapértékhez viszonyított **abszolút adatként** kezeljük.

Az alábbi összefüggés a hangteljesítmény, a hangintenzitás és a hangnyomás decibelben kifejezett értékei között mindig azonos értéket ad:

$$10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} = 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_2} = 20 \cdot \lg \frac{p_1}{p_2} \quad (\text{II.4.4})$$

SZINTÉRTÉK fogalma alatt egy célszerűen megválasztott vonatkoztatási értékhez való viszonyítást értünk *logaritmikus* rendszerben. A **szintérték** jele: **L**, indexben mindig ki kell tenni, hogy melyik jellemzőre vonatkozik — lásd a továbbiakban a (II.4.5) egyenletet. A *szintérték* mértékegysége a **decibel**, a mértékegység rövid jele: **dB**.

Az *abszolút szintek* alkalmazásához szükség van egy nemzetközileg is rögzített viszonyítási alapra, amelynek meghatározása a II.2.1. ábrán is szemléltetett

$f = 1 \text{ kHz}$ értéknél meghatározott hallásküszöbre vezethető vissza. Ennek értéke a teljesítmény esetében 1 pW , vagyis a korábbiakban már használt 10^{-12} W . A vonatkoztatási értékek összefoglaló áttekintését a II.4.1. táblázatban adjuk meg.

Jellemző	Vonatkoztatási érték
Hangteljesítmény vonatkoztatási értéke	$P_0 = 10^{-12} \text{ W}$
Hangintenzitás vonatkoztatási értéke	$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$
Hangnyomás vonatkoztatási értéke	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$

II.4.1. táblázat Vonatkoztatási értékek
forrás: [II.1]

A decibel mértékegységben kifejezett *szintérték* eredeti megfogalmazásban mindig teljesítmény jellegű mennyiségre vonatkozik, egyéb esetekben *származtatott szintekről* beszélünk. A HANGTELJESÍTMÉNYSZINTET az alábbi egyenlettel fejezzük ki:

$$L_W = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_0}\right) [dB] \quad (\text{II.4.5})$$

ahol:

P — hangteljesítmény, amelynek szintértékét keressük, [W].

A hangteljesítmény és a hangtér leírására használt jellemzők kapcsolatából következik, hogy a forrás környezetét leíró származtatott jellemzők is hasonló mértékben ingadoznak, ezért a szintérték bevezetése ezeknél is célszerűen adódik. A hangteljesítmény és a hangnyomás között a (II.1.15) és (II.1.16) összefüggések figyelembe vételével a hangintenzitás teremt kapcsolatot, ami az egységnyi felületen átközvetített hangteljesítményt adja, egyszerűbb alakban a P teljesítmény és az A felület alapján a következő egyenlettel fejezzük ki:

$$I = \frac{P}{A} \quad (\text{II.4.6})$$

INTENZITÁSSZINTET a (II.4.6) összefüggés felhasználásával a teljesítményszinthez hasonlóan képezzük a következő egyenlet alapján:

$$L_I = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) [dB] \quad (\text{II.4.7})$$

ahol:

I — intenzitás a hangtér adott pontjában, $[\text{W/m}^2]$.

A korábban elmondottak szerint a teljesítmény és az intenzitás a hangnyomás négyzetével arányos, illetve a szintérték fogalmánál rögzítettük, hogy a szintképzésnél

a teljesítménnyel arányos mennyiségek viszonyát képezzük.

HANGNYOMÁSSZINTET fentiekből adódóan a következő egyenlettel fejezzük ki:

$$L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \cdot \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) [dB] \quad (II.4.8)$$

ahol:

p — hangnyomás értéke a hangtér adott pontjában [Pa].

A *hangteljesítményszint*, a *hangintenzitásszint*, valamint a *hangnyomásszint* meghatározása (II.4.5), (II.4.7) és (II.4.8) összefüggések alapján minden esetben a II.4.1. táblázatban megadott vonatkoztatási értékek alkalmazásával történik, melyek megválasztása úgy történt, hogy a megfelelő szintek dB-ben kifejezett értékei könnyen kezelhető kapcsolatban legyenek egymással.

Az eddigiekben részletezett feltételek mellett a teljesítményszint és a hangnyomásszint közötti kapcsolatot szabad térben az alábbi egyenlet fejezi ki:

$$L_p = L_W - 10 \cdot \lg \frac{A}{A_0} [dB] \quad (II.4.9)$$

ahol:

$A [m^2]$ az a felület, melyen a hangteljesítmény áthalad,

$$A_0 = 1 m^2, L_W$$

a hangteljesítményszint [dB], L_p a hangnyomásszint [dB].

Rezgések esetében szintek helyett a rezgés gyorsulását szoktuk meghatározni m/s^2 -ben. Ha mégis gyorsulásszintet kell alkalmazni, azt a hangnyomásszinthez hasonlóan kell képezni és összegezni:

$$L_a = 20 \cdot \lg \left(\frac{a}{a_0} \right), \text{ illetve } a = a_0 \cdot 10^{0,05 \cdot L_a} \quad (II.4.10)$$

ahol:

$$a_0 = 10^{-6} m/s^2.$$

II.4.1. MŰVELETEK SZINTEKKEL

A minden napi életben a hangteret legtöbbször több, egy időben, de eltérő intenzitással üzemelő hangforrás hozza létre, ezért gyakran előforduló feladat, hogy adott észlelési pontban érvényesülő hangnyomás érték meghatározása céljából *szintek összegzését* kell elvégezni a rendelkezésünkre álló értékek alapján. De szükség lehet erre akkor is, amikor a hangforrások számát növeljük vagy csökkentjük és a várható hatás előzetes

becslése szükséges.

A műveletek elvégzése során ügyelni kell arra, hogy a **dB** mértékegységű **szintérték** logaritmikus viszonyt jelent, ezért az egyes feladatoknál a logaritmikus mennyiségekkel történő számítás szabályait betartva a (II.4.2) és (II.4.3) egyenleteknél már bemutatott módon eljárva kell meghatározni a keresett értéket.

Először határozzuk meg a tér azonos pontjában egyidejűleg üzemelő P_1, P_2, \dots, P_i hangteljesítményű hangforrások eredő teljesítményszintjét. Mivel ezek a teljesítmény értékek közvetlenül összeadhatók, ezért a (II.4.3) összefüggés értelmében

$$L_e = 10 \cdot \lg \frac{P_1 + P_2 + P_i}{P_0} = 10 \cdot \lg \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{P_0} \quad (\text{II.4.11})$$

Amennyiben az egyes források szintértéke adott, akkor visszatérhetünk a következők szerint meghatározott teljesítményhez:

$$P_i = P_0 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Wi}} \quad (\text{II.4.12})$$

A (II.4.12) összefüggést a (II.4.11) egyenletbe helyettesítve:

$$L_{We} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{Wi}} \quad (\text{II.4.13})$$

ahol:

L_{Wi} — az i -ik összegzett hangteljesítményszint érték.

Két azonos $L_{W1} = L_{W2} = L_{Wf}$ szintértékű forrás eredője a (II.4.13) egyenlet alapján tehát:

$$L_{We} = 10 \cdot \lg(10^{0,1 \cdot L_{Wf}} + 10^{0,1 \cdot L_{Wf}}) = 10 \cdot \lg(2 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{Wf}}) = L_{Wf} + 3 \text{ [dB]} \quad (\text{II.4.14})$$

A (II.4.14) egyenlet alapján **két azonos szintértékű**, de eltérő frekvenciájú **forrás eredője** az összetevők értékénél **3 dB-lel nagyobb értéket ad**. Hasonló módon járunk el a **források számának felezésénél** is, amennyiben két forrás közül az egyik működését leállítjuk, az összegzett **szintérték 3 dB-lel csökken**.

Hangforrások által létesített hangtér vizsgálatánál és hanghatások előzetes becslésénél az észlelt hangnyomásszintek összegzését kell elvégezni. Ekkor a (II.4.13) egyenlethez hasonló összefüggést kapunk:

$$L_{pe} = 10 \cdot \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_{pi}} \quad (\text{II.4.15})$$

ahol:

L_{pi} — az i -ik összegzett hangnyomásszint érték.

A (II.4.13), (II.4.14) és (II.4.15) egyenletek alapján két hangforrás együttes terében mindig az intenzitás értékek és a hangnyomás értékek négyzetei összegződnek. Ahhoz, hogy a gyakorlatban mindig helyesen járjunk el a vizsgálatoknál és az előzetes becsléseknél, egy jól alkalmazható szabályt célszerű megjegyezni:

$$60 \text{ dB} + 60 \text{ dB} = 63 \text{ dB} \quad \text{és} \quad 60 \text{ dB} - 57 \text{ dB} = 57 \text{ dB} \quad (\text{II.4.16})$$

II.4.2. HANGFORRÁSOK ÉS SZINTEK KÖZÖTTI ÖSSZEFÜGGÉSEK

A II.3. fejezetben a hangforrások bemutatásánál tárgyaltuk a jellemző teljesítményt, valamint a hangnyomás értékek kialakulásának feltételeit. A továbbiakban a korábban megismert összefüggéseket felhasználva ismertetjük a hangforrásoktól r távolságban mérhető p hangnyomás értékek meghatározási szabályait.

Minden irányban egyenletesen sugárzó pontforrásoknál szabad térben a *hangteljesítményszint* és *hangnyomásszint* közötti összefüggés a (II.3.1) egyenlet alapján:

$$L = L_w - 20 \cdot \lg \frac{r}{r_0} - 11 \quad (\text{II.4.17})$$

ahol:

$$r_0 = 1 \text{ m.}$$

A (II.4.17) összefüggés alapján tehát kijelenthető, hogy pontsugárzók esetében a távolság megkétszerezése a hangnyomásszint 6 dB-es csökkenését eredményezi, mivel:

$$-20 \cdot \lg 2r = -20 \cdot \lg 2 - 20 \cdot \lg r = -20 \lg r - 6 \quad (\text{II.4.18})$$

Hangvisszaverő felület felett elhelyezett, szabad féltérbe sugárzó hangforrás esetén a hangtérben létesített hangnyomásszint érték a II.3.1. táblázatban megadott irányítási tényezőt alkalmazva:

$$L = L_w - 20 \cdot \lg \frac{r}{r_0} - 8 \quad (\text{II.4.19})$$

ahol:

$$r_0 = 1 \text{ m.}$$

Szabad félhangtér esetén $r=0,4$ m távolságban a teljesítményszint és a hangnyomásszint egyenlő. **Pontszerű hangforrás** és az észlelési hely közötti távolság megkétszerezése esetén távolság (II.4.18) egyenlet alapján 6 dB-lel csökken. Ha r_1 távolságban a hangnyomásszint $L_p(r_1)$, akkor r_2 távolságban az $L_p(r_2)$ hangnyomásszint:

$$L_p(r_2) = L_p(r_1) - 20 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{II.4.20})$$

A hangforrás irányítottságát szabad félhangtér esetén az **irányítotttsági mutatóval** jellemezhetjük, ami megmutatja, hogy a hangforrást körülvevő felület vagy a kijelölt mérőfelület valamely pontjában az L_i hangnyomásszint mekkora értékkel tér el a mérőfelületen mért átlagos L_m hangnyomásszint értéktől. A G irányítotttsági mutatót a következő egyenlettel határozzuk meg:

$$G = L_i - L_m + 3 \quad (\text{II.4.21})$$

Végtelen hosszú, egyenes **vonalszerű hangforrás és akadálytalan terjedés** esetén a forrás és az észlelési hely közötti távolság megkétszerezésekor a hangnyomásszint 3 dB-lel csökken. Ha r_1 távolságban a hangnyomásszint $L_p(r_1)$, akkor r_2 távolságban az $L_p(r_2)$ hangnyomásszint:

$$L_p(r_2) = L_p(r_1) - 10 \cdot \lg \frac{r_2}{r_1} \quad (\text{II.4.22})$$

Koherens vonalsugárzóknál a hangnyomásszint a (II.3.4) összefüggés alapján a következő összefüggéssel fejezhető ki:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \lg \frac{r}{r_0} - 8 \quad (\text{II.4.23})$$

Inkoherens vonalsugárzóknál ugyanabban az észlelési pontba több forrásból is érkezik hangenergia, a hangtérben kialakuló hangnyomásszint a (II.4.23) összefüggéshez képest módosul. Ilyenkor a hangnyomásszint r távolságban:

$$L_p = L_w - 10 \cdot \lg \frac{r}{r_0} - 6 \quad (\text{II.4.24})$$

A pontsugárzókhöz hasonlóan az irányítási tényező az inkoherens vonalsugárzóknál is értelmezhető, így az összefüggés esetenként módosul.

II.4.3. EGYADATOS MÉRŐSZÁMOK

Zaj- és rezgésjellemező alatt rendszerint azt a fizikai mennyiséget értjük, ami a hanghatás erősségére utal. Hangok esetében elsősorban mérés technikai okokból a hangnyomást, rezgéseknél a kitérést, sebességet és gyorsulást alkalmazzuk. Ezek bármelyike, így pl. a hangnyomás a frekvenciával kiegészítve az idő függvényében leírja a hangjelenséget.

Az I.2. fejezetben tárgyaltak szerint a hang az élőlények számára fizikai, élettani és lélektani értelemben eltérő jelentéstartalommal rendelkezik, de ugyanez

állapítható meg rezgések vonatkozásában is. Az élő környezet szempontjából az élettani és lélektani hatások a jelentősebbek, amit a szabályozásban szükségszerűen figyelembe kell venni.

Az észlelőben kialakuló hangérzet valamilyen módon a fizikai jellemzők függvénye. A függvénykapcsolat mindig összetett, és általános alakban írható le a következők szerint:

$$\Psi = f(\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_3) \quad (\text{II.4.25})$$

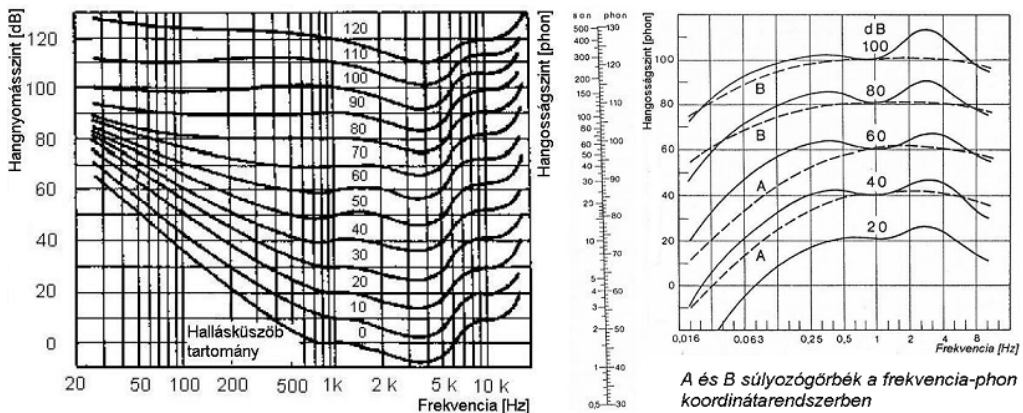
ahol:

- Ψ — észlelőben kialakuló hangérzet;
 Φ_i — fizikai hatásokat jellemző tényező.

Az egzakt kifejezésforma hiánya és a beavatkozás hatásosságára vonatkozó jellemző bevezetésére irányuló igény olyan szubjektív mérőszámok alkalmazását is indokolja, amelyeket a fizikai adatokból egyszerűen meg lehet határozni. Ezzel párhuzamosan megfigyelhető az a törekvés is, hogy a gyakorlatban a hatásokat egyetlen adattal jellemezni lehessen, mivel így a határértékkel való összehasonlítás alapján közvetlenül megítélhető lesz a hang- és rezgéshatás. Ezek az úgynevezett **egyadatos mérőszámok** [II.5].

Az **egyadatos mérőszámok** közül a zajoknál jelentősebbek a hangosság, a zajosság, az A-hangnyomásszint és az egyenértékű hangnyomásszint, valamint rezgéseknél a súlyozott egyenértékű rezgésyorsulás.

HANGOSSÁGSZINT a hangosság jellemzésére szolgáló **élettani mennyiség**. Jele: L_N , egysége a [phon]. Értelmezés szerint annak az 1 kHz frekvenciájú, szabad hangtérben terjedő tisztahangnak a hangnyomásszintje, ami a vizsgált hanggal azonos hangérzetet kelt az észlelőben. **Egyenlő hangosság szintek** görbéit mutatja a II.4.1. ábra. Például egy 100 Hz frekvenciájú 50 dB hangnyomásszintű tisztahang hangosság szintje: $L_N = 41$ phon.



II.4.1. ábra Egyenlő hangosság szintek görbék és phon skála
 ([II.1] alapján)

HANGOSSÁG a hangosságérzetet jellemző mennyiség, ami a hangnyomás- és a hangosságszinttel szemben *lineáris kapcsolatot* biztosít az egyes hangtani összetevők között. Jele: N , mértékegysége a $[son]$. A hangosságszint rendszerhez kötött azonosítási pontja, amit egységnyi hangosságnak is nevezünk:

$$1 \text{ son} = 40 \text{ phon} \quad (\text{II.4.26})$$

A *hangosság* és a *hangosságszint* közötti kapcsolatot az alábbi egyenletek adják:

$$N = 2^{0,1(L_N - 40)} \quad [son] \quad (\text{II.4.27})$$

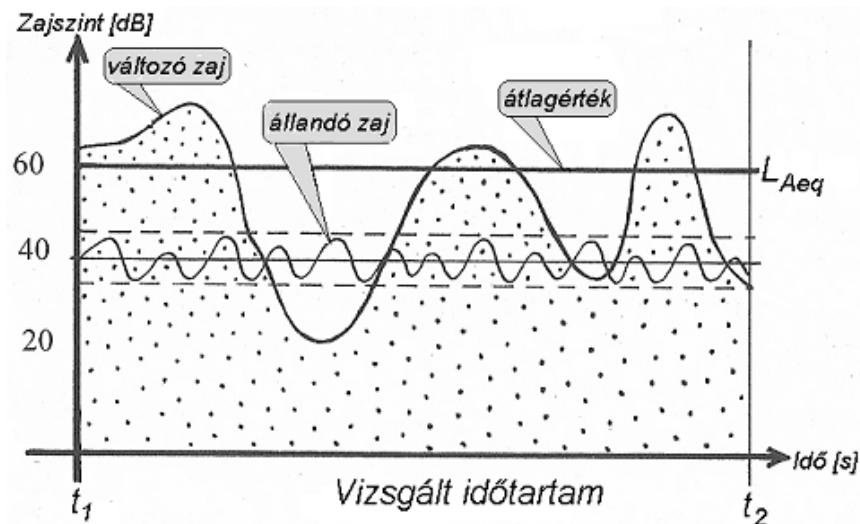
$$L_N = 40 + 10 \cdot \lg N \quad [phon] \quad (\text{II.4.28})$$

A *hangosság* a valóságos érzetnek felel meg, vagyis lineáris mérték, amit a következő példa szemléltet:

$$1 \text{ son} + 1 \text{ son} = 2 \text{ son} \quad (\text{II.4.29})$$

ZAJOSSÁG a zajosságérzet jellemzésére használatos, jele: Z , mértékegysége a *noy*. Olyan mérhető jellemző, ami az észlelő által kapott érzetnek felel meg. A *zajosságszint* meghatározása:

$$L_Z = 40 + 10 \cdot \lg Z \quad [PNdB] \quad (\text{II.4.30})$$



II.4.2. ábra Egyenértékű hangnyomásszint képzése

Minden olyan esetben, amikor a zaj erősségét az emberi szervezetre gyakorolt

hatása szempontjából kell megítélni a gyakorlat a hangosság szint helyett jellemzőként a közvetlenül mérhető A-HANGNYOMÁSSZINTET alkalmazza. A hangnyomásszint mérő műszerekbe erre a célra szűrőkört építenek be, ami közelítőleg a II.4.1. ábra szerinti 40 phon hangosság szintű görbe tükörképe, ami a fül érzékenységet kívánja visszaadni. Az **A-hangnyomásszint** jele: L_A , mértékegysége: $dB(A)$, vagy dB .

EGYENÉRTÉKŰ HANGNYOMÁSSZINT a zaj erősségén kívül az adott észlelési pontban fellépő zajterhelés hatásidejét is figyelembe veszi. Bevezetését elsősorban az indokolta, hogy a környezetünkben fellépő zajok többsége nem állandó jellegű, hanem az idő függvényében kisebb vagy nagyobb mértékben változik. Ezért az időben változó zajhatás jellemzésére szükség van egy olyan átlagértékre, melynek az emberre gyakorolt hatása azonos az adott környezetben vizsgált változó zaj hatásával. Ez a mennyiség az egyenértékű hangnyomásszint, jele: L_{eq} , mértékegysége: dB .

Eredeti megfogalmazásban — követve a II.4.2. ábra szerinti függvényt — az **egyenértékű hangnyomásszint** az időben változó hangnyomás értékekből képzett energia szerinti átlagérték, amit a következő egyenlettel fejezünk ki:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \cdot \int_{t_1}^{t_2} \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right) \quad (II.4.31)$$

ahol:

- $p(t)$ — hangnyomás időfüggvénye [Pa];
- p_0 — hangnyomás vonatkoztatási értéke [Pa];
- t_1 és t_2 — vizsgált időtartam kezdete és vége [s];
- T — vizsgált időtartam, $T = t_2 - t_1$ [s].

Az A-súlyozott mérés esetén az **egyenértékű A-hangnyomásszintet** kapjuk, melynek jele: L_{Aeq} mértékegysége: $dB(A)$, vagy dB .

Amennyiben a mérés folyamán az egyes t_i részdíjokra vonatkoztatott L_{eqi} rész egyenértékű hangnyomásszinteket ismerjük, akkor a T_v vonatkoztatási időre az L_{eq} **egyenértékű hangnyomásszintet** a következők szerint határozhatjuk meg:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T_v} \cdot \sum t_i \cdot 10^{0,1 \cdot L_{eqi}} \right) \quad (II.4.32)$$

II.5. HANGTERJEDÉS

HANGTERJEDÉS feltétele a zavarási állapot továbbítására alkalmas vivőközeg jelenléte, amit anyagjellemzőin túl annak állapota is jellemez. Rugalmatlan közegben a hang energiája rohamosan fölemészthető, az ilyen anyagok tehát a hang terjedését akadályozzák. Ha a közeg részecskéi ritkábban helyezkednek el, mint a hangnyomás által létesített részecske-elmozdulás ($10^{-5} \dots 10^{-11}$ m), a nyomásingadozás nem terjed tovább. Ebből következik, hogy légritkított térben vagy az űrben nincs hang. Érdeemes tudni, hogy hullámterjedés van az űrben is, ahol az elektromágneses hullám közvetítő közeg nélkül is terjed.

Az ideális állapotnak megfelelő szabad hangterjedés feltételezésével a hangforrásról lesugárzott P hangteljesítmény a távolság növekedésének arányában egyre nagyobb S felületen oszlik meg. Ilyenkor az intenzitás:

$$I = \frac{dP}{dA} \quad (\text{II.5.1})$$

A (II.5.1) egyenlet alapján veszteségmentes közegben való terjedés esetén az észlelési távolság növekedésével egyre kisebb lesz a hangintenzitás értéke. Az ilyen jellegű intenzitás-csökkenést nevezzük **geometriai csökkenésnek**. Amikor egy pontszerű, irányítatlan forrás működésétől származó hanghullám akadálymentes térben minden irányban azonos mértékben terjed, a hangnyomás négyzete r távolságban:

$$p^2(r) = \rho \cdot c \cdot \frac{P}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (\text{II.5.2})$$

ahol:

- ρ — levegő sűrűsége, $[\text{kg}/\text{m}^3]$;
 c — hang terjedési sebessége a levegőben, $[\text{m}/\text{s}]$.

A hang terjedését a valóságban több olyan tényező is befolyásolja, ami a hangenergiát továbbító közeg állapotával és a környezeti adottságokkal van összefüggésben. A szabad teret betöltő levegőben a hangterjedésre gyakorolt hatás figyelembe vétele a hangnyomás változása miatt elengedhetetlen, ezért a következőkben áttekintést adunk arról, hogy milyen tényezőktől függ a csillapodás mértéke.

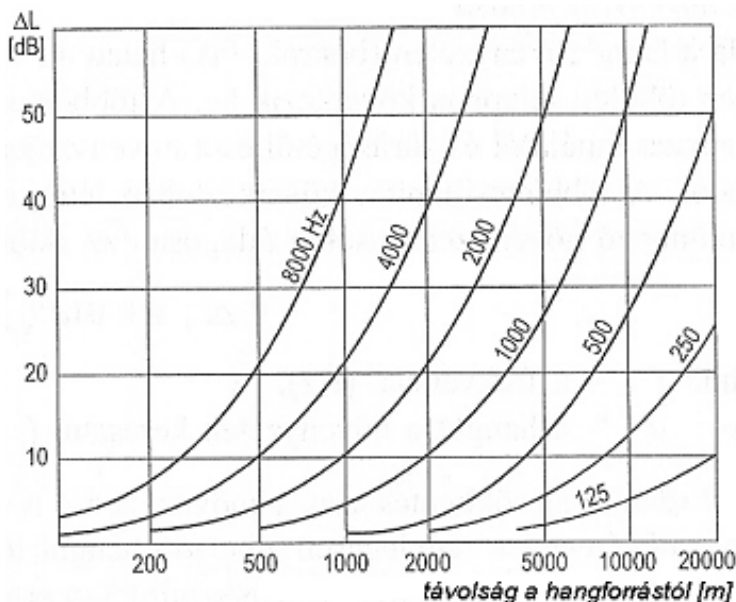
II.5.1. LEVEGŐ CSILLAPÍTÓ HATÁSA

A valóságban a távolság függvényében bekövetkező hangnyomás-csökkenés mindig nagyobb, mint az ideális esetre vonatkoztatott elméleti érték. Ennek oka a levegő hangelnyelése. Levegőben való terjedéskor a hangenergia egy része a disszipációs hatás miatt hővé alakul, emiatt a kezdeti hangenergia szempontjából veszteségek keletkeznek. A ΔL csillapítás mértéke erősen függ a hang frekvenciájától, ugyanis a magas hangok (nagy frekvencia) jobban csillapodnak, mint a mély hangok (alacsony frekvencia). A levegő hangelnyelő hatását a frekvencia és a távolság függvényében a II.5.1. ábra szemlélteti.

Levegőben megvalósuló elnyelési mechanizmus arra a jelenségre vezethető vissza, hogy a levegőt alkotó molekulák nemcsak haladó mozgásukhoz, hanem a molekulát alkotó atomok egymás körüli forgó mozgásához és az egymáshoz viszonyított rezgő mozgáshoz is képesek energiát felvenni környezetükből. Ugyanakkor a levegő molekuláinak haladó mozgása és az atomok forgó mozgása nagyon rövid idő alatt gerjeszthető, így az energia felvétel azonnal megtörténik.

Az atomok rezgésgerjesztéséhez szükséges rövid idő alatt a bekövetkező energianövekedés másik energiaforma terhére következik be. A termikus egyensúly

kialakulási folyamatát relaxációnak, az ehhez szükséges időt relaxációs időnek nevezzük. Ez a relaxációs folyamat energiát von el a környezetből, ezáltal csökkenti a hanghullámok nyomását.



II.5.1. ábra Levegő csillapító hatása a távolság és frekvencia függvényében
forrás: [II.3]

Levegő hőmérséklete °C	Relatív nedvességtartalom %	γ_l csillapítási tényező, 10^{-3} dB/m							
		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
0	50	0,2	0,4	0,8	2,1	6,1	18	48	120
	70	0,2	0,4	0,7	1,6	4,2	12	36	96
	90	0,2	0,4	0,7	1,4	3,3	9,3	28	77
10	50	0,2	0,4	0,9	1,7	3,9	14	31	86
	70	0,2	0,4	0,9	1,7	3,5	7,8	21	61
	90	0,2	0,4	0,9	1,7	3,5	9,1	17	46
20	50	0,3	0,5	1,1	2,1	4,2	8,5	20	53
	70	0,3	0,5	1,1	2,1	4,2	8,5	17	39
	90	0,3	0,5	1,1	2,1	4,2	8,5	17	34

II.5.1. táblázat Levegő csillapítási tényező értékei
forrás: [II.3]

A gyakorlat számára vezették be a γ_l csillapítási tényezőt, ami megadja az 1 m terjedési hosszra eső hangnyomásszint csökkenés értékét. A ΔL_l hangnyomásszint csökkenés értékét d [m] távolságra a következő összefüggéssel határozzuk meg:

$$\Delta L = \gamma_l \cdot d \quad (\text{II.5.3})$$

Jellemző frekvenciákra vonatkozó γ_l csillapítási értékeket a hőmérséklet és a relatív nedvességtartalom függvényében a II.5.1. táblázatban adjuk meg. Az értékek jól szemléltetik, hogy a csillapítás mértéke a levegő hőmérsékletétől és relatív nedvességtartalmától is függ. Látható, hogy a hőmérséklet növekedésével és a relatív nedvesség csökkenésével a csillapítás mértéke növekszik.

Tervezési célokra a II.5.1. táblázat 10 °C levegő-hőmérsékletéhez és 70 % relatív nedvességtartalomhoz tartozó értékeit célszerű használni. Kisebb távolságok esetén a II.5.1. ábra értékeit tekintve a levegő csillapítása elhanyagolható.

II.5.2. NÖVÉNYZET, HANGVISSZAZVERŐDÉS ÉS TALAJ HATÁSA

A földfelszínen a terjedést a **növényzet** is gátolja, csillapítja. A csillapítás mértéke függ a növényzet fajtájától, lombhullató növények esetében az évszaktól. Az eddigi kísérletek eredményei a különböző növényi alakzatok miatt erősen szórnak, így nehéz pontos értéket adni minden területre vonatkozóan. A nagyságrendet célszerű megadni, melyre azt a megfigyelést célszerű vonatkoztatni, hogy legalább 50 m széles, dús lombozattal és aljnövényzettel bíró erdő mögött várható szubjektív érzékeléssel is kimutatható, $\Delta L = 2,5\text{-}3$ dB-es csillapítás, illetve 0,05 dB/m hangcsillapítással számolhatunk.

Jó közelítésként a csillapítás értéke a növényzetben megtett d [m] hangútra vonatkoztatva:

$$\Delta L_{\text{növényke}} \approx 0,01 \cdot d \cdot \sqrt[3]{f} \quad (\text{II.5.4})$$

ahol:

f — hang frekvenciája, [Hz].

A **növényzet** csak a föld felszínén, attól 3-4 m magasságig érezteti hatását, és semmi esetre sem nyújt védelmet a magasan elhelyezkedő zajforrások ellen, illetve a magasan lévő védendő objektumok számára. A növényzet növekedési ideje, lombozata, bizonytalan sűrűsége miatt növényzetre, mint védősávra körültekintő módon lehet csak számítani.

Hangvisszazverődés hatása abban az esetben érvényesül, ha a hangforrás vagy a megfigyelési pont közelében nagyobb hangvisszaverő felület van, pl. épületek, burkolt felületek, falak. Ilyen esetben tükrözéssel nyert **tükrőforrással** számolhatunk, a hangvisszaverő felület környezetében a hangnyomásszint tapasztalat szerint legalább **3 dB**-el emelkedik. A hangvisszazverődés csökkenthető növényzettel fedett területek vagy sávok fenntartásával.

A **talaj** közelében bekövetkező különböző hatások együttesen többletcsillapítást eredményeznek. Amennyiben a hangforrás a talaj felett helyezkedik el, a II.2. fejezetben már említett *interferencia* lép fel a megfigyelő helyén a közvetlen és a visszavert hangszög között.

Nagyobb távolságok esetén a hangelnyelés és szóródás következtében ~ 3 dB többletcsillapítással számolhatunk a szabad feltérben megvalósuló terjedéshez képest.

Ilyenkor a sűrű gye, cserjés és egyéb aljnövényzet lényegesen nagyobb csillapítást eredményez, mint az elnyelő tulajdonságú talajok (pl. homok). A csillapítás mértéke kedvező esetben elérheti a 20 dB/100 m értéket is.

II.5.3. METEOROLÓGIAI HATÁSOK

A szabadtéri hangterjedést leginkább a levegő hőmérséklete és a szél befolyásolja. Szélsebesség és levegőhőmérséklet változásainak hatására a hangsugarak jelentősebb elhajlása következik be, ami a szabadterben tartózkodó megfigyelő számára szubjektív módon is érzékelhető hatást vagy hatásváltozást okoz.

A (II.2.2) egyenlet alapján kijelenthetjük, hogy a hang terjedési sebessége a levegő abszolút hőmérséklete függvényében változik, erre tényleges értékeket a II.2.1. táblázatban adtunk meg. Tapasztalatok szerint szabadtéri hangterjedéskor azonban nem annyira a hőmérséklet abszolút értéke a döntő, hanem a hőmérséklet hangtérben való eloszlása számít. Mivel melegebb közegben a hang nagyobb sebességgel terjed, már néhány Celsius-fok hőmérsékletváltozás is kimutatható sebességváltozást idéz elő. Megfelelő hőmérséklet-eloszlás esetén tehát változó hangsebesség alakul ki, ezért elsődleges az úgynevezett ***hőmérsékleti gradiens***, ami a közegben a hangsugarak törését okozza, amikor azok eltérő hőmérsékletű közegbe érnek. Két eltérő hőmérsékletű közeg határfelületén a hangtörés jellege a hang a beesési merőlegesétől függ.

Napsugárzás hatására a földfelszín felmelegszik, ezért az alul elhelyezkedő légrétegek melegebbek a felsőknél, tehát felfelé haladva hidegebb van, azaz ***negatív hőmérsékleti gradiens*** alakul ki, amit a következőképp fejezünk ki:

$$\frac{dT}{dz} < 0 \quad (II.5.5)$$

ahol:

z — talajszint feletti magasság, [m].

A (II.5.5) összefüggés esetében a hőmérséklet-eloszlás függvényében kialakuló határréteghez érve a hang a beesési merőleges felé törik, és így nagyon gyorsan elvész a levegőben, a hang igen kis távolságban lesz észlelhető.

Negatív hőmérsékleti gradiens esetén a felülettel párhuzamosan haladó hanghullámok az eltérő hőmérsékletű határfelületeken akadályokba ütköznek és hamar elnyelődnek, a ferdén kiinduló hanghullámok, pedig, a magasba vesznek. Ez a jelenség elsősorban forró nyári napokon fordul elő, vagy nyári meleg estéken, pl. nagyobb embertömeg felett egy szabadtéri előadás alkalmával. A hatás olyan erős lehet, hogy feljegyzések szerint csatadöntő jelentősége volt, amikor háborúban az ágyúlövések hangját 8-10 km távolságból sem lehetett meghallani.

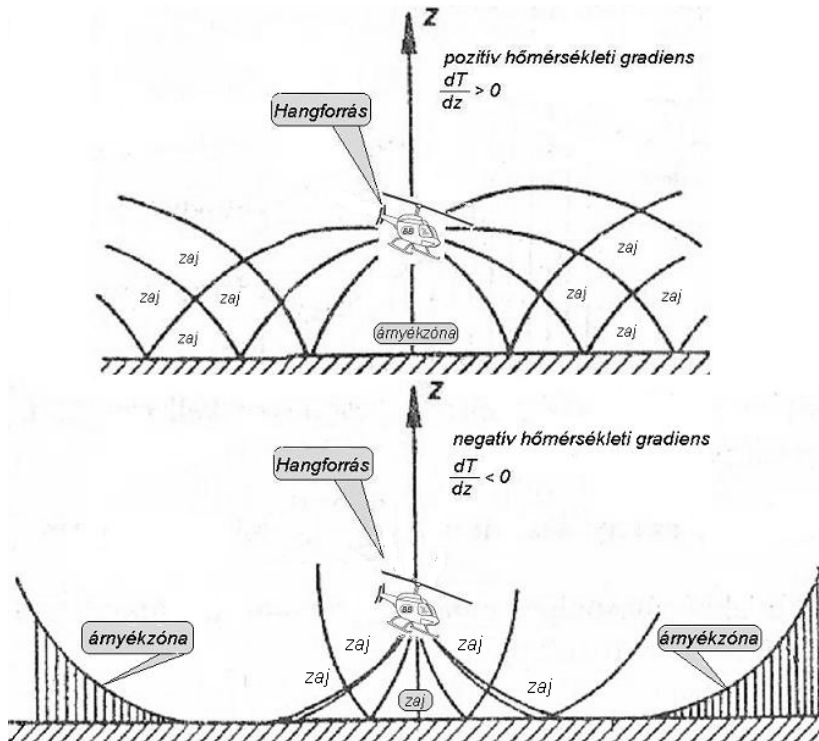
Pozitív hőmérsékleti gradiensről beszélünk fordított helyzetben, amikor a földfelszínnel párhuzamos légrétegek hőmérséklete a magassággal együtt növekszik, így az alul elhelyezkedő légrétegek hidegebbek a felsőknél, tehát felfelé haladva melegebb van. Ekkor a ***hőmérsékleti gradiens***:

$$\frac{dT}{dz} > 0 \quad (\text{II.5.6})$$

ahol:

z — talajszint feletti magasság, [m].

Tehát a magasabb hőmérséklet miatt a felsőbb légrétegekben gyorsabban terjed a hang. Ferde irányú hangsugár alakul ki, ami folytonosan megtörve eléri a teljes visszaverődés határszögét, majd onnan visszajut a földfelszínre. *Pozitív hőmérsékleti gradiens* leggyakrabban tavasszal és kora ősszel jön létre, amikor a hidegebb felszín fölé melegebb légtömeg áramlik be. Ilyenkor megfigyelhető, hogy a távoli vasút vagy autópálya forgalmától, esetleg egy helikopteres átrepüléstől származó hanghatás nagy távolságban, esetenként több kilométerre is jól észlelhető, ami egyben azt is jelenti, hogy a magasban meleg levegő áramlik a térségbe, hogy aznap kellemes napsütéses idő következzen életünkben.



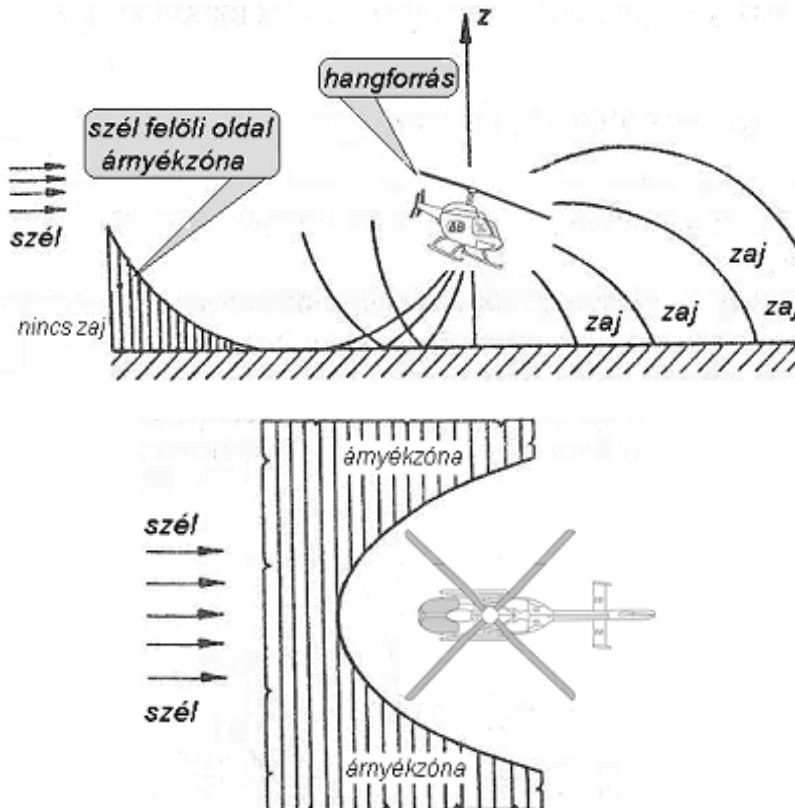
II.5.2. ábra Terjedési viszonyok pozitív és negatív hőmérsékleti gradiens esetén

A (II.5.5) és (II.5.6) összefüggéseket tekintve szabad térben, inhomogén közegben a hangsugarak nem egyenesen terjednek, hanem a *hőmérsékleti gradiens függvényében* sokszorosan megtörve, valamilyen görbe mentén. Állandó dc/dz sebességi gradiens esetén a sugárzás köríven történik, görbülete az alacsonyabb

terjedési sebességek, vagyis a kisebb hőmérsékletek felé mutat. A II.5.2. ábra a hőmérsékleti gradiens függvényében szemlélteti a sugárzás jellegét, melyből következik, hogy negatív gradiens esetén *árnyékszóna* alakul ki, ahol hanghatás nem tapasztalható.

A II.5.2. ábrán szemléltetett jelenség figyelembe vétele a zajvizsgálatoknál kiemelt jelentőséget kap, hiszen évszakonként, vagy akár pár hetes eltéréssel az időjárási viszonyok megváltozhatnak, és ennek függvényében időszakonként eltérő hangterjedési jelenséggel állunk szemben. Emiatt a gyakorlatban sokszor előfordul, hogy egy megismételt mérés eredménye eltér a korábbi mérési eredménytől. Esetleg a szubjektív észlelés alapján leírt hangjelenséget nem sikerül méréssel igazolni, mert a hőmérséklet gradiens megváltozott vagy megfordult a korábbiakhoz képest. A jelenlegi jogszabályok és műszaki előírások az ún. inverziós hatást még nem veszik figyelembe, de ezen a jövőben indokolt lesz változtatni, hogy a szubjektív érzékelést jobban kövessék az objektív mérési eredmények.

A hőmérséklethez hasonlóan a légmozgás is hatással van a terjedésre. A szélsébség és a hang terjedési sebessége vektoriálisan összegződik, így a sugárzás eltérően alakul a szél feletti és a szél alatti oldalon, tehát a széliránnyal megegyező irányú hangterjedés nagyobb, ellenkező irányban kisebb sebességű.



II.5.3. ábra: Szél hatása a hangterjedésre

A légáramlást a földfelszín közelében a növényzet és a beépítés fékezi, ezáltal a szélsébség a magassággal együtt növekszik. Emiatt a hanghullámok a szélirányban történő terjedésnél a földfelszín felé, ellenkező irányú terjedésnél a felszíntől felfelé hajlanak el. Tehát széllal szembeni hangterjedésnél a forrástól bizonyos távolságban hangárnyék jön létre, szélirányban azonban nem alakul ki hangárnyék, a hanghullámok föld felé hajlása ebben az esetben a mesterségesen akadályozott hangterjedést kedvezőtlenül befolyásolja és a csökkentő hatást részben vagy teljesen megszünteti. A szél hatását a II.5.3. ábrán szemléltetjük.

II.6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [II.1] Tarnóczy Tamás: Akusztika. Hangnyomás, hangosság, zajosság, Akadémia Kiadó, Budapest, 1984.
- [II.2] Cirad Smetana: Zaj- és rezgésmérés, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.
- [II.3] Dr. Barótfi István (szerk.): Környezettechnika, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 2000.
- [II.4] Dr. Kovács Attila: Zaj- és rezgésvédelem, Veszprémi Egyetem, Veszprém, 1995.
- [II.5] Bera József: Környezeti zaj és határértékek közötti összefüggések, Műszaki Tudomány az Észak Alföldi Régióban 2009 konferencia kiadványa, Mezőtúr 2009., pp 101–106.
- [II.6] MSZ 15036:2002 számú szabvány, Hangterjedés szabadban.

A HELIKOPTEREKRŐL ÁLTALÁBAN

III.1. BEVEZETÉS

A helyből való fel- és leszállás, az egyhelyben lebegés lehetősége és vágya már régóta foglalkoztatta az embereket. Szitakötőként lebegni, majd szabadon ellibbenni – ez csak alig több mint hetven éve lehetséges. A fém-szitakötő, a „repülő csirkecomb”, azaz a helikopter lényegében az elmúlt évszázad utolsó hatvan–hetven évében fejlődött ki, és napjainkban már nélkülözhetetlen repülő eszközzé vált.

LEONARDO DA VINCI több mint 500 éve publikálta híres könyvében, a CODEX ATLANTICUS-ban azt az emberi erővel működtetett szerkezetét, mely mint egy nagy csavar a levegőbe fűrődva helyből emelkedhetett fel a földről. Az elmúlt századokban a kísérletező ezermesterek, híres tudósok működőképes modelleket készítettek, elsősorban szórakoztatás céljából, de ezek inkább „csak” fontos előtanulmányoknak bizonyultak a későbbiek során. A zseniális elmélet valóra váltásával várni kellett a technika fejlődésének későbbi szakaszáig.

A francia BRÉGUET testvérek építették meg az első olyan szerkezetet, amely először emelkedhetett fel emberrel a fedélzetén függőlegesen, 1907 novemberében. Mivel a második gépükkel már nem sikerült felemelkedniük, abbahagyták a kísérletezést. Több tanulmány (például a [III.3]) szerzői ettől a repüléstől számítják a helikopteres repülés történetét, amit a jelen sorok írója legfeljebb a forgószárnyas repülés kezdete egy állomásának nevezne. Hogy miért? Mert nem csak a helikopter létezik, mint forgószárnyas repülőgép. A laikusok, vagy a repülés tudományát csak felületesen ismerők számára ez a két fogalom egyet jelent. Pedig nem az.

Ebben a fejezetben előbb a helikopter fogalmát, a repülőszerkezetek csoportosításán belüli helyét ismerhetjük meg. Ezt követően a helikopterek (forgószárny elrendezés szerinti) csoportosítása olvasható. A III.4 alfejezetben a helikopter fejlődésének történetét ismerheti meg a Tisztelt Olvasó. Mivel a helikopterek a Föld légkörében repülnek, azok repülési teljesítményét nagyban befolyásolják a légkör fizikai jellemzői. Ezért a levegő állapotjelzőinek Nemzetközi Egyezményes Légkör szerinti változását tárgyaljuk — röviden, a későbbi vizsgálatainkhoz szükséges mértékben — a tengerszint feletti magasság függvényében

III.2. MI A HELIKOPTER?

Valójában mi is a helikopter?

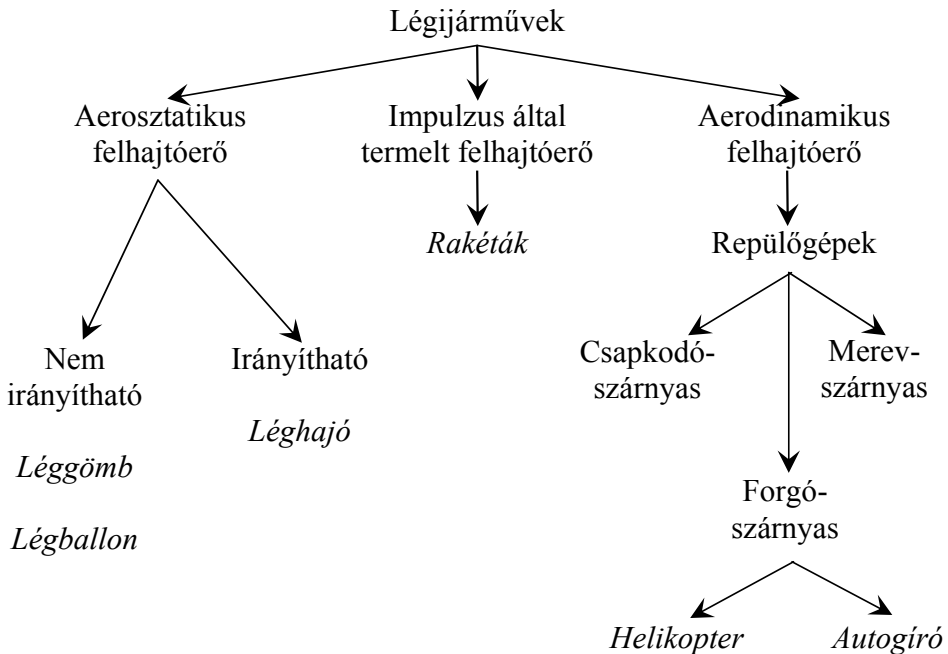
HELIKOPTER – a Repülési Lexikon [III.11] megfogalmazásában – egy olyan forgószárnyas repülőgép, melynek forgószárnyát vagy forgószárnyait beépített erőgép forgatja. A hagyományosnak tekintett repülési formák mellett a helikopter képes önállóan függőlegesen fel- és leszállni, függeni (egy pont fölött lebegni), valamint bármely irányban oldalra, hátrafelé repülni.

Most nézzük meg, hogy a légi eszközök, repülőszerkezetek között hol

helyezkednek el a helikopterek.

LÉGIJÁRMŰ alatt azoknak a levegőnél könnyebb és nehezebb eszközöknek az összességét értjük, amelyek aerosztatikai, aerodinamikai vagy impulzus által termelt emelőerőre támaszkodva a levegőben vagy a légkör határain túl végeznek önálló helyváltoztatást. A repülőszerkezetek felosztását szemlélteti a III.1. ábra a felhajtóerő keletkezése alapján.

Az aerosztatikus felhajtóerőn valamely gáznemű közegben — mondjuk a légkör levegőjében — (részben vagy teljesen) elmerülő testre ható, a test által kiszorított közeg súlyával egyenlő, függőlegesen felfelé ható erőt értjük. Az aerosztatikus felhajtóerő segítségével repülnek a léggömbök, légballonok és a léghajók. A sztatikus felhajtóerőt biztosító közeg alapján ezek a repülőszerkezetek lehetnek gáztöltésűek, vagy meleg levegősek.



III.1. ábra Repülőszerkezetek osztályozása

A léggömbök, légballonok nem irányítottak, repülési irányukat, sebességüket a repülési magasságukon tapasztalható szél határozza meg, és vázuk nem merev.

A léghajók általában merev vázzal rendelkeznek. Levegőbe emelkedésüket az aerosztatikus felhajtóerő, még vízszintes irányú mozgásukat és kormányozhatóságukat erőgépmeghajlás biztosítja. Leghíresebb léghajók a német építésű Zeppelinek voltak.

Impulzus által termelt erő felhasználásával a rakéták repülnek, amikor a repüléshez szükséges felhajtó és mozgóerőt is a rakéta hajtóműve biztosítja. A rakétahajtómű sajátossága, hogy a tolóerő létrehozásához szükséges üzemanyagot és



a



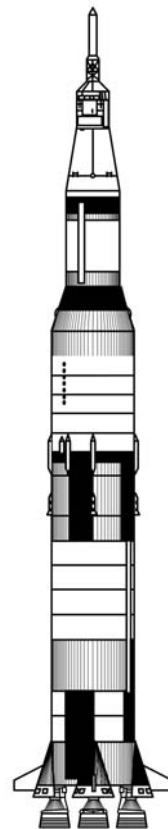
b

III.2. Légballon és léghajó forrás: <http://www.airliners.net/>

az oxidáns — azaz a tüzelőanyag elégetéséhez szükséges oxigént — is magával viszi. A rakéták képesek a világűrben is repülni, még a másik két elven működő légijárművek csak a Föld légkörében, ahol nem zérus a levegő sűrűsége.

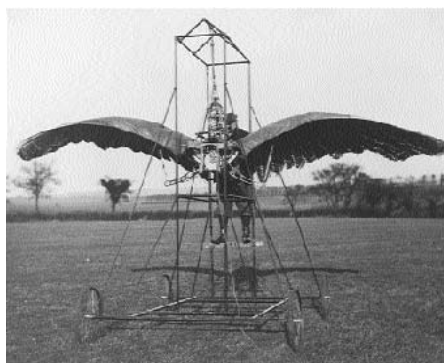
Tágabb értelemben repülőgépek nevezzük azokat a repülőszervezeteket, melyek a repüléséhez szükséges felhajtóerőt aerodinamikai úton hozzák létre. Aerodinamikai felhajtóerő akkor keletkezik, ha az azt létrehozó hordfelület a közeghez képest — ellentétben az aerosztatikus felhajtó erővel — valamilyen sebességgel mozog. Az aerodinamikai felhajtóerő keletkezését és — későbbi elemzéseinkhez szükséges — sajátosságait a III.3. fejezetben ismer-tetjük.

Egy kissé tudományos megfogalmazásban az aerodinamikai felhajtó erőt létrehozó szerkezeti elem törzshöz képesti mozgása alapján három fajta repülőgépet különböztetünk meg. Ezek:



III.3. ábra Rakéta (Saturn V)
forrás: <http://commons.wikimedia.org/>

CSAPKODÓ SZÁRNYÚ REPÜLŐGÉP, vagy más néven **ORNIKOPTER**. Az ornikopter a madarak evező szárnyú repülését utánzó légi eszköz. Kezdetben a repülés megszállottjai ilyen szerkezeteket akartak építeni. A LILIENTHAL testvérek is először egy csapkodó szárnyú repülőgép megalkotásán fáradoztak.



III.4. ábra Csapkodó szárnyú repülőgépek
forrás: [III.11], illetve <http://www.sciencemuseum.org.uk/>

MEREVSZÁRNYAS REPÜLŐGÉP, melyet a köznapi életben „csak” repülőgépnek nevezünk.



III.5. ábra Merevszárnyas repülőgép (Avro 698 Vulcan B2)
forrás: <http://www.airliners.net/>

FORGÓSZÁRNYAS az a **REPÜLŐGÉP**, mely a repüléséhez szükséges felhajtó (és esetleg) mozgató erőket forgószárnyával vagy forgószárnyaival hozza létre. A forgószárnyas repülőgépek — amennyiben a forgó szárnyat beépített erőgép forgatja — képesek lebegni, mivel a felhajtóerőt nem, vagy nemcsak a repülési sebességgel áramló levegő hozza létre. A forgószárnyas repülőgépek két fő csoportját alkotják a helikopterek és

az autogírók.

Mivel könyvünk a helikopterekkel, illetve az általuk keltett zajjal foglalkozik, azok szerkezetani osztályozásával a következő fejezetben külön foglalkozunk.

A kevésbé ismert – „a másik” – forgószárnyas repülőgép az autogíró. Az autogíró egy olyan forgószárnyas repülőgép, amelynek forgószárnyát a repülés közben hozzá érkező légáram – egyszerűen megfogalmazva az úgynevezett menetszél – tartja forgásban. Ezt a forgást hívjuk autorotációnak. A természetben is tapasztalható ilyen jelenség, ha például a szárnyas juharmag pörgését szemléljük, amint lehullva egész távolra jut a fájától. Az autogíró repüléséhez szükséges mozgatóerőt általában egy légsavarral hozzák létre.

Az autorotációs repülés tulajdonságával a helikopterek is rendelkeznek, de azok ezt csak mint vészleszállási lehetőséget használják. A forgószárny és a helikopterek autorotációs üzemmódját a IV. fejezetben részletesen tárgyaljuk.

Az autogíró forgószárnya – földön történő nekifutása során – a menetszél hatására forogni kezd és az így keletkező aerodinamikai vonóerő emeli a magasba, majd a haladó repülése során tartja fenn a levegőben. Kormányzására jobbra hagyományos (a merev szárnyas repülőgépeknél is alkalmazott) kormányfelületeket, valamint a forgószárnyat használják. Az autogírók haladási sebessége elérheti a 60–120 km-t is óránként és egyes konstrukciók közel voltak ahhoz, hogy rövid ideig egyhelyben lebegni is tudjanak. Hobby jelleggel használnak olyan autogírókat, melyet gépkocsi vontatással mozgatnak. Sőt, voltak olyan tervek is, hogy a híres és hírhedt német tengeralattjárók, az U-BOOT-ok által vontatott autogírokat használjanak haditengerészeti felderítésre.

Az első, gyakorlatilag használható autogíróat JUAN DE LA CIERVA spanyol konstruktőr építette. Az általa tervezett C-4 típusjelzésű autogíró első repülésére 1923. január 9-én került sor. Egyébként, DE LA CIERVA volt a világon az első pilóta, aki – 1928-ban – forgószárnyas repülőgéppel repült át a LA MANCHE-t, a Csatornát.



a



b

III.6. ábra Autogírók
forrás: a Szerző felvételei

Az autogírók fénykorukat az 1935–40-es években élték meg. CIERVA munkásságának jelentőségét az a tény emeli ki, hogy gépeit – licenc alapján, vagy anélkül – alkalmazta a brit, a francia, a japán, a német, a szovjet és az USA haderő. A

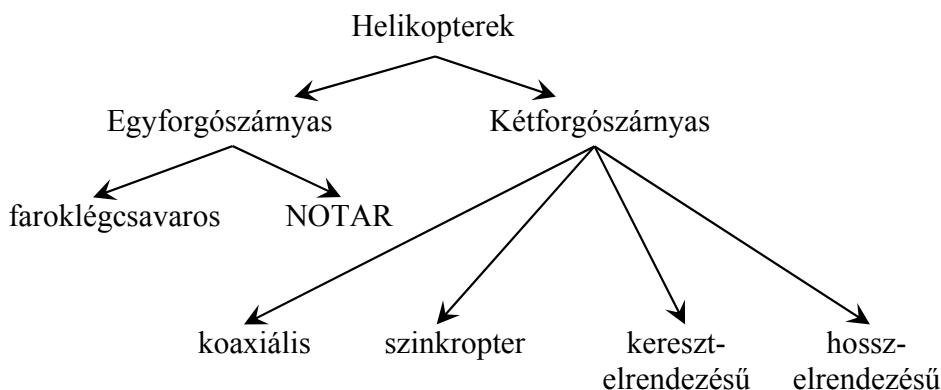
szovjet Vörös Hadsereg légieréjébe például 1941 nyarán vonult be az A-7-3a típusjelzésű autogíró, melynek „ősatyja” a DE LA CIERVA-FÉLE C-8 típus volt. A gép tervezésénél ismerős nevekkel találkozhatunk. Főkonstruktőrnek és az üzem igazgatójának NYIKOLAJ KAMOV-ot nevezik ki, helyettesének pedig MIHAIL MIL-t. (Később mindkettőjükről részletesebben is olvashatunk.)

DE LA CIERVA AVRO ROTA C-30A, majd később a C-40 típusjelű — az RAF Hendon-i múzeumában kiállított — autogírója látható a III.6.a ábrán. Napjainkban az autogírokat már csak sport- vagy hobbi célokra alkalmazzák. Egy ilyen szerkezet fényképe látható a III.6.b ábrán, mely Varsóban, a Technikatörténeti Múzeumban tekinthető meg. Az autogírók alapvetően nem képesek helyből fel- és leszállni, míg a helikoptereknek ez egy komoly előnyös tulajdonsága.

III.3. A HELIKOPTEREK CSOPORTOSÍTÁSA

A helikoptereket több szempont alapján tudjuk csoportosítani. Itt csak a későbbi elemzésekhez fontos szempontot a forgószárnyak számát, elhelyezését fogjuk vizsgálni. Ez a csoportosítás a helikopterek egyik fő szerkezettani kérdése, a — III.6.2. fejezetben leírásra kerülő — reakciónyomaték kiegyensúlyozása megoldásának módját is megmutatja.

A forgószárnyak száma alapján egy és több (gyakorlatilag csak két) forgószárnyas helikopterekről beszélhetünk (III.7. ábra).



III.7. ábra Helikopterek csoportosítása a forgószárnyak száma alapján

III.3.1. EGYFORGÓSZÁRNYAS HELIKOPTEREK

EGYFORGÓSZÁRNYAS, FAROKLÉGCSAVAROS HELIKOPTER

Napjainkban ezt tekinthetjük az „általános” helikopter kialakításnak. Korunk technológiai szintjén könnyen gyártható sorozatban. A faroklégcsavar a forgószárny reakciónyomatékának kiegyensúlyozását és a helikopter útirányú kormányzását oldja meg. Egyik legfőbb hátránya, hogy a faroklégcsavar a hajtómű teljesítményének körülbelül 8-10 %-át használja fel, ezáltal kisebb a forgószárny hajtásra rendelkezésre

álló hajtómű teljesítmény. Másik fő hátránya, hogy vezetéstechnikai szempontból ennek a kialakításnak a kormányzása a legbonyolultabb. De, ez a típus egyszerű szerkezete folytán a leggyakrabban alkalmazott megoldás.



III.8. ábra Egyforgószárnyas faroklégsaváros helikopter (Mi-24D)

forrás: <http://www.airliners.net/>

EGYFORGÓSZÁRNYAS NOTAR HELIKOPTER

A NOTAR (**NO T**ail **R**otor) kialakítás lényege, hogy az (egy) forgószárny reakciónyomatékát nem egy faroklégsavárral oldják meg, hanem a faroktartó kialakításával és a COANDĂ effektus kihasználásával.



III.9. ábra Egyforgószárnyas NOTAR helikopter (MD-530N)

forrás: <http://www.airliners.net/>

A COANDĂ effektus lényege, hogy a szilárd test — esetünkben a faroktartó — felszínét az őt körüláramló levegő követi. A testre úgymond „ráhajló” levegő görbült áramvonalai miatt nyomáskülönbség alakul ki a faroktartó két oldal között. A nyomáskülönbség következtében aerodinamikai erő keletkezik, mely nyomatékokot fejt

ki a helikopter súlypontjára.

A NOTAR kialakítás előnye a kisebb zaj és fedélzeti vibráció, valamint a nagyobb útirányú stabilitása oldal- és hátszél esetén. Hátránya, hogy a faroklégcsavarhoz képest nagyobb a teljesítményigénye, így kisebb a hatásfoka. Fő hátránya, hogy a COANDÁ effektus csak a méretezési üzemmódon működik megfelelően, attól való eltérések, például nagy sebességű vízszintes repülés, esetén akár meg is szűnhet.

III.3.2. KÉTFORGÓSZÁRNYAS HELIKOPTEREK

Mindegyik kétforgószárnyas helikopter kialakítás esetén a két forgószárny mindig ellentétes irányban forog. Így egymás reakciónyomatékát kiegyensúlyozzák.

A kétforgószárnyas kialakítás általános előnyének tekinthető, hogy nincs olyan teljesítmény elvonás, ami „csak” a reakciónyomaték kiegyensúlyozásához szükséges. Hátrányuk a bonyolult közlőműrendszer, mivel a forgószárnyak forgását szinkronizálni kell. Szintén jelentős problémát okoz a megfelelő, és így az igen bonyolult kormányvezérlő rendszer kialakítása.

HOSSZELRENDEZÉSŰ KÉTFORGÓSZÁRNYAS HELIKOPTER

Ennél a kialakításnál a két ellentétesen forgó forgószárnyat a helikopter hossz tengelye mentén helyezik el, a hátsót kissé feljebb. Előnye a hasznos teher könnyű ki- és berakodását biztosító törzskialakítás. Hátránya, hogy jelentős hosszmérettel jelentkezik, ami a repülőtereken, leszállóhelyeken történő mozgását, parkolását nehezíti. Szintén hátránya, hogy ferde pályán történő süllyedéskor a hátsó forgószárny az első által zavart áramlásban dolgozik, így hatásfoka romlik.



III.10. ábra Hosszelrendezésű kétforgószárnyas helikopter (Boeing CH-47D Chinook)
forrás: <http://www.airliners.net/>

KERESZTELRENDEZÉSŰ KÉTFORGÓSZÁRNYAS HELIKOPTER

Mint az a fenti megfogalmazásból kitűnik, a két forgószárnyat a helikopter kereszt tengelye mentén helyezik el. Előnye a hossz elrendezéshez hasonló

törzskialakítás. Sajátossága, a viszonylag alacsony fedélzeti vibráció, mivel a hajtóművek és reduktorok, valamint a forgószárnyak nem közvetlenül a törzs közelében helyezkednek el. Jelentős keresztirányú mérete következtében a repülőtereken, leszállóhelyeken történő mozgása, parkolása nehézkes.

Híres keresztelrendezésű helikopter típus a III.11. ábrán látható Mi-12 (V-12), illetve a FOCKE FW 61 (III.16. ábra), mely az első, minden követelményt kielégítő, helikopternek tekinthető.



III.11. ábra Keresztelrendezésű kétforgószárnyas helikopter (Mil Mi-12)
forrás: <http://www.airliners.net/>



III.12. ábra Koaxiális kétforgószárnyas helikopter (Kamov Ka-26)
forrás: <http://www.airliners.net/>

KOAXIÁLIS KÉTFORGÓSZÁRNYAS HELIKOPTER

A forgószárnyak koaxiális, egytengelyű elhelyezése lehetővé teszi a szükséges vonóerő biztosítását aránylag nem nagy átmérőjű forgószárny rendszerrel. A viszonylag kis méretek, a koncentrált tömegelhelyezés kis tehetetlenségi nyomatékokat hoznak létre. Ezért az ilyen kialakítású helikopterek nagyon jó manőverező képességgel bírnak. Hátránya, hogy általában az alsó forgószárny a felső zavart áramlásában dolgozik (speciális repülési helyzetekben viszont fordítva), ami hatásfok csökkenést jelent (III.12. ábra).

SZINKROPTER

A kevésbé ismert szinkropter sajátossága az átfedett kétforgószárnyas kialakítás. A két forgószárny tengelyét keresztirányban, egymástól viszonylag kis távolsága és viszonylag ki szögeltéréssel építették be. Előnyei és hátrányai lényegében megegyeznek a koaxiális megoldásával, de ebben az esetben mindkét forgószárny jelentős mértékben dolgozik a másik zavart áramlásában. Ez a konstrukciós megoldást lényegében csak a Kaman cég alkalmazza (III.13. ábra).



III.13. ábra Szinkropter (Kaman K-1200 K-Max)

forrás: <http://www.airliners.net/>

III.3.3. KOMBINÁLT HELIKOPTEREK

A kombinált helikoptereket általában a forgószárnyas repülőgépek egy csoportjának tekintik — a helikopterek, az autógírók, valamint (a következő fejezetben bemutatásra kerülő) konvertiplánok társaságában. A fenti csoportosítástól eltérően a következőkben röviden ismertetjük ezt a két kialakítású repülőgépet.

Kombinált helikopternek tekintjük azt a forgószárnyas repülőgépet, mely a felhajtóerőt a forgószárnya és merev szárnyfelülete és/vagy a mozgatóerőt a forgószárny és légcavar (esetleg sugárhajtómű) hozza létre A szárnyfelület és/vagy a

légcsavar alkalmazásával a forgószárnyat tehermentesítik, s így nagyobb vízszintes repülési sebességet lehet elérni. Egy-egy típus besorolásánál viták keletkezhetnek annak eldöntésekor, hogy az adott elem például áramvonalazott rakétakonzol vagy segédcsárny, melyen elhelyezték a rakétaindító síneket.



III.14. ábra Kombinált helikopterek (Mil Mi-6A)

forrás: <http://www.airliners.net/>

III.3.4. KONVERTIPLÁNOK

A konvertiplán (angol nevén tilt rotor aircraft — dönthető rotorú repülőgép) fel- és leszálláskor a forgószárnyakkal — pontosabban nagy átmérőjű légcsavarokkal — hozza létre a felhajtóerőt, majd vízszintes repülésre áttérve a vízszintes irányba elfordított tengelyű légcsavarok biztosítják a mozgatóerőt. Ekkor a merev szárnyfelületeken keletkezik a repüléshez szükséges felhajtóerő. A repülőgépek ezen csoportja átmenetet képez a merev és forgószárnyas repülőgépek között (III.15. ábra), mert fel- és leszálláskor lényegében forgószárnyas, vízszintes repüléskor merevszárnyas.



III.15. ábra Konvertiplán (Bell-Boeing MV-22B Osprey)

forrás: <http://www.airliners.net/>

III.4. A HELIKOPTEREK RÖVID TÖRTÉNETE

Mint az a könyv további fejezeteiből részletesen kiderül, egy helikopter forgószárnyának egyszerre kell megfelelnie a merevszárnyas repülőgép lassú (kis sebességű) és a hangsebesség körüli (nagysebességű) repülésénél fellépő problémáknak és az ezekből származó áramlástani, szilárdsági és szerkezeti követelményeknek.

Könnyen belátható, sok-sok aerodinamikai, szerkezeti és más műszaki problémát kellett legyőzni, hogy azt mondhassuk: van helikopterünk! Ez az oka annak, hogy a különböző szakirodalmak más-más személyhez, helyszínhez, időponthoz vagy típushoz kapcsolják az első helikopter megalkotásának dicsőségét. Az az igazság, hogy a fenti gondok miatt egy hosszú és nehéz út vezetett napjaink modern helikoptereihez. Sokan – híresek és névtelenek – tettek egy-egy kisebb vagy nagyobb, sikeresnek vagy sikertelennek tűnő lépést ezen az úton. Nos, akkor most nézzük röviden ezt az utat a Szerző korábbi [III.9] és [III.10] tanulmányai alapján.

III.4.1. A HŐSKOR

A kezdeti helikopterek (vagy csak inkább jóindulattal annak tekinthető repülő szerkezetek) nem voltak stabilak és kormányozhatóak, a stabilitást csak bizonyos mértékig tudták biztosítani a forgószárnyak pörgettyűs hatásával.

B. N. JURJEV orosz kutató a helikopterek stabilitási problémájával foglalkozott. Kifejtette, hogy a szerkezetnek egy forgószárnyból, aminek lapátjai állíthatóak, és egy úgynevezett kormánycsavarból (faroklégcsvárból) kell állnia, ami a forgószárny nyomatkát egyenlíti ki. 1910-ben egy úgynevezett egyforgószárnyas, faroklégcsváros gépet tervezett, ami sajnos nem készülhetett el.

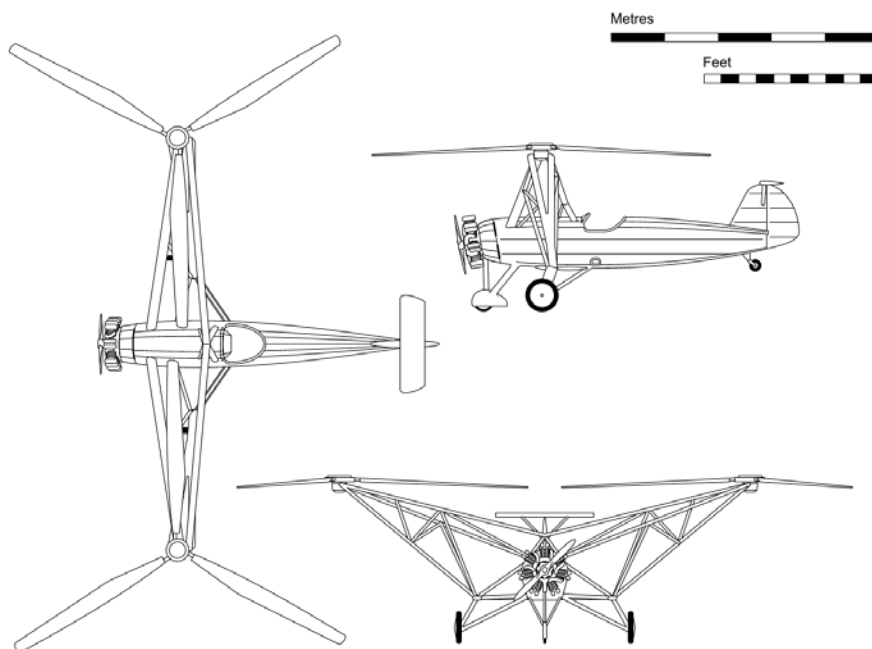
1915-ben a francia ALPHONSE PAPIN és DIDIER ROUILLY páros egy nagyon érdekes, aszimmetrikus törzskialakítású, reaktív hajtású, egylapátos repülőszerkezetet készített, melynek a GYROPTÈRE nevet adták. Kísérleti repülésére 1915-ben került sor egy franciaországi tavon. A szerkezet instabilitása miatt a pilóta kénytelen volt elhagyni a gépet, ami nem sokkal utána elsüllyedt a vízben [III.13]. Az amerikai PERRY 1920-ban tervezett helikoptert, melynek lapátjai már állíthatóak voltak a kormányzás és a mozgatóerő szabályozása érdekében.

A huszas években egy Párizsban élő argentin márki, bizonyos RAOUL PATERAS PESCARA, végzett kísérleteket, melyek során a RHONE típusú motor és a forgószárny közé kuplungot iktatott, azzal a céllal, hogy a hajtómű leállásakor kihasználhassák az autorotáció lehetőségét, és a gép veszély nélkül leszállhasson. Ezen a szerkezeten két ellentétes forgású, koaxiális forgószárnyat tartalmazó rendszert alkalmazott.

A helikopter történetében az első, hitelesen dokumentált, valóban stabil és megismételhető repülést 1937-ben a német HEINRICH FOCKE által tervezett FOCKE-WULF FW 61 típus hajtotta végre. FOCKE tanulmányozta elődei munkásságát és eredményeit, és arra az eredményre jutott, hogy az amerikai BERLINER eredményeit alkalmazza repülőgépe elkészítése közben.

Németországban, a Bréma melletti NEUENLANDER FELD-ről, 1937. június 26-

án szállt fel először a FOCKE FW 61-es típusjelzésű, egészen új konstrukciójú repülő szerkezet, amely mérföldkövet jelentett a repülésben, és ami lényegében elindította a helikopterek sikertörténetét (III.16. ábra). Jelen sorok írója, és a legtöbb helikopteres szakember szerint ez az esemény tekinthető a helikopteres repülés kezdetének – ha már feltétlen egy időponthoz akarjuk kötni azt.



III.16. ábra Focke Fw 61helikopter háromnézeti rajza
forrás: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fw_61.png

A Focke Fw 61 gép berepülő pilótája, EWALD ROHLFS, később pedig HANNA REITSCH pilótanő számos világrekordot állított fel az Fw 61-es helikopterrel, amelyet a repülés történetének olyan úttörői is megcsodáltak, mint CHARLES LINDBERGH és IGOR SIKORSKY.

III.4.2. A MODERN HELIKOPTERFEJLESZTÉS NAGYJAI

Ha a helikopterek fejlesztésének történetét, még ha csak röviden is, le akarjuk írni, a világban legelterjedtebb, modern helikopterek főkonstruktőreit és névadóit mindenképpen meg kell említenünk. Ők névsor szerint: NYIKOLAJ ILJICS KAMOV, MIHAIL LEONTYJEVICS MIL és IGOR (IVANOVICS) SIKORSKY.

NYIKOLAJ ILJICS KAMOV a Tomszki Műszaki Egyetem elvégzése után több tervezőintézetben, többek között francia repülőgép-tervező irodában is dolgozott. Amikor Moszkva mellett 1926 végén a Központi Aero- és Hidrodinamikai Intézet-ben (CAGI-ban) létrehoztak egy speciális kutatócsoporthoz a különféle elrendezésű autogírok és helikopterek kutatására, ő is csatlakozott hozzájuk. Frontszolgálat után

1940 és 45 között a Moszkvai Repülő Egyetemen egy olyan tervezőintézetben tevékenykedett mint főkonstruktőr, mely forgószárnyas szerkezetekkel foglalkozott. 1945-ben megalakította a saját – napjainkban már a nevét viselő – tervezőirodáját, ahol úgynevezett koaxiális forgószárnyas helikopterek fejlesztésével foglalkozott. Ezzel a kialakítással korábban már Pescara is Sikorsky és kísérletezett. Ezek közül hazánkban talán a legszélesebb körben ismert típus a Ka-26-os helikopter (III.12. ábra).

MIHAIL LEONTYJEVICS MIL Irkutszkban született, 1909. november 22-én. Már gyerekkorában repülőmodellezéssel foglalkozott, Tizenkét éves korában díjat nyert az egyik modelljével Tomszkban. 1925-ben kezdte tanulmányait a Szibériai Gépgyártástechnológiai Főiskolá-n Tomszkban, ahonnan ideológiai okokból hamarosan kizárták, mivel apja rabbi volt. Végül is 1931-ben fejezte be főiskolai tanulmányait, és a szovjet repülőgépipar egyik fő kísérleti központjában, a Moszkva melletti Zsukovszkij-ban található Központi Aero- és Hidrodinamikai Intézetben (CAGI) kezdett el dolgozni. Itt NYIKOLAJ ILJICS KAMOV helyetteseként vett részt a kutatómunkákban.

1947-ben MIHAIL MIL egy helikopterek kifejlesztésére Moszkvában létrehozott tervezőiroda főkonstruktőre lett. Vezetésével hozták létre az első sorozatban gyártott szovjet helikoptert, a Mi-1 helikoptert, melynek prototípusa már 1948-ban GM-1 típusjelzéssel repült. 1964-ben kinevezték az OKB-329 tervezőiroda vezetőjévé. Nevéhez fűződik a Mi-2, Mi-4, Mi-6, Mi-8, Mi-10 és Mi-12 (V-12) helikopterek tervezése. Utolsó munkája a keresztelrendezésű, kétforgószárnyas V-12 vagy Mi-12 típusjelzésű helikopter volt (III.11. ábra), amelynek első kísérleti repülésére már csak halála után került sor. Az általa tervezett helikopterekkel összesen 860 hivatalos világrekordot állítottak fel.

IGOR (IVANOVICS) SIKORSKY 1889. május 25-én született Kijevben, egy ötgyermekes lengyel család legfiatalabb gyermekeként – még SZIKORSZKI-ként. Ő tervezte az első stabil, sorozatgyártásra kerülő helikoptertípust. 1903 és 1909 között Szentpéterváron – közben (1906–1907) Párizsban is – tanult mérnöki tudományokat. 1908-ban, Németországban járva értesült ORVILLE WRIGHT-nak a FLYER-el tett történelmi, első motoros repüléséről, amivel kapcsolatban azt mondta: „Huszonnégy órán belül elhatároztam, hogy megváltoztatom életem célját, és aviatikával fogok foglalkozni.” 1909-ben ismét Párizsba, az európai repülés központjába ment. Ott több francia pilótával tudott találkozni, köztük BLERIOT-val, aki elsőként repülte át a Csatornát. Még abban az évben visszatért Kijevbe és elkezdte repülési kísérleteit, hogy egy koaxiális helikoptert építsen. Kis kitérőt téve, 1911-ben elkészítette az S-6-B merevszárnyas repülőgépet, melyet a cári hadseregben alkalmaztak is, bár csak kis számban.

Az I. Világháború után repülőműszaki szakemberként részt vett az oroszországi polgárháborúban – persze, nem a bolsevikok oldalán. Ez utóbbi ok miatt 1919-ben emigrált Oroszországból. Az Egyesült Államokban először iskolai oktatóként dolgozott, majd 1923-ban megalapította a Sikorsky Aero Engineering Company-t, melyben az orosz cári hadsereg volt tisztjei segítettek. A Sikorsky által tervezett VS-300-A helikopter 1941. december 8-án 1 óra 32 és fél perces repüléssel időtartam világrekordot állított fel. Ennek a típusnak a javított változata lett az első

katonai célra épített helikopter, a legendás R-4-es, mely első alkalommal 1942. január 13-án szállt fel.

Ha a helikopterek fejlődéséről beszélünk, mindenképpen meg kell említeni HENRI COANDĂ-nak személyét és munkásságát is. 1910-ben elsőként ő épített turbólégcsavaros repülőgépet, amelynek ventilátorszerű, csőbe helyezett sokágú légszárjáját gázturbina helyett még dugattyús belsőégésű motor hajtotta. Aerodinamikai kísérletei során fedezte fel a róla elnevezett effektust. A Coandă-hatást alkalmazzák a NOTAR kialakítású helikoptereknél.

III.4.3. MAGYAROK A HELIKOPTEREK TÖRTÉNETÉBEN

Mint az emberiség minden nagy vállalkozásában, így a helikopterfejlesztés történetében is fontos (rész)szerepet játszottak a magyarok

Időrendi sorrendben nézve az első fontos magyar esemény BARTHA MIKSA és Madzsar József szabadalma volt. Az 1909-ben 249 702. számú német birodalmi okirattal elfogadott szabadalom egy stabil és kormányozható emelő (helikopter-) forgószárny kialakításáról szólt. Megoldásukban a forgószárnylapátok csuklós bekötése tette lehetővé, hogy körbefordulásuk közben csapkodó mozgást végezzenek. A haladó mozgáshoz szükséges forgószárny-vonóerőt pedig a forgás síkjának megfelelő döntésével javasolták megoldani. Az egyértelműen kijelenthető, hogy a szabadalmukban javasolt technikai megoldások valamennyi mai helikopteren alkalmazott, a korszerű helikopter stabil és kormányozható repülését lehetővé tevő elvek egyik legelső megnyilvánulása [III.4].

A nemzetközi szakirodalom JUAN DE LA CIERVA-nak tulajdonítja a fent leírt, csuklósan bekötött forgószárny lapát találmányát, de az a valós tény, hogy CIERVA csak a szabadalom után jóval később, 1922-ben épített ilyen rendszerű gépet. Sajnos a magyar tudománytörténet sem tartja számon e két jeles feltalálót.

1916-ban PETRÓCZY ISTVÁN azt a javaslatot terjesztette be a felső katonai vezetésnek, hogy a megfigyelésre használt, ám az ellenségnek könnyű célpontot jelentő léggömböket váltsák fel helikopterekkel. PETRÓCZY ISTVÁN RÓL tudni kell, hogy 1910. szeptember 28-án ő vált az első magyar vizsgázott katonai pilótává. Később a Bécs melletti Fischamen-ben repülőkísérleti állomást hozott létre, ahova a kor legjobb szakembereit gyűjtötte össze a Monarchia egyetemeiről és tervezőirodáiból. Ebben az intézetében a PETRÓCZY ISTVÁN, KÁRMÁN TÓDOR és ZUROVECH VILMOS mérnökhármas kapta feladatuk egy ilyen légieszköz kifejlesztését, míg az emelőlégszár megtervezését és kivitelezését ASBÓTH OSZKÁRra bízták.

A PKZ (PETRÓCZY–KÁRMÁN–ZUROVECH) típusnéven ismertté vált helikopterek kétféle változatban készültek, elektromotoros és dugattyús belsőégésű motoros meghajtással. A PKZ–1 változatot a MÁG-nál, Mátyasföldön, a PKZ–2 változatot Pestszentlőrincen a Lipták gépgyárban építették meg.

Mindkét típus váza acélcsőből készült, a felemelkedést két, egymással szemben forgó ASBÓTH-féle emelőlégszár biztosította. Igen érdekes volt a súlypont alatt elhelyezett koaxiális rotorelrendezés, amivel a nyomatékkiegyenlítés automatikusan lehetővé vált. Az elektromotoros változatban a villanymotor földről kapta kábelen az áramot. A helikopterek helyben lebegésének stabilizálását kötelekkel történő kipányvázással biztosították. A munkálatokat 1917 végére befejezték, és a

következő év tavaszán kezdték meg a gyakorlati kísérleteket. Számos sikeres felszállást végeztek helikopterükkel, melyek során 50 méter magasságban történő, hozzávetőlegesen egy óráig tartó helyben lebegést is el tudtak érni. Ezzel végképp beigazolódott, hogy emelőlégsaváros szerkezetekkel megoldható a viszonylag nagy magasságba történő (szakmai megfogalmazásban a légpárnahatáson kívüli) felemelkedés, és általuk megvalósítható a huzamosabb ideig tartó helyben lebegés is. Igaz, távolról sem voltak még tökéletesek ezek a szerkezetek, de alapvetően megszabták a további fejlesztések irányvonalát.

KÁRMÁN TÓDOR a világon elsőként mutatta meg, hogy a helikopter ilyen, a súlypont alatti elrendezés mellett is stabil. A PKZ-helikopterek kísérletei a maguk korában a világ legjobb eredményeinek számítottak. A további kutatásoknak az I. világháborút lezáró békeszerződések vetettek véget.

A körösközi Pankotán született ASBÓTH OSZKÁR nem elégedett meg a PKZ kötött helikopter nyújtotta eredményekkel, hosszas kísérletezés, több mint 10 év után elkészítette AH-1 nevet viselő szerkezetét, amely 1928-ban emelkedett fel először. ASBÓTH négy repülőszerkezetével összesen 192 kísérleti repülést hajtottak végre, ez idő alatt 29 órát töltöttek a levegőben. A legnagyobb magasság 30–50 m között volt.

Az AH-4-gyel ASBÓTH munkatársai 95 felszállást végeztek, összesen 3 óra 43 perc időtartamban. Asbóth agilitása ellenére sem külföldön, sem pedig Magyarországon nem mutatkozott állami szintű szponzori érdeklődés a kísérletek iránt. Mivel ASBÓTH pénze elfogyott és a gép műszaki állapota is folyamatosan romlott, egy időre be kellett fejezni a kísérleteket. Az AH-4 1931. május 31-én repült utolsó alkalommal.

Itt meg kell említenünk azt a szakmai körökben eléggé elterjedt nézetet, miszerint ASBÓTH feltehetően némileg „kozmetikázta” az általa elért eredményeket. Egyik „érdekes tény” a szerkezetek repüléseiről készült fotókon az alatt állók furcsa kéztartása, amivel a körülállók a gépre mutatnak. (Lehet, hogy a biztosító köteleket tartják?) Az viszont egyértelműnek tekinthető, hogy az Asbóth által választott út nem vezethetett eredményre. Sajnos csak azt sikerült bizonyítania, hogy az általa javasolt elrendezés nem életképes [III.2].

Az első magyar tervezésű helikopter megalkotását jelentette SAMU BÉLA, OROSZ JENŐ és HATHÁZI DÁNIEL 1954-ben elkezdett munkája.

A SOH-1 típusnévre keresztelt helikopter hatlapátos forgószárnya, illetve annak agykialakítása és forgószárny-vezérlése műszaki szempontból igen érdekes volt, pörgettyűs stabilizátort tartalmazott és a kitérítéssel arányos kormányerőt szolgáltatott, ami HATHÁZI DÁNIEL szabadalma. Hatásos stabilizáló rendszerével és a kormányerő érzékelhetőségével olyan jelentős lépést jelentett a helikopterek konstrukciójának fejlesztésében, hogy irántuk nagyon komoly nemzetközi érdeklődés is megnyilvánult. A helikopter prototípusa alapos kutatások, távirányítású, szabadon repülő modellel végzett sikeres kísérletek után épült meg. A helikopterrel végül a hosszú tervezés és a sok probléma után egy – a repülőgép-vezetői hiba miatt bekövetkezett – szerencsétlen berepülési kísérlet végzett 1960-ban. A motorpróba során a helikopter kissé megemelkedett, majd a talajra visszaérve az oldalára dőlt és a forgó forgószárny összetört, és a törzs szerkezete is súlyosan károsodott. A további kísérletek – pénzühiány miatt – nem folytatódhattak.

III.4.4. A HELIKOPTEREK ALKALMAZÁSAINAK TÖRTÉNETE

A forgószárnyas repülőgépek alkalmazásának története lényegében egyidős a helikopterek fejlődéstörténetével. Az Osztrák–Magyar Monarchiában, annak hadseregében PETRÓCZY ISTVÁN javaslatára indult meg a PKZ kötött felderítő helikopterek fejlesztése.

CIERVA C-30 jelzésű autogíróját több haderő alkalmazta a III. Világháború előtt és alatt. A világháború kitörése előtt a francia haderőben már 52 db – LeO C-30 típusú –, licenc alapján gyártott autogíró szolgált. A francia haditengerészetnek is volt 8 gépe, melyek hajók felderítését végezték, és 1940. május végéig őrzőrajtoztak a La Manche felett. Az amerikaiak 1944 áprilisában, Burmában hajtottak végre első alkalommal légi felderítést és kutató-mentő feladatot helikopterrel a kínai–burmai–indiai határ térségében. Egy R-4-es 1944. április 25-én három sebesült brit katonát és egy szövetséges pilótát mentett ki a japánok által megszállt területől, mintegy 250 km mélységből. Ez akkor nagy tettnek minősült. De még előtte, ugyanazon év januárjában már végrehajtották az első polgári mentőfeladatot is az Amerikai Egyesült Államokban. Ekkor egy gőzhajón történt robbanás sebesültjeinek szállítottak R-4 helikopterrel vérplazmát, ráadásul erős hóesésben.

A FOCKE–WULF cég 1939 közepére elkészítette az Fa-266 típus első példányát, melyet átkereszteltek Fa-223-ra. 1944 végén 400 gépes rendeltést kapott a cég. A németek tömeges helikoptergyártása azonban nem volt sikeres, mert a szövetségesek bombatámadásai következtében az üzemek jelentős része elpusztult. 1945 elején egy szállítórepülő-század állományában volt még néhány Fa-223-as és Fi-282-es helikopter. A helikopterek szállító-, futár- és tüzérségi tűzhelyesbítő feladatokat láttak el.

Az Fa-223 típus egyik nevezetes harci alkalmazása az volt, amikor 1945 februárjában – ADOLF HITLER személyes parancsára – a körülzárt Breslauból ki kellett menekíteni KARL HANKE gauleitert. A feladatot végrehajtó gép 16,5 óra alatt 1665 km-t repült és végrehajtotta a feladatot. Egy másik eset már magyar vonatkozású. A magyar királyi honvédség 210 mm-es lövegekkel felszerelt 103/2. ütege 1944 decemberében az Eperjestől keletre fekvő Galambos község mellett foglalt tüzelőállást. Az ütegnek nem állt rendelkezésére a magyar 102 kg-os repeszgránát, ezért a németek helyette ugyanolyan kaliberű, de fele akkora súlyú, olasz hajóágyú-lövedékeket szállítottak egy Fa-223-as helikopterrel.

Az 1950–1953 közötti koreai háborúban a katonai helikoptereket elsősorban a III. Világháborúban kialakult klasszikus feladatokra alkalmazták, csak jelentősebb mennyiségben. Az eszközök alkalmazásának pozitív tapasztalatai alapján az USA-ban beindították a tömeges helikoptergyártást. A helikopterek katonai alkalmazása és fejlesztése szempontjából a legnagyobb impulzust a vietnami háború 10 éve (1961–1971) adta. A helikopterek ekkor már pótolhatatlan kutató-mentő eszközként is helytálltak. Az 1965–1969 közötti időszakban 40471 embert mentettek ki, ezen belül a katapultált hajózóállomány 55%-át. A vietnami háborúban a helikopterek harci alkalmazásának tapasztalatai egyértelműen megdöntötték azokat a szkeptikus véleményeket, amelyek szerint rendkívül magas lesz a helikopterek légvédelmi eszközöktől elszenvedett vesztesége. A helikopterek harci veszteségei a háború 10 éve

alatt 1900 db gép, míg a nem harci veszteség 2300 db volt. 590 harci bevetésre jutott egy lövedéktalálat, és 6600 bevetésre jutott egy teljes helikopter megsemmisülés.

A Mi-24 Hind harci helikopter típus első repülése után 10 évvel az akkori Szovjetunió bevetette csapatait Afganisztánban. A harcok folyamán valamivel több, mint 400 helikoptert alkalmaztak, melyek személyzetei éves váltásos rendszerben teljesítettek szolgálatot és kb. 300–400 bevetésen vettek részt egy év alatt. Az afgán ellenzék erősödő légvédelme a szovjet repülőcsapatoknak jelentős veszteségeket okozott. Legnagyobb veszteségük a Mi-8 Hip szállító helikoptereknek és a Mi-24 Hind különböző változataival felszerelt helikoptercsapatoknak volt: mintegy 335–340 db-ot vesztek, ennek kb. 65–70%-a harci, 30–35% nem harci veszteség volt. Afganisztánban 1988-ban 2273 bevetésre jutott egy teljesen megsemmisült szovjet helikopter [III.12].

A harci helikopterek az (első) Öböl-háborúban nemcsak a harcokcsikra, hanem más objektumokra is mértek csapásokat. Kevésbé ismert tény, hogy az iraki csapatok elleni légitámadás első feladatát egy helikopterkötelék kapta, amikor éjszaka megtámadták Irak 700 kilométeres mélységben lévő kulcsfontosságú légvédelmi irányító központját. Azért választották a katonai vezetők ezt a nagyon kockázatos megoldást, mert csak a vezetési pont sikeres megsemmisítése eredményeként indulhatott meg a szövetséges légierő támadása a kijelölt célpontok ellen. A sokkal gyorsabb (merevszárnyas) repülőgépes támadás esetén nem tudták volna azonnal, és pontosan felmérni (esetleg „javítani”) a támadás eredményét, ami kulcsfontosságú volt az első tömeges légi csapás sikere szempontjából [III.6].

Bár az előzőekből úgy tűnhet, mintha a helikopter csak katonai eszköz lenne, de a polgári alkalmazása is igen széles spektrumot takar. A fentiekben leírt katonáinak tűnő előnyös tulajdonságokat a polgári élet területén is kamatoztatják. Kihhasználva, hogy a helikopterek kis helyen le tudnak szállni, majd onnan felszállni, hogy fordulékonyak, képesek lebegni egy adott pont felett, a polgári életben is egyre nagyobb szerephez jutnak. Csak pár példát rá. Már folyamatos légi mentőszolgálatot látnak el helikopterekkel, betegszállításra vagy baleseti mentésre. A mezőgazdaságban előszeretettel alkalmaznak – főleg hegyvidéki területen – helikoptereket permetezésre, műtrágyaszórásra. A helikoptereket, ha szükséges, bevetik tűzoltásra, daruként úgynevezett beemelési, árvizeknél mentési, ellátási vagy gáterősítési feladatokra is.

III.5. A LEVEGŐ ÁLLAPOTJELZŐI

A repülő szerkezetekre ható légerők, a hajtóművek teljesítményei lényegesen függenek a környező levegő állapotától, vagyis az állapotjelzőitől: a nyomástól, a hőmérséklettől és a sűrűségtől [III.8]. Ezen állapotjelzők a tengerszint feletti magasság függvényében változnak, sőt ugyanazon magasságon is más-más légköri viszonyokat találhatunk különböző földrajzi helyen vagy időjárási körülmény esetén.

Légkör réteges szerkezetű, olyan gömbhéjakból áll melyek bizonyos fizikai tulajdonságokban eltérnek egymástól. A légkör legalsó rétege a troposzféra. Mivel a troposzféra a mérsékelt sebességű repülések légtere, jelen fejezetben csak ezzel a légköri réteggel foglalkozunk.

Az átlagosan 11 km vastag troposzféra legfontosabb tulajdonsága a hőmérséklet csökkenése a magasság növekedése esetén. Túlnyomórészt ebben a rétegben mennek végbe a meteorológiai folyamatok (a felhőzet képződése, átalakulása és a lecsapódások). Jelentős sebességű függőleges légmozgások találhatók benne.

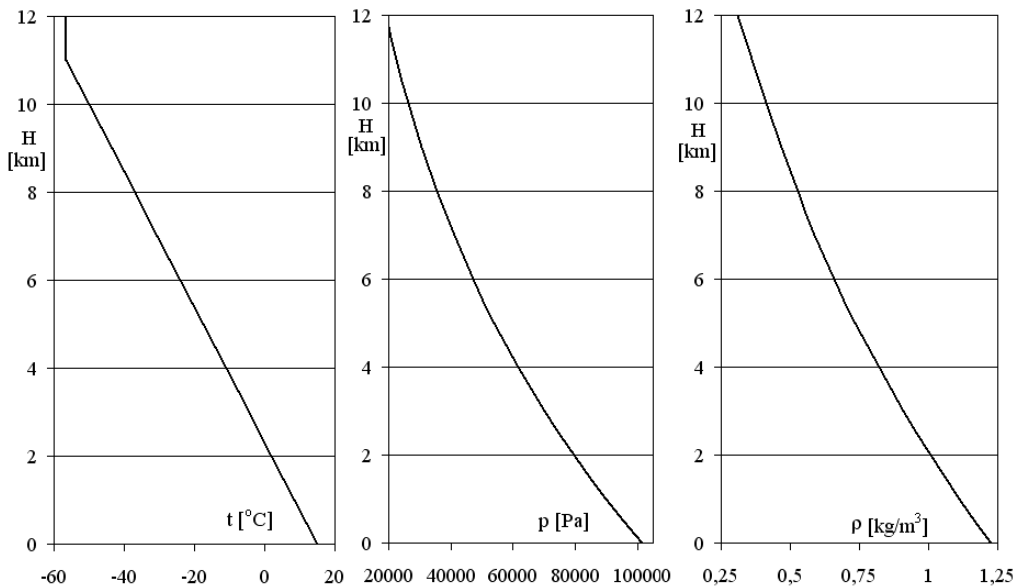
A levegő állapotjelzői (nyomás, hőmérséklet, sűrűség) a légkörben helyről helyre és időről időre változnak. Az egyes légköri rétegek jellemzőit, jelenségeit repülőgépekkel, rádiószondákkal, magas-légköri rakétákkal és műholdakkal nemzetközi együttműködésben kutatják

A repülési adatok egységes vonatkoztatási alapjának megteremtésére és nem utolsó sorban a repülőgép hajtóművek, áramlástanai gépek (például gézturbinás hajtóművek) átvételi méréseinek szabványosítása, teljesítményadatainak összehasonlíthatósága végett vezették be az úgynevezett NEL — Nemzetközi Egyezményes Légkör (International Standard Atmosphere) fogalmát. Adatait 1950 óta az ICAO (International Civil Aviation Organization — Nemzetközi Polgári Repülési Szervezet) határozza meg a tengerszint alatti 500 m-től a tengerszint feletti 32 km-ig.

A NEL alapadatai ($H = 0$ km — a tengerszint magassága Amsterdammál):

Hőmérséklet: $t \quad 15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (288 K)
 Nyomás: $p \quad 101325 \text{ Pa}$ (760 torr)
 Sűrűség $\rho \quad 1,225 \text{ kg/m}^3$

A hőmérséklet a troposzférában felfelé lineárisan csökken. A csökkenés előírt értéke kilométerenként $6,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. A levegő állapotjelzőinek változását a Troposzférában a III.17. ábra szemlélteti.



III.17. ábra Légkör állapotjelzői a Troposzférában
 [III.8] alapján

A barometrikus magasságmérő műszer mutatta magasság az úgynevezett nyomásmagasság, mivel a magasságmérő — lényegében egy barométer — a légkör nyomását méri, de a számlapja a NEL szerinti magasságokra van beosztva. A nyomásmagasság tehát nem más, mint a repülési magasságban uralkodó légköri nyomásnak megfelelő NEL szerinti magasság.

A másik ilyen fontos magasság a sűrűségmagasság. Az a NEL szerinti magasság, amelyen a levegő sűrűségének értéke megegyezik a repülési magasságon lévő tényleges légsűrűséggel. Repülési teljesítmények és hajtómű teljesítmények szempontjából ez a magasság a mérvadó.

III.6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [III.1] A repülőgépek fejlődése,
<http://www.sulinet.hu/fizika/anyagok/repulo/repulooxx.htm>
- [III.2] Asboth Oszkár helikopter kísérletei, <http://www.asbothoszkas.fw.hu/>
- [III.3] Az idén százéves a helikopter,
<http://www.aeromagazin.hu/rovatok/friss/sporthobby/zgto9o9o9/>
- [III.4] Bödök Zsigmond: Magyar feltalálók a repülés történetében, NAP Kiadó, Dunaszerdahely, 2002., pp. 146.
- [III.5] Kenyeres Dénes: Helikopterek a magyar haderőben. „Fél évszázad forgószárnyakon a magyar katonai repülésben”. Tudományos konferencián elhangzott előadás, Repüléstudományi közlemények elektronikus különszám (CD ROM), 2005. április 15. Szolnok <http://www.szrfk.hu/rtk/index.html>
- [III.6] Kormos László: A helikopterek katonai alkalmazásának tapasztalatai, Hadtudomány, VIII. évfolyam 3. szám 1998. szeptember
- [III.7] Pokorádi László: Teherkidobás, illetve ejtőernyős ugrás hatása a kétforgószárnyas koaxiális elrendezésű helikopter stabilitására és kormányozhatóságára, főiskolai tudományos diákköri dolgozat. MN. KGyRMF, Szolnok, 1980, pp. 63. (Konzulens: Tóth Mihály)
- [III.8] Pokorádi László: Aerodinamika I., Ideális közeg általános aerodinamikája, főiskolai jegyzet, MH. SzRTF, 1993., pp. 142.
- [III.9] Pokorádi László: 1907–2007: A forgószárnyas repülés első száz éve, Korunk. 2007. december, 36–45. oldal.
- [III.10] Pokorádi László, A helikopteres repülés első 100 (?) éve, Debreceni Szemle, Debrecen, 2009/1., p. 175-178.
- [III.11] Repülési Lexikon, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
- [III.12] Szilvássy László: A harci helikopterek fegyverrendszerének modernizációs lehetőségei a Magyar Honvédségben. Doktori (PhD) értekezés, ZMNE. Budapest, 2008. pp. 129.
- [III.13] Thales Gyrotère Past, <http://davidszondy.com/future/Flight/gyroptere.htm>

MAGYAR TUDOMÁNYOS AKADÉMIA DEBRECENI TERÜLETI BIZOTTSÁGA (DAB)



Az 1976-ban alapított DAB egyike az MTA öt területi bizottságának. A DAB tevékenysége három megyére terjed ki: Hajdú-Bihar, Szabolcs-Szatmár-Bereg és Jász-Nagykun-Szolnok megyék tudományos létét van hivatva összefogni. A két szomszédos megye külön-külön önálló szakbizottsággal van jelen a DAB munkájában. A területi bizottságok határát a DAB vezetése azonban mindig rugalmasan értelmezte, tudományos programjai gyakran terjednek ki azon túlra. Nagy figyelmet fordít arra a bizottság vezetése, hogy az országhatáron túl is segítse a tudományos élet szervezését, s a regionalitást a legtágabban értelmezve építse ki kapcsolatait a hozzá közel eső országok tudósaival.

Az épületet a DAB megalapítása után 5 évvel, 1981. április 14-én avatták fel. Tervezője Kertai László debreceni építész, aki kényszerű körülmények között, zömében házigyári elemekből alakította ki. Belsőépítész a szintén debreceni Mohácsi Péter volt, az épületet övező szép parkot pedig Dobos Sára kertépítő mérnök tervezte.

Az MTA határon túli magyar köztestületi tagjai közül a következőkkel tart közvetlen kapcsolatot: Ukrajna kutatói, valamint Románia északi részének tudományos munkatársai (összesen mintegy 360 személy).

A DAB funkciója - hasonlóan más akadémiákéhoz - kettős:

Egyfelől a területén dolgozó tudományos közösség munkáját igyekszik minden módon segíteni, számára a nyilvános fórumokat s a kutatást elősegítő eszmecserék alkalmait megteremteni. A tudományos eredmények megvitatásának ilyen fórumai lehetnek a konferenciák, workshop-jellegű rendezvények, neves szakemberek előadásai, jubileumi ülésszakok s a tudományos élet képviselőinek egyéb jellegű találkozói. Különösen is támogatja a DAB az interdiszciplináris megbeszéléseket, a regionális témák megvitatását s az országos és nemzetközi méretű összejöveleteket. A kötetlen kollegiális találkozások lehetőségét kívánja megteremteni a DAB- klubja, amelyről alább bővebb tájékoztatás található.

Másfelől a DAB a társadalom minél szélesebb rétegei felé igyekszik képviselni a tudományos közösséget, a tudományosan is megalapozott álláspontokat és véleményeket, s azokat minden módon igyekszik népszerűsíteni is. A korunkban elterjedt számos áltudományos nézettel szemben a felvilágosítás, a kutatási eredmények közérthető megfogalmazása látszik leginkább célravezető útnak, a bizottság ennek lehetőségeit is igyekszik megragadni.

Reméljük, hogy hasznos lesz az Olvasó további tájékozódása a DAB tevékenységét illetően s, figyelemmel kíséri rendezvényeinket, amelyeken szeretettel várjuk az érdeklődőket.

www.airportdebrecen.hu



REPÜLJÖN DEBRECENBŐL!



- Egyszerű check-in
- Gyors megközelítés
- Családias, kellemes várótermek
- Ingyenes vagy őrzött-fizetős parkolás



Tel: 52/518-800 office@airportdebrecen.hu Fax: 52/518-802

A FORGÓSZÁRNY AERODINAMIKA ALAPJAI A FORGÓSZÁRNY MOTOROS ÜZEMMÓDJA

IV.1. BEVEZETÉS

A forgószárny a helikopter legfontosabb és legösszetettebb szerkezeti eleme. Feladata a repüléshez szükséges felhajtó-, valamint mozgatóerő létrehozása, a helikopter stabilitásának és kormányozhatóságának a biztosítása. A forgószárny fő részei az agy és a lapátok. A lapátok hozzák létre a forgószárny vonóerejét. Az agy fogja össze a lapátokat, átadja a lapátoktól a helikopter törzsére a vonóerőt, illetve a hajtómű(vek)től a forgató nyomatékot, teljesítményt a lapátok forgatásához.

Forgószárny működése során, a levegőt általában felülről szívja és nyomja maga alá — ezt nevezzük *motoros üzemmódnak*. Ha pedig az alulról érkező levegő átáramlási sebességét csökkenti, *autórotációs üzemmódról* beszélünk. Ez utóbbi üzemmódot a IV. fejezetben külön vizsgáljuk.

Jelen fejezetben — a IV.7 alfejezetben felsorolt szakirodalmakra támaszkodva — előbb, a IV.3. fejezetben, a forgószárnyak működéséhez szükséges aerodinamikai ismeretek olvashatók. A IV.4. fejezetben a forgószárny geometriai és üzemmód jellemzőit ismertetjük. Ezt követően a forgószárny motoros üzemmódjának működését írjuk le az impulzus (IV.5. fejezet), majd az úgynevezett lapelem-elmélet (IV.6. fejezet) segítségével. Elemzéseink, ismertetéseink „csak” olyan mélységben történnek, melyek a helikopter működésének, repülésének alapvető megértéséhez szükségesek.

IV.2. A FEJEZETBEN ALKALMAZOTT ÁLTALÁNOS JELÖLÉSEK

A felsorolás nem tartalmazza a IV.4. fejezetben ismertetésre kerülő geometriai és üzemmód jellemzőket.

A	—	felület; keresztmetszet;
c_D	—	ellenállási erő tényező;
c_L	—	felhajtóerő tényező;
D	—	ellenállási erő;
G	—	súlyerő;
L	—	felhajtóerő;
M	—	Mach-szám; nyomaték;
m	—	tömegáram;
N	—	centrifugális erő
P	—	teljesítmény;
p	—	statikus nyomás;
Q	—	tangenciális erő;
R	—	eredő légerő;
T	—	vonóerő;

t	—	hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
u	—	kerületi sebesség;
$V; v$	—	sebesség;
w	—	eredő megfűvási sebesség;
α	—	állásszög;
β	—	felcsapási szög;
γ	—	az eredő légerő hátradőlési szöge;
η	—	hatásfok
ρ	—	sűrűség;
ν	—	a sebességi háromszög szöge;

IV.3. ÁRAMLÁSTANI ALAPOK

Jelen fejezetben a későbbiekben leírtak megértéséhez szükséges minimális áramlástani ismereteket rögzítjük. Mélyebb áramlástani ismertetek szerezhetők a [IV.12]; [IV.13] és [IV.14] irodalmakból

IV.3.1. AZ AERODINAMIKAI FELHAJTÓ ERŐ

Aerodinamikai felhajtóerő akkor keletkezik, ha az azt létrehozó test — ami esetünkben egy szárnyprofil — a közeghez képest valamilyen sebességgel mozog. Vizsgálatunkhoz előbb írjuk fel a folytonossági törvény

$$vA = \text{állandó} \quad (\text{IV.3.1})$$

legegyszerűbb alakját. Majd a BERNOULLI egyenlet azon egyszerű alakját, ahol a levegő oszlopból származó nyomáskülönbséget elhanyagoljuk:

$$\frac{\rho}{2} v^2 + p = \text{állandó} \quad (\text{IV.3.2})$$

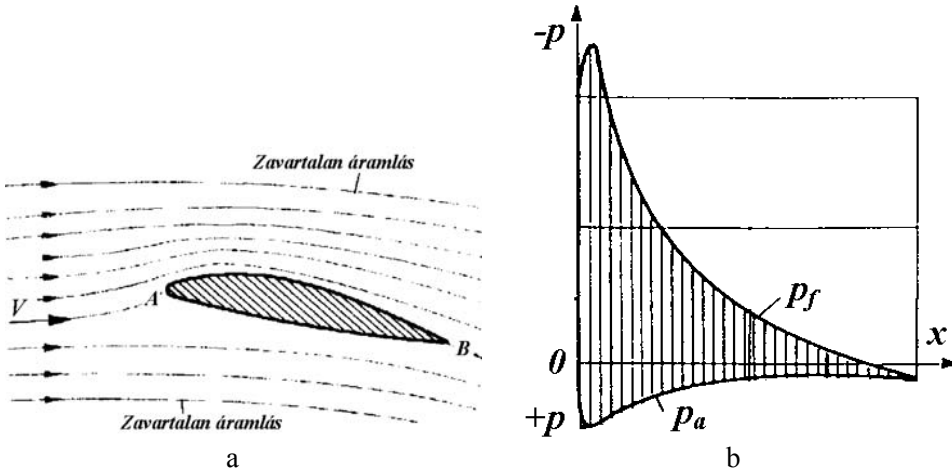
A szárny szelvény körül a IV.1.a ábrán látható áramkép alakul ki.

Egy szárnyprofil α állásszögén a metszet húrja — a két legtávolabbi pontját (a be- és kilépő élet) összekötő egyenes — és a zavartalan áramlás iránya által bezárt szög.

Az áramlást az **A** torló pontban látszólag megszűnő, és a **B** torló pontban újrainduló áramvonal felső és alsó részre osztja. A szárny felett és alatt – töle bizonyos távolságban – zavartalan áramvonalakat látunk. A szárny felett az áramvonalak összesűrűsödnek és ismét távolodnak egymástól, hogy a szárny kilépő éle mögött kellően nagy távolságban újra a szárny előtti zavartalan, párhuzamos áramlás alakuljon ki. A szárny alatt az áramvonalak — az ábrán láthatóan — hasonló módon viselkednek, de az áramlási keresztmetszetek különbözősége miatt kisebb mértékben.

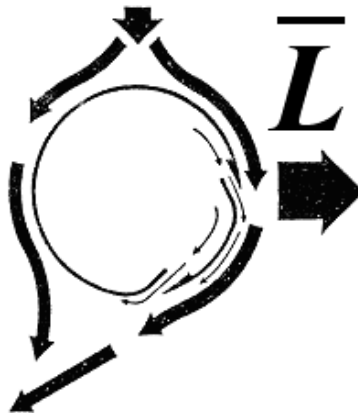
A folytonossági törvény — (IV.3.1) egyenlet — alkalmazásával az áramképből megállapíthatjuk, hogy a szárny felett az áramlás — az áramcső nagyobb mértékű szűkülése miatt — jobban gyorsul fel, mint a profil alatt. A (IV.3.2)

BERNOULLI egyenlet értelmében ezért ott a statikus nyomás nagyobb mértékben csökken, mint a szárnyprofil alatt. Ennek következtében a szárnyprofil alsó és felső felületei között nyomáskülönbség lép fel (IV.1.b ábra). A nyomáskülönbség hatására pedig a zavartalan áramlás irányára merőleges erő keletkezik. Ezt az erőt nevezzük **aerodinamikai felhajtóerőnek**.



IV.1. ábra Szárnyszelvény körüli áramlás

Célszerű itt megjegyezni, hogy az aerodinamikus felhajtó erőt létrehozó nyomás különbséget a szárnyprofil körüli aszimmetrikus sebességeloszlás okozza. Egy áramlásba helyezett test körüli aszimmetrikus sebesség eloszlást más módon is létre tudunk hozni. Jó példa erre a pörgetett labda, ami körül repülése során aerodinamikai erő keletkezik, melynek következtében csavarodik, azaz a ballisztikus pályáról eltér. A NOTAR helikoptereknél a COANDĂ effektus kihasználásával hozzák létre az előbb említett aszimmetrikus sebesség-eloszlást. Ezt szemlélteti a IV.2. ábra.



IV.2. ábra COANDĂ effektus

IV.3.2. AZ AERODINAMIKAI ELLENÁLLÁS

Mint minden áramlásba helyezett testen, így a szárnyon, szárnyprofilon is légellenállás keletkezik. Az aerodinamikai ellenállás — keletkezési módja szerint — három fő részből tevődik össze: alaki-; súrlódási-; és indukált ellenállásból.

Az alaki ellenállás a test alakjától függ, szárnyak esetében az úgynevezett üzemi állásszög-tartományban közel állandó értéket mutat.

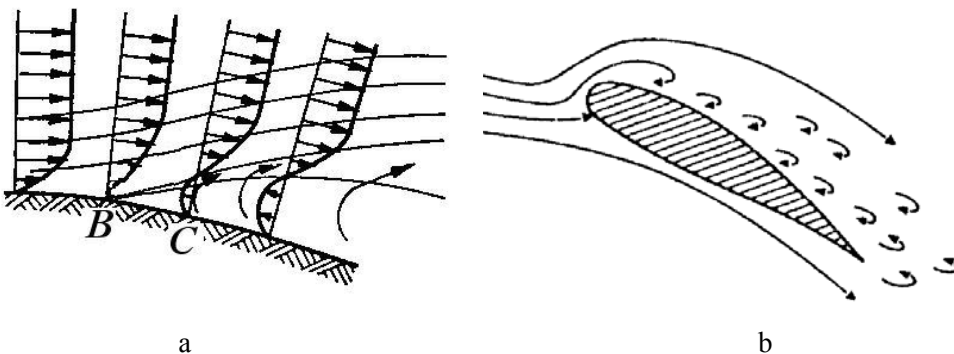
A súrlódási ellenállás az áramlásba helyezett test fala és az áramló közeg között — a határrétegben — kialakuló súrlódó erő, mely a test mozgását akadályozza. Nagysága egy szárnyprofil üzemi állásszög-tartományában állandónak tekinthető. Az alaki és súrlódási ellenállást együttesen profil ellenállásnak is nevezzük.

Az indukált ellenállás a szárny véges voltának következménye és a felhajtóerő keletkezésével függ össze. Az indukált ellenállás nagysága a (később ismertetendő) felhajtóerő-tényező négyzetével arányos.

Egy szárnyprofil felső kontúrjának fala mellett szűkülő áramlási csatorna esetén — a határrétegen kívüli áramlásban fellépő sebességnövekedés miatt — a határréteg kevésbé fog vastagodni, mint egy síklap esetében. Jelentős minőségi eltérés lesz a sík és a görbült felület menti határrétegek között a táguló áramlási keresztmetszet esetén.

A IV.3.a ábra egy táguló csatornában történő áramlást mutat. Ekkor a kontinuum a nagyobb nyomás irányába áramlik (mivel a sebessége — a kontinuitás elve értelmében — csökken). A határrétegben található részecskék sebessége, mozgási energiája is csökkenni fog. Ennek okai:

- a súrlódás miatt fellépő energiaelnyelődés;
- a határrétegen kívüli sebesség csökkenése a táguló csatorna miatt;
- a csatornában fellépő nyomásnövekedés.



IV.3. ábra A határréteg leválása

A fentiek következtében keletkezhet az áramlásban egy olyan (a IV.3.a ábrán **B**-vel jelölt) pont, ahol a határrétegben lévő részecskék mozgási energiája — így sebessége — zérusra csökken. Ebben az esetben a részecskék mozgását a csatornában uralkodó nyomáseltérések fogják meghatározni. Mivel a csatornában uralkodó statikus

nyomás az áramlás irányában növekszik, a fal melletti részecskék visszafelé kezdenek mozogni (lásd a *C* pontot). Ekkor ***a határréteg leválik a falról.***

A IV.3. ábrán szemléltetett és fent leírt jelenséget ***áramlásleválás***nak nevezzük. Az áramlásleválás a szárnyprofil kritikus állásszögénél következik be, és ekkor a szárny alaki ellenállása hirtelen növekedni kezd. Ezzel egy időben a szárnyon keletkező felhajtó erő intenzíven csökkenni fog.

Fontos itt külön megjegyezni, hogy a helikopter törzsén több olyan felületet (például konzolok, futómű szár, permetező csőrendszer) találhatunk, ahol szintén fellép az áramlás leválás. Ezek, a törzsről leváló örvények keltik az úgynevezett sárkányzajt.

IV.3.3. A POLÁRIS

A szárnyakat, szárnyprofilokat aerodinamikai szempontból az aerodinamikai (felhajtó erő ellenállás) tényezőikkel jellemezzük.

A felhajtóerő nagyságát a c_L felhajtóerő tényezővel jellemezhetjük, ami alapján a felhajtó erő a

$$L = \frac{\rho}{2} v^2 A c_L \quad (IV.3.3)$$

egyenlettel számítható. A felhajtóerő tényező a szárnyprofil kialakításától és állásszögétől függ. Azt az állásszöget, ahol nem keletkezik felhajtóerő a szárnyon, α_0 -al jelöljük.

Az úgynevezett üzemi állásszög tartományban (amikor $\alpha_0 < \alpha < \alpha_{kr}$) a felhajtóerő, illetve a c_L tényező az állásszöggel egyenes arányban változik, majd a kritikus állásszög elérésekor hirtelen csökken (IV.4. ábra)

Az ellenállási erőt a c_D ellenállási tényezővel jellemezzük, felhasználásával az ellenállási erő a

$$D = \frac{\rho}{2} v^2 A c_D \quad (IV.3.4)$$

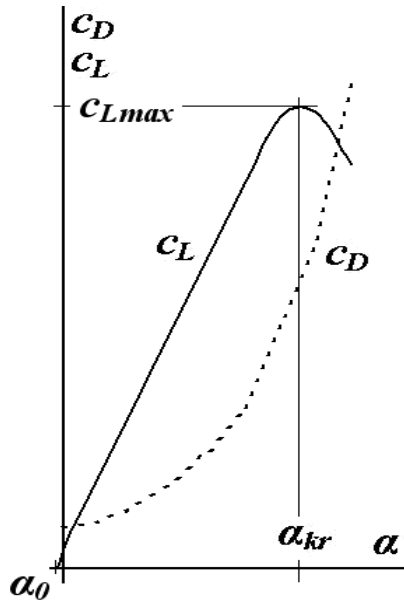
egyenlettel határozható meg.

Mivel a profil ellenállás az üzemi állásszög tartományon állandónak tekinthető, illetve az indukált ellenállás négyzetesen arányos az állásszöggel egyenes arányban növekvő felhajtóerő tényezővel, az ellenállási tényező egy másodfokú görbével írható le. A kritikus állásszög elérésekor pedig hirtelen növekedni kezd az áramlás leválása miatt (IV.4. ábra).

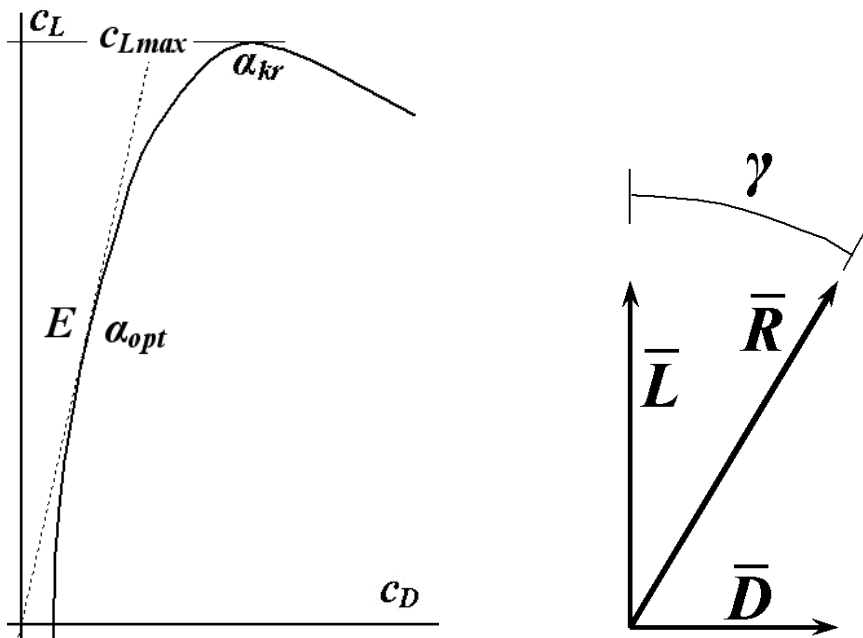
A gyakorlati aerodinamikában a szárnyak és a repülőgépek áramlástani jellemzésére a LILIENTHAL-féle polárist alkalmazzák.

A poláris függőleges tengelyére a c_L felhajtóerő-tényezőt, vízszintes tengelyére a c_D ellenállás tényezőt vesszük fel. A poláris elvi rajzát a IV.5. ábra szemlélteti. A polárdiagram — a két tengely azonos léptéke esetén — nemcsak az

adott állásszöghöz tartozó aerodinamikai erőket adja meg, hanem az eredő légerő nagyságát és irányát is. A poláris minden pontja egy adott állásszögnek felel meg.



IV.4. ábra Szárny aerodinamikai tényezői



IV.5. ábra LILIENTHAL-féle polárdiagram

K **jósági szám**nak nevezzük a felhajtóerő és az ellenállás, illetve tényezőik hányadosát azaz:

$$K = \frac{c_L}{c_D} \quad (IV.3.5)$$

amely arányossági számot a grafikonon a

$$\gamma = \arctg K \quad K = \operatorname{ctg} \gamma \quad (IV.3.6)$$

Könnyen belátható, hogy a K értéke ott lesz maximális, ahol a γ szög a legkisebb értékű. A γ szög minimuma pedig az origóból a polárgörbéhez húzott érintő által meghatározott állásszögnél található. Ezt az állásszöget optimális állásszögnek nevezzük és α_{opt} -al jelöljük (IV.5. ábra E pont).

IV.3.4. SZÁRNYPROFIL-KÖRÜLI NAGYSEBESSÉGŰ ÁRAMLÁS

Bár a helikopter a hang sebesség alatti sebességgel repül, repülése során találkozhatunk olyan esetekkel, amikor a forgószárny lapát körül közel hangsebességű lesz a helyi áramlás. Ezért most röviden az ezzel kapcsolatos minimális ismereteket írjuk le.

Elméleti kutatások és gyakorlati mérések igazolták, hogy a hang gázokban történő terjedési sebessége csak a gáz összetételétől (annak adiabatikus kitevőjétől és gázállandójától) valamint hőmérsékletétől függ. Levegő esetén egyszerűen az

$$a = 20,05 \sqrt{273 + t} \quad (IV.3.7)$$

egyenlettel határozható meg.

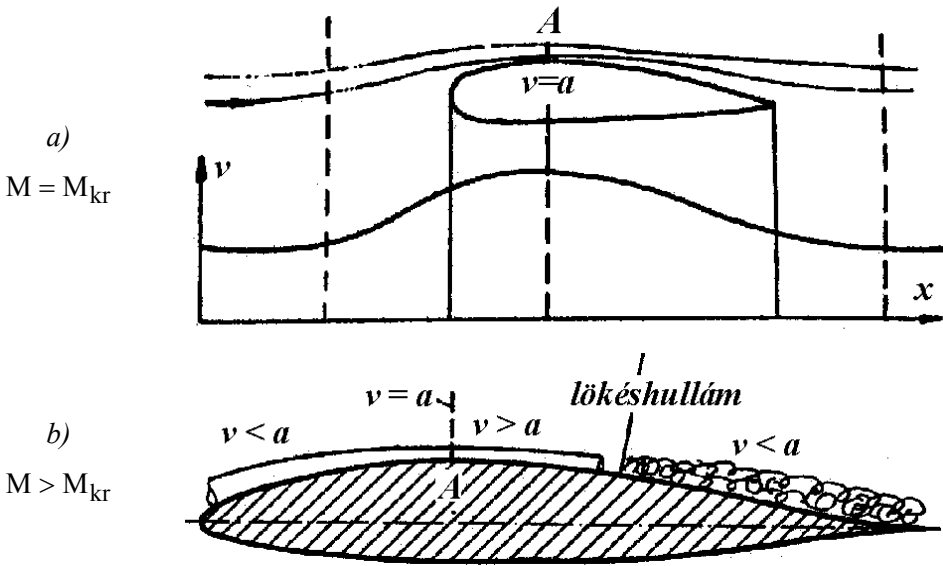
Egy adott (például repülési) sebesség MACH-számán az adott sebesség és a helyi hangsebesség

$$M = \frac{v}{a} \quad (IV.3.8)$$

hányadosát értjük. Ez azért fontos áramlástanai kritérium, mert több esetben nem az áramlási sebesség abszolút nagysága, hanem annak a hangsebességhez viszonyított relatív értéke határozza meg a lejátszódó jelenséget.

Ha növeljük egy szárnyprofil körüli áramlás zavartalan megfűvási sebességét, akkor a IV.1. ábránál leírtak szerint a profil mindegyik pontjánál nőni fog a helyi áramlási sebesség. Belátható, hogy a megfűvási sebesség növelésével kialakulhat egy olyan állapot, amely esetén (a IV.6.a ábra A pontjában) kialakuló helyi áramlási sebesség egyenlő lesz a helyi hangsebességgel. Az ezen állapotnak megfelelő megfűvási sebességet — ahol a szárny kontúrjának valamely pontján kialakul a helyi

hangsebesség — kritikus repülési sebességnek, az ehhez a sebességhez tartozó repülési MACH-számot **kritikus MACH-számnak** nevezzük.



IV.6. ábra A kritikus Mach-szám értelmezése (forrás: [IV.14])

Ha egy szárny eredő megfúvási MACH-száma meghaladja a kritikus értéket, a szárny felső kontúrján lökéshullám alakul ki (IV.6.b ábra), ami a jelentős, és hirtelen fellépő ellenállási erő növekményt, illetve felhajtóerő csökkenést eredményez. A lökéshullámban ugrásszerűen megnő a nyomás, és ha ezt nyomáshullámot halljuk, „hangrobbanást” érzékelünk.

IV.4. A FORGÓSZÁRNY GEOMETRIAI, ÉS ÜZEMMÓD JELLEMZŐI

A forgószárnyat az alábbi főbb geometriai adatokkal jellemezhetjük:

- z — **lapátok száma** [-];
D — **forgószárny átmérő**: a lapátok végei által leírt kör átmérője [m];
R — **forgószárny sugár**: a lapátok végei által leírt kör sugara [m];
 A_S — **súrolt felület**: a lapátok végei által leírt kör területe:

$$A_S = R^2 \pi = \frac{D^2 \pi}{4} \quad [\text{m}^2]; \quad (\text{IV.4.1})$$

- p — **felületi terhelés**: a súrolt felület területegységére jutó gépsúly:

$$p = \frac{G}{A_S} \quad \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]; \quad (\text{IV.4.2})$$

- n — **forgószárny fordulatszáma** $\left[\frac{1}{\text{perc}} \right]$;
- Ω — **forgószárny forgási szögsebessége** $\left[\frac{1}{\text{s}} \right]$
- σ — **kitöltési tényező** alatt a lapátok összes (alaprajzi) felületének és forgószárny súrolt felületének

$$\sigma = \frac{zA_l}{A_S} [-] \quad (\text{IV.4.3})$$

hányadosa. Korszerű helikopterek esetén a kitöltési tényező értéke 0,03 ~ 0,09 közé esik.

A IV.1. Táblázat bemutatja a könyv későbbi részeiben vizsgált helikopterek forgószárnyainak fent ismertetett geometriai adatait.

Típus	z	D	A_S	p^a $\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$
	[-]	[m]	[m ²]	
Mi-8 Hip	5	21,288	355,7	306,1
Mi-24 D Hind D	5	17,300	235,1	467,4
Eurocopter EC135 T2	4	10,200	81,7	349,4

IV.1. Táblázat Helikopter típusok forgószárnyainak geometriai adatai

A helikopter motoros állandósult repülési üzemmódjai a következők::

- függőleges repülési üzemmódok:
 - függés (lebegés);
 - függőleges emelkedés;
 - függőleges süllyedés működő hajtóművel;
- vízszintes repülés;
- ferde pályán való emelkedés;
- ferde pályán való süllyedés működő motorral.

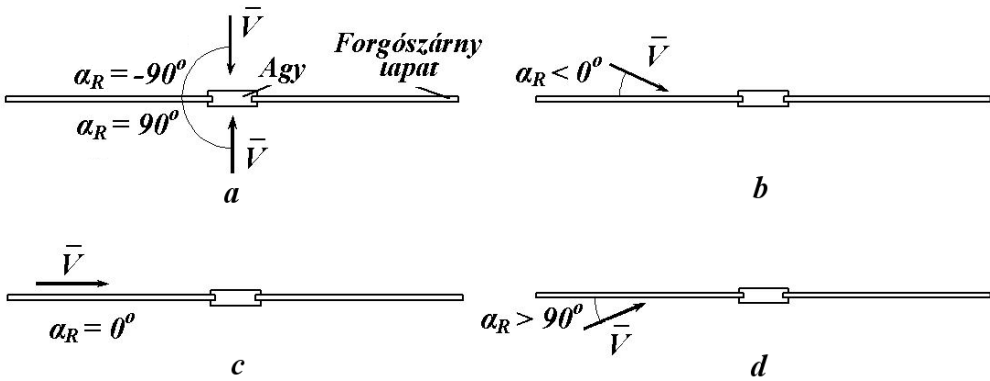
A fentiek közül az első, függőleges repülési üzemmódokhoz kapcsolódik a forgószárny tengelyirányú átáramlási üzemmódja. A másik három repülési módhoz pedig az úgynevezett ferde átáramlási forgószárny üzemmód köthető. A forgószárny két motoros üzemmódja közt több — a helikopter repülése, és így az általa kibocsátott

^a Névleges felszálló tömeg esetén

zaj szempontjából — fontos eltérés található.

A **tengelyirányú átáramlási üzemmód** esetén a zavartalan áramlás iránya merőleges a forgószárny forgássíkjára, és a forgási tengellyel párhuzamos (IV.7.a ábra). Az üzemmód legfontosabb jellegzetessége az, hogy a forgószárny lapátjainak megfúvási viszonyai nem változnak a körülfordulásuk során.

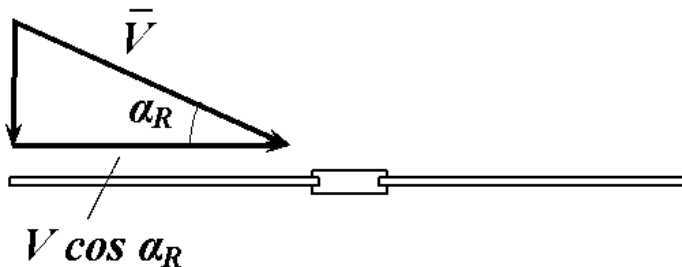
Ferde átáramlású üzemmódnak a forgószárnynak azon működést nevezzük, amikor a zavartalan áramlás iránya a forgás tengelyével nem párhuzamos (IV.7.b – d ábrák). Ekkor a lapátok helyzete az áramlás irányához viszonyítva — így a rajtuk keletkező légerő is — változik a körülfordulásuk során.



IV.7. ábra A forgószárny üzemmódjai

A forgószárny üzemmódok jellemzésére vezették be az α_R **forgószárny állásszög** fogalmát. A forgószárny állásszögén a forgószárny agy forgássíkja és a zavartalan áramlás sebessége (a repülési sebesség) által bezárt szöget értjük.

A forgószárny állásszöge tengelyirányú átáramlású üzemmódokban $\alpha_R = \pm 90^\circ$, ferde átáramlású üzemmódokban az állásszög $\alpha_R \neq \pm 90^\circ$.



IV.8. ábra Az üzemmód tényező értelmezése

A forgószárny üzemmódok jellemzésére alkalmazzuk még a μ **üzemmód tényezőt**. A forgószárny üzemmód tényezőjének nevezzük a repülési sebesség forgószárny agy forgássíkjába eső összetevőjének és, a lapátvég kerületi sebességének

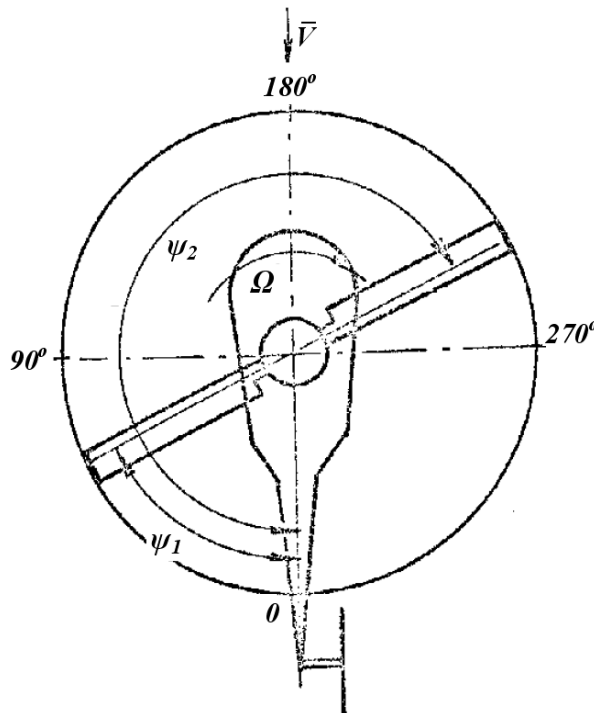
$$\mu = \frac{V \cos \alpha_R}{R\Omega} \quad (\text{IV.4.4})$$

arányát (IV.8. ábra). Tengelyirányú átáramlási üzemmódban — amikor repülési sebesség és/vagy $\cos \alpha_R$ ($\alpha_R = \pm 90^\circ$) értéke zérus — μ tényező is zérus. Ha $\mu \neq 0$, akkor a forgószárny ferde átáramlási üzemmódban dolgozik. Korszerű helikoptereknél az üzemmód tényező értéke 0 és 0,4 közé esik.

A forgószárny lapátok működését jellemző legfontosabb paraméter a beállítási szög. Egy **lapátelelem** φ **beállítási szögén** a lapátszelvény húrja és a forgószárny agy forgási síkja által bezárt szöget értjük (IV.9. ábra).



IV.9. ábra A lapátelelem beállítási szög értelmezése



IV.10. ábra Azimut szög értelmezése

Forgószárny lapát φ_1 **beállítási szöge** az $\bar{r}=0,7$ relatív sugáron (az R forgószárny sugár 70 %-ánál) levő lapátszelvény beállítási szöge.

Ferde átáramlási üzemmódon a forgószárny lapát a helikopter repülési sebességéhez viszonyított helyzetét — a forgószárny agy forgási síkjában vizsgálva — a ψ **azimut szöggel** határozhatjuk meg. A lapáthelyzet azimut szöge alatt a zavartalan áramlás iránya és a lapát hossz tengelye által bezárt szöget értjük, a forgószárny forgási irányában mérve (IV.10. ábra). Zérus azimut helyzetnek azt a lapáthelyzetet tekintjük, amikor a lapát hossz tengelye egybeesik a zavartalan áramlás (a helikopter repülési) sebességének irányával, és a lapát a zavartalan áramláshoz viszonyítva „hátral” helyezkedik el. A lapát azimut szöge 0 és 360 fok közt változhat.

Az azimut szög értelmezésénél — áramlástanai szempontok miatt — fontos hangsúlyozni, hogy a helikopter repülési irányát kell figyelembe vennünk, nem pedig a gép hossz tengelyét. Így — például egy beemelések során — ha a helikopter a jobb oldal felé mozog, a zérus azimut szögön a baloldali irányt kell értenünk.

Tengelyirányú átáramlási üzemmódokon nem értelmezzük az azimut szöget.

IV.5. A FORGÓSZÁRNY IMPULZUS ELMÉLETE

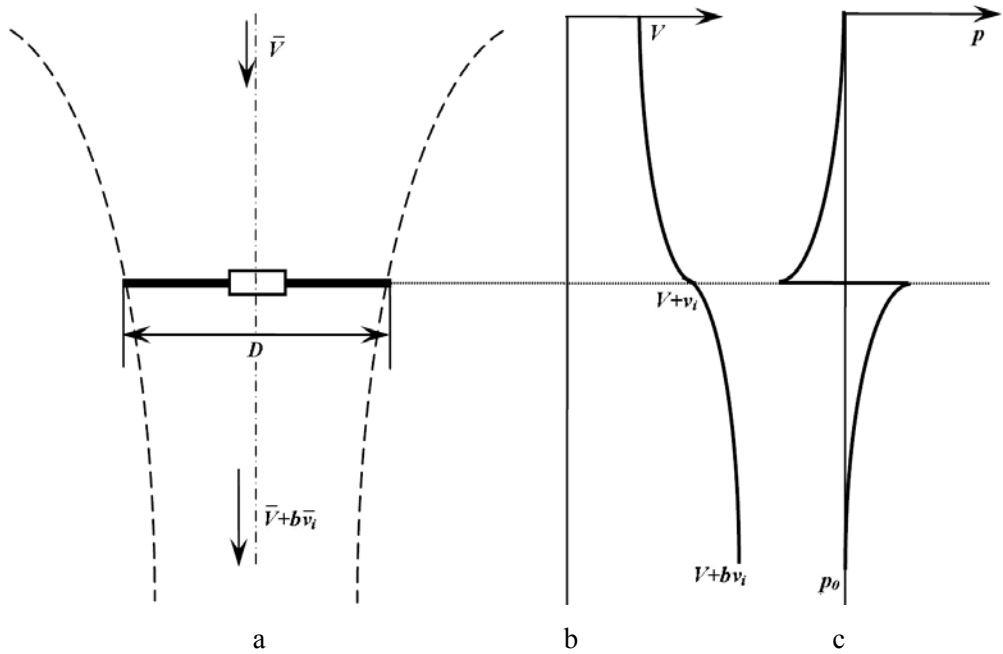
Ebben a fejezetben a forgószárnyak úgynevezett impulzus elméletét írjuk le — a teljes matematikai levezetések mellőzése nélkül — röviden. Első látásra ez csak egy elvi megközelítésnek tűnhet, de az itt megfogalmazott megállapítások később fontos következtetések levonását teszik lehetővé.

IV.5.1. A FORGÓSZÁRNY IMPULZUS ELMÉLETE TENGEYIRÁNYÚ ÁTÁRAMLÁS ESETÉN

A forgószárny impulzus elmélete a forgószárnyat olyan szerkezetnek tekinti, amely motoros működése során a levegőt felülről szívja, és maga alá nyomja (IV.11a ábra). A forgószárny a levegőáram függőleges sebességét változtatja meg úgy, hogy a levegő sugar a forgószárnyra felfelé mutató reakcióerővel hat vissza. Ezt a reakcióerőt nevezzük a **forgószárny vonóerőnek**. A forgószárny vonóereje a súrolt felületén átáramló levegő a forgószárny síkja előtti — körülbelül egy forgószárny átmérőnyi távolságra található, még zavartalan — V sebességét a forgószárny síkjáig $V + v_i$ mértékűre növeli. Majd, a forgószárny síkja alatt, attól körülbelül szintén D távolságra $V + bv_i$ sebességre gyorsítja fel (IV.11. ábra). A vonóerő egyenlő a forgószárny súrolt felületén időegység alatt átáramló felgyorsított m levegőtömeg és a forgószárny által létrehozott bv_i sebességváltozás szorzatával:

$$T = \dot{m}bv_i = \rho A_S(V + v_i)bv_i \quad . \quad (IV.5.1)$$

Levezethető, hogy $b = 2$, azaz a forgószárny a levegőáram sebességváltozásának egyik felét a forgás síkja előtt, a másik felét pedig a forgássíkja után hozza létre. Ez a v_i sebességváltozás a forgószárny úgynevezett **indukált sebessége** (IV.11.b ábra).



IV.11. ábra A forgósárny impulzus elméletének szemléltetése tengelyirányú átáramlás esetén

A forgósárny előtt és mögött nagy — körülbelül egy forgósárny átmérőnyi — távolságra a levegősugar statikus nyomása egyenlő a zavartalan áramlás nyomásával. A forgósárnyhoz közeledve a forgósárny felett a nyomás csökken, mely depresszió gyorsítja a levegősugarat. Majd. a forgósárny síkjában egy ugrásszerű nyomásnövekedés lép fel, mivel itt adódik át az energia a forgósárnytól a levegősugarának. A forgósárnytól távolodva a nyomás ismét csökken egészen a környezeti, atmoszférikus nyomásáig (IV.11.c ábra).

A fentiek alapján a forgósárny vonóerejét az alábbi módon számíthatjuk:

$$T = \dot{m} 2v_i = \rho A_S (V + v_i) 2v_i, \quad (\text{IV.5.2})$$

ami függés esetén (amikor $V = 0$):

$$T = \rho A_S 2v_i^2. \quad (\text{IV.5.3})$$

Mivel függés esetén a forgósárny vonóereje lényegében egyenlőnek tekinthető a helikopter súlyával, az indukált sebesség a:

$$v_i = \sqrt{\frac{G}{2\rho A_S}} = \sqrt{\frac{p}{2\rho}} \quad (\text{IV.5.4})$$

módon határozható meg. A IV.2. Táblázat tartalmazza a könyvben vizsgált helikopterek forgószárnyainak függés közbeni indukált sebességeit.

Típus	$v_i \left[\frac{m}{s} \right]$	Típus	$v_i \left[\frac{m}{s} \right]$	Típus	$v_i \left[\frac{m}{s} \right]$
Mi-8 Hip	11,18	Mi-24D Hind D	13,81	Eurocopter EC135 T2	11,94

IV.2. Táblázat Helikopter típusok függési indukált sebességei

A vonóerő létrehozásához szükséges teljesítményt — az átáramló levegő mozgási energiájának megváltoztatásához szükséges, úgynevezett sugárteljesítményt — az alábbi módon számíthatjuk:

$$P_S = T(V + v_i) = 2\rho A_S(V + v_i)v_i \quad (IV.5.5)$$

Függéskor:

$$P_S = 2\rho A_S 2v_i^3 \quad (IV.5.6)$$

Az összefüggésekből látható, hogy az indukált sebességnek nagy jelentősége van úgy a vonóerő, mint a szükséges teljesítmény szempontjából. Felmerülhet az a kérdés, hogy hogyan célszerű adott vonóerőt létrehozni: Nagy levegőtömeget mozgatva, viszonylag kis indukált sebességgel, vagy kis levegőtömeget nagyobb sebességnövelésre kényszeríteni?

Erre a kérdésre a forgószárny úgynevezett propulziós hatásfokának vizsgálata alapján válaszolhatunk. A forgószárny ideális vagy propulziós hatásfoka alatt a vontatás szempontjából hasznos

$$P_h = TV \quad (IV.5.7)$$

vontatási teljesítmény és a szükséges teljesítmény

$$\eta_{\text{prop}} = \frac{P_h}{P_S} = \frac{TV}{T(V + v_i)} = \frac{V}{V + v_i} = \frac{1}{1 + \frac{v_i}{V}} \quad (IV.5.8)$$

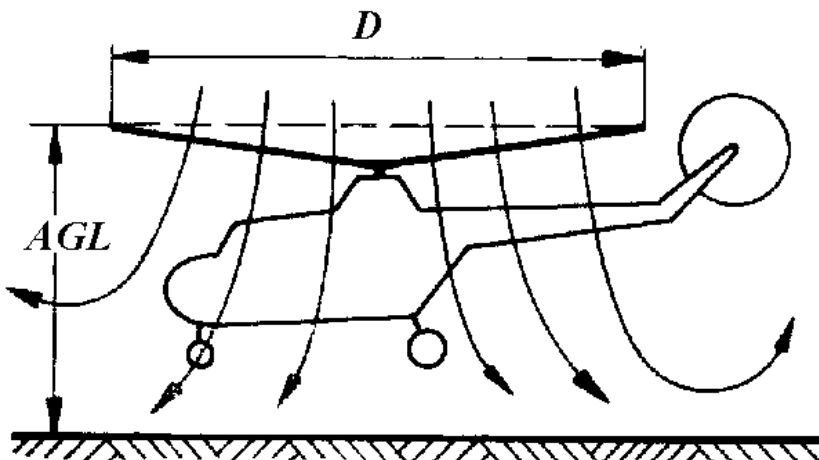
viszonyszámát i értjük.

Eszerint, minél kisebb az indukált sebesség a zavartalan áramlás sebességéhez képest, annál jobb a forgószárny hatásfoka. Jelen könyvben feltétlen meg kell említeni, hogy az úgynevezett propulziós elven működő berendezések (sugarhajtóművek, légsavarok, ventilátorok stb.) által keltett zaj szintje annál nagyobb minél nagyobb az általuk létrehozott sebességváltozás. Így kimondható, hogy annak a forgószárnynak

nagyobb a hangnyomásszintje, melynek nagyobb az indukált sebessége. Azaz a forgószárny által kibocsátott zaj szempontjából is célszerűbb a viszonylag nagy átáramló tömegáram relatív kis indukált sebességgel való gyorsításával létrehozni a repüléshez szükséges vonóerőt. Ez pedig adott repülési sebesség esetén csakis a súrolt felület, azaz a forgószárny átmérő növelésével oldható meg. A későbbiekben megvizsgáljuk, hogy a forgószárny átmérő növelése milyen más áramlástani és így zaj problémákat jelenthet.

IV.5.2. A LÉGPÁRNA-HATÁS

A forgószárny impulzus elméletének tárgyalásakor érdemes megemlíteni az úgynevezett légpárna-hatást, melynek jelentősége van a helikopterek földközeli függése, repülése, valamint fel- és leszállása során.

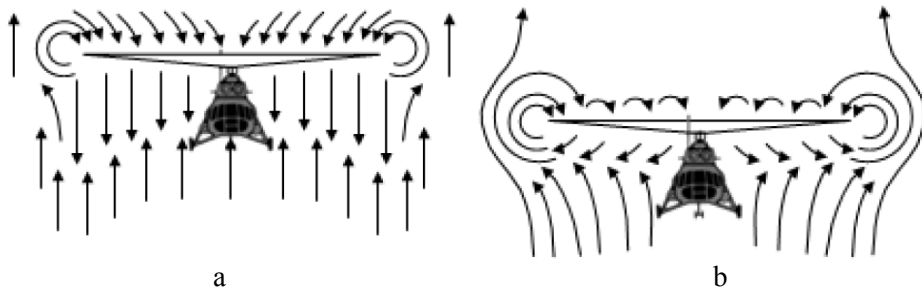


IV.12. ábra A légpárna-hatás

Amikor a forgószárny AGL (Around Ground Level) talaj feletti magassága kisebb, mint az átmérője, vagyis $AGL < D$, függésben a forgószárny vonóereje és a függéshez szükséges teljesítményigénye az előzőekben tárgyaltakhoz képest jelentősen megváltozik. A légpárna-hatás jelenségét úgy is magyarázhatjuk egyszerűen, hogy a talaj közelsége miatt a forgószárny alatt lefékeződő levegő nyomása megnő, és ez visszahat a forgószárnyra (IV.12. ábra).

Ez a nyomásnövekedés azért lép fel, mert a forgószárnyon átáramlott levegő nyomása nem tud a környezetre visszarendeződni — nincs meg az ehhez szükséges egy forgószárny átmérőnyi távolság. A légpárna-hatás következtében a helikopterrel a talaj közvetlen közelében nagyobb hasznos teher emelhető fel, mint a légpárnahatás jelenléte nélkül. A légpárna-hatás a helikopter leszállását is lágyabbá teszi, mivel a földet érés előtt a függőleges süllyedési sebességet jelentősen csökkenti. A légpárna-hatást a helikopter túlterheléssel történő felszállásakor használják ki, és javítja a helikopter stabilitását is.

IV.5.3. A FORGÓSZÁRNY ÖRVÉNYGYŰRŰ ÜZEMMÓDJA



IV.13. ábra Az örvénygyűrű üzem mód kialakulása
forrás: [IV.2.]

Egyszerű megfogalmazásban a helikopter motoros repülésekor a forgószárny felülől szívja a levegőt és maga alá nyomja. Függéskor a forgószárny fölött körülbelül egy átmérőnyi távolságra a levegő még nyugalomban van. A forgószárny alatt szintén egy átmérőnyi távolságra a levegő sebessége eléri az indukált sebesség kétszeres értékét (lásd a IV.11. ábrát), majd a környező levegő hatására sebessége nullára csökken.

Függőleges motoros süllyedést végrehajtásakor, a forgószárny által lefelé nyomott levegő a helikopterhez képest felfelé mozgó álló levegővel „ütközik” (IV.13.a ábra). Ezzel egy időben a forgószárny mintegy „megszökik” a felülől szívott levegő elől. A forgószárny alatt és felett is található egy-egy felületet, ahol a levegő forgószárnyhoz képesti sebessége zérus lesz, azaz a két felület a forgószárnyal együtt süllyedni fog. Ezeknél a felületeknél a forgószárny által létrehozott áramlás megfordul, és zárt örvényt képez (IV.13.b ábra). Az így kialakuló, gyűrű alakú áramlást nevezzük örvénygyűrűnek, illetve ezt a repülési esetet örvénygyűrű üzem módnak.

Belátható, hogy a süllyedő sebesség növekedésével ezek a felületek közelednek a forgószárny síkjához a hajtómű teljesítménye az örvénygyűrű forgatására fordítódik, így a forgószárny vonóereje lecsökken, és a süllyedési sebesség növekedni fog, ami a helikopter lezuhanásához vezethet.

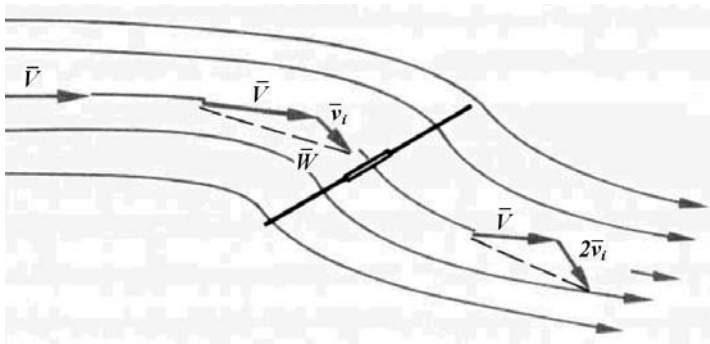
Az örvénygyűrű üzem mód elkerülése érdekében a függőleges motoros süllyedési sebességét ($2 \sim 3$ m/s értékben) maximálni kell, ami a helikopter leszállását korlátozhatja.

IV.5.4. A FORGÓSZÁRNY IMPULZUS ELMÉLETE FERDE ÁTÁRAMLÁS ESETÉN

Ferde átáramlási üzem mód esetén az előzőekben leírt forgószárny impulzus elmélet úgy módosul, hogy a zavartalan áramlás (repülés) és az indukált sebesség nem párhuzamosak egymással (IV.13. ábra). Az impulzus elmélet alkalmazásával történő számítások sokkal bonyolultabbakká válnak — számunkra ez nem is érdekes. Az az alapelv továbbra is érvényesül, hogy a forgószárny forgási síkja előtt, illetve után egy átmérőnyi távolságra a levegő még, illetve már zavartalanul áramlik, és nyomása megegyezik a környezeti nyomással. A tömegáram növekedése következtében nő a

forgószárny vonóereje, illetve csökken a forgatásához szükséges teljesítmény. Ezzel magyarázható, hogy a túlterhelt helikopter, ami már függeni nem képes, nekifutással képes felszállni és emelkedni. (Az ezzel kapcsolatos kérdéseket a VI.4. fejezetben olvashatóak részletesebben.)

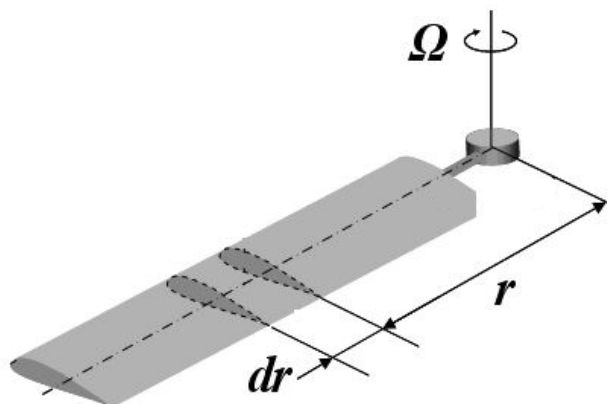
A IV.5.2. fejezetben ismertetett légpárna-hatás a helikopter talaj közeli ($AGL < D$) vízszintes repülése, gyorsítása során a repülési sebesség növekedésével fokozatosan csökken. Ahogy mondani szokás: „a menetszél elfújja a légpárnát”.



IV.14. ábra A forgószárny impulzus elmélet szemléltetése ferde átáramlás esetén

IV.6. A FORGÓSZÁRNY LAPELEM ELMÉLETE

A forgószárny — előző fejezetben ismertetett — egyszerű impulzuselmélete nem ad választ arra a kérdésre, hogy az indukált sebességet hogyan hozza létre a forgószárny, és ezért nem ad útmutatást sem a forgószárny lapátok, sem a forgószárny szerkezeti kialakítására. Az impulzuselmélet ezen hiányosságait pótolja a lapelem elmélet. A lapelem elmélet a forgószárny lapátok elemein a körülfordulásuk során keletkező légerők és nyomatékok leírása és összegzése alapján magyarázza a vonóerő keletkezését, az ahhoz szükséges teljesítményt, valamint a szükséges szerkezeti kialakításokat (IV.15. ábra).



IV.15. ábra Lapelem elmélet értelmezése

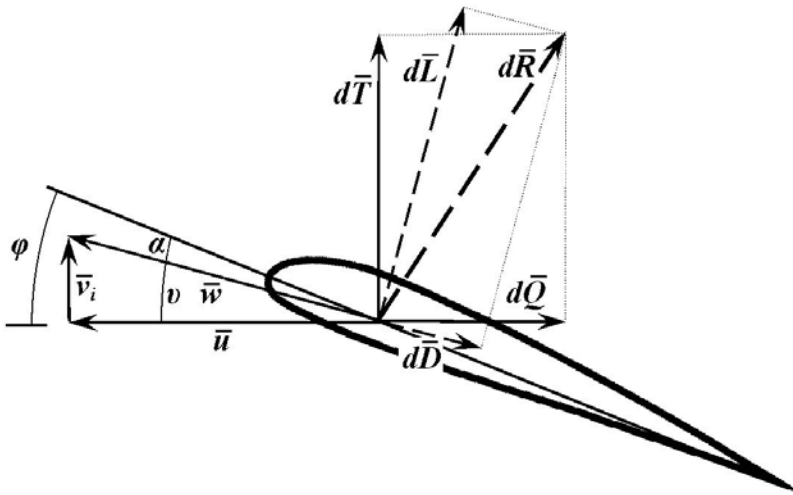
A lapátelelem körüláramlása hasonló, mint szárnyprofilnál pozitív állásszög esetén (lásd a IV.3.1. fejezetet). A lapátelelem alsó oldalán nagyobb nyomás keletkezik, mint a felsőn, ezért rajta aerodinamikai erő keletkezik.

A lapátelemeken keletkező légerő meghatározásához ismernünk kell annak eredő megfűvását, az őt körüláramló levegőhöz képesti sebességét, és helyzetét. Mivel ebből a szempontból jelentős eltérés található a forgószárny tengelyirányú-, és ferde átáramlási üzemmódjai között, ezért ezeket külön tárgyaljuk.

IV.6.1. A FORGÓSZÁRNY LAPELEM ELMÉLETE TENGEYIRÁNYÚ ÁTÁRAMLÁS ESETÉN

A forgószárny tengely irányú motoros működésekor mindegyik lapelem egy r sugarú körpályán mozog — $u = r\Omega$ kerületi sebességgel (IV.16. ábra). A sugár mentén kifelé haladva a kerületi sebesség lineárisan nő, ezért a lapelemeken keletkező légerők is nőnek.

A kerületi sebességhez vektorosan (irányhelyesen) hozzá kell adnunk a forgószárny v_i indukált sebességét is, mely merőleges a forgássíkra.



IV.16. ábra A lapátelelemre ható aerodinamikai erők függés esetén

Itt fontos megjegyezni, hogy további elemzéseink során — a szemléletesebb ábrázolás érdekében — a lapátelelem mozgását írjuk le az őt körüláramló levegőhöz képest. Ezért mutat az ábrán az indukált sebesség felfelé. Motoros üzemmódon a forgószárny felülről szívja, és maga alá nyomja a sűrűlt felületén átáramló levegőt — tehát a levegőhöz képest a forgószárny, és így a lapeleme is, felfelé mozog. (A keletkező légerők szempontjából mindegy, hogy a test mozog az álló közegben vagy a test áll és a közeg mozog.)

Az u kerületi sebesség és a v_i indukált sebesség vektorát összegezve a w eredő sebességvektort kapjuk meg. A lapátelelem húrja és az eredő sebesség vektora által bezárt α szöget a lapátelelem állásszögének nevezzük.

A IV.3. fejezetben leírtak alapján ez azt jelenti, hogy a lapátelemen az adott α állásszögű, és w sebességű megfúvás esetén:

→ az eredő megfúvásra merőleges $d\bar{L}$ elemi felhajtó erő;

illetve

→ az eredő megfúvással párhuzamos (azzal ellentétes) $d\bar{D}$ elemi ellenállás

keletkezik, melyek eredője a $d\bar{R}$ elemi aerodinamikai erő.

Mivel minket a forgószárny vonóerejének keletkezése érdekel, ezt az eredő elemi légerőt

→ a forgássíkra merőleges $d\bar{T}$ elemi vonóerő;

illetve

→ a forgássíkba eső $d\bar{Q}$ elemi kerületi erő

komponensekre bontjuk. (Trigonometriai összefüggések felírásával ezen erők pontosan meghatározhatóak. Mivel ez a további elemzéseinkhez nem szükséges, ettől most eltekintünk.)

A lapátelemeken keletkező elemi vonóerők összegzésével a lapáton keletkező vonóerőt, illetve a lapátok vonóerőinek összegzésével a teljes forgószárny vonóerejét határozhatjuk meg.

IV.6.2. A FORGÓSZÁRNY REAKCIÓ NYOMATÉKA

Mivel az előzőekben elemzett lapelem egy r sugarú körön mozog, a rajta keletkező $d\bar{Q}$ elemi kerületi erő a forgószárny tengelyére egy $dM = r dQ$ nagyságú elemi nyomatékot fejt ki. Ez a nyomaték — motoros üzemmódon — gátolja a lapát forgását. A forgószárny lapátok összes elemén keletkező ezen elemi nyomatékok összegzésével kapjuk meg azt a nyomatékot, mellyel a forgószárnyat forgatnunk kell a fentiekben meghatározott vonóerő létrehozásához. Ezt a nyomatékot nevezzük a forgószárny **reakció nyomatékának**

A forgószárny hajtása — azaz a reakció nyomaték kiegyensúlyozása — két alapvető módon történhet.

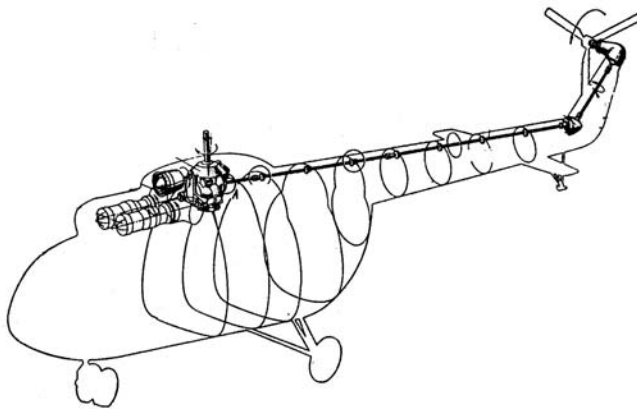
Az első megoldás a forgószárny közvetlen hajtása, amikor a lapátok végén elhelyezett kisméretű hajtóművekkel vagy fúvókákkal történik (IV.17. ábra) a forgatás. Ez a megoldás számos szerkezeti problémát jelent, így napjainkban lényegében nem alkalmazzák.

A gyakorlatilag elterjedt mechanikus forgószárny-hajtású helikopterek esetében a törzsben elhelyezett hajtómű a közlőmű rendszer fő reduktorán keresztül (IV.18. ábra) hajtja a forgószárnyat. Ekkor a helikoptert a függőleges tengelye körül a

fő reduktorról a törzsre átvitt nyomaték akarja elforgatni a forgószárny forgásával ellentétesen. A forgószárny reakciónyomatékát a forgató nyomaték kiegyensúlyozza. A forgatónyomaték a forgószárny tengelyén át adódik át az agyra és lapátokra. A forgatónyomatékkal azonos nagyságú, de ellentétes értelmű reakciónyomaték adódik át a reduktorról törzsre, s ezt az elforgató hatást kell ellensúlyozni.



IV.17 ábra Közvetlen forgószárny hajtású helikopter
(forrás: <http://www.aerospaceweb.org/>)



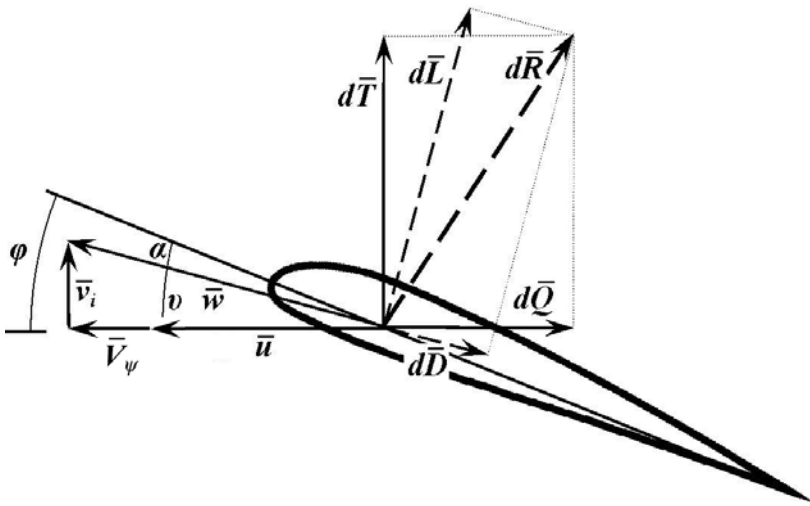
IV.18. ábra MI-8 helikopter mechanikus forgószárny-hajtású közlőmű rendszere
(forrás: [IV.15])

Az egy-forgószárnyas faroklégcsavaros helikopterek esetén a faroklégcsavar oldalirányú vonóerejének nyomatéka egyensúlyozza ki a forgószárny reakciónyomatékát. A faroklégcsavar egy külön zajforrásként jelenik meg, ami aszimmetrikussá teszi a helikoptert, mint zajforrást. A NOTAR helikoptereknél a faroktartón keletkező oldalirányú légerő nyomatéka biztosítja a nyomatéki kiegyensúlyozottságot.

A forgószárny(ak) reakció nyomatékát ki lehet egyensúlyozni egy másik, ellentétesen forgó forgószárny reakciónyomatékával is. A helikopterek különböző szerkezeti kialakításairól a III.2. fejezetben már lehetett olvasni.

IV.6.3. A FORGÓSZÁRNY LAPELEM ELMÉLETE FERDE ÁTÁRAMLÁS ESETÉN

A forgószárny ferde átáramlású motoros működésekor a lapát elemeinek megfűvése, mozgása összetettebb a tengelyirányú átáramláshoz képest — a lapát körülfordulása során ciklikusan változik. Az egyszerűbb vizsgálat érdekében most az $\alpha_R = 0$ forgószárny állásszögű motoros repülés esetén elemezzük a lapelemek áramlási viszonyait, és azok következményeit.



IV.19. ábra A lapátelelem működése motoros ferde átáramlási üzemmódon

Határozzuk meg, hogyan változik egy kiválasztott lapelem megfűvése (IV.19. ábra):

- a lapelem egy r sugarú körpályán mozog — $u = r\Omega$ kerületi sebességgel;
- a helikopter V mozgási sebességének $V_\psi = V \sin \psi$ kerületi komponense;
- a forgószárny v_i indukált sebessége, mely merőleges a forgássíkra;

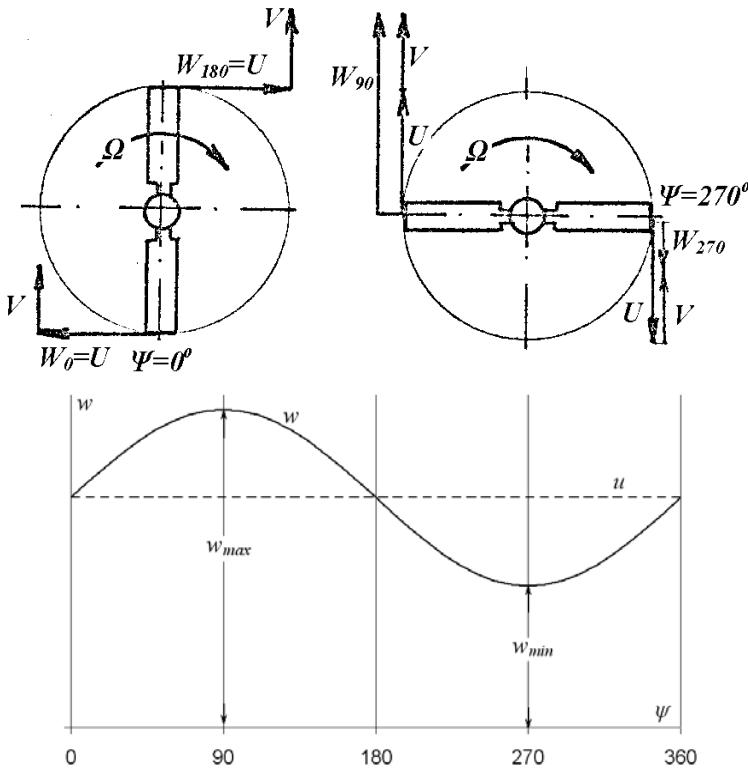
Az \bar{u} , \bar{V}_ψ és a \bar{v}_i sebességvektorokat összegezve kapjuk meg a lapelem \bar{w} eredő sebességvektorát. A lapátelelem húrja és az eredő sebesség vektora által bezárt szög a lapátelelem α állásszögét jelenti.

További elemzéseinkhez ábrázoljuk (IV.20. ábra) a lapátelelem \bar{w} eredő megfűvási sebességének változását annak körülfordulása során (azaz a ψ azimuttszög

függvényében).

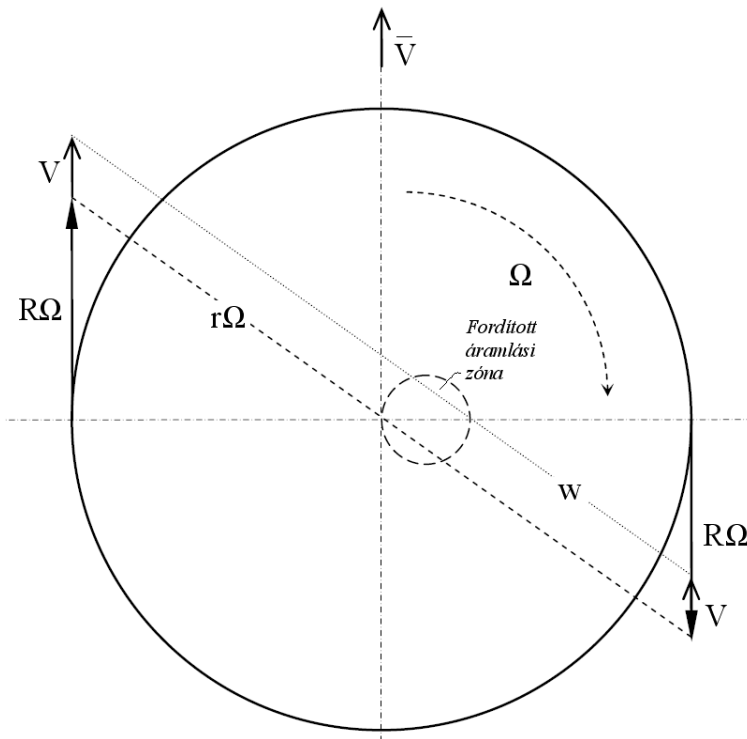
Az ábrák alapján látható, hogy $\psi = 0^\circ$ és $\psi = 180^\circ$ azimutszög helyzetben az eredő megfűvási sebesség megegyezik a tengelyirányú átáramlásnál tapasztalttal, mert a repülési sebesség kerületi sebesség irányú vetülete zérus, a minimális megfűvási sebesség $\psi = 270^\circ$ helyzetnél, még a maximális érték pedig a $\psi = 90^\circ$ -nál alakul ki.

Ez utóbbi következménye az, hogy ott a lapátvég eredő sebessége elérheti az úgynevezett kritikus MACH-számot, ami a lökeshullám és a hullámmellenállás keletkezéséhez vezethet. Ha a lapátok végei minden körülforduláskor belépnek ebbe a zónába, az akkor keletkező lökeshullámok erős vibrációt és zajt jelentenek.



IV.20. ábra A lapátelelem eredő megfűvási sebességének változása a körülfordulás során

Ha megvizsgáljuk a lapátok megfűvási sebességének változását a $\psi = 90^\circ$ és $\psi = 270^\circ$ azimutszög helyzetekben a sugár mentén, azt tapasztalhatjuk, hogy a hátrahaladó lapátok törészenél kialakul egy olyan szakasz, ahol fordított az áramlás, mert a repülési sebesség nagyobb, mint a lapelem kerületi sebessége. (IV.21. ábra). A forgószárny súrolt felületének ezt a részét nevezzük **fordított áramlási zónának**. Ebben a zónában — mely bizonyíthatóan kör alakú — a kilépőele felől kapja a lapát a megfűvást.



IV.21. ábra A fordított áramlási zóna kialakulása

IV.6.4. A VÍZSZINTES CSUKLÓ SZÜKSÉGESSÉGE

A fentiek alapján belátható, a ciklikusan (szinuszos jelleggel) változó megfűvási sebesség következtében a lapát vonóereje is ciklikusan változni fog. Ferde átáramlási üzemmód esetén a folyamatosan változó lapát vonóerő változó hajlító igénybevételt okoz a lapát bekötésénél, ami fáradásos törést eredményezhet.

Ez a probléma megszüntethető vagy jelentősen csökkenthető, ha a lapátokat úgynevezett **vízszintes csukló** — melynek tengelye az agy forgási síkjába esik — közbeiktatásával rögzítjük a forgószárny agyhoz. Ebben az esetben a lapátok vonóereje kevésbé fog változni a körülfordulás során.

A vízszintes csuklóval ellátott forgószárny lapát az agy forgási síkjához képest felfelé, vagy lefelé csap. A csapkodás mértékét, melyet a β felcsapási szöggel jellemzünk, a lapátra az agy forgási síkjára merőleges síkban — a vonóerő síkjában — ható erők vízszintes csuklóra gyakorolt nyomatékai határozzák meg (IV.22. ábra)

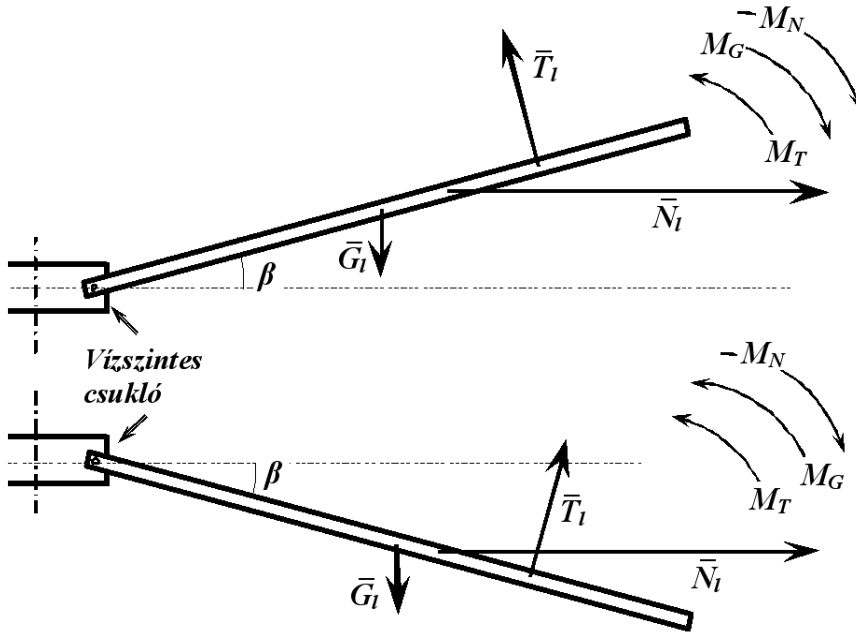
A lapát vonóerejének síkjában az alábbi erők hatnak, és fejtenek ki nyomatékokat a vízszintes csuklóra:

G_1 — a lapát súlya;

Ez az erő a lapát súlypontjában hat, és a vízszintes csuklóra ható nyomatéka a lapátot mindig lefelé igyekszik fordítani.

T_l — a lapát vonóereje;

A lapát hossza mentén megoszló légerő eredője a körülbelül 0,7-es relatív sugárnál ébred, és a vízszintes csuklóra gyakorolt nyomatéka a lapátot mindig felfelé igyekszik fordítani. Ferde átváramlási üzemmód esetén a körülfordulás során nagysága és így nyomatéka ciklikusan változik.



IV.22. ábra A lapátra ható erők a vonóerő síkjában

N_l — a lapátra ható centrifugális erő;

A centrifugális erő eredője körülbelül a lapát hossz kétharmadánál ébred. A vízszintes csuklóra gyakorolt nyomatéka a lapátot mindig az agy forgási síkjába igyekszik fordítani. Felcsapás esetén lefelé, lecsapás esetén felfelé.

A vízszintes csuklóval ellátott forgószárny lapátjai a forgás során egy úgynevezett forgási kúpot írnak le. A forgási kúp csúcsa az agy középvonalában helyezkedik el. A forgószárny lapátvégek által súrolt síkot a **forgószárny forgási síkjának** nevezzük. A forgószárny forgási síkja általában nem egyezik meg a forgószárny agy forgási síkjával. Az előző fejezetben tárgyalt tengelyirányú átváramlási üzemmód esetén a lapátokon keletkező vonóerő nem változik a körülfordulás során. Ezért a lapátok felcsapási szöge nem változik, a forgószárny forgási síkja párhuzamos az agy forgási síkjával.

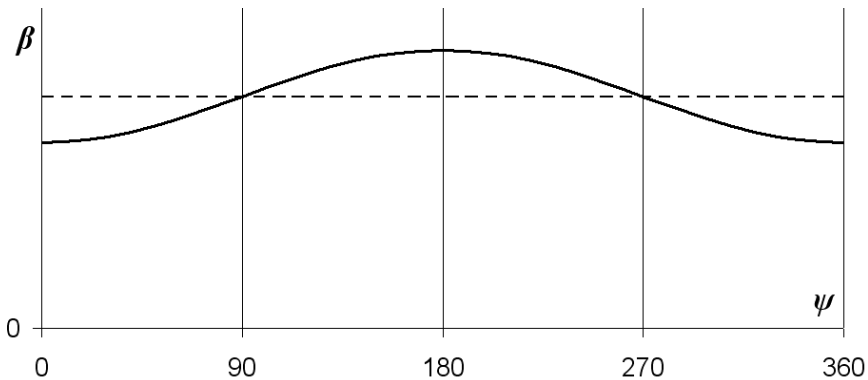
Erre a síkra az agy középpontjából bocsátott merőleges egyenest a **forgáskúp tengelyének** nevezzük. A forgószárny forgáskúp tengelye megegyezik a forgószárny vonóerő tengelyével. Tengelyirányú átváramlási üzemmód esetén a forgási kúp tengelye egybeesik a forgószárny forgási tengelyével.

Ferde átáramláskor a lapátok vonóereje ciklikusan változik. A felcsapási szög mértéke is változni fog, melynek következtében a lapátok úgynevezett **csapkodó mozgást** végeznek körülfordulásuk során. Csapkodó mozgásnak nevezzük a lapátok vízszintes csuklóhoz viszonyított — a vonóerő síkjában történő — mozgását.

A csapkodó mozgás lefolyását elsősorban a lapát vonóerő változásának jellege szabja meg, de figyelembe kell venni a tehetetlenségi erőket is. A csapkodó mozgás, illetve az úgynevezett csapkodás kompenzátor alkalmazása következtében szintén változik a lapátelelemek beállítási-, és állásszög szöge, s így vonóereje.

Vizsgáljuk meg — a IV.23. ábra alapján — a lapátelelemek eredő megfúvási sebességének változását és annak következményét a körülfordulás során:

Az előrehaladó lapátnál a zérus azimut szögtől $\psi = 90^\circ$ -ig az eredő megfúvási sebesség, a lapát vonóerő és annak nyomatéka nő — így a lapát felcsapást végez, a lapát felcsapási sebessége, illetve a β felcsapási szöge fokozatosan növekszik. A maximális felcsapási sebességet a $\psi = 90^\circ$ azimuthelyeztetnél éri el a lapát. Ezt követően a lapát vonóereje fokozatosan csökken, de tehetetlenségénél fogva, lassulva, tovább mozog felfelé, s körülbelül $\psi = 180^\circ$ -nál eléri maximális felcsapási szöget.



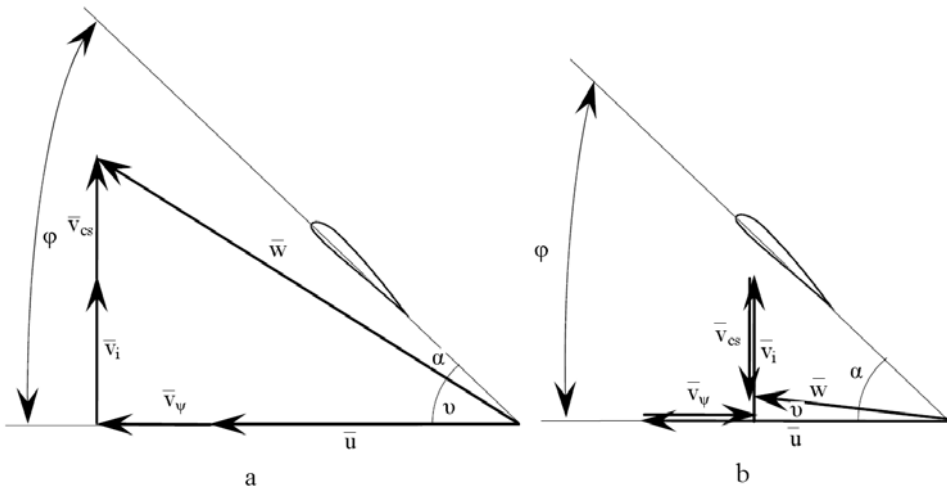
IV.22. ábra Forgószárny lapát csapkodó mozgása

A hátrahaladó lapátnál a vonóerő $\psi = 270^\circ$ -os azimut helyzetig csökken, a lapát növekvő szögsebességű lecsapást végez. A $\psi = 270^\circ$ azimutszögnél lesz a lecsapási sebesség a maximális. A lapát a lecsapást körülbelül $\psi = 360^\circ$ ($\psi = 0$)-nál fejezi be.

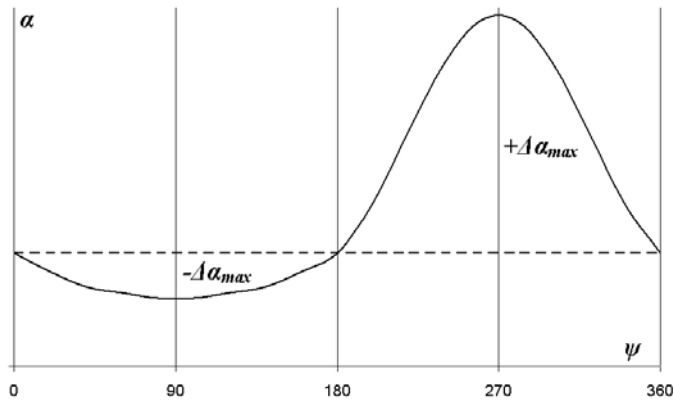
Ezek szerint a forgószárny forgási kúp tengelye az eredő megfúvási sebesség változása miatt hátrafele dől meg. Ennek kompenzálására forgószárnyakat enyhe előredöntött helyzetben építik be a helikopterek törzsébe.

Ha elemezzük a lapát csapkodó mozgásának hatását a lapelemek állásszögére, a következőket tapasztaljuk: Az előrehaladó lapát felfelé csap, ezért a v_{cs} csapkodási sebesség következtében a lapátelelemek állásszögei csökkennek (IV.24.a ábra). A hátrahaladó lapát esetén, a lecsapás következtében a lapátelelemek állásszögei

növekednek (IV.24.b ábra). A körülfordulás során nem változó beállítási szöget és azonos fel- és lecsapási szögsebességet feltételezve azt tapasztaljuk, hogy a hátrahaladó lapátok állásszög növekedése nagyobb mértékű lesz, mint az előrehaladó lapátok állásszögének növekedése. Ez annak a következménye, hogy a hátrahaladó lapát elemének eredő megfűvási sebessége forgássíkba eső komponense — a repülési sebesség miatt — kisebb, mint az előrehaladóé (IV.24. ábra).



IV.24. ábra A csapkodó mozgás következményei



IV.25. ábra A lapát elemek állásszög-változása a lapátcsapkodás következtében a körülfordulás során

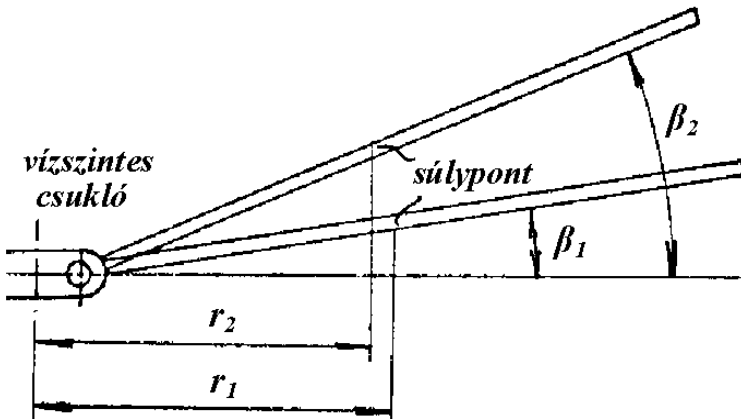
Mint az a IV.25. ábrán látható, a hátrahaladó lapát végének állásszöge jelentősen megnőhet és elérheti a kritikus értéket, amikor a lapát elemről az áramlás leválik, és a profil átesik (lásd IV.3.2. fejezetben leírtakat). Ha a lapátvégi profilok átesnek, az jelentős vibrációt okoz és külön zajforrást jelent, ami az egyik oka a helikopter — mint zajforrás — sajátosságainak.

IV.6.5. A FÜGGŐLEGES CSUKLÓ SZÜKSÉGESSÉGE

A forgószárny lapátok csapkodó mozgása a fent említett kritikus állásszög kérdésen túl egy másik fontos szerkezeti problémát is maga után von. A lapát csapkodó mozgása következtében súlypontjának forgási sugara változni fog. Pozitív felcsapási szögek esetén (ami általánosan feltételezhető) felcsapáskor csökken, lecsapáskor növekszik (IV.25. ábra)

Állandó fordulatszám esetén a lapát felcsapása a súlypontja kerületi sebességének csökkenését jelentené. Ekkor azonban olyan — a forgószárny forgási síkjában ható — tehetetlenségi erő fog a lapátra hatni, mely az eredeti kerületi sebességet tartani igyekszik. Ezt az erőt nevezzük Coriolis erőnek. Lecsapó lapát esetén a súlypont kerületi sebessége nőne, amit a fent már említett erő csökkenteni igyekszik.

A Coriolis erő a súlyerőhöz hasonlóan tömegerő, amit a lapátsugár $2/3$ -ban ható koncentrált erőnek tekinthetjük. A Coriolis erő a forgószárny tengelyére nyomatékot fejt ki úgy, hogy a felcsapó lapátot sietteti, a lecsapóét fékezi. Ezen változó nyomaték hatására a lapáttő hajlító igénybevétele ciklikusan változik, és fáradásos törést okozhat. Ezt megelőzendő a forgószárny lapátok bekötésénél egy-egy úgynevezett függőleges csuklót is elhelyeznek. A függőleges csukló tengelye körül a lapátok lengő mozgást végeznek az alábbiak szerint: Ha a lapát előre halad, a növekvő vonóerő miatt felcsapást végez és a Coriolis erő hatására előre siet a forgószárny tengelyéhez képest. Hátrahaladó és így lecsapást végző lapát lemarad a forgószárny tengelyéhez képest.

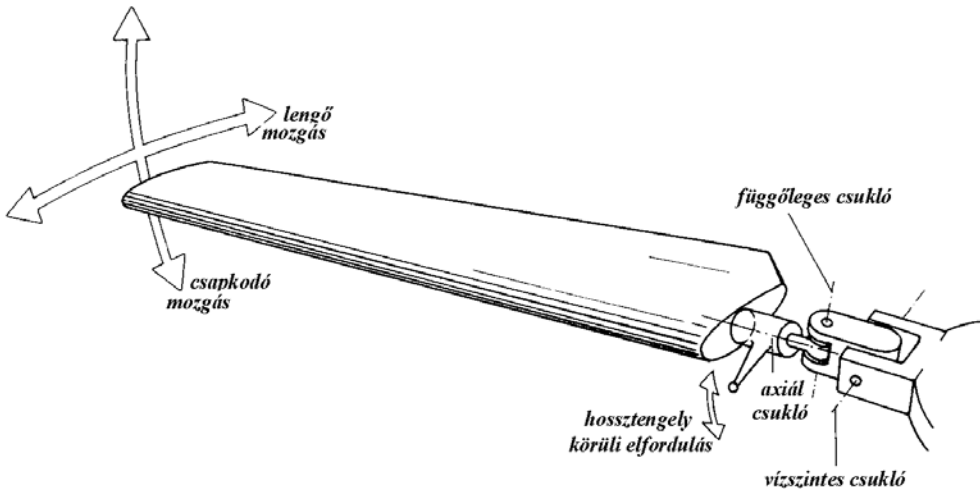


IV.26. ábra A lapát csapkodó mozgása

IV.7. KÖVETKEZTETÉSEK

A forgószárny motoros üzemmódja rövid aerodinamikai leírása is rámutat arra, hogy a forgószárny működése bonyolult folyamat, mely több ok következtében jelentős és összetett zajforrássá teszi azt.

A forgószárny motoros működésekor a lapátok az agy forgástengelye körül forgó mozgást végeznek. A ciklikusan változó megfűvás következtében — a beépített vízszintes csuklók tengelye körül — csapkodó mozgást végeznek: az előrehaladó lapátok felfelé, a hátrahaladó lapátok lefelé csapnak. Lásd IV.27. ábra: „csapkodó mozgás”.



IV.27. ábra Forgószárny lapátok mozgási lehetőségei

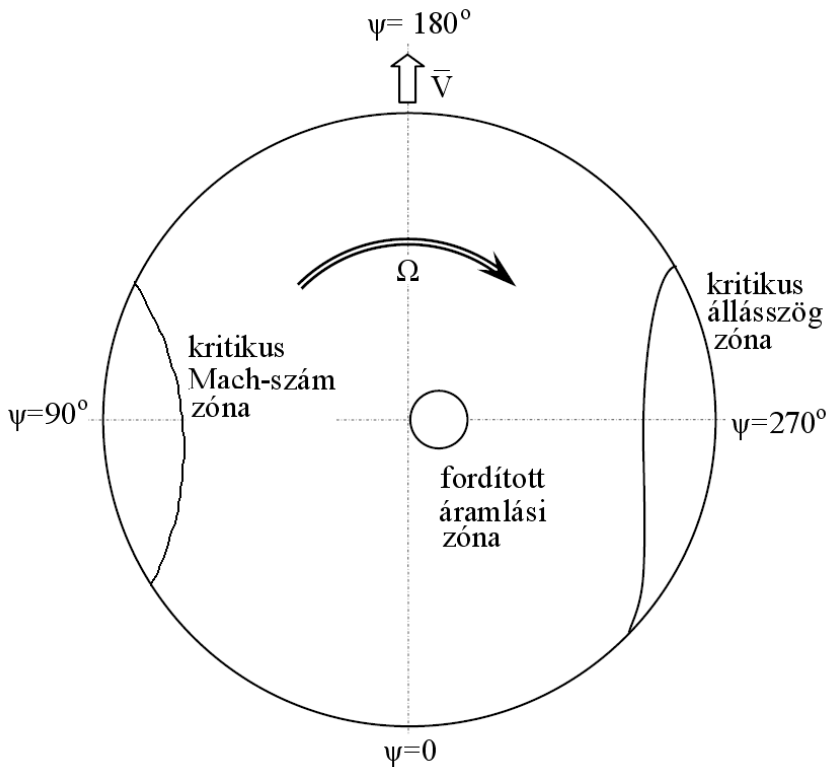
A csapkodó mozgásuk miatt — a fellépő Coriolis erő és a változó kerületi erő hatására — a forgószárny forgási síkjában a forgószárny tengelyéhez képest lengő mozgást végeznek: Az előrehaladó és felcsapó lapátok előre sietnek, a hátrahaladó és lecsapó lapátok lemaradnak. Lásd IV.27. ábra: „lengő mozgás”.

A forgószárny vonóerő nagyságának, illetve irányának változtatásához a lapátok beállítási szöge (azonos mértékben) kollektíven és ciklikusan változtatható. A lapátok ezen mozgását biztosítják az axiál csuklók. Lásd IV.27. ábra: „hossztengely körüli elfordulás”. (Jelen könyvünkben nem térünk ki a helikopterek kormányzására, illetve a forgószárnyak vezérlésére, mivel ezek a kérdések jelentősen nem érintik a helikopter által keltett zaj problémáját.)

A lapátok kerületi sebessége és a helikopter repülési sebessége következtében az előrehaladó lapátok végeinél a kritikus Mach-szám probléma léphet fel. A hátrahaladó és lecsapást végző lapátok végeinél pedig az úgynevezett kritikus állásszög probléma léphet fel. Ez utóbbi két jelenség jelentős vibráció és zaj keletkezését okozhatja.

A IV.28. ábra egy forgószárny súrolt felületének kritikus területeit szemlélteti.

Fontos visszatérni a fejezet elején leírtakra, miszerint most a csuklós lapátbekötésű forgószárnyak aerodinamikáját írjuk le. A korszerű helikopterek lapátbekötése általában nem tartalmaz vízszintes és függőleges csuklókat. Ennek ellenére az előzőekben leírt jelenségek alapvetően végbemennek, de ekkor a csuklók szerepét a fél-merev lapátbekötés „veszi át”. Ennek következtében a forgószárny-lapátok tengelyekhez (csuklókhöz) viszonyított mozgásaik csak kisebb mértékben lépnek fel. Ezért a korszerű helikopterek vibrációja, illetve az általuk keltett zaj is kisebb a korábbi helikopterekhez képest. Ismertetésünkben lejátszódó folyamatok összetettségének könnyebb megértése érdekében választottuk a csuklós lapátbekötésű forgószárnyak példáját.



IV.28. ábra Forgószárny súrolt felület kritikus területei

IV.8. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [IV.1] Békési László: A multimédia és a működő modellek alkalmazási lehetőségei a repülőtisztképzés javítása érdekében, doktori (PhD) értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem (Szolnok), 2001.
- [IV.2] Békési László – Szabó László: Az egy-forgószárnyas, farok-légcsavaros helikopterek kritikus repülési üzemmódjai, Szolnoki Tudományos Közlemények XII. A tudomány napja, Szolnok, 2008. nov. 06.
- [IV.3] Данилов В. А. – Другов А.Г. – Тетерин И.В.: Вертолет МИ-8, Транспорт, Москва, 1979., pp. 248.

- [IV.4] Данилов В. А.: Вертолет МИ-8 Устройство и техническое обслуживание, Транспорт, Москва, 1988., pp. 278.
- [IV.5] Gausz Tamás: Helikopterek, BME Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1982., pp. 145.
- [IV.6] Gausz Tamás — Orosz Gyula Helikopterek (Rotoraerodinamika, Mechanikai alapismeretek) előadásvázlat, BME Járműgépészeti Intézet, 1985., pp. 18.
- [IV.7] Hennel Sándor – Megyery Miklós: Repülőgép sárkányszerkezet és rendszerismeret IV. (ISBN 963 10 2951 4) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979., pp. 156.
- [IV.8] Jereb Gábor: Aerodinamika és repüléselmélet II. (ISBN 963 10 2032 0) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., pp. 168.
- [IV.9] Jereb Gábor: Repülési alapismeretek (ISBN 963 10 3418 6) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., pp. 175.
- [IV.10] Óvári Gyula: Helikopter szerkezettan I. : Forgószárnyak, forgószárnyak vezérlőrendszerei, MN. Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1986., pp. 222.
- [IV.11] Óvári Gyula: A légijárművek gazdaságosságát és manőverezőképességét javító sárkányszerkezeti megoldások, MN. Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1990., pp. 333.
- [IV.12] Pokorádi László: Aerodinamika I., Ideális közeg általános aerodinamikája, főiskolai jegyzet, MH. SzRTF, 1993., pp. 142.
- [IV.13] Pokorádi László: Aerodinamika II., A súrlódásos és az összenyomható közeg áramlástan, főiskolai jegyzet, MH. SzRTF, 1993., pp. 170.
- [IV.14] Pokorádi László: Aerodinamika IV., Ideális Közeg két- és háromméretű áramlása, főiskolai jegyzet, MH. SzRTF, 1993., pp. 121.
- [IV.15] Pokorádi László: Mi-8 helikopter sárkányszerkezet I. Szerkezet, főiskolai jegyzet, MH. KGyRMF, Szolnok 1990., pp. 119.
- [IV.16] Pokorádi László: Mi-8 helikopter sárkányszerkezet II. Rendszerek, főiskolai jegyzet, MH. KGyRMF, Szolnok 1990., pp. 221.
- [IV.17] Szelestey Gyula: Áramlástan IV. Helikopter aerodinamika, Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1974., pp. 281.
- [IV.18] Вахитов А.Ф. – Буров Б.В.: Вертолет МИ-6А, Транспорт, Москва, 1977., pp. 216.
- [IV.19] Varga Pál: A koaxiál-rotoros helikopterek gyakorlati aerodinamikája, MÉM RNA, Budapest, 1972., pp. 312.

AZ AUTOROTÁCIÓ

V.1. BEVEZETÉS

A helikopterek egyik sajátos repülési tulajdonsága az, hogy a hajtómű(vek) leállása esetén is képes leszállást végrehajtani. Ekkor a forgószárny forgatását, illetve vonóerejét nem a hajtómű(vek) nyomatéka(i) biztosítják, hanem a forgószárny lapátokon ébredő aerodinamikai erők és nyomatékok. A forgószárny ezen üzemmódját nevezzük **autorotációnak**. Az autogirók forgószárnyai is autorotációs üzemmódon hozzák létre a repüléshez szükséges felhajtóerőt.

Autorotációs üzemmódon a helikopter helyzeti energiájának csökkenése biztosítja a forgószárny forgatásához szükséges teljesítményt, ezért ebben a repülési üzemmódban a helikopter csak — függőleges vagy ferdepályán történő — süllyedő repülést képes végrehajtani. Ebben az üzemmódban a levegő a forgószárny forgási síkján alulról felfelé halad, ellentétben a motoros üzemmóddal, ahol felülről alulra áramlik a levegő.

Zajvédelmi szempontból nincs közvetlen jelentősége a helikopterek ezen repülési üzemmódjának. De — mint az majd a V.4. fejezetből kiderül — a helikopter autorotációs tulajdonságai jelentős mértékben befolyásolják annak fel- és leszállási tulajdonságait és így a vele szemben támasztható fel- és leszállási jellemzőket.

Fejezetünkben első lépésként — a V.3. fejezetben — egy forgószárny lapalelem, majd az egész forgószárny autorotációját írjuk le. Ezt követően vizsgáljuk meg a teljes helikopter autorotációs repülését — a V. 4. fejezetben.

Mivel a függőleges, azaz tengelyirányú, autorotáció vizsgálata egyszerűbb, mint a ferdepályán történő, azaz ferde átáramlású autorotáció leírása, elemzéseinket is ezzel fogjuk kezdeni.

V.2. A FEJEZETBEN ALKALMAZOTT ÁLTALÁNOS JELÖLÉSEK

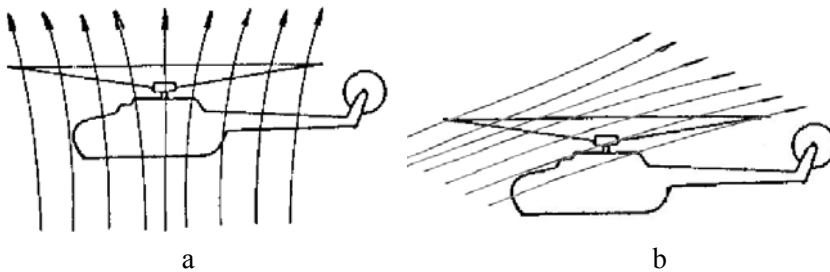
D	—	Ellenállás;
F	—	erő;
G	—	súlyerő;
L	—	felhajtóerő;
Q	—	Kerületi erő;
R	—	eredő légerő;
r	—	sugár;
T	—	vonóerő;
u	—	kerületi sebesség;

$V; v$	—	sebesség;
w	—	eredő megfúvási sebesség;
α	—	állásszög;
γ	—	az eredő légerő hátradőlési szöge;
φ	—	beállítási szög;
ρ	—	sűrűség;
v	—	a sebességi háromszög szöge;
Ω	—	forgószárny forgási szögsebessége.

V.3. A FORGÓSZÁRNY AUTOROTÁCIÓJA

A helikopter autorotációs repülésének megértéséhez először a forgószárny lapát lapelemének autorotációs állapotait, majd a teljes forgószárny önforgási üzemmódját célszerű vizsgálnunk. Most még tekintsünk el attól a kérdéstől, hogy a forgószárny hogyan került ebbe az üzemmódba (ezt majd a V.4 fejezetben fogjuk leírni), illetve, hogy egymagában repülhet-e egy forgószárny.

Mint már említettük, a helikopter autorotációs üzemmódon csak siklásra képes. Ez lehet vagy függőleges irányú (V.1.a ábra) vagy ferdepályán történő (V.1.b ábra) Ekkor a helikopter forgószárnyát a súrolt felületén áramló levegő — mozgási energiájának (sebességének) rovására — fogja forgatni. Azaz ebben az esetben az alulról felfelé áramló levegőt fogja fékezni a forgószárny (a IV.5. fejezetben már megismert) v_i indukált sebességgel a forgószárny forgássíkjaig, illetve ugyanennyivel a forgássík mögött. (Vessük össze a V.1.a és IV.11., illetve a V.1b és IV. 14. ábrákat!)



V.1. ábra Helikopter autorotációs repülése

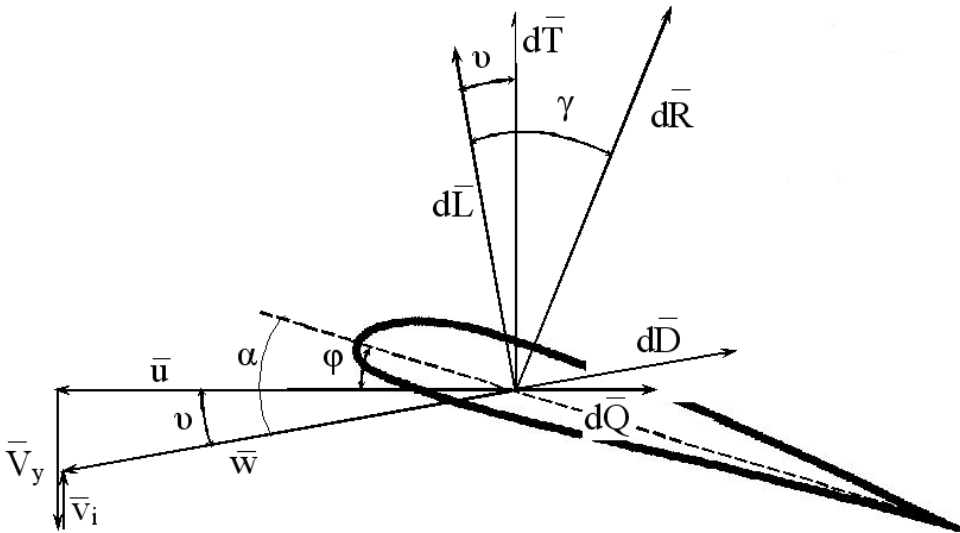
V.3.1. A FORGÓSZÁRNY LAPELEM AUTOROTÁCIÓS ÁLLAPOTAI

Rajzoljuk fel egy függőleges autorotációt végrehajtó forgószárny egy lapelemének megfúvását (V.2. ábra).

A forgószárny tengelyirányú működésekor mindegyik lapelem egy r sugarú körpályán mozog — $u = r\Omega$ kerületi sebességgel.

A kerületi sebességhez vektorosan (irányhelyesen) hozzá kell adnunk a forgószárny V_y süllyedési és v_i indukált sebességét is, melyek a merőlegesek a forgássíkra. A süllyedési sebesség természetesen lefelé mutat. Mivel autorotációs üzemmódon a felfelé áramló levegőt fékezi a forgószárny, így az indukált sebesség

felfelé mutat. (Könyvünkben a lepelem levegőhöz viszonyított mozgásait szemléltetjük.)



V.2. ábra Lapelem autorotációs megfűvése

A sebesség vektorokat összegezve a \bar{w} eredő sebességvektort kapjuk meg. A lapátelelem húrja és az eredő sebesség vektora által bezárt α szöget a lapátelelem állásszögének nevezzük.

A IV.3. fejezetben leírtak alapján ez azt jelenti, hogy a lapátelemen az adott α állásszögű, és w sebességű megfűvés esetén:

→ az eredő megfűvásra merőleges $d\bar{L}$ elemi felhajtó erő;

illetve

→ az eredő megfűvéssal párhuzamos (azzal ellentétes) $d\bar{D}$ elemi ellenállás

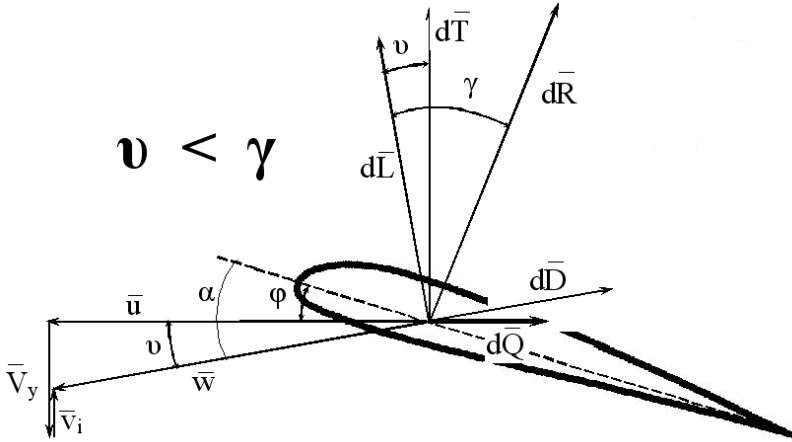
keletkezik, melyek eredője a $d\bar{R}$ elemi aerodinamikai erő. Fontos hangsúlyoznunk, hogy, a lepelemen keletkező ellenállás miatt az eredő légerő „hátrafelé dől” a $d\bar{L}$ irányához képest. Ezt a hátradőlést jellemezzük a — IV.3.3. fejezetben már megismert — γ szöggel, amit a polárisból (IV.5. ábra) tudunk leolvasni.

A sebességi háromszög vizsgálatakor láthatjuk, hogy a függőleges irányú sebességek következtében az eredő megfűvés a forgássíkhhoz képest ν szöggel lefelé dől, ami az eredő légerő ugyanilyen mértékű „előre dőlését” okozza.

Mivel minket a forgószárny vonóerejének keletkezése érdekel, ezt a $d\bar{R}$ eredő

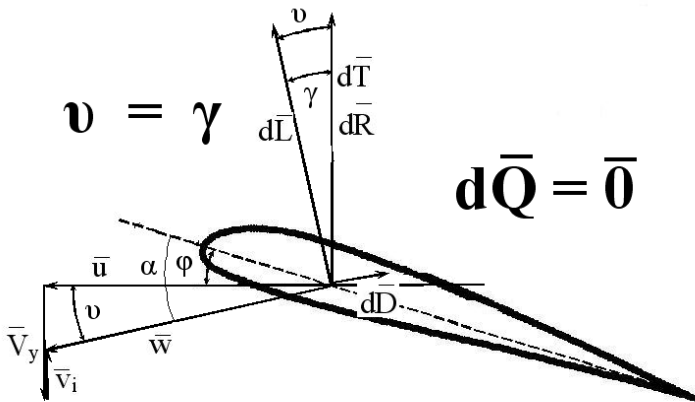
elemi légerőt a forgássíkra merőleges $d\bar{T}$ elemi vonóerőre és $d\bar{Q}$ kerületi erőre bontjuk. Az elemi vonóerők összege jelenti a forgószárny vonóerejét.

A forgássíkba eső $d\bar{Q}$ elemi kerületi erő komponens további vizsgálatot igényel. Ezért rajzoljuk fel a különböző sugáron mozgó lapelemek sebességi háromszögeit.



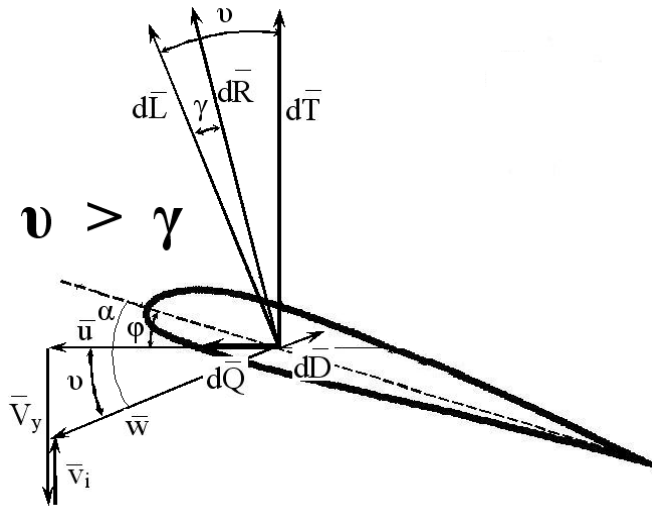
V.3. ábra Lapelem fékező autorotációs állapota

A V.3. ábrán látható, ha a $v < \gamma$ — azaz az ellenállás miatti hátradőlés nagyobb, mint a sebesség háromszög miatti előre dőlés — az eredő égerő tangenciális komponense fékezni fogja a lapát forgását. Ezt az esetet nevezzük a lapelem fékező autorotációs állapotának.



V.4. ábra Lapelem állandósult autorotációs állapota

A forgószárny sugáron befelé haladva találunk egy olyan pontot ahol $v = \gamma$ — azaz az ellenállás miatti hátradőlés azonos mértékű, mint a sebesség háromszög miatti előre dőlés. Ekkor az eredő elemi légerő megegyezik az elemi vonóerővel. Ezt, a V.4. ábrán látható, állapotot állandósult autorotációs állapotnak nevezzük.



V.5. ábra Lapelem gyorsuló autorotációs állapota

Tovább haladva befelé a forgószárny sugáron azt tapasztaljuk, hogy az eredő légerő ellenállás miatti hátradőlése kisebb, mint a sebesség háromszög miatti előre dőlése, azaz: $v > \gamma$. Ekkor az elemi eredő légerő forgássíkba eső komponense a forgási irányba mutat (V.5. ábra). Ezen tangenciális erő nyomatéka gyorsítaná a lapelemet, illetve a forgószárny lapátot. Ekkor beszélünk a lapelem gyorsító autorotációs állapotáról.

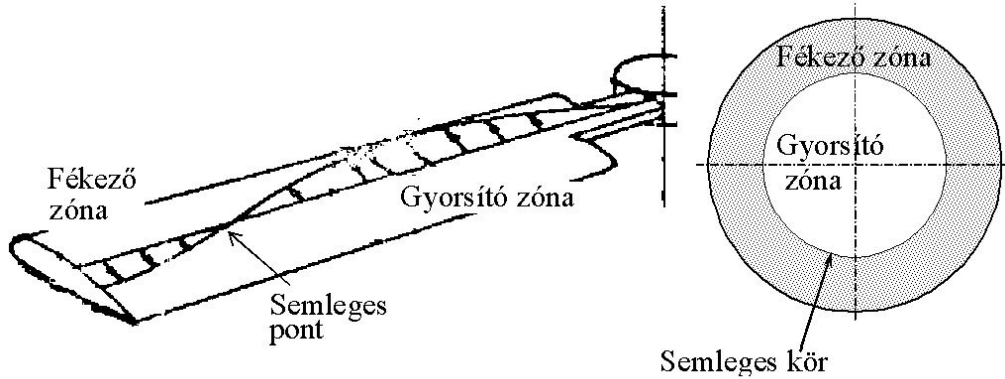
V.3.2. A FORGÓSZÁRNY AUTOROTÁCIÓS ZÓNÁI

Ha a forgószárny lapát sugara mentén végig megvizsgáljuk, hogy a lapelemek milyen állapotban vannak, azt tapasztaljuk tengelyirányú átláramlási üzemmódon, hogy egy adott sugarú körön semleges állapotban dolgoznak a lapelemek (V.6. ábra). Ezt a kört semleges körnek nevezzük. A semleges körön kívül található lapelemek fékező állapotban dolgoznak. Ezt fékező zónának nevezzük. A semleges körön belül találjuk a gyorsító zónát, ahol a lapelemek gyorsító állapotban működnek.

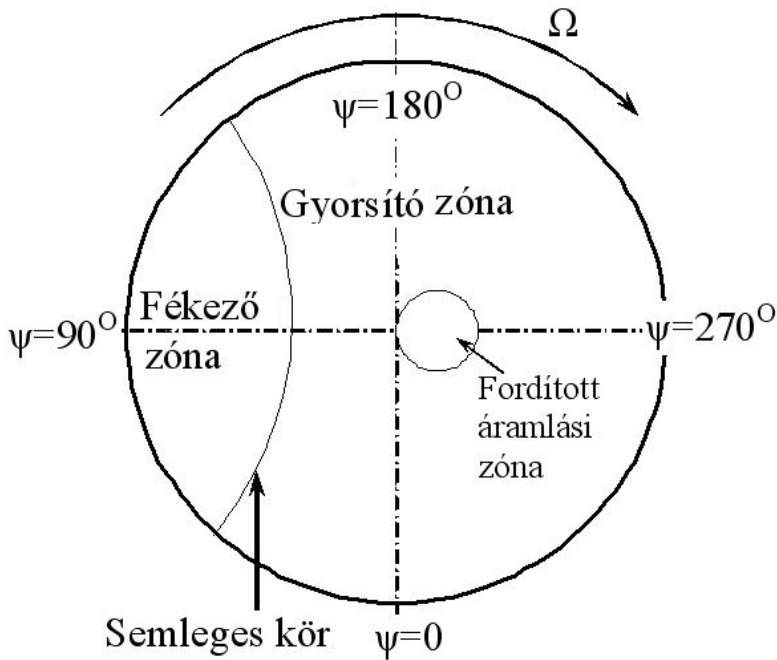
Belátható, hogy tengelyirányú átláramlás esetén, maga a forgószárny állandósult autorotációt akkor tud végrehajtani, amikor a gyorsító, illetve a fékező zónák nyomatékai kiegyenlítik egymást.

Ferde átláramlási üzemmódon a lapelemek megfűvése bonyolultabban írható le. A repülési sebesség vízszintes összetevőjét — mely az azimut szög függvényében változik — és a lapátok csapkodó mozgását is figyelembe kell venni a lapelemek

sebességi háromszögek felrajzolásához. Könnyen belátható, hogy ekkor is kialakulnak a lapelemek az előzőekben tárgyalt fékező, semleges és gyorsító állapotai, illetve a forgószárny semleges köre, valamint fékező és gyorsító zónái (V.7. ábra). Ekkor is abban az esetben fog állandósulni a forgószárny önforgási üzemmódja, amikor a különböző zónák nyomatókai kiegyenlítik egymást.



V.6. ábra Forgószárny lapát tengelyirányú autorotációja



V.7. ábra Forgószárny ferde átáramlási autorotációs zónái

V.4. A HELIKOPTER AUTOROTÁCIÓS REPÜLÉSE

A forgószárny autorotációs működésének megértése után írjuk le egy — a legáltalánosabban elterjedt egyforgószárnyas faroklégcsavaros — helikopter autorotációs repülését.

V.4.1. AZ AUTOROTÁCIÓRA TÖRTÉNŐ ÁTÁLLÁS

Első lépésként célszerű a hajtómű(vek) leállása utáni folyamatot megvizsgálnunk:

A hajtómű(vek) repülés közbeni leállásakor a forgószárny lapátok — tehetetlenségüknél fogva — tovább forognak. Azért, hogy a hajtómű ne fékezze a forgószárnyat, közéjük szabadonfutó tengelykapcsolót építenek be. A teljes forgószárny fékező üzemmódban dolgozik, mivel a lapátelemeken ébredő légerők fékező hatást fejtenek ki. Annak érdekében, hogy minél nagyobb legyen a forgószárny gyorsító zónájának nyomatéka, a helikopter vezetőnek minimálisra kell állítania a forgószárny lapátok közös beállítási szögét — azaz az egyesített vezérlőkart le kell nyomnia, valamint meg kell növelni a forgószárny állásszögét — azaz „hasra húzni” kell a botkormányt.

A forgószárny törzsre gyakorolt nyomatéki hatása jelentősen megváltozik. Egyrészt, mivel a forgószárny már nem kap hajtást a hajtómű(vek)től, ezért a forgásával ellentétes irányú reakció nyomatéka megszűnik. Ezzel egy időben a közlőműrendszerben fellépő csapágysúrlódás következtében a forgószárny a törzset a forgásának irányába akarja elforgatni. Ezért a helikopter vezetőnek a farok légcsavar vonóerejének irányát meg kell fordítania — azaz be kell lépnie a lábkontrollal.

A faroklégcsavar vonóerő irányának megfordulása miatt a helikopter keresztirányú egyensúlyának biztosítása érdekében a pilótának oldalirányban kell mozdítania a botkormányt.

Mivel a faroklégcsavarnak autorotációs üzemmódon is vonóerőt kell létrehoznia és a hajtómű(vek) már nem működ(nek), a forgatásához szükséges nyomatókat csakis a forgószárny tudja biztosítani.

A faroklégcsavaron túl, autorotációs repülés esetén a létfontosságú segédberendezések (mint például a kormányvezérlő rendszer hidraulikus kormányerő csökkentői) hajtásához szükséges teljesítményt, nyomatókat is a forgószárnynak kell biztosítani.

V.4.2. AZ ÁLLANDÓSULT AUTOROTÁCIÓ KIALAKULÁSA

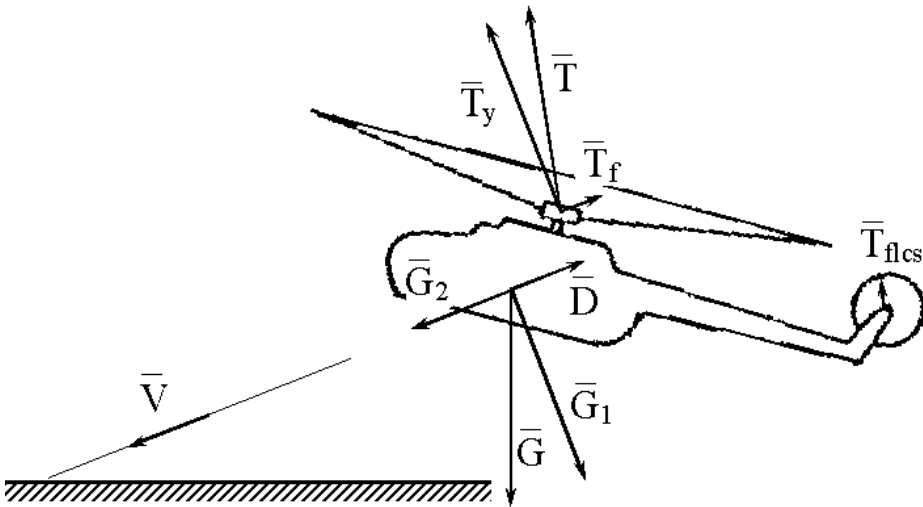
A helikopter autorotációs repülésre való átállás után a következő fontos kérdés az állandósult állapot elérése. Ez egy nagyon bonyolult feladat, mivel a korábban leírt kérdések egyidejű megoldását jelenti.

A forgószárny gyorsító zónájában keletkező gyorsító nyomatéknak egyensúlyt kell tartania a fékező zóna fékező nyomatékával, a farok-légcsavar forgatásához valamint a segédberendezések működtetéséhez szükséges nyomatókkal.

A fenti feltétel a megfelelő méretű gyorsító zóna kialakulásával oldható meg. Ezt pedig egyértelműen (de, összetett módon) a forgószárny, azaz a helikopter,

süllyedő sebessége határozza meg. Azaz meg kell találnunk azt a siklási sebességet és pályahajlásszöget, ahol az első feltételként megfogalmazott nyomatéki egyensúly kialakul.

Az állandósult siklási sebességet — mely célszerű, hogy az úgynevezett gazdaságos sebesség (lásd V.3. fejezetet) legyen — viszont csakis a helikopterre ható erők és nyomatékok egyensúlya esetén tudjuk elérni. Ez azt jelenti, hogy a forgószárny \bar{T} vonóerejének egyensúlyt kell tartania a helikopter \bar{G} súlyával, helikopter repüléséből származó \bar{D} ellenállási erővel, valamint a farok légcsavar \bar{T}_{flcs} oldalirányú erejével. (V.8. ábra) Továbbá, a forgószárny nyomatéki hatását ki kell hogy egyensúlyozza a farok légcsavar helikopter súlypontjára kifejtett nyomatékával.



V.8. ábra Helikopter autorotációs siklása

Könnyen belátható, hogy egy helikopter állandósult önforgási üzemmódon történő siklásának kialakulása bonyolult, sok összetevős probléma. Ha bármelyik összetevő már kis mértékben is megváltozik, új egyensúlyi helyzet, állandósult önforgási siklási üzemmód alakulhat ki.

V.4.3. AZ AUTOROTÁCIÓS LESZÁLLÁS

A helikopter autorotációs siklása végén a talaj közeli manőver a végső, kritikus mozzanat.

Ha a helikopter függőleges vagy közel függőleges autorotációs süllyedést hajt végre, a talaj fölött körülbelül 20 ~ 25 méter magasságban a helikopter vezetőnek hirtelen felrántással maximális értékűre kell növelni a forgószárny lapátok közös beállítási szögét. Ekkor a forgószárny vonóerő hirtelen megnövekszik, mert a lapátok tehetetlenségüknél fogva még tovább forognak. A megnövekedett vonóerő hatására a helikopter süllyedő, így a helikopter talajfogási, földhöz ütközési sebessége nagy

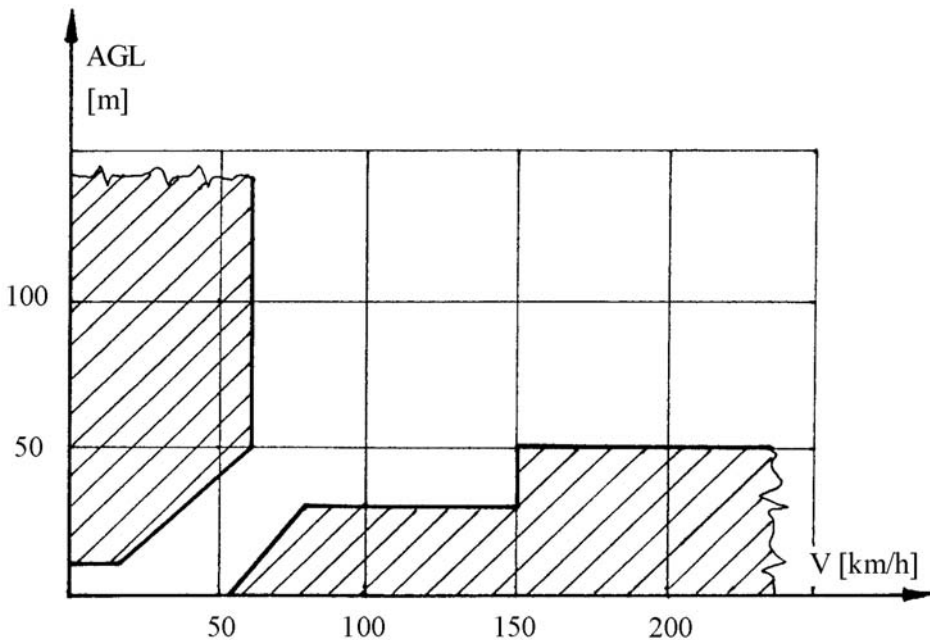
mértékben csökken. A helikopter mozgási energiáját a sárkány szerkezet különböző energiaelnyelő elemei fogják felemészteni.

Ferde pályán történő autorotációs siklás végén egyik lehetséges megoldásnak mutatkozik az előző bekezdésben leírt eljárás. Ha a terepviszonyok lehetővé teszi — a talajfogás előtt, 15 ~ 30 méter magasan — a forgószárny lapátok közös beállítási szögének fokozatos növelésével is lehetséges a süllyedő sebesség csökkentése. A helikopter talajfogása után a merevszárnyas repülőgépek kigurulásával egyező művelettel csökkenthető a helikopter mozgási energiája.

A VI.5. fejezetben még részletesebben tárgyaljuk a helikopter leszállási módjait.

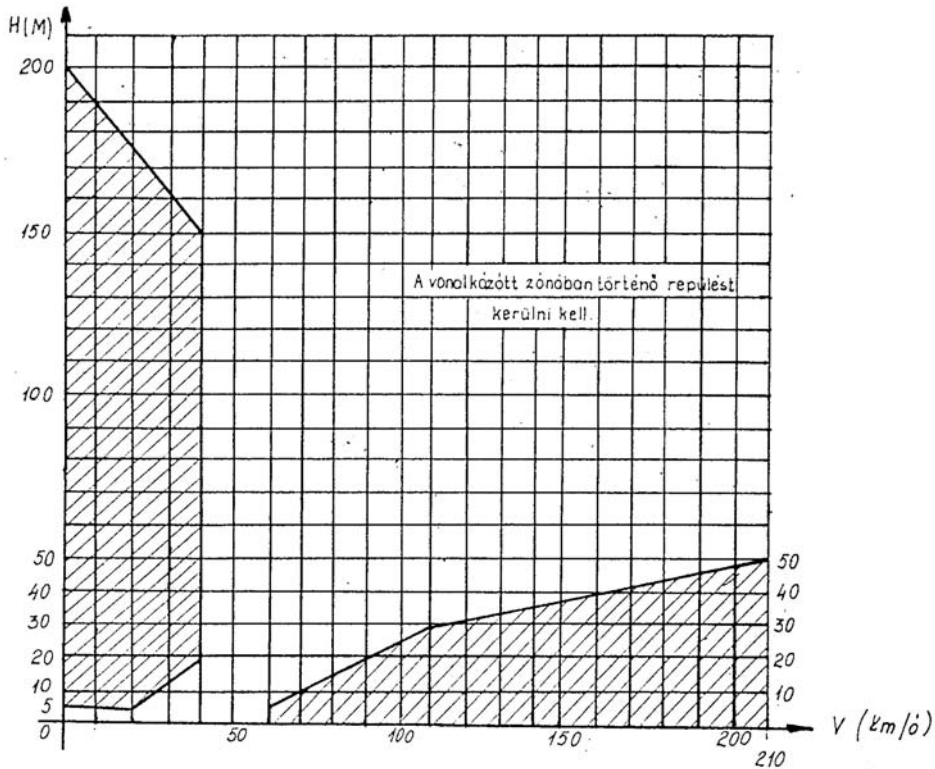
V.4.4. A HELIKOPTEREK VESZÉLYES REPÜLÉSI TARTOMÁNYAI

Az autorotációs repülést, siklást a helikopter úgynevezett gazdaságos sebességével célszerű végrehajtani. Függés vagy a gazdaságosnál kisebb sebességű repülés esetén a helikoptert fel kell gyorsítanunk erre a sebességre. Ezt csak a helyzeti energiájának rovására tudjuk megoldani, ami egyértelműen magasságvesztést igényel. Ez azt jelenti, hogy a helikopternek egy adott talaj feletti magasságra van szüksége, hogy a helyzeti energiáját megfelelő mértékű mozgási energiává (sebességgé) tudja alakítani. Csak ha kialakul a megfelelő sebességű, állandósult autorotációs süllyedés, tudja a helikoptervezető megfelelően végrehajtani az előző fejezetben leírt műveleteket a sikeres autorotációs földet érés érdekében.



V.9. ábra Mi-6 helikopter veszélyes repülési tartományai
(forrás: [V.13])

E fenti gondolatmenetből egyértelműen következik az, hogy kis sebességű repülés esetén létezik egy talajfeletti magasság–sebesség tartomány, ahol a hajtómű(vek) leállásakor nincs lehetőség a helikopterrel autorotációs leszállás végrehajtására. Ezt a **kissebességű veszélyes repülési tartomány**nak nevezzük, ami a V.9. és V.10. ábrák ábra bal oldalán látható.



V.10. ábra Mi-8 helikopter veszélyes repülési tartományai
(forrás: [V.6])

A helikopter kis talaj feletti magasságon végrehajtott, viszonylag nagy sebességű repülésekor azzal a problémával találkozhatunk, hogy a helikopter vezetőjének nincs ideje, hogy reagáljon a hajtómű(vek) leállására. Ezen repülési tartomány neve: **nagysebességű veszélyes repülési tartomány**.

A veszélyes repülési tartományok korlátozzák a helikopterek alkalmazhatóságát. Repülésbiztonsági okokból a helikoptereknek általában tilos repülni e két veszélyes repülési tartományban. Ez a korlátozás viszont befolyásolja a fel- és leszállási módokat, azaz a leszállóhelyek használatának rendjét.

Több hajtóműves helikopterek esetében ez a repülési korlátozás nem olyan szigorúan jelentkezik, mivel általában egy hajtóművel is képes biztonságos repülést végrehajtani. De, azt is figyelembe kell vennünk (s ezt a repülésbiztonsági statisztikai elemzések is igazolják), hogy az egyik hajtómű leállása esetén jelentősen megnő a másik hajtómű leállásának valószínűsége is. Például, ha a helikopter belerepül egy

madárrajba és ezért az egyik hajtóműve „madarat nyel” és leáll, akkor nagy annak a valószínűsége, hogy a másik hajtómű is madárütkezés miatt sérülést szenved.

Fontos itt megjegyezni, hogy a helikopterek vészhelyzetben történő lehetséges leszállási módjai egy sokkal összetettebb helikopter-szerkezettani kérdés, melynek részletes megtárgyalása túlmutat a könyv témakörén. A helikopterek ez irányú repülésbiztonsági kérdéseit elemzi Óvári Gyula például a [V.8] és a [V.9] tanulmányaiban.

V.5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [V.1] Békési László: A multimédia és a működő modellek alkalmazási lehetőségei a repülőtisztképzés javítása érdekében, doktori (PhD) értekezés, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem (Szolnok), 2001.
- [V.2] Borsányi József: Készítsen tanulmányt a helikopterek autorotációs üzemmódjáról, Szakdolgozat, MN KGyRMF, Szolnok, 1988. pp. 36. (konzulens: Pokorádi László)
- [V.3] Данилов В. А.: Вертолет МИ-8 Устройство и техническое обслуживание, Транспорт, Москва, 1988., pp. 278.
- [V.4] Gausz Tamás: Helikopterek, BME Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1982., pp. 145.
- [V.5] Gausz Tamás — Orosz Gyula Helikopterek (Rotoraerodinamika, Mechanikai alapismeretek) előadásvázlat, BME Járműgépészeti Intézet, 1985., pp. 18.
- [V.6] Leiner László: Vizsgálja meg a helikopter fel- és leszállási módjait, illetve a környezeti jellemzők ezekre gyakorolt hatásait, Szakdolgozat, ZMNE SzRfK, Szolnok, 1997. pp. 78. (konzulens: Pokorádi László)
- [V.7] Óvári Gyula: Helikopter szerkezettan I. : Forgószárnyak, forgószárnyak vezérlőrendszerei, MN. Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1986., pp. 222.
- [V.8] Óvári Gyula: Autorotálni, katapultálni vagy lezuhanni? Haditechnika 1992/4 p. 2-9.
- [V.9] Óvári Gyula: Biztonság- és repüléstechnikai megoldások katonai helikopterek harci túlélőképességének javítására Repüléstudományi Közlemények 2005. 04. 15. (különszám)
- [V.10] Pokorádi László: Mi-8 helikopter sárkányszerkezet I. Szerkezet, főiskolai jegyzet, MH. KGyRMF, Szolnok 1990., pp. 119.
- [V.11] Szelestey Gyula: Áramlástan III. Helikopter aerodinamika, Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1974., pp. 281.
- [V.12] Szigeti Zoltán: Készítsen tanulmányt a forgószárny és a helikopter autorotációjáról, Szakdolgozat, ZMNE SzRfK, Szolnok, 1997. pp. 69. (konzulens: Pokorádi László)
- [V.13] Вахитов А.Ф. – Буров Б.В.: Вертолет МИ-6А, Транспорт, Москва, 1977., pp. 216.
- [V.14] Varga Pál: A koaxiál-rotoros helikopterek gyakorlati aerodinamikája, MÉM RNA, Budapest, 1972., pp. 312.

www.airportdebrecen.hu



REPÜLJÖN DEBRECENBŐL!



- Egyszerű check-in
- Gyors megközelítés
- Családias, kellemes várótermek
- Ingyenes vagy őrzött-fizetős parkolás



Tel: 52/518-800 office@airportdebrecen.hu Fax: 52/518-802

A DAB SZÉKHÁZÁNAK TEREMBÉRLÉSI LEHETŐSÉGEI:

Nagy előadó:

155-170 személy befogadására alkalmas, kiváló technikai feltételeket biztosító terem.



Klub:

Kis létszámú, 20-30 személyes megbeszéléseknek, a DAB-klub összejöveteleinek, kötetlenebb találkozóknak és vendéglátásnak lehetőséget adó barátságos hely.



Tanácsterem:

60 személy befogadására alkalmas terem, vetítési lehetőséggel.



Kis előadó:

Maximálisan 80 személy befogadására alkalmas, vetítési lehetőséggel ellátott terem.



Vendégszobák:

A székház 8 darab kétágyas szobával rendelkezik a mai kor igényének megfelelően berendezve (internet, légkondicionáló, telefon).



A részletek miatt kérjük, hívja a következő telefonszámot: +36 52/ 412 177

A HELIKOPTER REPÜLÉSI ÜZEMMÓDJAI

VI.1. BEVEZETÉS

A környezeti zaj szempontjából a legkritikusabb kérdés a helikopterek fel- és leszállása, a repülőtér vagy leszállóhely kialakítása, használata. Ezért ennek a fejezetnek a fő célja a helikopterek fel- és leszállásának repülésmechanikai leírása. A vizsgálandó manőverek korrekt megismeréséhez röviden el kell végeznünk a helikopter alap repülési módjának, a vízszintes repülésnek, a teljesítmény szempontú elemzését.

Jelen fejezetben — VI.7. alfejezetben felsorolt szakirodalmakra támaszkodva — előbb, a VI.3 alfejezetben, helikopter vízszintes repüléséhez szükséges teljesítményt elemezzük. A következő, VI.4. alfejezetben a helikopter lehetséges felszállási módjait ismertetjük és elemezzük a könyv fő vizsgálati céljai alapján repüléstechnikai szempontokból. A VI.5. alfejezetben a helikopter motoros leszállási módjainak ismertetésére, és elemzésére kerül sor. Végezetül a fejezetben bemutatottak alapján összegzett következtetéseket vonunk le a helikopter fel- és leszállásával, illetve a megfelelő leszállóhely kialakításával, működtetésével kapcsolatban

VI.2. A FEJEZETBEN ALKALMAZOTT ÁLTALÁNOS JELÖLÉSEK

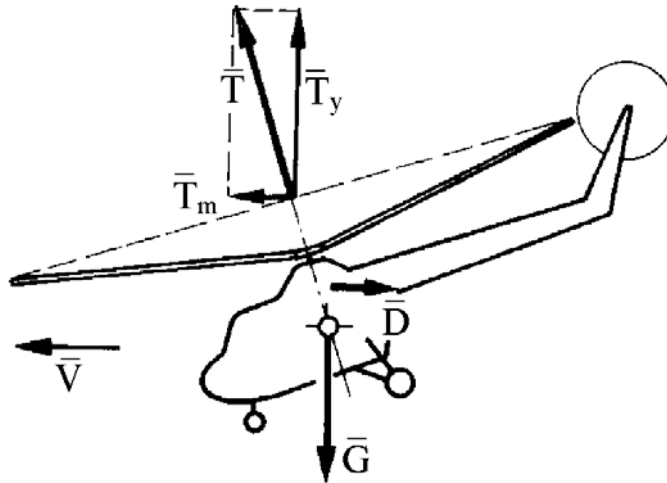
A	—	felület; keresztmetszet;
c_{Dk}	—	törzs káros ellenállási erő tényezője;
D	—	Ellenállási;
G	—	súlyerő;
P	—	teljesítmény;
T	—	vonóerő;
$V; v$	—	sebesség;
α_R	—	forgószárny állásszög;
ρ	—	sűrűség;

VI.3. A HELIKOPTER VÍZSZINTES REPÜLÉSE

A merev- és forgószárnyas repülőgépek manővereinek vizsgálatához feltétlen szükségünk van az adott gép vízszintes repüléséhez szükséges, illetve a rendelkezésre álló (hajtómű) teljesítmények arányának ismeretére. Ezért jelen fejezetben röviden ezt a kérdéskört fogjuk elemezni.

Vízszintes repülésen — repülésmechanikai, teljesítmény-elemzési szempontból — a repülőgép állandó magasságon történő, egyenes vonalú, egyenletes sebességű repülését értjük. Ez — NEWTON 1. törvényéből adódóan — akkor lehetséges, amikor a helikopterre ható erők egyensúlyban vannak. Ezt szemlélteti a VI.1. ábra. Az erők egyensúlyának biztosításához a vízszintes repüléshez szükséges

valamint a hajtómű(vek) által biztosított rendelkezésre álló teljesítményeknek is egyensúlyban kell lenniük. Teljesítmény elemzések során feltételezzük, hogy a helikopterre ható erők mindegyike a helikopter súlypontjára hat, így arra nyomatékok nem hatnak.



VI.1. ábra Helikopterre ható erők egyensúlya vízszintes repülés esetén

A helikopter vízszintes repüléséhez szükséges teljesítményt három fő összetevőre tudjuk bontani. Fontos azt hangsúlyozni, hogy ez az elkülönítés teljesen önkényes, mivel a valóságban az összes teljesítmény a forgószárny hajtására fordítódik. (A farok-légszárny forgatásához szükséges teljesítmény, mely lényegében nem változik a repülési sebesség változásával, elhanyagoljuk.) A főbb teljesítmény összetevők:

P_{pr} – Profilteljesítmény:

A forgószárny-lapátok profilellenállásának legyőzéséhez szükséges teljesítmény. Pontos, korrekt áramlástan elemzése igen bonyolult, mivel a lapátelelemek állásszöge, eredő megfúvási Mach-száma jelentős mértékben változik a sugár, valamint az azimutszög függvényében a repülés során. Nagysága a másik két összetevőhöz képes viszonylag kis mértékben változik, a repülési sebesség növekedésével enyhén növekszik. (VI.2. ábra)

P_i – Indukált teljesítmény:

A forgószárny indukált sebességének (lásd III.5. fejezetet) létrehozásához szükséges teljesítmény. Az ideális forgószárny egyszerű impulzus elméletéből a

$$P_i = T v_i \quad (VI.3.1)$$

összefüggés alapján meghatározható. A forgószárny vonóerő jó közelítéssel

megegyezik a helikopter súlyával. Így a helikopter függésekor — amit zérus sebességű vízszintes repülésnek is tekinthetünk — felhasználva a (III.5.4) egyenletet:

$$P_i = G \sqrt{\frac{G}{2\rho A_s}} \quad . \quad (\text{VI.3.2})$$

Ferde átáramlási üzemmódon az átáramló levegő tömegáramát a V_1 eredő megfúvási sebességgel (lásd III.14. ábrát) számíthatjuk, mely repülési- és az indukált sebesség vektorainak vektoriális összege, azaz

$$V_1 = \sqrt{(V \sin \alpha_R + v_i)^2 + (V \cos \alpha_R)^2} \quad . \quad (\text{VI.3.3})$$

Ebben az esetben a forgószárny vonóerőt a

$$T = 2\rho A_s V_1 v_i \quad , \quad (\text{VI.3.4})$$

illetve az indukált sebességet a

$$v_i = \frac{T}{2\rho A_s V_1} \quad (\text{VI.3.5})$$

módon határozhatjuk meg. Az indukált teljesítményt pedig a

$$P_i = \frac{G^2}{2\rho A_s V_1} \quad (\text{VI.3.6})$$

összefüggéssel számíthatjuk. A (VI.3.6) egyenletből — figyelembe véve a (VI.3.3) összefüggést — az a következtetést vonhatjuk le, hogy a vízszintes repülési sebesség növekedésével csökken az indukált teljesítmény (VI.2. ábra). Ezt a kérdéskört már a IV.5.1. fejezetben lényegében érintettük, amikor megállapítottuk, hogy kis levegőtömeg (függés) nagyobb sebességnövelésével, vagy nagyobb levegőtömeget (vízszintes repülés) mozgatva, viszonylag kis indukált sebességgel biztosítjuk a forgószárny vonóerejét.

P_m – Mozgatási teljesítmény:

A helikopter káros ellenállásának legyőzéséhez szükséges teljesítmény, mely a

$$P_m = D_{\text{heli}} V \quad (\text{VI.3.7})$$

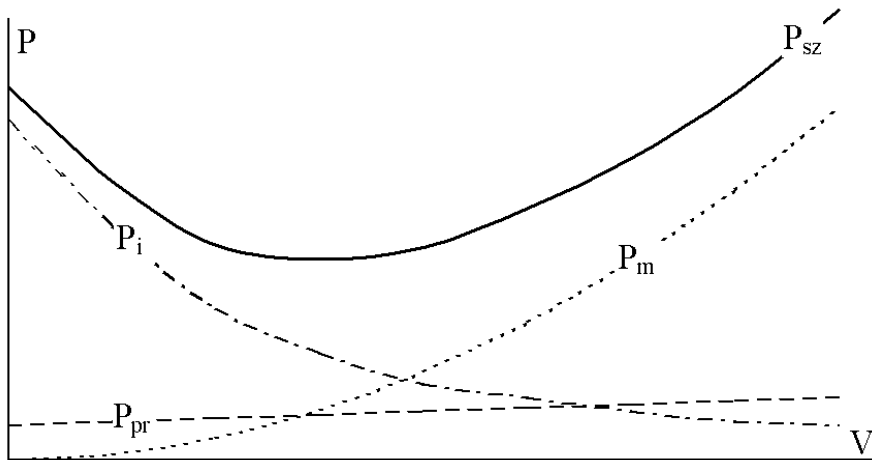
módon számítható. A (IV.3.4) egyenlet analógiájára a helikopter káros ellenállása:

$$D_{\text{heli}} = \frac{\rho}{2} A_s c_{Dk} V^2 \quad , \quad (\text{VI.3.8})$$

módon számítható. Némi egyszerűsített szemlélettel (VI.3.8) egyenletet a (VI.3.7) egyenletbe helyettesítve, kapjuk meg azt a

$$P_m = \frac{\rho}{2} A_s c_{Dk} V^3 \quad (\text{VI.3.9})$$

összefüggést, mely alapján kijelenthetjük, hogy a mozgatási teljesítmény a repülési sebesség harmadik hatványával közel arányosan növekszik (VI.2. ábra).



VI.2. ábra Vízszintes repüléshez szükséges teljesítmény összetevői

A vízszintes repüléshez szükséges teljesítmény a fenti három teljesítmény-összetevő összege, azaz:

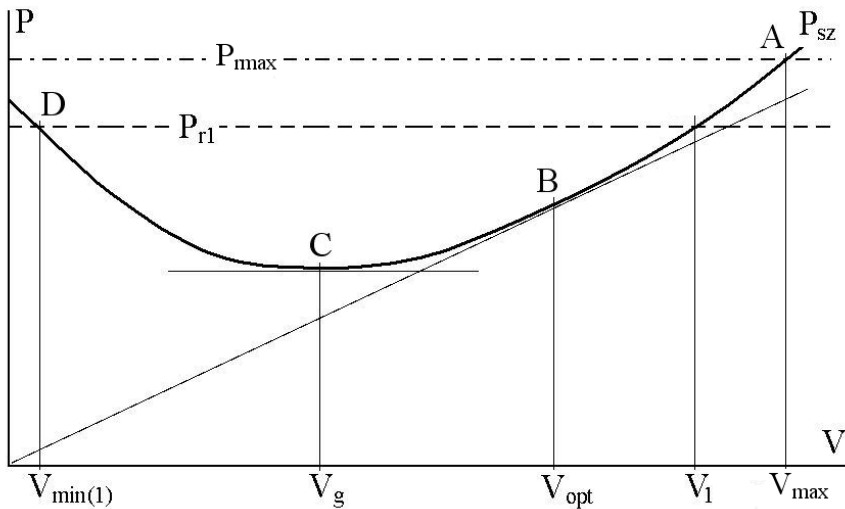
$$P_{sz} = P_{pr} + P_i + P_m \quad , \quad (\text{VI.3.10})$$

amit a VI.2. ábra szemléltet.

Az ábrából megállapítható, hogy kis repülési sebességnél az indukált teljesítmény dominál, nagy sebességeknél pedig a mozgatási teljesítmény a mérvadó. A másik érdekes következtetés, amit a szükséges teljesítmény görbékből le tudunk olvasni az az, hogy egy adott ponttól a repülési sebesség csökkenésével növekszik a szükséges teljesítmény. Ez teljesen ellentétben áll a „szárazföldi” járművek teljesítmény igényével. Ez a (merev- és forgószárnyas) repülőgépek egyik fontos sajátossága, ami annak következménye, hogy azok a repüléshez szükséges felhajtó erőt aerodinamikai úton hozzák létre. A teljesítmény görbe ezen tulajdonsága esetünkben meghatározhatja a helikopterek repülését, fel- és leszállási, illetve repülőtér vagy

leszállóhely használati módjait. De ez azt is jelenti, hogy a gazdaságosnál kisebb repülés esetén a nagyobb szükséges teljesítmény következtében nagyobb hajtóműzajjal kell számolnunk.

A repülési manőverek elemzéséhez azt is fontos tudnunk, hogy a rendelkezésre álló teljesítmény is hogyan alakul. Ez vizsgálható a VI.3. ábrán. Most arra nem térünk ki, hogy a rendelkezésre álló hajtómű teljesítmény miként alakul a repülési magasság, illetve sebesség függvényében. Ez a hajtóműelmélet tudományterület művelőinek feladata. Számunkra a továbbiakban ez nem lesz fontos tényező.



VI.3. ábra Helikopter teljesítmény diagramjai

Több, fontos adatot tudunk leolvasni a teljesítmény grafikonról. Ezek:

V_{max} – maximális repülési sebesség (A pont):

Ez az a sebesség, ahol a „jobb oldalt” metszi egymást a szükséges és a rendelkezésre álló teljesítménygörbe a maximális hajtómű teljesítménynél. Ezen sebesség fölött — mivel nem rendelkezik a helikopter a repüléshez szükséges teljesítménnyel — vízszintes repülésre képtelen, csak motoros süllyedést tud végezni.

V_{opt} – optimális repülési sebesség (B pont):

Értéke a grafo-analitikusan az origóból a szükséges teljesítménygörbéhez húzott érintővel határozható meg. Ezzel a sebességgel képes a helikopter adott tüzelőanyag mennyiséggel a legtávolabbra, leghosszabb útvonalon repülni, illetve a legkisebb meredekséggel (pályahajlás szögével) siklást végrehajtani.

V_g – gazdaságos repülési sebesség (C pont):

Ez a minimális teljesítményigényű sebesség. Grafikusan a szükséges teljesítmény görbéhez húzott vízszintes érintő adja meg. Mivel ezen a sebességen rendelkezik a

helikopter a maximális teljesítmény tartalékkal (a rendelkezésre álló és szükséges teljesítmény különbségével), ezzel a sebességgel tudja elérni a maximális emelkedési sebességet. A minimális teljesítményigény következtében ezzel a sebességgel képes a helikopter a leghosszabb ideig levegőben tartózkodni, és a legkisebb függőleges sebességgel siklani. A gazdaságos sebességgel célszerű végrehajtani az autorotációs siklást is (lásd V.4.2. és V.4.4. fejezeteket).

V_{min} – minimális repülési sebesség (D pont):

Ezt a sebességet a szükséges és a rendelkezésre álló teljesítménygörbe a „baloldali” metszéspontja adja meg – ha metszik egymást (lásd a P_{rl} görbe). Ha nem metszik egymást a görbék (lásd a P_{rmax} görbét), az azt jelenti, hogy zérus sebességnél van teljesítmény tartalékja a helikopternek, azaz képes függésre a légpárnahatáson kívül (lásd IV.5.2. fejezetet), és függőleges emelkedésre. Ha a két teljesítmény görbe metszi egymást az azt jelenti, hogy a helikopter képtelen légpárnahatáson kívül függőleges repülési üzemmódokon repülést végrehajtani.

Meg kell jegyeznünk, hogy mindkét teljesítmény görbét több tényező is befolyásolja.

Először ezek közül kiemeljük a felszálló súly hatását. Nagyobb felszálló súly esetén megnő a vízszintes repüléshez szükséges teljesítmény az indukált teljesítmény növekedése miatt.

A repülési magasság (vagy a levegő hőmérsékletének) növekedésekor a levegő sűrűsége lecsökken, ezért csökken a hajtómű(vek) által leadott teljesítmény, valamint a forgószárny súrolt felületén átáramló levegőmennyiség és így a forgószárny vonóereje is. Ennek következtében lesz egy olyan magasság, ahol a függéshez szükséges és a rendelkezésre álló teljesítmény megegyezik. Ezen a magasságon helikopter még képes függést végrehajtani, ezért (elméleti) **statikus csúcsmagasságnak** nevezzük. A statikus csúcsmagasság fölött a minimális sebesség növekedni fog.

Találunk egy olyan magasságot, ahol a minimális és maximális sebesség megegyezik a gazdaságos sebességgel. Azt a repülési magasságot, ahol a szükséges és a rendelkezésre álló teljesítmény görbék csak egy pontban érintik egymást, azaz csak egy sebességgel képes vízszintes repülést végrehajtani a helikopter, (elméleti) **dinamikus csúcsmagasságnak** nevezzük.

A fenti két csúcsmagasság értékét befolyásolja a helikopter felszálló súlya. (Gyakorlati csúcsmagasságokon azokat a repülési magasságokat értjük, ahol a helikopter képes még 0,5 m/s-os emelkedési sebességű függőleges, illetve ferde pályán történő emelkedő repülést végrehajtani.)

VI.4. A HELIKOPTER FELSZÁLLÁSI MÓDJAI

A helikopter felszállása egy átmeneti, változó gyorsulású repülési üzemmód, amikor a sebessége nulláról a gazdaságos sebességig nő, mivel a helikopter az emelkedő repülését rendszerint ezzel a sebességgel hajtja végre a repülési magasság eléréséig. A helikopter több módon képes felszállást végrehajtani. A választandó vagy választható

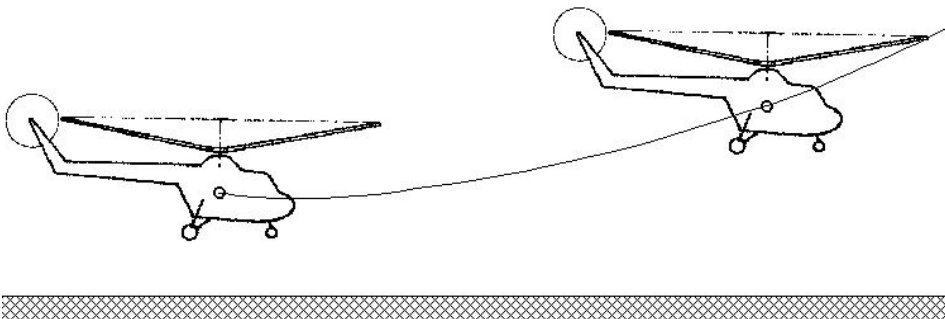
felszállási módot több tényező is befolyásolja. Ezek: a tengerszint feletti (repülési) magasság, a levegő hőmérséklete, a felszálló helyen uralkodó szél nagysága és iránya, a gép felszálló súlya, illetve a terepviszonyok. A fentiektől függően a felszállás végrehajtható:

- helikopterszerűen;
- repülőgépszerűen;
- helikopterszerűen a légpárnahatás felhasználásával;
- helikopterszerűen függőleges emelkedéssel.

VI.4.1. HELIKOPTERSZERŰ FELSZÁLLÁS

A helikopter alapvető felszállási módja. Fázisai (VI.4. ábra):

- függőleges elemelkedés,
- függés 1,5 – 2 m magasan a forgószárny, a hajtómű(vek), a berendezések működésének, és a helikopter súlyponthelyzetének ellenőrzése;
- ferde pályán történő emelkedés, sebesség gyűjtés.



VI.4. ábra Helikopterszerű felszállás

Ez a felszállási mód nem alkalmazható, ha:

- a helikopter túlterhelt;
- a hajtómű teljesítménye nem elegendő a légpárnahatás fölötti emelkedő repüléshez;
- a repülőtér nagy magasságon fekszik;
- magas a levegő hőmérséklete.

Ezekben az esetekben a felszállást más módon kell végrehajtani,

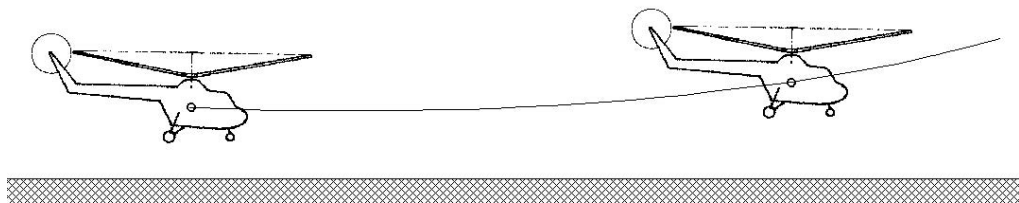
Összességében úgy fogalmazható meg, hogy helikopter az adott felszálló súlyához tartozó statikus csúcsmagasság alatt (lásd a VI.3. fejezetet) képes ezen a felszállási mód végrehajtására.

VI.4.2. HELIKOPTERSZERŰ FELSZÁLLÁS LÉGPÁRNAHATÁS FELHASZNÁLÁSÁVAL

Ekkor a III.5.2. fejezetben megismert légpárna azon hatását használjuk ki, mely egy látszólagos vonóerő növekményt, szükséges teljesítmény csökkenést jelent. Fázisai (VI.5. ábra):

- függőleges emelkedés;
- függés 1,5 – 2 m magasan a forgószárny, a hajtómű(vek), a berendezések működésének, és a helikopter súlypont helyzetének ellenőrzése;
- sebességgyűjtés a talaj közelében a légpárnahatás fokozatos csökkenésével úgy, hogy a talaj és a forgószárny forgássíkja közti távolság nem haladhatja meg a forgószárny sugarát;
- ferde pályán történő emelkedés, további sebesség gyűjtés.

A felszállási mód végrehajtásához megfelelő hosszúságú sík terep szükséges, melyen nem lehet nagyobb árok, vagy bemélyedés, ahol a légpárnahatás hirtelen megszűnhet, azaz a légpárna „elszökhet”.



VI.5. ábra Helikopterszerű felszállás légpárnahatás felhasználásával

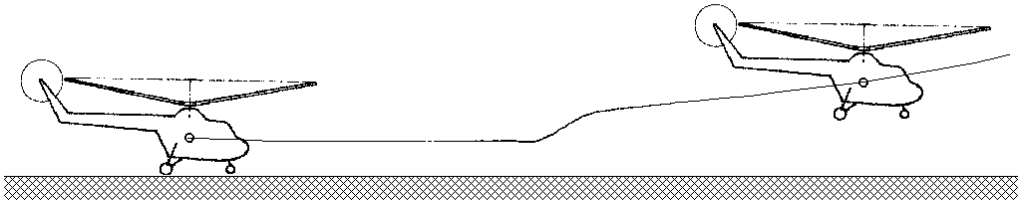
VI.4.3. REPÜLŐGÉPSZERŰ FELSZÁLLÁS

Repülőgépszerű felszállás során a helikopter a merevszárnyas repülőgép felszállásához nagyon hasonló módon hajtja végre a manővert. Fázisai (VI.6. ábra):

- nekifutás, felgyorsulás 50-70 km/ó sebességre;
- emelkedés;
- ferde pályán történő emelkedés, sebesség gyűjtés.

A nekifutás során a forgószárny ferde áramlási üzemmódon dolgozik, a súrolt felületén áramló levegőtömeg, és így a forgószárny vonóerő fokozatosan növekszik. A nekifutást a helikopter az úgynevezett három pont helyzetben (az összes futómű kerék érinti a talajt) hajtja végre. Ezáltal lehetővé válik, hogy az erősen túlterhelt helikopter emelkedjen a talajtól. A repülőgépszerű felszálláshoz repülőtér vagy körülbelül 100 ~ 150 méter hosszú síkfelületű terület szükséges. Segédzárnyal felszerelt kombinált helikopter repülőgépszerű felszállása során, a segédzárnyon keletkező felhajtóerő nagymértékben segíti a felszállást. Egyenlőtlen talajon

repülőgépszerű felszállást nem lehet végrehajtani. A csúszótalpas helikopterek nem alkalmasak a repülőgépszerű felszállás végrehajtására. Túlterhelt helikopter felszállása ezekben az esetekben — ha a felszálló tömeg azt megengedi — a fentiekben már megismert légpárnahatás felhasználásával történhet.

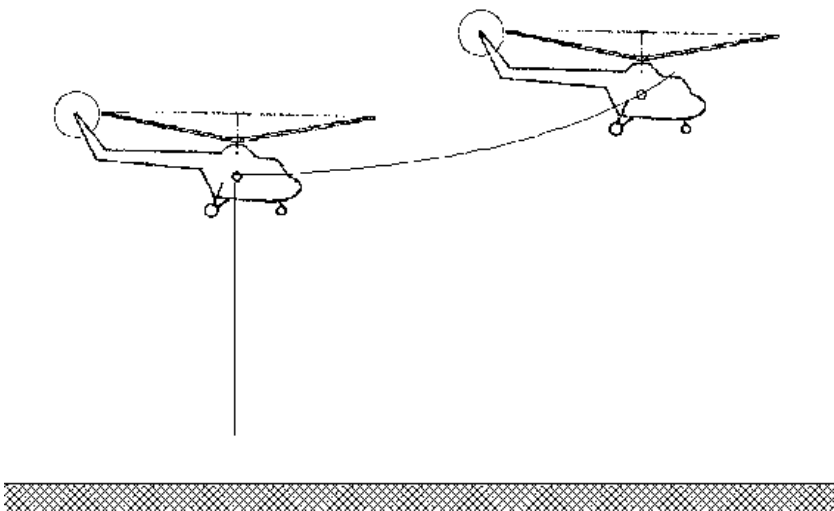


VI.6. Repülőgépszerű felszállás

VI.4.4. HELIKOPTERSZERŰ FELSZÁLLÁS FÜGGŐLEGES EMELKEDÉSSSEL

Ez a helikopterszerű felszállás csak abban az esetben alkalmazható, ha az előzőekben megismert felszállási módokat a terepakadályok miatt nem lehet végrehajtani, és ha a környezeti feltételek adottak. Fázisai (VI.7. ábra):

- függőleges elemelkedés,
- függés 1,5 – 2 m magasan a forgószárny, a hajtómű(vek), a berendezések működésének, és a helikopter súlyponthelyzetének ellenőrzése;
- függőleges emelkedés a terepakadályok fölé (körülbelül 5 – 10 méterrel);
- áttérés ferde pályán történő emelkedésre sebességgyűjtéssel.



VI.7. ábra Helikopterszerű felszállás függőleges emelkedéssel

Csak ritkán alkalmazzák ezt a felszállási módot, mivel jelentős a szükséges teljesítmény tartalékigény és igen kockázatos. A helikopter függőleges emelkedése során, amikor a terepakadályok fölé emelkedik, belerepül a kisebb sebességű veszélyes repülési tartományba (V.9. és V.10. ábrák) Azt pedig az V.4.4. fejezetben már tárgyaltuk, hogy a veszélyes repülési tartományban történő repülést — repülésbiztonsági okokból — el kell kerülni.

Ha egyik felszállási módot sem lehet végrehajtani a kis rendelkezésre álló teljesítmény vagy más okok miatt, akkor a helikopter felszálló súlyát csökkenteni kell.

Végezetül vizsgáljuk meg teljesítmény szempontjából is a felszállási módokat.

Helikopterszerű felszállás, illetve helikopterszerű felszállás függőleges emelkedéssel csak a helikopter felszállási tömegéhez tartozó statikus csúcsmagassága alatt hajtható végre.

A felszálló tömeghez tartozó statikus csúcsmagasság fölött vagy a légpárnahatás felhasználásával történő helikopterszerű felszállást, vagy a repülőgépszerű felszállást kell alkalmazni. Az ehhez a magasság tartományhoz tartozó szükséges és rendelkezésre teljesítménygörbék grafikonját célszerű megvizsgálnunk, amit az VI.3. ábra szemléltet (P_{r1} egyenes). Látható a diagramból, hogy ebben az esetben nulla sebesség (függés) esetén nincs a helikopternek teljesítmény tartaléka. Ezért a helikoptert valamilyen módon fel kell gyorsítanunk a $V_{min(1)}$ minimális sebesség fölé, hogy teljesítménytartalékkal bírjon a helikopter. Ezt egyrészt el tudjuk érni a légpárna — a sebesség növekedésével fokozatosan csökkenő — kedvező hatásának kihasználásával, másrészt a talajon történő nekifutással.

Szintén célszerű itt megemlíteni, hogy a felszállási módot a felszállóhelyen uralkodó szél is befolyásolhatja. A könyvben nem tárgyalandó stabilitási okokon túl teljesítmény szempontból is a felszállásokat (függést, függőleges emelkedést, légpárnán való gyorsítást, és a talajon történő nekifutást) mindig széllal szemben kell végrehajtani. Teljesítmény szempontból nézve ez azért fontos, mert függéskor — bár a helikopter a talajhoz képest áll — a levegőhöz képest a szél sebességével előrehalad. Az VI.3. ábrán is látható, ebben az esetben szükséges teljesítmény kisebb, mint zérus sebességnél. Ez pedig nagyobb teljesítménytartalékot jelent, amivel könnyebb, és így biztonságosabb felszállást lehet végrehajtani.

VI.5. A HELIKOPTER LESZÁLLÁSI MÓDjai

A helikopter leszállása is — a felszálláshoz hasonlóan — átmeneti üzemmód. De, ekkor a sebessége — az általában gazdaságos — repülési sebességről nullára csökken. A helikopter (megfelelő feltételek esetén) képes úgynevezett motoros (működő hajtóművel végrehajtott — lásd a IV.1. fejezetet) és autórótoriós leszállásra. Ez utóbbival az V.4.3. fejezetben röviden foglalkoztunk. Jelen fejezetben csak a

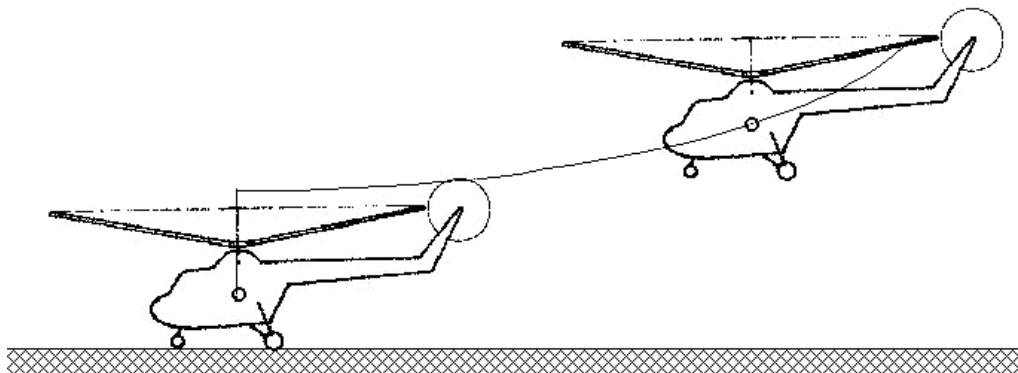
„normál”, motoros leszállási módokat ismertetjük. A helikopter több módon képes motoros leszállást végrehajtani. A választandó vagy választható leszállási módot több tényező is befolyásolja. Ezek: a leszállóhely tengerszint feletti magassága, a levegő hőmérséklete, a leszállóhelyen uralkodó szél nagysága és iránya, a gép leszálló súlya, illetve a terepviszonyok. A fentiektől függően a helikopter motoros leszállása végrehajtható:

- helikopterszerűen;
- repülőgépszerűen;
- helikopterszerűen függőleges süllyedéssel.

VI.5.1. HELIKOPTERSZERŰ LESZÁLLÁS

A helikopterszerű leszállás működő hajtómű esetén a helikopterek alapvető leszállási formája. Fázisai (VI.8. ábra):

- süllyedés állandó hajlásszögű (meredekségű) repülési pályán széllel szemben, fokozatosan csökkenő pályamenti és függőleges süllyedő sebességgel (amit a helikoptervezető a forgószárny vonóerő hátradöntésével biztosít);
- pályahajlásszög csökkentése, fékezés zérus sebességig;
- függés 2 ~ 3 m magasságon a talaj fölött;
- függőleges süllyedés, talajfogás igen kicsi (0,1 ~ 0,4 m/s-es) süllyedő sebességgel;
- megállás.



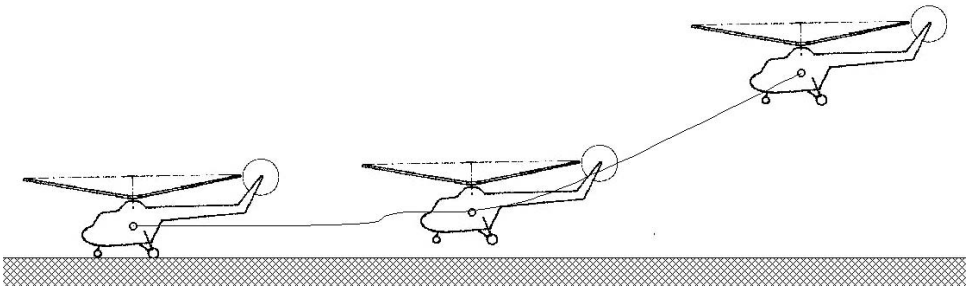
VI.8. ábra Helikopterszerű motoros leszállás

Ez a felszállási mód akkor alkalmazható, ha a leszállóhely a helikopter az adott leszálló súlyához tartozó statikus csúcsmagassága alatt található.

VI.5.2. REPÜLŐGÉPSZERŰ LESZÁLLÁS

A túlterhelt helikopter repülőgépszerű leszállását ugyanolyan feltételek esetén alkalmazzák, mint a repülőgépszerű felszállást (VI.4.3. fejezet) Fázisai (VI.9. ábra):

- állandósult süllyedés ferde pályán — széllel szemben;
- „felvétel” 7 ~ 10 méter talaj feletti magasságon, ami a süllyedő és a pályamenti sebesség csökkentését jelenti a forgószárny vonóerő növelésével és hátradöntésével;
- „kilebegtetés” körülbelül 1 méteres talaj feletti magasságon, azaz a sebesség csökkentése 30 ~ 40 km/ó-ra;
- leszállás a főfutókra;
- kigurulás, fékezés, megállás hárompont helyzetben.



VI.9. ábra Repülőgépszerű motoros leszállás

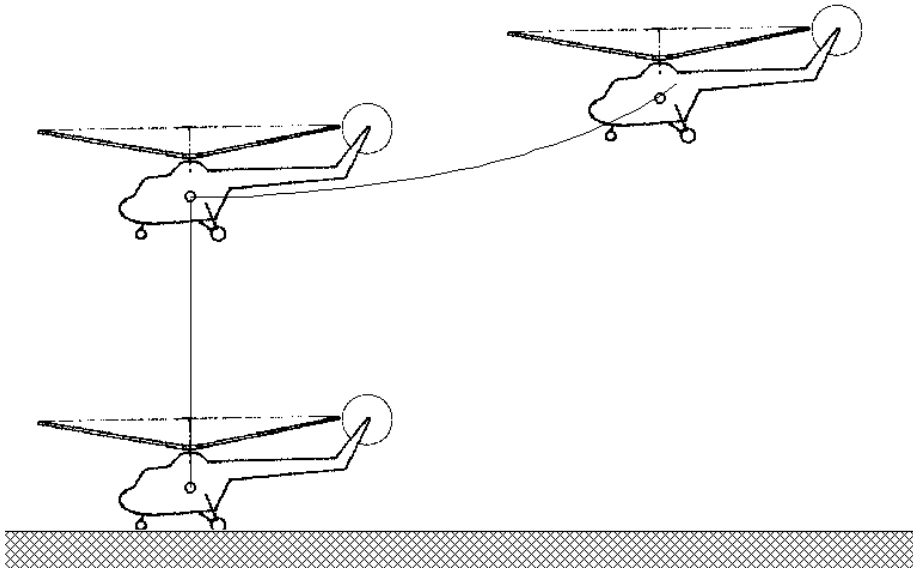
A repülőgépszerű leszálláshoz repülőtér vagy körülbelül 100 ~ 150 méter hosszú síkfelületű terület szükséges. Egyenlőtlen talajon repülőgépszerű leszállást nem lehet végrehajtani, mert könnyen a helikopter felborulásához, töréséhez vezethet. A csúszó talppal felszerelt helikopterek nem képesek a repülőgépszerű motoros leszállás végrehajtására. Vészhelyzetben, füves leszállóhelyen a csúszótalpas helikopterek is képesek autorotációs repülőgép leszállást végrehajtani.

VI.5.3. HELIKOPTERSZERŰ LESZÁLLÁS FÜGGŐLEGES SÜLLYEDÉSSEL

Ezt a leszállási módot csak akkor alkalmazhatják, ha a leszállóhely adott leszálló súlyhoz statikus csúcsmagasság alatt található és a körülötte elhelyezkedő tereptárgyak a helikopterszerű leszállási eljárást nem teszik lehetővé. Fázisai (VI.10. ábra):

- süllyedés állandó hajlásszögű (meredekségű) repülési pályán, fokozatosan csökkenő pályamenti és függőleges süllyedő sebességgel — széllel szemben;
- függés széllel szemben az akadályok magassága felett 5 ~ 10 méterrel;
- függőleges süllyedés 2 m/s-nál kisebb függőleges sebességgel (az úgynevezett örvénygyűrű üzemmód elkerülése céljából);

- a süllyedő sebesség csökkentése 0,5 m/s alá, talajfogás;
- megállás;



VI.10. ábra Helikopterszerű motoros leszállás függőleges süllyedéssel

A függőleges emelkedéssel történő helikopterszerű felszálláshoz hasonlóan ez a leszállási mód is kockázatos lehet, mivel a helikopter belerepül a kisebb sebességű veszélyes repülési tartományba (lásd V.4.4. fejezet V.9. és V.10. ábráit).

VI.6. KÖVETKEZTETÉSEK

A fejezetből megismerhető, hogy a helikopter megfelelő vagy megengedhető fel-, és leszállási módját nagyban befolyásolják olyan tényezők, melyek a repülőtér, vagy heliport üzemeltetőitől, illetve a gépszemélyzettől teljesen függetlenek.

A repülőtér tengerszint feletti magassága, és a leszállás időpontjában az ottani levegő hőmérséklete korlátozza, vagy korlátozhatja a helikopterek fel-, és leszállási módjait. Ha a repülőtér vagy leszállóhely a helikopter felszálló tömegéhez — amit jórészt a szállítandó személyek vagy rakomány, azaz a hasznos teher határoz meg — tartozó statikus csúcsmagasság fölött helyezkedik el, csak légpárnahatáson való gyorsítással, vagy repülőgépszerűen lehet felszállni, illetve csak repülőgépszerűen leszállni.

A fel- és leszállásokat — teljesítmény és stabilitási okok miatt — mindig a pillanatnyi széllel szemben kell végrehajtani. Ezért helyeznek el a leszállásra kijelölt helyeke szélzsákokat és ezért építik a repülőterek fel- és leszálló pályáit a helyi uralkodó szélirányban.

A terepakadályok is jelentős mértékben meghatározhatják a végrehajtható fel-

és leszállási módot. A helikopternek ferde pályán történő emelkedése vagy süllyedése során a környező terepakadályok fölött biztonságos magasságban kell repülnie.

A környezeti zaj szempontjából „legkedvezőbb” függőleges emelkedéssel történő felszállás, illetve függőleges süllyedéssel történő leszállás repülésbiztonsági okokból csak indokolt esetben alkalmazható.

A fenti kérdések korrekt szakmai megválaszolása meghatározza egy repülőtér vagy egy helikopter leszállóhely kialakítását, és használati rendjét.

VI.7. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [VI.1] Békési László – Szabó László: Az egy-forgószárnyas, farok-légcsavaros helikopterek kritikus repülési üzemmódjai, Szolnoki Tudományos Közlemények XII. A tudomány napja, Szolnok, 2008. nov. 06.
- [VI.2] Gausz Tamás: Helikopterek, BME Mérnöki Továbbképző Intézet, Budapest, 1982., pp. 145.
- [VI.3] Gausz Tamás – Orosz Gyula Helikopterek (Rotoraerodinamika, Mechanikai alapismeretek) előadásvázlat, BME Járműgépészeti Intézet, 1985., pp. 18.
- [VI.4] Hennel Sándor – Megyery Miklós: Repülőgép sárkányszerkezet és rendszerismeret III. (ISBN 963 10 2951 4) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979., pp. 156.
- [VI.5] Jereb Gábor: Aerodinamika és repüléselmélet II. (ISBN 963 10 2032 0) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., pp. 168.
- [VI.6] Jereb Gábor: Repülési alapismeretek (ISBN 963 10 3418 6) Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980., pp. 175.
- [VI.7] Leiner László: Vizsgálja meg a helikopter fel- és leszállási módjait, illetve a környezeti jellemzők ezekre gyakorolt hatásait, Szakdolgozat, ZMNE SzRfK, Szolnok, 1997. pp. 78. (konzulens: Pokorádi László)
- [VI.8] Repülési Lexikon, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.
- [VI.9] Szabó Zsolt: Készítsen tanulmányt a légkör állapotjelzőinek a helikopter fel- és leszállására gyakorolt hatásairól, Szakdolgozat, MH. KGyRMF, Szolnok, 1990., pp. 47. (konzulens: Pokorádi László)
- [VI.10] Szegő László: Készítse el adott műszaki jellemzőkkel rendelkező könnyű sporthelikopter szükséges teljesítménygörbéit, Szakdolgozat, MH. KGyRMF, Szolnok, 1989., pp. 28. (konzulens: Pokorádi László)
- [VI.11] Szelestey Gyula: Áramlástan III. Helikopter aerodinamika, Kilián György Repülő Műszaki Főiskola, Szolnok, 1974., pp. 281.
- [VI.12] Varga Pál: A koaxiál-rotoros helikopterek gyakorlati aerodinamikája, MÉM RNÁ, Budapest, 1972., pp. 312.

HELIKOPTERZAJ SZABÁLYOZÁSA

VII.1. BEVEZETÉS

A zajcsökkentésre irányuló intézkedések a repülésben, így a helikopteres repülés esetében is a zajforrásokhoz, a repülési tevékenységekhez, a környezeti jellemzőkön keresztül a hangterjedési körülményekhez, és az észlelés helyéhez kapcsolódnak. Ezek a főbb tényezők úgynevezett *szabályozási láncot* alkotnak, és a kapcsolódó elemek vizsgálata vezethet az adott repülési zajprobléma eredményes megoldásához.

Hatékony zajcsökkentés érdekében szükséges a teljes *szabályozási lánc* figyelembe vétele, amit a következő okok magyaráznak:

1. a gyakorlatban megvalósítható zajcsökkentési intézkedések köre korlátozott;
2. a zajcsökkentésnek a lehetőségek függvényében jelentős költségvonzata lehet;
3. a zajcsökkentés során tekintettel kell lenni a repülési tevékenység esetleges korlátozásából adódó következményekre.

A *zajcsökkentési lehetőségek köre* az erre irányuló kutatások eredményeit tekintve bővült ugyan az elmúlt évtizedekben, de több szempontból is korlátokba ütközik. Például repülési zaj vonatkozásában nincs lehetőség műszaki zajárnyékoló építmény kialakítására, vagy a helikopter utólagos zajcsökkentésére. Csendesebb légijármű előállítása a járműszerkezet adottságait tekintve csak a fejlesztés, a tervezés és a gyártás időszakában lehetséges [VII.2].

A zajcsökkentés eredményét a környezet állapotában elért kedvező változás jelenti, ami a legtöbb esetben *jelentős költséget* jelent az üzemeltető számára. Ezért az intézkedések terén törekedni kell a gazdasági optimumra, az előírt vagy tervezett zajcsökkentésnél vizsgálni kell a járulékos kiadásokat is.

Gyakorlati tapasztalat, hogy sok esetben a kiválasztott zajcsökkentési megoldás akár a lehetőségekből adódóan, akár a probléma leegyszerűsítésével a repülés olyan mértékű korlátozását jelenti, aminek következtében a tevékenység értelmét veszti, vagy az egyéb előírásokat is tekintve lehetetlenné válik az üzemeltetés. Ilyenkor kiemelt figyelmet kell fordítani a *szabályozási lánc* elemeinek kapcsolatára, és a zajterhelés kialakulását befolyásoló folyamat által meghatározott összefüggésekre.

Az észlelt zajhatás megítélésének sarkalatos pontja a zajkibocsátás, valamint a környezetben okozott zajterhelés meghatározása és minősítése, amelynek alapja a *határérték rendszer*. Az általánosan alkalmazott intézkedések az eddigiekben tárgyalt szabályozási lánc meghatározó elemeihez, így a zajforráshoz és a zaj ellen védendő környezethez kapcsol *határértéket* és *minősítési eljárást*.

Ebben a fejezetben a helikopterzaj kezelését meghatározó, a szabályozási lánc elemeivel összefüggésben lévő tényezők, így a határértékek és követelményrendszer, illetve a jogi és műszaki előírások kérdéskörét tekintjük át, segítséget adva a Tisztelt Olvasó számára a zaj elleni védelem eszközeinek megismeréséhez.

VII.2. HATÁRÉRTÉKEK ÉS KÖVETELMÉNYEK

VII.2.1. JOGSZABÁLYOK ÉS MŰSZAKI ELŐÍRÁSOK

A szabályozási rendszer keretében követelményeket határozunk meg az új és a már használatban lévő légi járművekre, a védendő környezetben fellépő zajterhelés értékeire, illetve a tevékenységet végzőkre és a zaj ellen védett terület vagy objektum tulajdonosaira. A feladatokat a megkívánt és a tényleges zajszintek közötti különbség, valamint a zajforrás és a védelmet igénylő terület között fennálló kapcsolat határozza meg, amelynek alapja a szakterület vonatkozásában megalkotott jogszabályok és műszaki előírások köre. A fejezet első részében könyvünk megírásakor hatályos (2010. július - november) jogszabályokról és általánosan használt műszaki előírásokról adunk ismertetést.

Ssz.	Jogszabály vagy műszaki előírás
1.	284/2007. (X. 29.) Korm. rendelet a környezeti zaj és rezgés elleni védelem egyes szabályairól;
2.	93/2007. (XII. 18.) KvVM rendelet a zajkibocsátási határértékek megállapításának, valamint a zaj- és rezgés-kibocsátás ellenőrzésének módjáról;
3.	27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet a környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról;
4.	49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet a motoros légi járművek zajkibocsátásának korlátozásáról;
5.	280/2004. (X. 20.) Korm. rendelet a környezeti zaj értékeléséről és kezeléséről;
6.	25/2004. (XII. 20.) KvVM rendelet a stratégiai zajtérképek, valamint az intézkedési tervek készítésének részletes szabályairól;
7.	176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének szabályairól;
8.	18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének részletes műszaki szabályairól;
9.	159/2010. (V. 6.) Korm. rendelet a repülőtér létesítésének, fejlesztésének és megszüntetésének, valamint a leszállóhely létesítésének és megszüntetésének szabályairól;
10.	MSZ 18150-1:1998 számú szabvány , A környezeti zaj vizsgálata és értékelése;
11.	MSZ 15036:2002 számú szabvány , Hangterjedés a szabadban;
12.	MSZ 13-183-3:1992 számú szabvány , A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj;
13.	MSZ 13-183-4:1992 számú szabvány , A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj heliportok és kisrepülőterek környezetében.

VII.2.1. táblázat Jogszabályok és műszaki előírások

A környezeti zaj és rezgés megítéléséhez, a zajvizsgálatokhoz, a tervezéshez és a méréshez rendelkezésre álló jogszabályokat és műszaki előírásokat a VII.2.1.

táblázatban foglaltuk össze. A fejezetben a táblázatban felsorolt jogszabályok és előírások felhasználásával ismertetjük a zajvédelmi követelményeket.

A továbbiakban azokat a jogszabályi és műszaki előírásokat ismertetjük részleteiben, amelyek alkalmazása a helikopteres repüléssel kapcsolatos zaj- és rezgésvédelmi feladatokban meghatározó szerepet játszanak. Egyéb, a repüléssel vagy a környezeti zajjal, mint stratégiai kérdéssel foglalkozó jogszabály tárgyalásától könyvünk terjedelmi korlátai és a helikopterzaj, mint tárgykör miatt eltekintünk.

A környezeti zaj és rezgés kezelésének, illetve szabályozásának keretszabályait a környezeti zaj és rezgés elleni védelem egyes szabályairól szóló **284/2007. (X. 29.) Korm. rendelet**ben előírtak határozzák meg, az érintett területek állapot-változását és a hatásterületek kiterjedését ennek figyelembe vételével vizsgáljuk. Legfontosabb zaj- és rezgésvédelmi szempontú jogszabályunk. Repülésre vonatkozó tényleges előírásokat nem tartalmaz ugyan, azonban hangsúlyozni kell azoknak a tartalmi elemeknek a jelentőségét, amelyek meghatározó szerepet játszanak a zaj- és rezgésvédelmi követelmények meghatározásában:

1. tartalmazza azokat a környezetvédelmi hatósági jogköröket, amelyek az engedélyezési és felügyeleti eljárásokat alapozzák meg;
2. a jogszabály szerepelteti azokat a *fogalom meghatározásokat*, amelyek a zaj keletkezése és értékelése, a terjedési viszonyok és a zajterhelés megítélése szempontjából szükségesek mind a vizsgálatok és a zajcsökkentés, mind a szabályozás szempontjából;
3. szabályozási elemeket tartalmaz a létesítéssel kapcsolatban, területek használata és épületek elhelyezése zajvédelmi szempontú megítéléséhez.

Sor-szám	Zajtól védendő terület	Határérték (L_{TH}) az $L_{AM,kö}$ megítélési szintre, (dB)			
		nappal	éjjel	nappal	éjjel
1.	Üdülőtérület, különleges területek közül az egészségügyi terület	55 ¹	45 ¹	60 ²	50 ²
2.	Lakóterület (kisvárosias, kertvárosias, falusias, telepszerű), oktatási létesítmények területei, temetők, zöldterület	60 ¹	50 ¹	65 ²	55 ²
3.	Lakóterület (nagyvárosias beépítésű), a vegyes terület	65 ¹	55 ¹	65 ²	55 ²
4.	Gazdasági terület	65 ¹	55 ¹	65 ²	55 ²

VII.2.2. táblázat Zaj terhelési határértékei

¹Olyan repülőterek, vagy nem nyilvános *fel- és leszállóhelyek*, ahol 5,7 tonna maximális felszálló tömegnél kisebb légszavaros repülőgépek, illetve 2,73 tonna maximális felszálló tömegnél kisebb *helikopterek* közlekednek;

²Olyan repülőterek, vagy nem nyilvános *fel- és leszállóhelyek*, ahol 5,7 tonna maximális felszálló tömegű vagy annál nagyobb légszavaros repülőgépek, illetve 2,73 tonna maximális felszálló tömegű vagy annál nagyobb *helikopterek*, valamint sugárhajtású légijárművek közlekednek.

A környezeti zaj- és rezgésterhelési határértékek megállapításáról szóló **27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet** tartalmazza a területhasználat és a beépítettség, illetve a zaj ellen védendő területek és épületek figyelembe vételével előírt **zaj- és rezgésterhelési határértékeket**. A rendelet 3. sz. mellékletében található azok a **határértékek**, amelyek figyelembe vétele és alkalmazása üzemeltetői oldalról és a védendő területek vonatkozásában is kötelező. A helikopteres repülésre vonatkozó határértékeket — most eltekintünk az egyéb közlekedési létesítményekre vonatkozó határértékek részletezésétől — a VII.2.2. táblázatban ismertetjük.

A határértékek teljesülésének ellenőrzésére és a környezetben okozott zaj vizsgálatára vonatkozó előírások a zajkibocsátási határértékek megállapításának, valamint a zaj- és rezgés kibocsátás ellenőrzésének módjáról szóló **93/2007. (XII. 18.) KvVM rendelet**ben találhatók. A jogszabály hivatkozik azokra a műszaki szabványokra, melyek a repülési zaj mérésének szabályait és előírásait tartalmazzák.

A légi közlekedési zaj mérését a VII.2.2. táblázatban is feltüntetett **MSZ 13-183-3:1992 számú** és **MSZ 13-183-4:1992 számú szabvány** alapján vagy azokkal egyenértékű eredményt adó mérési módszerrel kell elvégezni. A mérési eredmények dokumentálása a stratégiai zajtérképek, valamint az intézkedési tervek készítésének részletes szabályairól szóló **25/2004. (XII. 20.) KvVM rendelet** vonatkozó előírásait követve történik. Dokumentáció készítésénél több olyan általános szabály is van, amit a helikopterzaj esetében is figyelembe kell venni, ezek közül a legfontosabbak:

1. zajmérési dokumentáció készítése a feladat és kitűzött célok leírásán túl minden esetben a környezet részletes bemutatásával, a hangterjedést és a zajterhelés kialakulását befolyásoló környezeti adottságok, és a zajterhelési határértékek meghatározásával kezdődjön;
2. meg kell adni a műszeres zajmérés elvégzését befolyásoló tényezőket, a mérés körülményeit, a kiválasztott mérési eljárás indokolását.

Zajgátló védőövezetek kijelölését a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének részletes műszaki szabályairól szóló **176/1997. (X. 11.) Korm. rendelet** szabályozza, ehhez a vizsgálati és számítási eljárásokat a repülőterek környezetében létesítendő zajgátló védőövezetek kijelölésének, hasznosításának és megszüntetésének részletes műszaki szabályairól szóló **18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet** tartalmazza. A gyakorlati tapasztalatok alapján tényeleges zajgátló védőövezet kijelölésre csak a nagyobb forgalmú repülőterek esetében van szükség. Helikopteres repülésre a legtöbbször egyedi leszállóhelyek igénybevételével kerül sor, ahol a védőövezet kijelölése nem indokolt. Azonban ez a két jogszabály is tartalmaz olyan szabályozási elemeket és számítási eljárást, amit a helikopteres repülésnél is érdemes figyelembe venni.

Felhívjuk a figyelmet ugyanakkor arra, hogy az alkalmazott elnevezés, az úgynevezett **zajgátló védőövezet** önmagában nem véd a zaj ellen, még csak nem is akadályozza a zaj terjedését. Sokan tévesen alkalmazzák a fogalmat. A **zajgátló védőövezet** kijelölése a repülőtér környezetében a repülési zajjal érintett területeket határozza meg, egyben olyan területhasználati és beépítési kötelmeket ír elő, amelyek

a továbbiakban szabályozzák a zajforrás és a védendő objektumok viszonyát, pl. korlátozást jelenthet a további építésekre. De korlátozást jelent a repülésre vonatkozóan is, mert *zajgátló védőövezet* kijelölésekor nyílik lehetőség a meglévő védendő területeken fellépő zaj csökkentése céljából olyan repülési eljárások vagy a repülés korlátozásának előírására, amelyek a kíméletes környezethasználatához járulnak hozzá.

Mint említettük, helikopteres repülésre sokszor olyan leszállóhelyek, korábbi megfogalmazásban nem nyilvános fel- és leszállóhelyek létesítésével és használatával kerül sor rövidebb időszakokban, melyek a repülőterektől távolabb helyezkednek el.

A repülőtér létesítésének, fejlesztésének és megszüntetésének, valamint a leszállóhely létesítésének és megszüntetésének szabályairól szóló **159/2010. (V. 6.) Korm. rendelet** tartalmazza azokat az előírásokat, amelyek a leszállóhelyek létesítésének és későbbi igénybevételének feltételeit, valamint a közlekedési hatóság és a környezetvédelmi hatóság eljárását szabályozza.

Az általános előírásokon túl kiemelt figyelmet érdemel a viszonylag új, 2010. évben életbe lépett jogszabályban több új szabályozási elem is. A repülőtereket és a leszállóhelyeket a tevékenység és az igénybevétel alapján kategóriákba sorolja, ami zajvédelmi szempontból is megteremtí a jobb megítélhetőség lehetőségét. Ennek a helikopteres repülésben kiemelt szerepet tulajdonítunk, hiszen a repülés csak ritkán kötődik menetrendhez, ami a napi repülési szám meghatározásában és a zajmérés elvégzésében bizonytalanságot okoz. A helikopteres repülésre gyakran speciális feladatok végrehajtásánál, így mezőgazdasági repülés, területfelmérés és vezetékek ellenőrzése, egy-két napos rendezvények kiszolgálása során kerül sor. Ilyenkor a határértékek teljesülésének ellenőrzése nehézségbe ütközik, de költséges zajszámlítás elvégzésének indokoltságát is mérlegelni kell.

Az új szabályozásból a leggyakrabban előforduló helikopteres repülésre vonatkozó fogalmakat és jellemzőket emeljük ki. A létesítés engedélyezéséhez teljesítendő követelmények alapján a leszállóhelyek a következő osztályokba tartoznak:

- a) „A” osztály: országos vagy helyi jelentőségű rendezvényen részt vevő légi járművek le- és felszállására kijelölt terület, amelyen a használni tervezett legnagyobb méretű, súlyú, légi jármű számára kielégítő hosszúsági, szélességi mérettel és akadálymentességgel rendelkező repülési sáv rendelkezésre áll;
- b) „B” osztály: légi járművel folytatott munkavégzés céljára szolgáló, le- és felszállásra kijelölt olyan terület, amelyen a használó légi jármű számára, a légi üzemeltetési utasításában meghatározott, hosszúsági, szélességi mérettel és akadálymentességgel rendelkező repülési sáv rendelkezésre áll, és ahol a le- és felszállást biztonságosan végre lehet hajtani.

A leszállóhely osztályba sorolása alapján lett meghatározva az igénybevétel és a használat időtartama a repülési tevékenységek jellege szerint. Tehát figyelemmel kell lenni arra is, hogy a repülés milyen egyéb tevékenységhez kapcsolódik. Zajvédelmi szempontból ennek a mozgásszám korlátozására és az engedélyezett műveletszámra nézve van jelentősége. Látható, hogy a zaj elleni védelem eszközeként megjelenik a repülés szabályozása olyan előírásokkal, melyek sok esetben az egyetlen lehetőséget jelentik a zaj elleni védelem számára.

VII. Helikopterzaj szabályozása

MAGYAR KÖZ TÁRSASÁG Légügyi Igazgatóság BUDAPEST-Ferihegy H-1675. Postafiók 41		Zajbizonyítvány Helikopterek részére (tömegkorlátozás nélkül)	
1. Lajstromjel, lajstromszám:	2. Típus, típusváltozat:	3. Gyári azonosító számok:	4. A vizsgálat jellege:
.....	.....	.....	? Típusvizsgálat ? Első üzembehelyezés ? Szerkezeti módosítás
5. Ezt a zajbizonyítványt a 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet 2. melléklet IV. fejezetében foglaltak szerint állítottuk ki. A zajbizonyítványban foglalt adatokat az alábbi szakértői vélemények és dokumentumok alapján bíráltuk el: 			
6. Zajhatárértékek: az R. 2. mell. IV. 3. fejezete szerint	Fel szálló referenciapontban EPNdB	Vízszintes átrepülés referenciapontjában EPNdB	Leszálló referenciapontban EPNdB
7. Zajmérés eredménye	..... EPNdB	..... EPNdB	..... EPNdB
Ez a zajbizonyítvány addig érvényes, amíg a titoldalon felsorolt műszaki adatokban nem történik változtatás.			
MAGYAR KÖZ TÁRSASÁG		Zajbizonyítvány	
A vizsgált léggépjármű műszaki adatai: (háttoldal)			
1. A léggépjármű:			
a) max. eng. felszálló tömeg: kg		c) befoglaló méretek: hosszúság m magasság m	
b) leszálló tömeg: kg			
2. Hajtóművek:			
Fő hajtómű típusa, típusszáma, helyzete, jellege, teljesítmény- és fordulatszám adatai:			
típus	típusszám	helyzet	jelleg
		teljesítmény/ford./szám	gyártási év
		..... kW	..... évnél
Fark rotor hajtómű típusa, típusszáma, helyzete, jellege, teljesítmény és fordulatszám adatai:			
(megjegyzés: ha külön hajtóműje van a fark-rotornak)			
típus	típusszám	helyzet	jelleg
		teljesítmény/ford./szám	gyártási év
		..... kW	..... évnél
3. Rotorok:			
Fő rotor típusa, típusszáma, átmérő, jellege, tollak száma és fordulatszám adatai:			
típus	típusszám	átmérő	jelleg
		tollak száma/ford./szám	gyártási év
		.....	..... évnél
Fark-rotor típusa, típusszáma, átmérő, jellege, tollak száma és fordulatszám adatai:			
típus	típusszám	átmérő	jelleg
		tollak száma/ford./szám	gyártási év
		.....	..... évnél
4. Gázvezető, és friss levegő beszívó rendszer jellemzői, helyzete:			
.....			
5. Egyéb kiegészítő tartozékok, megjegyzések (amelyek a zajmérés eredményeire befolyásolhatják):			
.....			

VII.2.1. ábra: Helikopter zajbizonyítvány
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

A repülési tevékenységek szabályozásán túl a légi járművek zajkibocsátását is szükségszerű ellenőrizni, illetve korlátozni. Erre vonatkozó előírásokat a motoros légi járművek zajkibocsátásának korlátozásáról szóló **49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet** tartalmaz. A motoros légi járművet típusvizsgálat során, illetve lajstromba vétele előtt zaj szempontjából is minősíteni kell. A zajminősítés eredményéről a légi közlekedési hatóság úgynevezett *zajbizonyítványt* állít ki, ami tanúsítja, hogy a motoros légi jármű megfelel a zajminősítési feltételeknek, illetve a zajbizonyítványban szereplő adatokkal jellemezhető. Helikopterek zajbizonyítványára mutat példát a VII.2.1. ábra, amely a zajhatárértékek feltüntetését is szemlélteti.

VII.2.2. HATÁRÉRTÉKRENDSZER

A II.4.3. fejezetben tárgyaltuk azokat a mérőszámokat, amelyekkel az észlelt hanghatást le tudjuk írni. Adott környezetben kialakuló zajterhelés jellemzésére a rendelkezésre álló mérőszámok közül a gyakorlatban azokat használjuk, amelyek kifejezik a zaj emberre gyakorolt hatását, így természetesen a zajterhelési határértékek megállapítása is ehhez az eljáráshoz kell, hogy igazodjon. A jelenleg használt **határérték rendszer** kidolgozásánál tehát elsődlegesen meg kellett határozni, hogy milyen paraméterek befolyásolják a kellemes akusztikai közérzetet és az egészség védelmét.

Az előírások a zajnak a hallásra és az emberi szervezetre gyakorolt káros hatására, illetve a zavarás megítélésére vonatkozó kutatási eredményekből indulnak ki. Határértékek megállapításánál ezért két tényezőt kellett figyelembe venni, egyrészt a *környezeti alapzajt*, másrészt az emberi érzékeléssel összefüggő *zavarási fokot* és az *egészségre* (pl. halláskárosodás) *gyakorolt hatást*. Ezek alapján határozták meg az adott körülmények mellett megengedett legnagyobb zajterhelés értékeket.

Ugyanakkor a határértékek előírásánál törekedni kellett az olyan, széles körben elfogadott legnagyobb zajterhelési értékek meghatározására, ami a szubjektív emberi megítéléssel összhangban van, és minden személy elfogadja. Mindenféleképpen az emberi reakciókból kellett kiindulni, azonban nem lehet figyelmen kívül hagyni, hogy minden közösségben (pl. a vizsgált lakóterületen élők) lesz az átlagosnál érzékenyebb személy, aki nehezen, vagy egyáltalán nem fogadja el a határértéket a zavarási tényező miatt. Ilyenkor a hatások megítélésénél az emberek jelzéseiből kell kiindulni, amelyek jellemzőiket tekintve is többfélék lehetnek.

Közvetlen hatások közé sorolható a hangosság, a zajosság, illetve a beszédzavarással vagy a hangelfedéssel összefüggő reakciók. Közvetett hatások között lehet említeni az alvás megzavarását, koncentráció megnehezítését, az idegrendszer terhelését és egyes betegségek kialakulását.

Külön kell tárgyalni a hallásvesztést és tényleges egészségkárosodást, amelyek egyértelmű összefüggésben vannak a zajterheléssel. Ebben a tekintetben a kimutatott halláskárosodás minden ember szempontjából kiemelt jelentőséget kap, hiszen bizonyos hangnyomásszintek alatt még akkor sem alakul ki halláskárosodás, ha egész életünkben tapasztaljuk a környezetünkre jellemző hanghatásokat. A **természetes hallásvesztés** napjainkban már kiegészül a **civilizációs ártalom hallásvesztéssel**, amit bizonyos részben az egyének önmaguk is befolyásolnak a lakókörnyezetük vagy az

életterük megválasztásával, életmódjukkal és életvitelükkel.

Az eddigiekben elmondottak alapján tehát rendkívül fontos kérdéssé vált a *határértékek* megválasztása, illetve ehhez kapcsolatosan a mért adatok értékelése és a vizsgálati módszerek alkalmazása.

Ebből a szempontból megkülönböztetünk *egészséget védő határértékeket*, és *jó akusztikai közérzetet biztosító határértékeket*.

Tragikus halláskárosodáshoz vezethet a nagy intenzitású hang roncsoló hatására létrejövő azonnali megsüketülés. Ennek elkerülését hivatott biztosítani az a szabály, amely szerint az $L_p > 135 \text{ dB}$ hangnyomásszintet még 1 másodpercig *sem szabad megengedni*. Maradandó hallásvesztés elkerülése érdekében huzamosabb ideig fellépő $L_p > 75 \text{ dB}$ zajszint esetén már védelemlről kell gondoskodni [VII.1].

Kellemes akusztikai közérzetet biztosító határértékek előírásától a huzamos emberi tartózkodás céljára kijelölt, pihenésre és alvásra, vagy egészségügyi célból létesített területeken nem lehet eltekinteni. Ekkor még mindig az emberek részéről adott szubjektív értékelésre alapozzuk az előírásokat, de napjainkban már bizonyított, hogy az állattenyésztésben is előnyös szerepe van a határértékekkel is védett környezetnek, illetve ajánlatos lenne a természetes környezet fokozottabb védelme és a zaj miatt ott kialakuló zavarás csökkentése a határértékrendszer bővítésével.

A határértékek előírásával és érvényesítésével kapcsolatban több probléma is felmerül, melyek megoldása még napjainkban sem megoldott teljes körűen. Milyen kérdések várnak megválaszolásra?

Munkahelyükön halláskárosodást szenvedett emberek vizsgálata során felmerült, hogy a bekövetkezett egészségkárosodás a környezeti zajon kívül számtalan olyan tényezővel függ össze, ami az emberek életvitelével és környezetük egyéb feltételeivel kapcsolatos. Kutatási eredmények igazolják, hogy aki dohányzik, fokozott fizikai terhelésnek teszi ki magát pihenés és regenerálódás nélkül, vagy valamilyen betegségben szenved, gyorsabban veszti el hallását. Mindennek gazdasági szerepe is jelentős, hiszen zaj elleni védelem vagy a munkaképesség romlásának következménye költséges lehet adott helyzetben.

Számít a környezet átlagos háttérterhelése, vagyis a lakóhely zajhelyzete és az ember napi zajterhelése is. Tudomásul kell venni, hogy elzajosodott világban élünk, így a regenerálódáshoz gondoskodni kell a csendes, zajjal nem terhelt környezetről, ami sok ember számára csak hosszabb utazással vagy időráfordítással érhető el.

Ugyanakkor sokan önmaguk is közrejátszanak zajterhelésük növekedésében, pl. kevesen számolnak az oly kedvelt mobil zene-lejátszók használatából eredő hatással. Az MP3 vagy az MP4 és a hasonló lejátszókkal hallgatott zene a közvetlenül fülbe juttatott hangenergiát tekintve idővel jelentős hallásvesztést okoz, az ilyen eszközök elterjedését figyelembe véve társadalmi szinten kell számolni a jövőben a halláskárosodás megjelenésével.

Tehát a *zaj terhelési határértékeinek* előírásánál körültekintően kell eljárni, figyelembe kell venni mind a szubjektív értékelés szempontjait, mind a védelmet igénylő környezet tulajdonságait, mint pl. a beépítettséggel vagy területhasználattal összefüggésben kialakult háttérterhelést, esetleg az alapzaj értékeket [VII.3].

Az előírások a zajnak hallásra és az emberi szervezetre gyakorolt káros hatására vonatkozó megítéléséből indulnak ki, és meghatározzák a maximálisan

megengedhető zajszinteket különböző környezetben és tevékenységek esetén. Ehhez a hangosság mellett valamilyen más, mérhető hangjelleg alkalmazása is szükséges volt az emberi hatásokkal párhuzamos objektív értékeléshez.

Megfelelő módszernek az L_{eq} egyenértékű zajszint felhasználása mutatkozott, amely figyelembe veszi, hogy az egymást követő azonos erősségű zajok összesen mennyi ideig hatnak. Ezzel a méréssel kimutatott összetevők egyetlen közös, eredő szintértékkel helyettesíthetők, és így biztosított, hogy a mért zajszint-értékek mellett a hatásidő figyelembe vétele is megtörténjen.

A határértékek megállapításához elvégzett vizsgálatok során azonban minden olyan mérhető és összehasonlítható adatot fel kellett tární, ami elősegítette az észlelt hanghatások adott időtartam alatti kellemetlenségi vagy zavaró hatásának ellenőrzését.

Az eredmények sorra azt igazolták, hogy a különböző emberek zajérzékenységi foka eltérő, ami a határértékek túl alacsony szintekben való automatikus rögzítése ellen, és a további kísérletek lefolytatása mellett szólt. Ezért a kutatók a továbbiakban olyan eljárásokat alkalmaztak, amelyekkel meg lehetett határozni a vizsgálatba vont egyének átlagának, valamint nagyobb közösségeknek kellemetlenséggel összefüggő érzését, illetve nagyszámú embercsoport által adott jelzés alapján a zavarás fokát [VII.1].

Történetileg az első kísérlet *D. Kryter* (1959) nevéhez fűződik, aki a zajossági skálát a hangossághoz hasonló módon szerkesztette meg. A zajosság *1 noy* egységét úgy választotta meg, hogy a mért érték az 1 kHz körüli (910 Hz és 1090 Hz közötti), 40 dB hangnyomásszintű zörej hangosságával legyen egyenértékű. A kellemetlenségi érzésre figyelő kísérleti személyek ugyanis a keskenyebb sávokban a hangossággal azonos ítéletet hoztak. Csak megfelelő sáv szélességű összetett hangoknál mutatkozott eltérés a kétféle érzet között.

Kryter kísérletének fő eredménye az volt, hogy az 1 kHz - 4 kHz közötti sávban a hangossági ítélethez képest erősen fokozódik a kellemetlenségi érzet, amiről a kísérletbe vont személyek visszajelzést adtak. A vizsgálat alapján megrajzolt görbék hasonlítanak a II.4.1. ábrán már bemutatott *son görbék*hez.

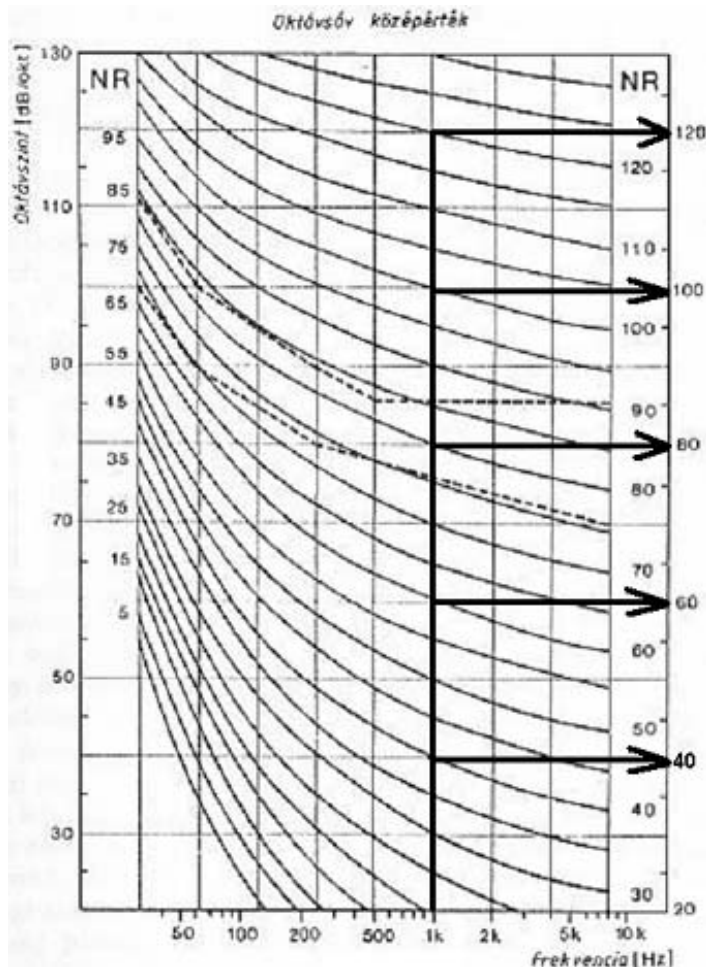
Az első kísérletet több hasonló méréssorozat is követte, amit nagyszámú emberen végeztek el, és a különböző jellegű zajok esetében a csoportok által adott jelzést használták fel az értékeléshez. A kísérlet-sorozatokban a zajosság nagyságának egyadatos meghatározása a *színképek szerinti összehasonlítás* alapján történt. Az alap gondolat az volt, hogy a hangosság szint görbékhez hasonló, de a kritikus sávok összefoglaló tulajdonságait és a hangelfedést is figyelembe vevő görbesereg alkalmas lehet a különféle színképű hangok osztályozására zajosság szempontjából.

Ebben a tárgykörben *L.L. Beranek* egyike volt azoknak, akik kiterjedt vizsgálatot végeztek, az alkalmazott eljárást és annak eredményeit az ő vizsgálatain keresztül szemléltetjük röviden. *L.L. Beranek* a legkülönbözőbb helyeken mérte fel, hogy az emberek miként ítélik meg a zajokat. Azt találta, hogy a megkérdezett személyek által adott minősítés sem a *beszéderthetőségtől*, sem a *phon számtól* (lásd: II.4.1. ábra) külön-külön nem függ. A felmérés alapján azonban megállapította, hogy a hang azonos szubjektív megítéléséhez mindig kb. 22 egységgel nagyobb, a hangnyomásszint mérések adataiból eredő *son szám* segítségével számított *phon szám* tartozott, mint a beszédzavaró-szint értéke. A görbék nincsenek összefüggésben az

időtartammal.

Ennek a felismerésnek nyomán *L.L. Beranek* olyan oktávsávokban megállapított hangnyomásszint megoszlási görbéket, úgynevezett *Noise Control*, rövidítve **NC görbét**et rajzolt fel, melyekre érvényes volt a fentiekben vázolt 22-es számkülönbség. A nemzetközi élet némi módosítással átvette ezt az eljárást és alkalmazza az **NC görbét**et, illetve ahogy napjainkban találkozni vele, az **N görbét**et.

A görbesorozatot kutatók tovább pontosították. *Kosten és van Os* 1962-ben született javaslatára kezdték használni Európában az úgynevezett **NR görbét**et, amelyek mindenfajta környezeti zajra alkalmazhatók, ezért 130 dB/okt-ig vannak kiterjesztve, és külön korrekciókat tartalmaznak eltérő körülményekre és időtartamokra. Tehát a huzamos emberi tartózkodásra kijelölt helyeken megengedett zaj határértékére egy-egy *NR görbe* már megfelelő ajánlást ad, amit a VII.2.2. ábrán szemléltetünk.



VII.2.2. ábra NR görbék oktávsáv középfrekvenciánként ([VII.1] alapján)

A továbbiakban a zajvizsgálat és az eredmények értékelése tehát úgy történik, hogy az oktávsvávokban mért hangnyomásszinteket a VII.2.2. ábrán szereplő görbékre fektetjük, és így állapítjuk meg azt a legmagasabb *NR görbe számot*, amelyet a mért értékek még éppen érintenek. Ennek a görbének a jelzőszáma lesz a mért megoszlást jellemző érték.

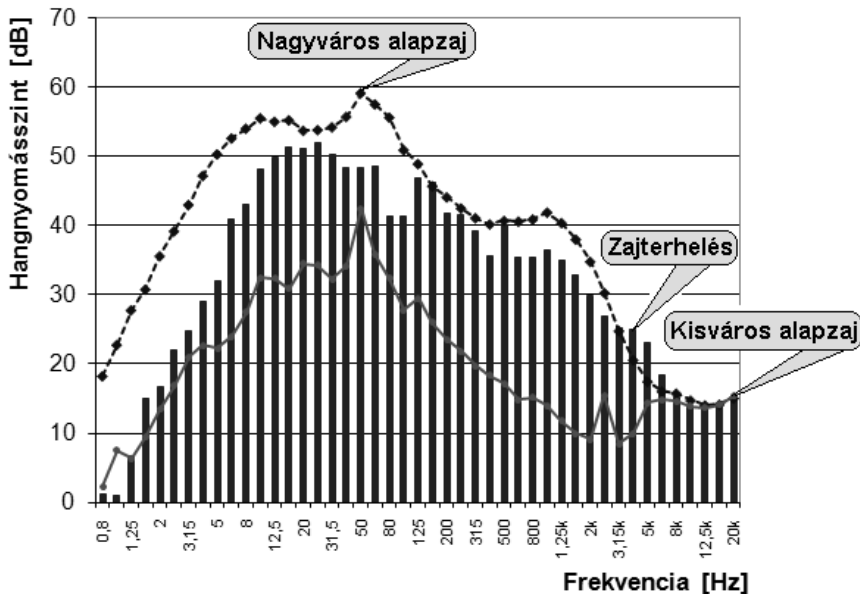
Bizonyos közelítéssel az *NR érték* a *dB*-ben kifejezett zajszintértékkel is helyettesíthető a következő összefüggéssel:

$$NR + 5 \approx dB(A) \quad (VII.2.1)$$

Az *NR görbék* használata oktávsvávban mért spektrumot igényel. A gyakorlatban azonban szükség van egy, egyetlen leolvasással teljesített *dB-ben* kifejezett, (VII.2.1) összefüggés szerinti szintérték megadására, hogy adott környezetben fellépő zajra a határértékeket meg lehessen határozni [VII.1].

A VII.2.2. ábra szerinti határgörbék zajossági szinteket szimbolizálnak. Ezeket a szintértékeket a görbék *NR számával* fejezzük ki, melyek azonosak a görbék *1000 Hz értékhez tartozó oktáv-hangnyomásszint* értékével. Ez az eljárás ma széles körben elterjedt, és az *NR görbés módszert* követve adja meg a szakirodalom az ajánlott határértékeket.

A védett környezetben fellépő zajterhelést ugyanakkor az *L_{Aa} alapzaj* figyelembe vételével értékeljük, így a különböző beépítettségű vagy használati funkcióbba vont környezetben előírt határértékek meghatározásánál ezt a tényezőt is figyelembe kellett venni. Eltérő jellemzőkkel bíró területeken megállapított átlagos hangnyomásszint értékeket és zajterhelés viszonyát szemlélteti a VII.2.3. ábra.



VII.2.3. ábra Alapzajszint értékek és zajterhelés
(a Szerző saját mérései alapján)

A VII.2.2. táblázat értelmezése és az előírt határértékek alkalmazása már rögzített szabályok és fogalmak szerint történik. A meghatározásnál legfontosabb a megítélési szint, a megítélési idő és a zajtól védendő terület fogalma.

MEGÍTÉLÉSI SZINT ($L_{AM,kö}$): a vizsgált zajforrás egyenértékű A-hangnyomásszintjéből korrekciós tényezőkkel számított, a teljes megítélési időre vonatkoztatott érték, amelynek **mértékegysége: dB**, vagy ***dB(A)***.

Az *egyenértékű hangnyomásszint* értelmezése és meghatározása a II.4.3. fejezetben tárgyaltak szerint történik. Ennek megfelelően a határértékek előírásánál, majd a határértékek teljesülésének ellenőrzésénél annak a folyamatos, állandó A-hangnyomásszintnek a **T_M megítélési időre** vonatkoztatott effektív értékét vesszük figyelembe, amely a vizsgált, időben változó zaj effektív értékével azonos. Az $L_{AM,kö}$ természetesen a közlekedési zajra vonatkozik, így többek között a helikopteres repülésre előírt megítélési szintet is jelenti.

MEGÍTÉLÉSI IDŐ (T_M) a közlekedés, így a helikopteres repülés vonatkozásában nappal a 6.00 óra és 22.00 óra közötti **$T_M = 16$ óra**, éjjel a 22.00 óra és 6.00 óra közötti **$T_M = 8$ óra**. A teljes napszakra vonatkozóan figyelembe vett időtartam előnye, hogy valamennyi zajeseményt figyelembe veszi, azonban óriási hátránya, hogy átlagos terhelés kimutatására alkalmas, vagyis a kiemelkedő zajszint értékek elhanyagolásával a zajterhelés értéke is csak átlagos érték lesz, ami a legtöbb esetben nem alkalmas a zavarás megfelelő megítélésére.

ZAJTÓL VÉDENDŐ TERÜLET a jogszabály szerint négy kategóriába lett besorolva. Az úgynevezett ***zajvédelmi kategóriák*** meghatározása a területhasználat és a funkció alapján történik, ahol az állandó emberi tartózkodás céljára kijelölt területek és épületek kapnak hangsúlyt az emberi szervezet védelme, illetve a pihenés és a kapcsolódás biztosítása érdekében. A *zajvédelmi kategóriák meghatározása* a települések érvényes helyi építési szabályzatában foglaltak szerint, az ehhez kapcsolt zajvédelmi kategóriák figyelembe vételével történik.

Sajnálatos módon a határérték rendszer nem tartalmaz a természetvédelmi vagy a természeti értékkel rendelkező területekre vonatkozó határértéket, ami az I.3.1. ábrát tekintve a környezetvédelmi és a természetvédelmi érdekek szempontjából a jogalkotás hiányossága. Ezért jelenleg a zavaró hatás megítélése a természetvédelmi területek vonatkozásában eltolódott a szubjektív megítélés irányába, egyre inkább nélkülözve az objektív mérőszámokra alapozott helyzetértékelést.

A VII.2.2. táblázatban feltüntetett határértékeknek a temetők teljes területén, valamint az épületek külső környezeti zajtól védendő azon homlokzata előtt kell teljesülni, amelyen legfeljebb **45 dB beltéri zajterhelési határértékű** helyiség nyílászárója van. Ezeket a helyiségeket a **27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendelet 4. számú melléklete** tartalmazza, elsősorban a lakószobák, hálók helyiségek és foglalkoztató termek, kórtermek és betegszobák tartoznak ide.

A repülőterek és a leszállóhelyek a zajterhelési határértékek szempontjából kettő fő kategóriába lettek besorolva, amit a VII.2.2. táblázatban 1-es és 2-es index-el jelöltünk. Értelmezésük a következő:

1. *Olyan repülőterek, vagy nem nyilvános fel- és leszállóhelyek, ahol 5,7 tonna maximális felszálló tömegnél kisebb légszavaros repülőgépek, illetve 2,73*

- tonna maximális felszálló tömegnél kisebb helikopterek közlekednek;
2. Olyan repülőterek, vagy nem nyilvános fel- és leszállóhelyek, ahol 5,7 tonna maximális felszálló tömegű vagy annál nagyobb légszavaros repülőgépek, illetve 2,73 tonna maximális felszálló tömegű vagy annál nagyobb helikopterek, valamint sugárhajtású légijárművek közlekednek.

A jelenleg hatályos, a 27/2008. (XII. 3.) KvVM-EüM együttes rendeletben alkalmazott szóhasználat szerint a zajterhelési határértékeket minden esetben a **zajforrástól**, vagyis a **helikopterektől** és a **helikopteres repüléstől** származó, védendő környezetben fellépő zajra kell értelmezni. Tehát a zajterhelési határérték a védendő terület és a zajforrás viszonyát jelenti, és a védettség fokát fejezi ki.

VII.3. HELIKOPTERZAJ JELLEMZŐI

A helikopterektől származó zaj értékelésénél a jelenleg alkalmazott eljárás szerint egy-egy adattal adják meg a leszállási-, felszállási- és átrepülési zajszinteket, ahogy azt a VII.2.1. ábra alapján is szemléltettünk. Azonban a helikopter összetett zajforrás, így a környezetében kialakuló hangtér jellegét a lesugárzott zaj mértéke mellett a lesugárzás irányítottága, és a rész-zajforrások eltérő üzemi viszonyokból eredő zajkibocsátása alapvetően meghatározza.

Kutatási eredmények alapján igazolt, hogy a helikopteres repülés zajszempontú minősítéséhez elengedhetetlen a hangtér alaposabb feltárása és a lesugárzott zaj pontosabb leírása, a hangtér különböző pontjain kimutatott hangnyomásszintek alapján [VII.3]. A légi járművektől származó zajterhelés határértékkel való összevetéséhez a terhelési pontokban ténylegesen mért hangnyomásszint értékek használata szükséges. Mielőtt azonban rátérnénk a vizsgálati eljárások tárgyalására, a helikopterektől, mint zajforrásoktól származó zaj jellemzőivel szeretnénk megismertetni az Olvasót.

VII.3.1. HELIKOPTER ZAJKIBOCSÁTÁS MEGHATÁROZÁSA

ZAJKIBOCSÁTÁS a vizsgált zajforrás jellemzője, a **zajkibocsátás értékeit** minden esetben a forrásra vonatkoztatva adjuk meg és értékeljük. Ettől eltér a *környezetben okozott zajterhelés* fogalma, amikor a védendő területen okozott hangnyomásról beszélünk, és ezt **zajterhelésnek** nevezzük. Lényeges szempont, hogy a zajforrásnak nincs zajterhelése, csak zajkibocsátása. Ez alól csak az ember számít kivételnek, amikor önmaga védendőnek számít ugyan, de sokszor, mint zajforrás (pl. a hangos zenehallgatás vagy telefonálás közösségben) jelenik meg és zavaró tényezőt jelent a körülötte tartózkodók számára.

Helikopterek esetében a zaj-minősítési követelmények alapja az **effektív észlelt zajszint**, amit a zajosságérzet alapján, az L_z **zajosságszint** meghatározására alkalmazott (II.4.30) *egyenletből* származtatunk, **jele: EPNL**, mértékegysége: **EPNdB**. Az effektív érzékelt zajszint a légijárművek által keltett zaj emberekre gyakorolt szubjektív hatását kifejező szám. Az EPNL értékét a folyamatosan észlelt PNL pillanatnyi zajszintből határozzák meg, amit a szinképi szabálytalanságoknak

megfelelően, továbbá egy megadott időtartamra vonatkoztatva korrigálnak.

A minősítéshez alkalmazott vizsgálat bemutatásánál a 49/1999. (XII. 29.) *KHVM rendeletben foglaltakat követjük*. A hangnyomás három alapvető fizikai tulajdonságát kell mérni, így a hangnyomásszint értéket, a frekvencia értékeket és az időbeli változást. Tehát a zajmérés során minden 500 ms időszakban ismerni kell 24 egyharmad oktávsvág mindegyikében a vizsgált légijármű által kibocsátott pillanatnyi hangnyomásszintet. A számítási eljárás, ami a zaj fizikai méréséből indul ki és az *EPNL* szubjektív reakció mértékének kiértékeléséhez vezet a következő öt lépésből áll.

ELSŐ LÉPÉS. A hangnyomásszintek 24 egyharmad oktávsvágját *zajosságra* kell alakítani. A *noy* értékeket kombinálni kell, majd *PNL(k)* pillanatnyi értékelt zajszintre kell átalakítani.

MÁSODIK LÉPÉS. A szinképi ingadozások jelenléte miatt minden egyes szinképhez ki kell számítani egy *C(k)* tisztahang korrekciós tényezőt, ami az emberi szervezet zajterhelésre adott szubjektív válaszát veszi figyelembe.

HARMADIK LÉPÉS. A tisztahang korrekciós tényezőt és az érzékelt zajszintet össze kell adni, hogy a minden egyes 500 ms időszakra egy *PNLT(k)* értéket kapjunk, ami az úgynevezett tisztahang szerint **korrigált érzékelt zajszintet** adja a következők szerint:

$$PNLT(k) = PNL(k) + C(k) \quad (VII.3.1)$$

A tisztahang szerint korrigált érzékelt zajszint pillanatnyi értékeiből meghatározható a *legnagyobb érték*, a **PNLTM**.

NEGYEDIK LÉPÉS. Számítással meg kell határozni a **D időtartam korrekciós tényezőt**, amely a tisztahang szerint korrigált érzékelt zajszint időfüggvényének idő szerinti integrálásából adódik.

ÖTÖDIK LÉPÉS. Az **EPNL** effektív érzékelt zajszint a tisztahang szerint korrigált érzékelt zajszint maximuma, ami az *időtartam korrekciós tényező* algebrai összegzésével adódik a következő összefüggés szerint:

$$EPNL = PNLTM + D \quad (VII.3.2)$$

A *PNL(k)* pillanatnyi érzékelt zajszinteket az **SPL(i,k)** pillanatnyi egyharmad oktávsvágú hangnyomás szintjeiből határozzuk meg három lépésben.

ELSŐ LÉPÉS. Az 50 Hz-től 10 kHz-ig minden egyes egyharmad oktávsvágban mért *SPL(i,k)* szinteket *n(i,k)* érzékelt zajosságra alakítjuk át, a VII.3.1. úgynevezett *noy táblázat* matematikai megfogalmazása szerint, amelynek értékeit a VII.3.1. ábrával együtt alkalmazzuk.

MÁSODIK LÉPÉS. Kombinálni kell az *n(i,k)* érzékelt zajosság értékeket a következő összefüggés alapján:

$$N(k) = n(k) + 0,15 \cdot \left\{ \left[\sum_{i=1}^{24} n(i,k) \right] - n(k) \right\} = 0,85 \cdot n(k) + 0,15 \cdot \sum_{i=1}^{24} n(i,k) \quad (VII.3.3)$$

ahol:

$n(k)$ — az $n(i, k)$ 24 értéke közül a legnagyobb érték;
 $N(k)$ — teljes érzékelt zajosság.

HARMADIK LÉPÉS. Az $N(k)$ teljes érzékelt zajosságot átalakítjuk $PNL(k)$ érzékelt zajszintre a következő összefüggés alapján:

$$PNL(k) = 40,0 + \frac{10}{\log 2 \cdot \log N(k)} \quad (\text{VII.3.4})$$

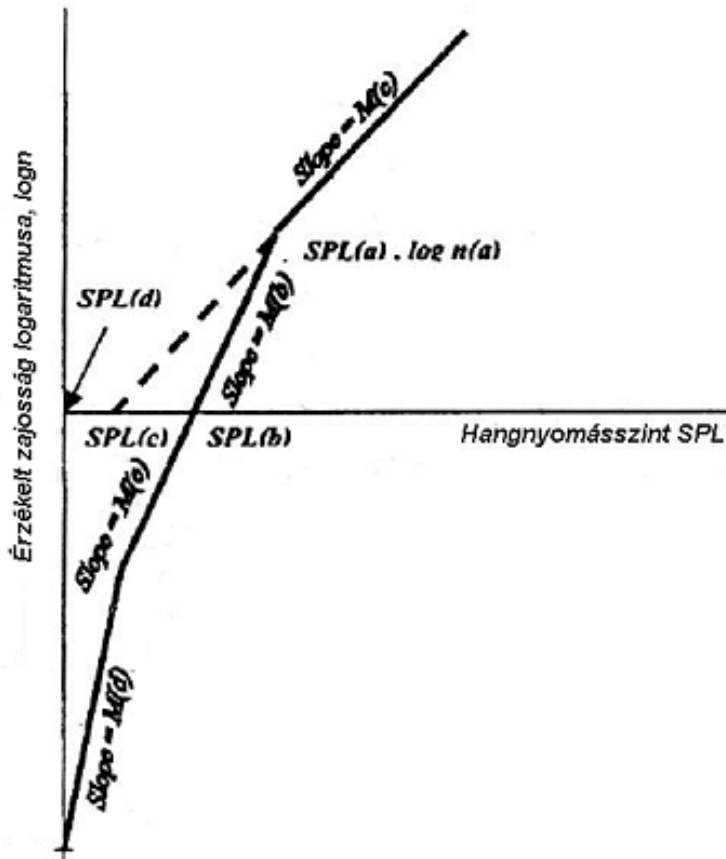
Sáv (i)	f (Hz)	SPL (a)	SPL (b)	SPL (c)	SPL (d)	SPL (e)	M(b)	M(c)	M(d)	M(e)
1	50	91,0	64	52	49	55	0,043478	0,030103	0,079520	0,058098
2	63	85,9	60	51	44	51	0,040570	↑	0,068160	0,058098
3	80	87,3	56	49	39	46	0,036831	□	0,068160	0,052288
4	100	79,9	53	47	34	42	0,036831	□	0,059640	0,047534
5	125	79,8	51	46	30	39	0,035336	□	0,053013	0,043573
6	160	76,0	48	45	27	36	0,033333	□	↑	0,043573
7	200	74,0	46	43	24	33	0,033333	□	□	0,040221
8	250	74,9	44	42	21	30	0,032051	↓	□	0,037349
9	315	94,6	42	41	18	27	0,030675	0,030103	□	0,034859
10	400	□	40	40	16	25	0,030103	Nem alkal- mazható	□	↑
11	500	↑	40	40	16	25	↑		□	□
12	630	□	40	40	16	25	□		□	□
13	800	□	40	40	16	25	□		↓	□
14	1000	□	40	40	16	25	↓		0,053013	↓
15	1250	□	38	38	15	23	0,030103		0,059640	0,034859
16	1600	□	34	34	12	21	0,029960		0,053013	0,040221
17	2000	□	32	32	9	18	↑		0,053013	0,037349
18	2500	□	30	30	5	15	□		0,047712	0,034859
19	3150	□	29	29	4	14	□		0,047712	↑
20	4000	□	29	29	5	14	□		0,053013	↓
21	5000	↓	30	30	6	15	↓		0,053013	0,034859
22	6300	□	31	31	10	17	0,029960		0,068160	0,037349
23	8000	44,3	37	34	17	23	0,042285	0,029960	0,079520	0,037349
24	10000	50,7	41	37	21	29	0,042285	0,029960	0,059640	0,043573

VII.3.1. táblázat Noy értékek matematikai egyenleteihez alkalmazott állandók
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

A színeképében határozott egyenlőtlenségeket tartalmazó zajt — pl. maximális diszkrét frekvencia összetevőket vagy hangokat — a $C(k)$ korrekciós tényező alkalmazásával kell korrigálni az alábbiak szerint.

Először a szomszédos frekvencia-sávok közötti hangnyomásszint változásokat kell kiszámítani az összes többi egyharmad oktávsávban a következő összefüggés szerint:

$$s(i, k) = SPL(i, k) - SPL(i - 1, k) \quad (\text{VII.3.5})$$



VII.3.1. ábra Érzékelte zajosság a hangnyomásszint függvényében
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

A VII.3. ábrán szereplő SPL a Sound Pressure Level (magyarul hangnyomásszint) rövidítése.

A továbbiakban meghatározzuk az $SPL'(i,k)$ új korrigált hangnyomásszinteket. Ki kell választani a (VII.3.6) egyenlet szerint azokat az $s(i,k)$ meredekség értékeket, ahol a meredekség változásának abszolút értéke 5-nél nagyobb.

$$|\Delta s(i,k)| = |s(i,k) - s(i-1,k)| > 5 \quad (\text{VII.3.6})$$

Ha az $s(i,k)$ meredekség (VII.3.6) egyenlet szerint kiválasztott értéke pozitív és algebrailag nagyobb, mint az $s(i-1,k)$ meredekség, ki kell választani az $SPL(i,k)$ értékeket. Amennyiben az $s(i,k)$ meredekség (VII.3.6) szerint kiválasztott értéke nulla vagy negatív, és az $s(i-1,k)$ meredekség pozitív, ki kell választani az $SPL(i-1,k)$ értéket. Azok a hangnyomásszint értékek, amelyek nem lettek kiválasztva, az eredeti hangnyomásszint értékeket vesszük figyelembe, azaz $SPL'(i,k) = SPL(i,k)$.

A kiválasztott hangnyomásszintek esetében az új hangnyomásszint mindig az

előző és a következő hangnyomásszint matematikai átlagával egyenlő a következők szerint:

$$SPL'(i, k) = 1/2 [SPL(i-1, k) + SPL(i+1, k)] \quad (VII.3.7)$$

A legmagasabb frekvenciasávban kiválasztott hangnyomásszint értékre az új hangnyomásszintet vesszük figyelembe a következők szerint:

$$SPL'(24, k) = SPL(23, k) + s(23, k) \quad (VII.3.8)$$

A következőkben az új $s'(i, k)$ meredekségeket számítjuk ki a következő összefüggést alkalmazva:

$$s'(i, k) = SPL'(i, k) - SPL'(i-1, k) \quad (VII.3.9)$$

Három szomszédos meredekség matematikai átlagát ($i=1-23$) számítjuk ki a következők szerint:

$$\bar{s}(i, k) = \frac{1}{3} \cdot [s'(i, k) + s'(i+1, k) + s'(i+2, k)] \quad (VII.3.10)$$

Ezután az első oktávsváttól kezdve az $SPL''(i, k)$ végső egyharmad oktávsvág hangnyomásszinteket számítjuk ki a 24. sávig a következő összefüggés szerint:

$$SPL''(i, k) = SPL'(i-1, k) + \bar{s}(i-1, k) \quad (VII.3.11)$$

A következőkben az $F(i, k)$ eredeti hangnyomásszintek és a végső háttér hangnyomásszintek közötti különbséget határozzuk meg azokra az értékekre, amelyek értéke 1,5 vagy ennél nagyobb:

$$F(i, k) = SPL(i, k) - SPL''(i, k) \geq 1,5 \quad (VII.3.12)$$

Frekvencia, f [Hz]	Szintkülönbség, F [dB]	Tisztahang korrekció, C [dB]
$50 < f < 500$	$1,5 \leq F < 3$	$F/3 - 1/2$
	$3 \leq F < 20$	$F/6$
	$20 \leq F$	$3 \frac{1}{3}$
$500 \leq f < 5000$	$1,5 \leq F < 3$	$2F/3 - 1$
	$3 \leq F < 20$	$F/3$
	$20 \leq F$	$6 \frac{2}{3}$
$5000 \leq f < 10\,000$	$1,5 \leq F < 3$	$F/3 - 1/2$
	$3 \leq F < 20$	$F/6$
	$20 \leq F$	$3 \frac{1}{2}$

VII.3.2. táblázat: Tisztahang korrekciós tényezők

forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

A (VII.3.12) *egyenlet* alapján meghatározott $F(i, k)$ hangnyomásszint különbségekből mindegyik érintett egyharmad oktávsvonalközlésében meghatározzuk a tisztahang korrekciós tényezőt, amihez a VII.3.2. táblázat nyújt segítséget.

A $PNLT(k)$ korrigált érzékelt zajszinteket a (VII.3.1) egyenlet alapján a megfelelő $PNL(k)$ értékekhez a $C(k)$ értékeket hozzáadva határozzuk meg. A tisztahang szerint korrigált érzékelt zajszint legnagyobb értéke, azaz a $PNLTM$, a $PNLT(k)$ tisztahang szerint korrigált érzékelt zajszintek közül kiválasztott legnagyobb érték. A zaj időbeli jellemzéséhez a méréseket 500 ms intervallumonként kell elvégezni.

A (VII.3.2) egyenletben szereplő D időtartam korrekciós tényezőt integrálással az alábbiak szerint határozzuk meg:

$$D = 10 \cdot \lg \left[\left(\frac{1}{T} \right) \cdot \int_{t(1)}^{t(2)} 10^{\frac{PNLT}{10}} dt \right] - PNLTM \quad (\text{VII.3.13})$$

ahol:

- T — vonatkoztatási idő;
- $PNLTM$ — a $PNLT$ legnagyobb értéke;
- $t(1)$ — első időpont, miután a $PNLT$ nagyobb lesz, mint a $PNLTM-10$;
- $t(2)$ — időpont, ami után a $PNLT$ állandóan kisebb, mint $PNLTM-10$.

Mivel a $PNLT$ értékét az SPL mért értékekből számítjuk ki, a $PNLT$ időfüggvényére általában nincs egyértelmű egyenlet, ezért a (VII.3.13) egyenletben az integrál jel helyett összegző jelet használhatunk a következők szerint:

$$D = 10 \cdot \lg \left[\left(\frac{1}{T} \right) \cdot \sum_{k=0}^{d/\Delta t} \Delta t \cdot 10^{\frac{PNLT(k)}{10}} \right] - PNLTM \quad (\text{VII.3.14})$$

ahol:

- T — 10 s;
- Δt — 0,5 s;

Fenti értékek alkalmazásával a (VII.3.14) egyenlet a következőképp alakul:

$$D = 10 \cdot \lg \left[\sum_{k=0}^{2d} 10^{\frac{PNLT(k)}{10}} \right] - PNLTM - 13 \quad (\text{VII.3.15})$$

ahol:

- d — a $PNLTM-10$ értékeinek megfelelően meghatározott időtartam.

A bemutatott vizsgálati eljárás alapján a zajesemény szubjektív hatását, vagyis az $EPNL$ *effektív érzékelt zajszintet* a D időtartam korrekció és a $PNLTM$ tisztahang

szerint korrigált érzékelt zajszint legnagyobb értékének algebrai összege adja. Látható, hogy többlépcsős vizsgálati eljárásról van szó, amelynek alapját a **mért és számított zajesemény-szint** (*SEL*, Sound Event Level) biztosítja **dB**-ben kifejezve, mait csak ebben a vizsgálati eljárásban alkalmazunk. A későbbiekben bemutatásra kerülő zajméréseknél a *SEL* értékek helyett viszont a L_{AX} zajeseményszint értékeket használjuk.

Ezekhez a referencia zajmérésekhez, melyek a *SEL* értékek meghatározására szolgálnak, a VII.2.2. táblázatban szereplő határértékek megállapításánál alkalmazott eljárást követve, a 2730 kg felszálló tömeg figyelembe vételével meghatározott *referencia zajmérési pontok* kijelölése szükséges. A zajmérési pontok kijelölésének módszerét a VII.3.3. és VII.3.4. táblázatokban foglaltuk össze.

Kategória		Helikopter jellemzője	
H1		Maximális felszálló tömege egyenlő és kisebb, mint 2,73 t	
Referencia zajmérési pont kijelölése			
<input type="checkbox"/>	Átrepülési referencia zajmérő pont		<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	A helikopterek zaját a referencia repülési pálya 150 m magas (492 láb) pontja alatt, a talaj felszíne felett 1,2 m-re kijelölt pontban kell mérni. A helikoptert a vizsgálatához 150 m magasságban szintrepülésben kell stabilizálni.		<input type="checkbox"/>

VII.3.3. táblázat Referencia zajmérési pontok *H1* helikopter kategória esetén
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

Kategória	Helikopter jellemzője		
H2	Maximális felszálló tömege nagyobb, mint 2,73 t		
Referencia zajmérési pont kijelölése			
Felszállási referencia zajmérő pont	Átrepülési referencia zajmérő pont	Megközelítési referencia zajmérő pont	
Repülési pálya alatt 1 db mérési pont, függőlegesen a talajon és a repülés irányában vízszintesen 500 m-re attól a ponttól, ami az emelkedés megkezdését jelenti. Repülési pálya két oldalán 2 db mérési pont 150 m-re, referenciaponton áthaladó egyenesen kijelölve.	1 db mérési pont a repülési pálya alatt függőlegesen 150 m-re (492 láb), földfelszín felett 1,2 m-re helyezkedik el.	Repülési pálya alatt 1 db mérési pont, függőlegesen 120 m-re, 1140 m-re a 6 fokos megközelítési pálya és a terep metszéspontjától vízszintesen. Repülési pálya két oldalán 2 db mérési pont 150 m-re, szimmetrikusan elhelyezve a referenciapontot metsző egyenesen.	

VII.3.4. táblázat Referencia zajmérési pontok *H2* helikopter kategória esetén
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

Általános szabályként a zajméréseknél a következőkre kell tekintettel lenni. A légi járművektől származó zaj méréséhez olyan, viszonylag sík területet kell kiválasztani, ahol nincs túlzott hangelnyelő tulajdonságot eredményező növényzet. Emellett a vizsgálattal érintett térrészben nem lehetnek a hangteret befolyásoló akadályok, amelyek a mért értékek módosulását okozzák.

A referencia zajminősítési eljárásokkal kapott eredményeket az értékelés és a minősítés keretében erre a célra megállapított határértékkel hasonlítjuk össze. Ebben az esetben nem az emberi megítélésen alapuló zajterhelési határértékekről van szó, hanem a helikopterre, mint zajforrásra jellemző értékekről, amelyekkel a zajforrást minősítjük. A maximális zajsztintek előírása követi a korábbiakban már alkalmazott, felszálló tömeg szerinti felosztást. A határértékeket a VII.3.5. és VII.3.6. táblázatokban szemléltetjük.

A vizsgálatokat a műszeres mérésre vonatkozó szabályok mellett tovább bonyolítja az is, hogy figyelembe kell venni a *helikopterek „m” felszálló tömegét*, valamint a *repülési- vagy a siklópálya adatait*. Az előírt paraméterektől nem lehet eltérni, amit sok esetben nehéz teljesíteni. Ezért a referencia vizsgálati eljárásoknál körültekintően kell eljárni, illetve a részt vevő személyek feladatait gondosan össze kell hangolni. További nehézséget okozhat, ha a helikopter jellemzői nem teszik lehetővé a referencia eljárások szerint végrehajtott repülést.

Kategória	Helikopter jellemzője
H1	Maximális felszálló tömege egyenlő és kisebb, mint 2,73 t
Megengedett maximális zajsztintek	
788 kg hitelesített maximális felszálló tömegig	SEL ≤ 82 dB
788 kg hitelesített maximális felszálló tömeg felett	SEL ≤ 82 dB a felszálló tömeg logaritmusával növekszik

VII.3.5. táblázat Határértékek a *H1* helikopter kategória esetén
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

Kategória		Helikopter jellemzője			
H2		Maximális felszálló tömege nagyobb, mint 2,73 t			
Megengedett maximális zajsztintek					
Felszállási referencia zajmérő pontnál		Átrepülési referencia zajmérő pontnál		Megközelítési referencia zajmérő pontnál	
m ≥ 800 kg	109 EPNdB	m ≥ 800 kg	108 EPNdB	m ≥ 800 kg	110 EPNdB
800 kg alatt a csökkenés mértéke:		800 kg alatt a csökkenés mértéke:		800 kg alatt a csökkenés mértéke:	
3 dB / 0,5·m		3 dB / 0,5·m		3 dB / 0,5·m	
89 EPNdB elérése után a határérték mindig:		88 EPNdB elérése után a határérték mindig:		90 EPNdB elérése után a határérték mindig:	
89 EPNdB		88 EPNdB		90 EPNdB	

VII.3.6. táblázat Határértékek a *H2* helikopter kategória esetén
forrás: 49/1999. (XII. 29.) KHVM rendelet

A VII.3.5. táblázat határértékekre vonatkozó második sorában előírtak értelmezése alapján, a (II.4.14) összefüggést alkalmazva járunk el, így a felszálló tömeg megkétszereződésekor a határérték 3 dB-lel növekszik.

A vizsgálati eljárás bemutatása kezdetén utaltunk rá, hogy a zajminősítéshez mindenekelőtt a hangnyomásszint értékek mérésére van szükség, ami kiegészül a vizsgált zaj frekvenciajellegének és időbeli változásának rögzítésével. Mindez a gyakorlatban úgy valósul meg, hogy a VII.3.3. – VII.3.6. táblázatokban is szereplő *felszállási-, átrepülési- és megközelítési zajeseményekre* vonatkoztatott **zajesemény-szintet** kell meghatározni műszeres méréssel.

Egyedi repülési műveletnél a helyszíni méréseken alapuló vizsgálati eredmény jele: L_{AE} , mértékegysége: **dB**. Ebben az esetben a zajesemény-szintet már a (II.4.31) összefüggés alapján határozzuk meg, vagyis a szintekben kifejezett érték az A-súlyozott hangnyomásszint négyzetének idő szerinti integrálja a vizsgálati időtartamban, illetve a zajesemény időtartamában. Tehát a zajesemény-szintet a következő egyenlet fejezi ki:

$$L_{AE} = 10 \cdot \lg \cdot \frac{1}{T_0} \int_{t_1}^{t_2} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \quad (\text{VII.3.16})$$

ahol: $L_A(t)$ — az A-súlyozott hangnyomásszint változása az időben.

A SEL értékét a következő kifejezéssel is megadjuk, ami a mért zajszint adatok mellett a zajeseményre jellemző úgynevezett időtartam engedményt is figyelembe veszi:

$$L_{AE} = L_{A\max} + \Delta A \quad (\text{VII.3.17})$$

ahol:

ΔA — az időtartam engedmény.

Az időtartam engedmény meghatározása a következők szerint történik:

$$\Delta A = 10 \cdot \lg \tau \quad (\text{VII.3.18})$$

ahol:

$$\tau = (t_2 - t_1) / 2.$$

A mérésnél a (VII.3.17) egyenletben szereplő $L_{A\max}$ értékeket kell rögzíteni, ami az A-súlyozású hangnyomás maximális értéke, és a hangnyomásszint mérő műszer lassú (slow) integrálási állandójának beállítása mellett mérjük.

A helyszíni méréseknél ügyelni kell az akusztikai alapzaj és a környezeti háttérzaj meghatározására is, ugyanis a vizsgálat helyszínén felléphetnek olyan zavaró zajok, amelyek befolyásolják a helikopter zajának értékelését és a minősítéshez felhasznált eredményeket is. Elfogadott szabály, hogy amennyiben a helikopteres

repüléstől származó hangnyomásszint csúcsértéke nem haladja meg legalább 15 dB-lel a háttérzaj hangnyomásszintjét, akkor a vizsgálatot a referencia eljáráshoz előírt magasságon végzett repülésre nem lehet elvégezni. Ekkor a repülési magasság csökkentésével lehet a mérést zavaró hatást kizárni.

VII.3.2. ZAJKIBOCSÁTÁS EGYSZERŰSÍTETT VIZSGÁLATA

Az eddigiekben tárgyalt zajminősítési eljárás azon túl, hogy csak több, megfelelő számú mérés és ehhez kapcsolt számítás eredményét felhasználva szolgáltat adatot a helikopterek zajminősítéséhez, a zajosságszintből levezetett *effektív észlelt zajszint* meghatározására szolgál. A határértékek előírására is EPNdB-ben került sor.

A gyakorlatban azonban nincs lehetőség minden alkalommal az ilyen jellegű mérési adatsor előállítására, illetve költséges zajmérések elvégzését pl. tervezési feladatoknál a gazdasági szempontok is akadályozzák. Emiatt tervezésnél vagy egy előzetes környezetvédelmi vizsgálatnál a helikopterektől származó zaj becslése csak nehezen végezhető el. Azonban törekedni kell a hiányzó zaj adatok pótlására, amire egyrészt az eddigi kutatások eredményeit, másrészt helikopteres repülések során a környezetben okozott zajterhelés mért adatait lehet felhasználni.

Helikopterzaj értékeléséhez egyszerűbb esetben alkalmazhatók azok a mérési adatok, amelyek a VII.3.1. fejezetben tárgyalt vizsgálat keretében elvégzett mérésekkel állíthatók elő. Említést érdemel ugyanakkor a repülőterek zajgátló védőövezeteinek kijelöléséhez bevezetett számítási eljárásnál felhasznált, és a vonatkozó jogszabályban jóváhagyott normatív zaj adatok felhasználási lehetősége. Helikopterekre vonatkozó értékeket 150 m-es referenciátávolságra októvsvonkénti bontásban a VII.3.6. táblázatban adjuk meg.

	Normatív zaj adatok			
Frekvencia	H1 felszállás	H1 leszállás	H2 felszállás	H2 leszállás
63 Hz	77 dB	77 dB	87 dB	87 dB
125 Hz	73 dB	73 dB	83 dB	83 dB
250 Hz	76 dB	76 dB	86 dB	86 dB
500 Hz	76 dB	76 dB	86 dB	86 dB
1000 Hz	71 dB	71 dB	81 dB	81 dB
2000 Hz	65 dB	65 dB	75 dB	75 dB
4000 Hz	57 dB	57 dB	67 dB	67 dB
8000 Hz	55 dB	55 dB	65 dB	65 dB
távolság	150 m	150 m	150 m	150 m

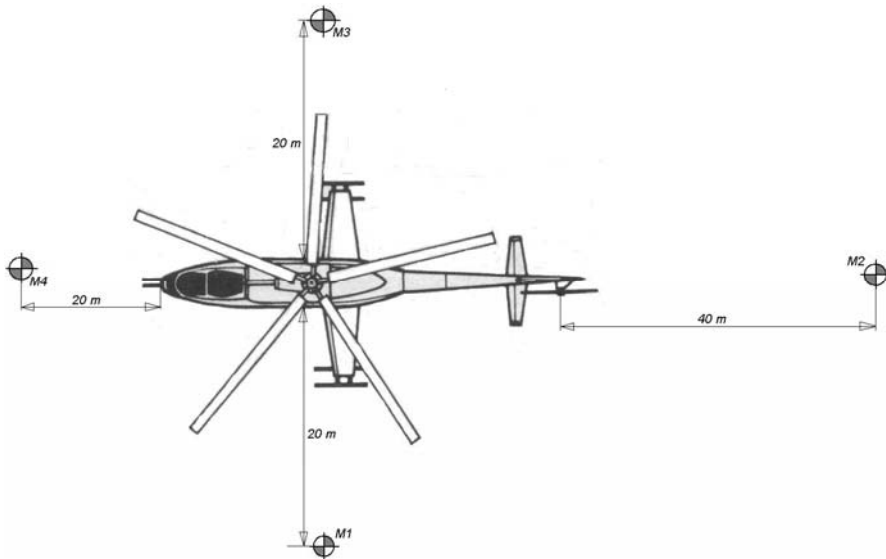
VII.3.6. táblázat Helikopterek normatív zaj adatai
forrás: 18/1997. (X. 11.) KHVM-KTM együttes rendelet

A helikopter, mint sugárzó hangforrás körül kialakuló hangtér jellemzésére a hangtér adott pontjában méréssel meghatározható hangnyomás (L_{Amax}) értékeket és a mérési idő függvényében kimutatott *zajesemény-szinteket* is felhasználhatjuk. Ebben az esetben a tényleges repülési műveletre vonatkoztatott zajesemény-szint jele: L_{AX} ,

melynek mértékegysége: **dB**. Ilyenkor az integrálási idő a művelet időtartamának megfelelően értelemszerűen jóval hosszabb lehet, mint a VII.3.1. fejezetben bemutatott eljárásnál alkalmazott időtartam.

Különböző irányokra jellemző hangnyomásszint értékeket szemléltetnek egy *MI-24 Hind* típusú helikopter esetében elvégzett mérés eredményei, amit a VII.3.2. ábrán szemléltetünk. A mért hangnyomásszinteket a VII.3.7. táblázat tartalmazza. A mérésekre kettő eltérő üzemmódban került sor:

1. alapjáratú üzemmód, amikor a helikopter még a földön állt;
2. felszálló üzemmód, függeszkedés 15 m-es magasságban.



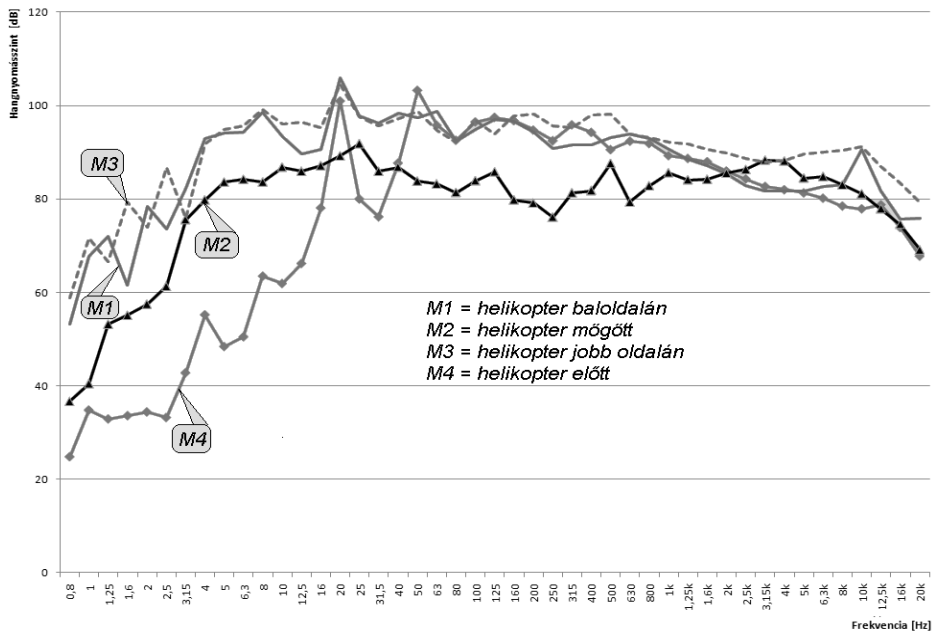
VII.3.2. ábra Zajmérési pontok elrendezése

<i>MI-24 Hind</i> típusú helikopter, álló helyzetben							
M1 (bal oldal)		M2 (hátsó)		M3 (jobb oldal)		M4 (elől)	
L_{\max}	L_{\min}	L_{\max}	L_{\min}	L_{\max}	L_{\min}	L_{\max}	L_{\min}
103,3 dB	97,5 dB	99,0 dB	95,3 dB	104,8 dB	101,2 dB	102,9 dB	97,4 dB
<i>MI-24 Hind</i> típusú helikopter, függeszkedés 15 m-en							
M1 (bal oldal)		M2 (hátsó)		M3 (jobb oldal)		M4 (elől)	
L_{\max}	L_{\min}	L_{\max}	L_{\min}	L_{\max}	L_{\min}	L_{\max}	L_{\min}
104,5 dB	98,5 dB	106,8 dB	101,6 dB	105,4 dB	100,5 dB	104,7 dB	98,6 dB

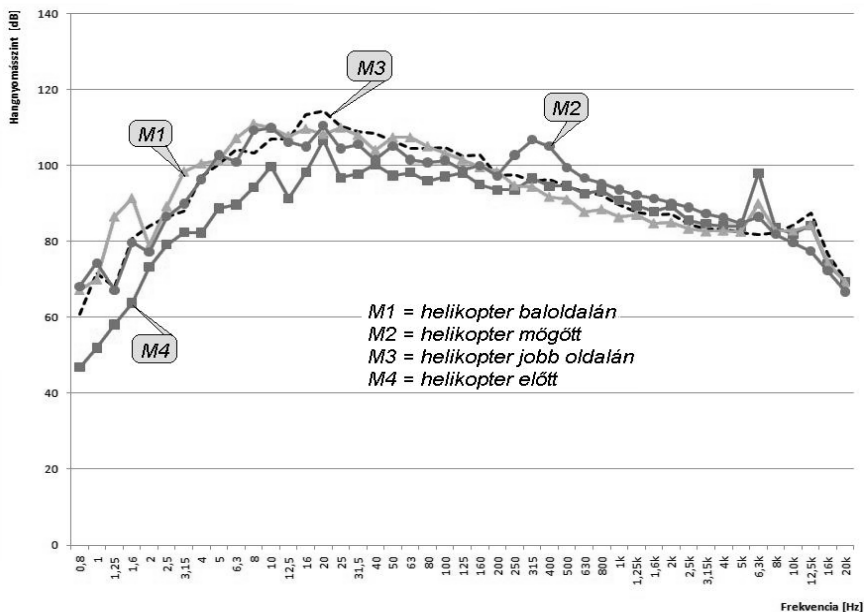
VII.3.7. táblázat Helikopter zajszint értékek

A VII.3.7. táblázatban feltüntetett hangnyomásszint értékeket tekintve megállapítható, hogy mind álló helyzetben a kisebb hajtómű teljesítménynél, mind függeszkedésnél a nagyobb hajtómű teljesítménynél a hangtér különböző irányokban

egyaránt eltérések mutatkoznak a kimutatott hangnyomásszintekben, ami a zajforrás irányítottságára hívja fel a figyelmet.



VII.3.3. ábra Állóhelyi üzemmód mellett mért L_{max} szintek



VII.3.4. ábra Függeszekedés üzemmód mellett mért L_{max} szintek
A hangnyomásszint-frekvencia függvény állóhelyi üzemmód esetén a VII.3.3.

ábrán, függeszkedő üzemmód esetén a VII.3.4. ábrán látható. Az állóhelyi hangnyomásszintek vonatkozásában, a helikopter jobb- és baloldalán észlelt magasabb értékekben a forgószárny mellett a hajtómű és az erőátvitel működésének van szerepe. A helikopter mögött mért zajszint értékek nagyobb mértékű változása alapján következtethetünk arra, hogy indulás időszakában megnövekedett a faroklégsavartól származó zaj szerepe az összes zajkibocsátásban, amíg álló helyzetben elsősorban a forgószárny lapátok zaja dominál a csúcsértékek miatt.

Említést érdemlő hangjelenség, amikor a légsavar lapátok végénél leváló örvény eléri a következő lapát végét és a lapát-elhaladási hangnyomásszintek gyors növekedését okozza, valamint a III.6.4. fejezetben említett, a forgószárny lapátok csapkodó mozgása, ami csattogó hanggal jár. A frekvencia spektrumban a főrotor lapátok elhaladásából adódó hangnyomás összetevők ilyenkor meghatározó jelleget képviselnek, jól láthatóan kiemelkednek a szélessávú zajból, amelynek legnagyobb értéke állóhelyi üzemmódban 21 dB, függeszkedés mellett 14 dB. A függeszkedés melletti kisebb csúcsérték-növekedés annak tudható be, hogy ilyenkor a teljes spektrumban kimutatható mértékű hangnyomásszint növekedés következik be, ezért két szomszédos sávban értelemszerűen kisebb a hangnyomásszintek különbsége. Ugyanakkor megfigyelhető, hogy magasabb frekvenciákon magas, $L_{Amax} = 80$ dB feletti hangnyomásszintek mutathatók ki, ami átlagos települési háttérterhelés értékeket tekintve jelentősen hozzájárul a zavaró hatás kialakulásához.

A terhelési pont, illetve egy védendő létesítmény feletti átrepülés miatt fellépő zajterhelés meghatározó szempont a repülési zaj értékelésénél. A gyakorlatban mind a tervezés, mind az utólagos ellenőrző vizsgálatok célja, hogy a zaj ellen védendő terület vagy objektum tényleges zajterhelését ismerjük meg. Számos esetben azonban gondot jelent, hogy az előzetes becsléseknél nem állnak rendelkezésre olyan hangnyomásszint eredmények, amelyek a 150 m-es referenciatávolságnál kisebb távolságokra adna a számításnál felhasználható adatot. Ilyenkor célszerűen úgy járhatunk el, hogy a tervezett repülési módosatra előírt egyéb feltételeket is figyelembe véve (legkisebb repülési magasság, repülési pálya a feladat függvényében) a lehetséges legnagyobb hangnyomásszint értékkel számolunk, és erre határozzuk meg a várható legnagyobb zajterhelést. Egy *MI-24 Hind* típusú helikopter átrepülési adatait foglaltuk össze a VII.3.8. táblázatban.

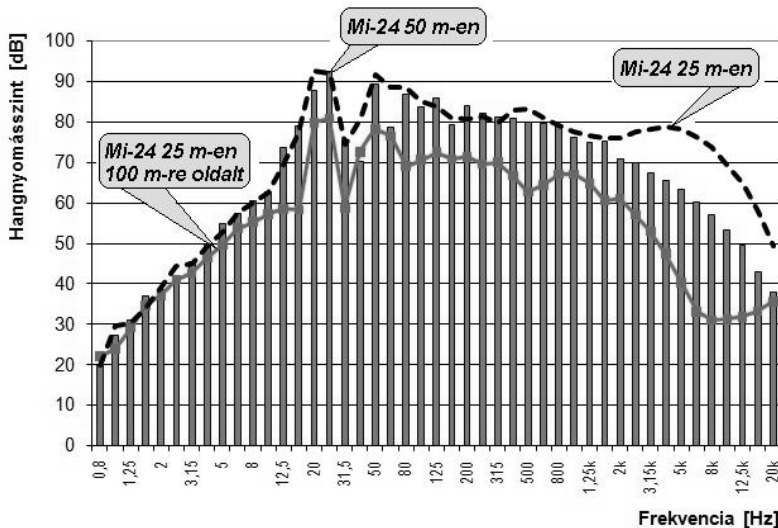
<i>MI-24 Hind</i> h = 50 m			<i>MI-24 Hind</i> h = 50 m, $s_t = 100$ m			<i>MI-24 Hind</i> h = 25 m		
LA_{max}	LA_{min}	L_{AX}	LA_{max}	LA_{min}	L_{AX}	LA_{max}	LA_{min}	L_{AX}
100,4 dB	56,0 dB	86,4 dB	84,0 dB	55,2 dB	74,1 dB	103,2 dB	62,1 dB	89,9 dB

VII.3.8. táblázat Zajszintek *MI-24 Hind* helikopter átrepülése során

A VII.3.8. táblázatban egy *MI-24 Hind* típusú helikopter eltérő magasságon történő átrepülésétől származó hangnyomásszint adatai szerepelnek. A zajmérésre 1,5 m magasságban kijelölt észlelési pontban, a helikopter eltérő repülési magassága (h) és oldaltávolsága (s_t) mellett került sor.

Az átrepülési szintek értékelésénél levont elsődleges megállapítás, hogy a repülési magasság kismértékű növelése kis távolságnál — esetünkben kétszeresére, 25 m-ről 50 m-re — mérésel kimutatható módon módosította a hangnyomásszinteket, de szubjektív észleléssel ez az eltérés nem volt érzékelhető. Tehát a magas, $L_{Amax} = 100,4$ dB-es és $L_{Amax} = 103,2$ dB-es zajszintek miatt a távolság ilyen kismértékű változása nincs jelentős hatással a terhelési pontban észlelt zajszintekre. Megjegyezzük, hogy 100 dB feletti, vagy ahhoz közeli hangnyomásszintek esetében a hanghatás felezésével elért 3 dB-es zajcsökkenés a szubjektív érzékelést nem befolyásolja érdemben. Helikopterzaj esetében a leszállóhelyek környezetében 3 dB-nél jóval nagyobb zajcsökkentést kell elérni ahhoz, hogy érzékelhető, kedvező irányú hatást érzünk el. Emellett a zajcsökkenésnek minden frekvenciasávra ki kell terjednie, amit a hangnyomásszint-frekvencia jelleg együttes hatása indokol.

Más a helyzet, amikor a terhelési pont és a zajforrás távolságát már jelentősebben növeltük, az átrepülési magasságot 50 m-en tartva, az oldalirányú távolságot 100 m-re módosítottuk. Ekkor mind az L_{Amax} értékekben, mind az átrepülésre vonatkoztatott L_{AX} értékekben nagyobb eltérés mutatkozott. A zajszint csökkenése már jelentősnek mondható, de ekkora távolság mellett is meghaladja a zavaró hatás mértékét és jellegét. A szubjektív módon észlelhető hallástartományban, valamint az infrahang tartományban rögzített zajszinteket a VII.3.5. ábra szemlélteti.



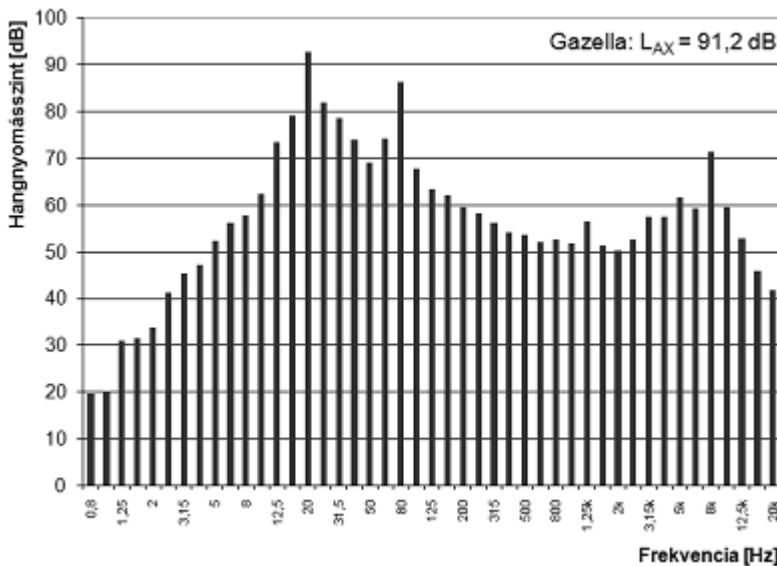
VII.3.5. ábra MI-24 Hind típusú helikopter átrepülése mellett mért L_{max} szintek

Mérési tapasztalatok alapján a helikopterek jobb oldalán az irányított lesugárzás miatt magasabb hangnyomásszint értékek mérhetők, így ezt az irányt meghatározónak tekinthetjük. Ezért egyszerűsített esetben egy helikopter leszállóhely mellett zajmérési pontot úgy célszerű kijelölni, hogy a leszállási és kirepülési irányt figyelembe véve a mérésre a helikopter jobb oldalán, illetve a faroklégsavartól származó zajszint-növekedésre tekintettel felszálláskor a helikopter mögött kerüljön sor.

Most nézzük meg, hogy eltérő típusú helikopterek működtetése során szokásos körülmények mellett mekkora hangnyomásszintek mutathatók ki egy leszállóhely környezetében.

A vizsgált helikopter típusok: *Eurocopter*, *Bell Jet*, *Gazella*. Ezeket a helikopter típusokat elterjedten használják Magyarországon személyszállítás céljából városi környezetben, lakóterületek közelében. A zajmérési pontot a leszállóhelytől 40 m-re oldalirányban, földfelszín felett 1,5 m-es magasságban jelöltük ki. *A vizsgált zajesemény*: helikopter érkezése és a leszállóhely megközelítése → leszállás és leszállóhelyen tartózkodás → kirepülés. Integrálási idő a (VII.3.16) egyenlet alapján: 120 s.

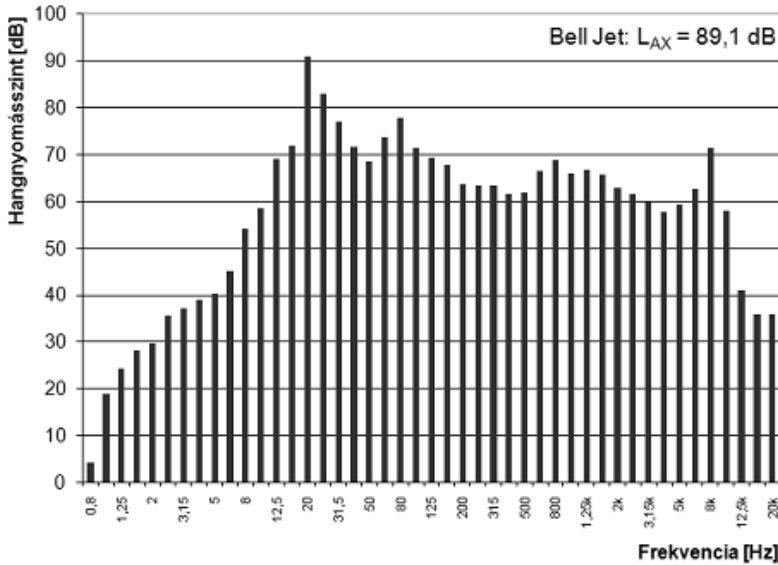
A zavarás megítélésére vonatkozó tapasztalatok alapján, lakóterületen létesített leszállóhelyek környezetében a megkérdezettek 75 %-a nagyon, vagy meglehetősen zavarónak ítélte meg a légi forgalomtól származó zajt. A zavarás mértéke a mért hangnyomásszintek mellett a frekvenciasávokban kimutatható magas, az átlagos hangtérhez képest megnövekedett szintekre volt visszavezethető. Ezért az értékelésnél indokolt a zavarás okaként feltárt egyéb tényezők figyelembe vétele. Leszállóhely mellett mért hangnyomásszintek a VII.3.6-7-8. ábrasorozaton láthatók.



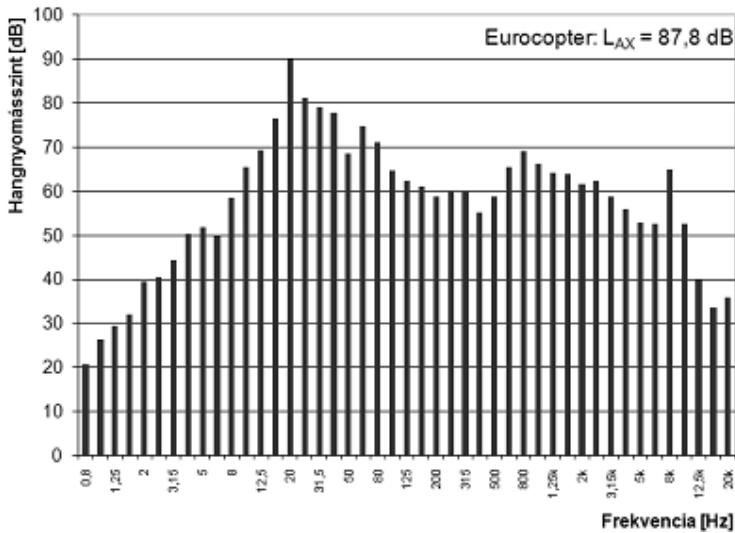
VII.3.6. ábra Gazella típusú helikopter L_{max} és zajesemény-szint értékek

A helikopteres repüléstől származó zaj értékelésében bizonytalansági tényezőt jelent a zajesemény időtartama, azaz a (VII.3.16) összefüggésben szerepeltetett integrálási idő a t_1 belépési időpont és a t_2 kilépési időpont közötti értéke. Nagyon fontos, hogy a szubjektív érzékelés szempontjából a repüléstől származó zaj megjelenése, érkezéskor a környezeti alapzajtól való kiemelkedés, távolodáskor a környezeti alapzajban való eltűnés adja a zajhatást. Helyszíni méréseknél szintén ennek megfelelően járunk el, így körültekintően kell megválasztani a mérés kezdési és

tényleges befejezési időpontját, ami alapvetően befolyásolja a zajesemény-szint értéket. Ebből adódik, hogy az L_{max} értékek mindig nagyobbak, mint az integrálással előállított zajesemény-szintek, azonban az eljárás előnye, hogy a helikopteres repülés sajátosságaival összefüggésben figyelembe veszi repülési zajesemény különböző fázisait.



VII.3.7. ábra Bell Jet típusú helikopter L_{max} és zajesemény-szint értékek



VII.3.8. ábra Eurocopter típusú helikopter L_{max} és zajesemény-szint értékek

Az L_{max} frekvencia hangnyomásszint értékek felhasználhatók a tervezésnél, pl. a helikopterzajjal érintett épülethomlokzat akusztikai méretezésénél, a belső terekre

előírt határértékek teljesítése érdekében. A zajesemény-szint értékek ezzel szemben a környezeti zajterhelési határértékkel való összevetés miatt szükségesek azzal együtt, hogy a mérési- és vonatkoztatási idő helyes megválasztásával a repülési eseményekre külön-külön is meghatározhatjuk a hangnyomásszinteket. Erre mutat példát a VII.3.8. táblázat.

A hangnyomásszintek helikopter leszállóhely mellett 10 m-re, helikopter jobb oldalán kijelölt mérési pontba lettek rögzítve. A vizsgálat egy *Bell 206 Jet* típusú helikopter leszállóhelyre való berepülését, a leszállóhelyen történt rövid tartózkodását (utasok ki- és beszállása), majd a helikopter indulását és a kirepülést öleli fel.

<i>Bell 206 Jet berepülés</i> $s_t = 10 \text{ m}$			<i>Bell 206 Jet állóhelyi üzem</i> $s_t = 10 \text{ m}$			<i>Bell 206 Jet kirepülés</i> $s_t = 10 \text{ m}$		
L_{Amax}	L_{Amin}	L_{AX}	L_{Amax}	L_{Amin}	L_{AX}	L_{Amax}	L_{Amin}	L_{AX}
105,2 dB	69,0 dB	100,5 dB	98,0 dB	64,6 dB	92,3 dB	108,7 dB	71,8 dB	101,8 dB

VII.3.8. táblázat Zajszintek *Bell 206 Jet* típusú helikopter repülése során

VII.4. HELIKOPTERZAJ KEZELÉSE

Mint ahogy az eddigiekben bemutattuk, a helikopterzaj szabályozásán azt értjük, hogy zajszint követelményeket állapítunk meg a zajforrásra, vagyis magára a helikopterre, valamint a repülési tevékenységgel összefüggésben a zajforrás környezetében elhelyezkedő zaj ellen védendő területekre és objektumokra. A követelményrendszer részeként tehát kettő lehetőség nyílik a **helikopterzaj kezelésére**:

1. egyrészt a zajforrás vonatkozásában előírásra kerülnek azok a *referencia hangnyomásszintek*, amelyek az adott típusú helikopter használata közben, meghatározott referencia távolságban fellelhetnek;
2. másrészt előírásra kerültek a zaj ellen védendő területek és épületek vonatkozásában a zajterhelési határértékek.

A szabályozás része még a követelményértékek teljesülésének ellenőrzése, az előírt és a tényleges zajszintek eltérése esetén a **szükséges és lehetséges zajcsökkentési feladatok** meghatározása. Kiemelt figyelemmel kell lenni zajcsökkentés esetén a **szükséges** és a **lehetséges** jelzőkre, ugyanis a műszaki megvalósíthatóság nélkülözése veszélyezteti a zajcsökkentés eredményességét, a túlzott zajcsökkentési igény viszont a költségtényező miatt aránytalan terhet jelent az üzemeltető számára, ami a repülés teljes leállításához, vagyis a tevékenység ellehetetlenítéséhez vezethet.

A zajcsökkentést minden esetben a forrásnál kell kezdeni, tehát keresni kell azokat a lehetőségeket, amelyek a zaj keletkezési helyén jöhetnek számításba. Ezt a szemléletet hivatott szolgálni a helikopterekre előírt követelményrendszer a referencia zajminősítési eljárashoz kapcsolódó zajbizonyítvány kiállításával.

Tapasztalatok szerint az utóbbi évtizedek kimutatható eredményt hoztak a csendesebb üzemű helikopterek terén. A zajminősítési kritériumnak elsősorban az új

légi járművek felelnek meg, a várt hatás azonban csak akkor lesz kimutatható mértékű, amennyiben a használatban lévő helikopterek jelentős része teljesíti a követelményeket.

Helikopterzaj kezelésének lehetőségeit nem csak az új helikopterekre vonatkozó követelmények és azok szigorításával kapcsolatban szükséges megközelíteni. Ugyanis nem szabad megfeledkezni a használatban lévő helikopterek esetében az életkortól és üzemállapottól függő zajszint-növekedésről. Az egyes rész-zajforrások (pl. hajtómű, erőátvitel) által lesugárzott zaj a karbantartás és a javítások függvényében változik, ezek elmulasztása, esetleges hanyag elvégzése zajszint-növekedést eredményez. Ez a tény egyik ösztönzője a szabályozási rendszer részeként az üzemben lévő helikopterek rendszeres és körültekintő ellenőrzésének, ami ki kell, hogy terjedjen a helikopter részegységeinek zajosságára is. Az üzemeltetési folyamat során az eltérő korú és üzemidővel rendelkező helikopterek zajszint romlással összefüggő vizsgálata más és más lehet, amire külön fel kell készíteni mind a repülő állományt, mind a javítással foglalkozó személyzetet [VII.2].

Az egyes helikopterektől származó, környezetben okozott zajterhelés a forgalmi jellemzők módosításával is befolyásolható. A gyakorlatban a leszállóhelyeket egy, esetleg kettő vagy három helikopter veszi igénybe, tehát a zajforrás műszaki jellemzői és zajszintjei jól meghatározhatóak. Ennek figyelembe vételével a repülési módok, a be- és kirepülési irányok, a repülési magasság vagy az adott területen eltöltött idő ismert helikopterre vonatkoztatható, ami csökkenti a forgalom-szabályozásban rejlő bizonytalanságot.

A légi közlekedés forgalom-szabályozásával kapcsolatban említést érdemel, hogy ezek az intézkedések nem hajthatók végre elszigetelten, ugyanis az egyik területen elért zajcsökkenés más területen kisebb-nagyobb zajszint növekedést okoz, ami további zajproblémát generál. Helytelenül, ám napjainkban a környezetvédelmi intézkedések során elterjedten alkalmazott megoldás olyan területek célzott zajvédelmi szempontú igénybevétele, ahol teljesülnek a határértékek, és ezzel együtt a zajterhelés vagy a háttérterhelés értéke a határértéknél alacsonyabb. Gyakran tapasztalható ilyen helyzetben, hogy a zajjal még terhelhető területek fölé kerülnek át a megközelítési és kirepülési útvonalak, vagy kedvező jellemzőkkel bíró területre kerül a helikopter leszállóhely. Az eljárás azért nem helyes, mert a *határértékek* úgynevezett *kitöltése* hozzájárul a még csendes területek elzajosodásához.

A jelenleg érvényben lévő határérték rendszer szerint a környezetben okozott zajterhelést a védendő területre előírt zajterhelési határértékekkel hasonlítjuk össze, és ennek eredményét használjuk fel a minősítéshez. Előfordulhat ugyanakkor, hogy a helikopterzajjal érintett terület zajhelyzete az ott érvényesülő magas, vagy határérték feletti háttérterhelés miatt nem változik meg kimutatható mértékben a repülés következtében, illetve emiatt a zajmérés is nehézkes. Más esetben a $T_M = 16$ óra megítélési időt figyelembe véve teljesülnek a zajterhelési határértékek, azonban ezzel együtt a zajesemény-szint értéke meghaladja az érintett lakosság által még tolerált szintet. Az ilyen helyzet a gyakorlatban a jelenlegi határérték rendszer alapján csak nehezen kezelhető, ezért célszerűnek látszik a helikopterzaj kezeléséhez további jellemzők alkalmazása, és egyedi követelmények bevezetése.

Leszállóhelyek üzemeltetésekor elsődlegesen azzal a ténnyel kell számolni,

hogy a fellépő zajterhelést a helikopterek adottságai mellett a repülési művelet jellemzői befolyásolják, tehát a követelmények szempontjából is célszerűnek látszik a repülési fázisok elkülönült vizsgálata. Ezt a tényt azért kell külön hangsúlyozni, mert minden esetben, így zajmérésnél és a helikopterzaj minősítésénél, vagy zajcsökkentett repülési eljárás előírásánál figyelemmel kell lenni a helikopter repülési üzemmódjaira, így pl. a IV.5. fejezetben bemutatott légpárna-hatásra és a helikopter forgószárny örvénygyűrű üzemmódjával kapcsolatban leírt összefüggésre.

Helikopterzaj kezelésére irányuló tevékenységnél könnyebb dolgunk van, ha a környezet alapállapotára jellemző hangnyomásszintekhez viszonyítva történik az értékelés, így kellő hangsúlyt kap az a körülmény, amikor a helikopterzaj értékek kisebbek a környezeti háttérterhelés értékeknél, azaz a szubjektív érzékelésnél és a mérésnél a hangelfedés hatása érvényesül. Ez a gyakorlatban kettő feltételhez kötött:

1. A helikopter vagy a repülési útvonal között olyan nagy a távolság, ami jelentős hangnyomásszint-csökkenést okoz, emiatt a terhelési pontban fellépő zajszint értékek kellőképpen alacsonyak lesznek, és a megkívánt határértéket nem lépik túl;
2. A zajforrás vagy az észlelési pont környezetére magas háttérterhelés a jellemző, így hangelfedés alakul ki és nem mutatható ki elkülönülten a helikopterzaj.

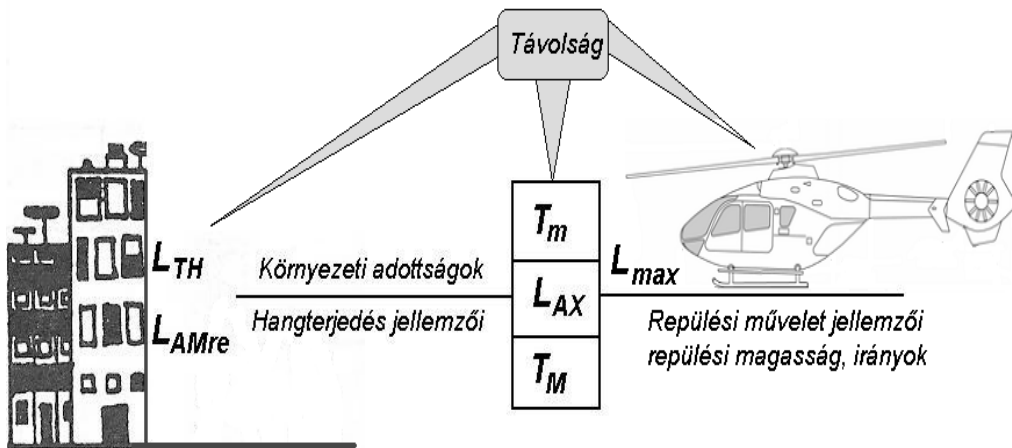
Határértékek szempontjából a helikopterzaj és a háttérterhelés viszonya érdemel bővebb elemzést amiatt, hogy mindaddig, amíg nem beszélhetünk kimutatható zajterhelésről, a határértékekkel való összevetés is értelmét veszti. Tehát figyelembe kell venni, hogy előfordulhat olyan eset is, amikor a helikopteres repüléstől származó zaj nem okoz akkora változást a hangtér állapotában, amit zavarónak ítélnénk a megfigyelés szempontjából, illetve nem lehet érzékelni a bekövetkező változást.

Ebben az esetben az a megfelelő eljárás, ha eltekintünk a jogszabályban előírt határértékektől, és a szabályozási intézkedéseket csak annyiban terjesztjük ki, hogy a repüléssel érintett terület zajhelyzete ne változzon meg jelentős vagy kimutatható mértékben. Ilyenkor elegendő, ha követelményként a háttérterhelésre gyakorolt hatás mértékét írjuk elő, pl. a változás nem haladja meg a 3 dB-es értéket.

Más a helyzet, amikor a repülési zaj szubjektív módon jól érzékelhető, illetve méréssel is kimutatható mértékű. Ilyenkor a szabályozás alapja a határérték kell, hogy legyen, azonban az alkalmazott eszközt körültekintően kell megválasztani.

Helikopterzaj kezelésében a probléma akkor jelentkezik, amikor a $T_M = 16$ óra vagy $T_M = 8$ óra megítélési időre vonatkoztatott zajszint érték az előírt határérték alatt marad ugyan, de a *zajesemény-szint* vagy az L_{max} érték a határértéket, és emiatt az érzékelő szempontjából még tolerálható szintet meghaladja, esetleg a helikopteres repülés kellemetlen zajhatással jár. Mivel a zajesemény-szintekre környezetvédelmi vonatkozásban nincs határérték előírva, a konfliktushelyzet elkerülése és kezelése érdekében javasolt **egyedi követelmények** felállítása a repüléssel szemben.

Az alapkérdés tehát a továbbiakban az, hogy a zajesemény-szintekre milyen előírást tehetünk? Egy sok vitát kiváltó kérdést kell megválaszolnunk, amihez a VII.4.1. ábra nyújt segítséget.



VII.4.1. ábra Zajesemény értékelésének összetevői

Helikopterzaj észleléséhez kötött minősítési eljárásnál elsődleges szempontként szerepel, hogy a hangnyomás értékek mellett a zajeseménnyel összefüggő hatásidő figyelembe vétele. E tekintetben lényeges szempont, hogy a helikopterek repülésénél nem beszélhetünk folyamatos zajról, a gyakorlatban egy-két különleges esettől eltekintve huzamos idő telik el két művelet között, csak ritkán számolhatunk rövid követési időkkal végzett be- és kirepülésekre. Mindemellett tekintettel kell lenni a helikopter lehetséges felszállási módjaira is, amelyek a repülési zajra is hatással lesznek, befolyásolásuk a repülés biztonságára tekintettel zajcsökkentési szándékkal csak erős korlátozással megengedett.

A helikopter felszállási módok megismerése és alkalmazása tehát a zajvédelem oldaláról is szükségszerű, áttekintését az V.4. fejezetben leírtak segítik.

Egyedi követelmények alkalmasak lehetnek arra is, hogy természetvédelmi területek (élőhelyek, természeti értékkel rendelkező területek) zavarását is objektív mérőszámokkal támogassuk, ami összefüggést ad a szubjektív érzékelés és a tényleges zavarási állapot között.

VII.5. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [VII.1] Tarnóczy Tamás: Akusztika. Hangnyomás, hangosság, zajosság, Akadémia Kiadó, Budapest, 1984.
- [VII.2] Dr. Buna Béla: A közlekedési zaj csökkentése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [VII.3] Bera József: Repülőter-használat és zajterhelés összefüggései a repülőképzésben, Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 2010., www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2010_cikkek/Bera_Jozsef.pdf



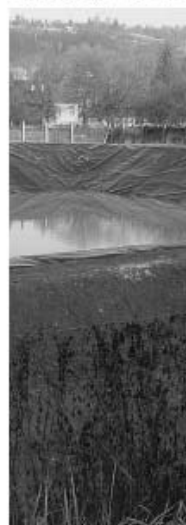
A tervezéstől a megvalósulásig

A LAWAND Mérnöki Iroda Kft. a környezetvédelem, a hulladékgazdálkodás, a mélyépítés, valamint a felszíni- és felszín alatti vízépités terén végez teljes körű szakértői, szaktanácsadói és tervezői tevékenységet.

Ezen tevékenységi körökhöz kapcsolódóan a Mérnöki Iroda vállalja a kivitelezési munkák tervezői művezetését, bonyolítását, felelős műszaki vezetését és műszaki ellenőrzését is.



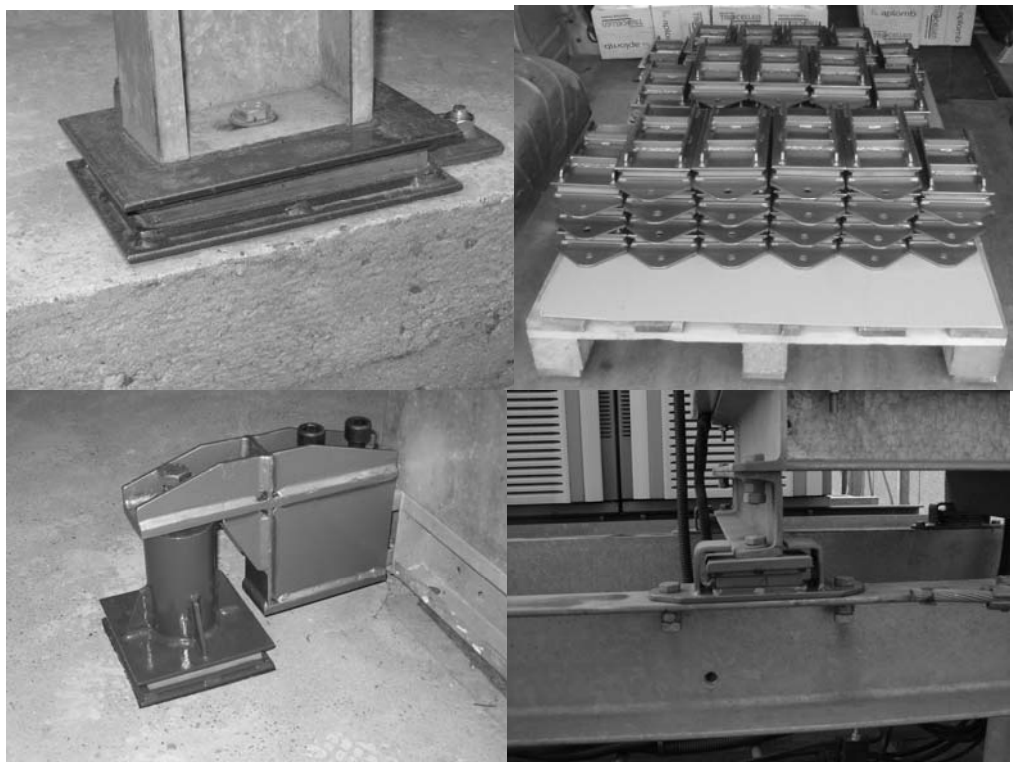
- Környezeti károk kezelése, kámentesítése
- Hulladéklerakó telepek komplett tervezése
- Illegális hulladéklerakók felszámolása, rekultiváció
- Komposztáló telepek tervezése
- Víz létesítmények tervezése
- Környezetvédelmi felülvizsgálatok, hatástanulmány készítése
- Gazdasági beruházások döntéshozzájáruló tanulmányok készítése
- Felszíni és felszínalatti földmunkák
- Környezetvédelmi résfalak tervezése, kivitelezése
- Mélyszivárgók, drének tervezése, kivitelezése
- Műszaki ellenőri tevékenység



www.lawand.hu



**Hűtőberendezések, hőszivattyúk és
rezgésgerjesztő épületgépészeti berendezések
rezgésszigetelése és rezgéscsökkentése igény
szerint FRC típ. rezgéscsillapító rugókkal.**



MÉRÉS, SZAKÉRTÉS, TERVEZÉS ÉS KIVITELEZÉS

KG-FILTER® Kft.
KÖRNYEZETVÉDELMI MÉRNÖKIRODA

1027 Budapest, Margit krt. 64/B., Tel: (+36 1) 356 1649, 214 6882,
Fax: 224 0068, E-mail: kg-filter@kg-filter.hu, Web: www.kg-filter.hu

HELIKOPTERZAJ VIZSGÁLATA

VIII.1. BEVEZETÉS

Helikopterzaj szabályozásánál nélkülözhetetlen azon jellemzők ismerete, amelyek a zajforrás bemutatására, illetve a környezeti zajterhelés leírására szolgálnak. Működő zajforrás környezetében a zajjellemzőket *hangnyomásszint méréssel* határozhatjuk meg, a műszeres vizsgálat tényleges helyzetre vonatkozó pontos eredményt ad.

Amennyiben a zajterhelés előzetes becslése a feladat pl. tervezés időszakában, a helikopterzaj mérésére nincs lehetőség. Ebben az esetben *számítással* lehet pótolni a hiányzó hangnyomásszint adatokat, amit a zajforrás jellemzőinek és a környezet akusztikai adottságainak figyelembe vételével tehetünk meg a célnak megfelelő összefüggések felhasználásával.

A továbbiakban azokat a *mérési és számítási eljárásokat* mutatjuk be, amelyek a helikopterzaj vizsgálatához állnak rendelkezésünkre.

VIII.2. HELIKOPTERZAJ MÉRÉSE

Zajmérésnél tulajdonképpen két zajszint értéket rögzítünk, egyrészt a vizsgált forrás által létesített hangnyomásszinteket, másrészt a környezetre jellemző alapzaj és/vagy háttérterhelés értékeit. Ennek oka, hogy a térben a különböző forrásoktól és az eltérő helyekről származó hangnyomásszint értékek összeadódnak, vagyis szuperponálódnak. Természetesen a méréseknél törekedni kell arra, hogy mérésnél az egyéb zajok zavaró hatása minél kisebb legyen.

A zajesemény-szint mérésénél tehát törekedni kell az egyéb környezeti zajok miatt fellépő zavarás kizárására, hiszen a repülési zaj időegységre vonatkoztatott átlagértéke mellett a frekvencia szerinti hangnyomásszinteket is pontosan kell rögzíteni. Ennek hiányában a zavaró hatás értékeléséhez nem áll rendelkezésre megfelelő adat, de a (VII.3.13) összefüggésben szereplő *időtartam korrekciós tényező* meghatározásához is szükséges a zajszint-frekvencia összefüggés feltárása.

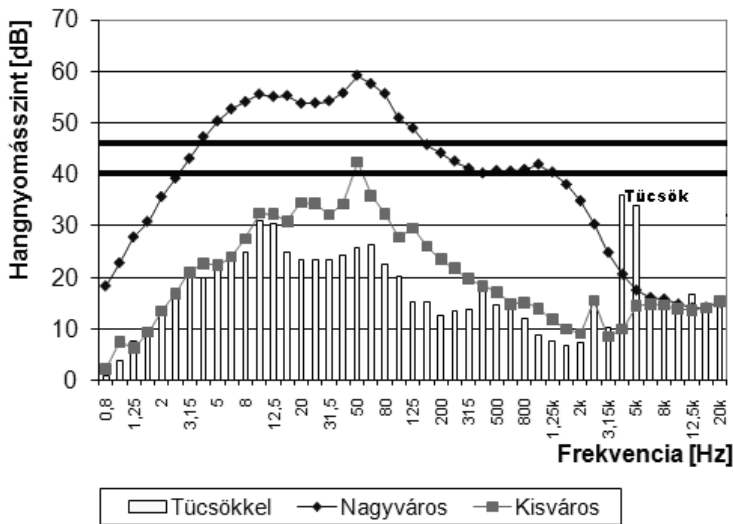
Ebben a vonatkozásban különbséget kell tenni a *környezeti alapzaj* és a *környezeti háttérterhelés* között.

KÖRNYEZETI ALAPZAJ olyan, a mérést zavaró zaj, amelyet a mérés helyén, a mérési idő alatt nem a vizsgált zajforrás okoz, és zavaró hatása mérés technikailag nem kiküszöbölhető. *Környezeti alapzaj* kategóriába tartoznak a vizsgált területen észlelhető azon hangnyomás-szintek, amelyek az I.3. fejezetben is tárgyalt zajforrások nélkül lehatárolt térrészben mutathatók ki akár szubjektív érzékeléssel, akár műszeres méréssel. Ide soroljuk pl. a természet hangjait, a távoli területekről származó települési hangokat. Alapzaj értékekre mutat példát a VIII.2.1. ábra.

A *környezeti alapzaj* értékelésénél elsődleges szabály, hogy a mérést zavaró zaj szintje legalább 10 dB-lel legyen kisebb a vizsgált zaj szintjénél. A helikopterek zajminősítéséhez előírt méréseknél a hangnyomás csúcsértékhez képest legalább 15

dB-lel legyen kisebb az alapzaj érték.

Emellett célszerű kitérni a *környezeti alapzaj* frekvencia jellege szerinti értékelésre is, mivel a legtöbb esetben olyan hangnyomásszint összetevők is jelen vannak a teljes spektrumban, amelyek az egyenértékű szint jelentős változását okozzák, forrásuk pedig valamilyen természetes jelenség. Ez látható a VIII.2.1. ábrán, ahol egy tücsök hangja okoz kiemelkedő hangnyomásszinteket egy szűk frekvencia sávban.



VIII.2.1. ábra Alapzaj értékek eltérő beépítettség esetén

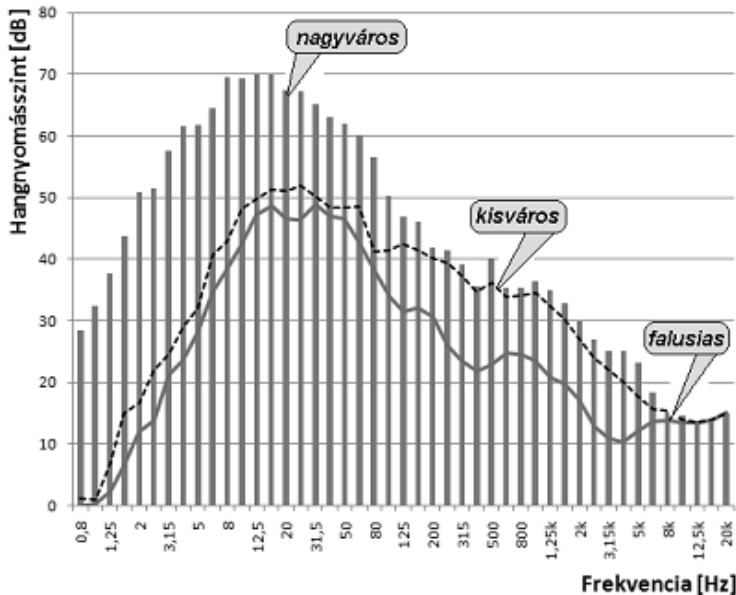
HÁTTÉRTERHELÉS a környezeti zajforrás terhelési területén, a forrás működése nélkül, de a terhelési követelmény tekintetében vele azonos megítélés alá tartozó forrásoktól származó zajterhelés.

Környezeti háttérterhelés alatt azt értjük, amikor a vizsgált területen több közlekedési zajforrás — könyvünk témája miatt értelemszerűen most nem térünk ki az üzemi zajra, de a háttérterhelés üzemi zajoknál is értelmezhető — hatása is észlelhető. Értelmezése bizonyos esetekben ellentmondásos lehet, hiszen egy-egy zajforrás elkülönült vizsgálatánál nem célszerű mindig az együttes zajterhelést meghatározni és figyelembe venni, mivel ez megnehezíti a minősítést és a zajcsökkentési tevékenység végrehajtását. Ugyanakkor *azonosítható zajforrásoknál* megvan a lehetőség az adott közlekedési létesítménytől származó zajterhelés mérésére és arra, hogy forrásonként elvégezzük a környezetben okozott zaj előírt határérték szerinti értékelését, ezért ilyenkor a különböző zajforrásokra vonatkozóan a tényleges zajterhelés adatokat célszerű figyelembe venni.

Ennek a későbbiekben (lásd a VIII.4 és VIII.5 fejezetek) az értékelésben és a zajcsökkentésben tulajdonítunk szerepet, tehát azonosítható zajforrásoktól (pl. közút és légi közlekedés) származó zajok összemérésének a hatásterület lehatárolásán túl az előírt követelmények szempontjából nincs értelme.

A vizsgálattal érintett területen fellépő, csak a szubjektív módon érzékelt

átlagos zajoknál vesszük figyelembe a *hátterterhelést*, ami elsősorban a laikus megfigyelő szempontjából, valamint a területhasználatok szabályozásánál hozott döntéseknél bír jelentőséggel. A *hátterterhelést* ezért a továbbiakban csak a környezeti zajhelyzet bemutatása, és a repülési zaj észlelhetősége szempontjából vesszük figyelembe. Hátterterhelés értékekre mutat példát a VII.2.2. ábra.



VIII.2.2. ábra Hátterterhelés értékek eltérő beépítettség esetén

Mind a *környezeti alapzaj*nál, mind a *környezeti hátterterhelés*nél meghatározó azoknak a vizsgált zajforrástól, pl. egy helikopteres átrepüléstől származó zajtól való különbsége, azaz másik oldalról megközelítve, a vizsgált zajszintek kiemelkedése a környezetre jellemző hangnyomásszintekből.

Szubjektív megfigyelő számára a forrásoktól származó zaj hangnyomásszintje ugyanis csak akkor különböztethető meg jól elkülönülten a környezet átlagos hangnyomásszintjétől, ha ez az eltérés legalább 3 dB. Ezt az értékelési módszert támasztja alá az is, hogy 3 dB-es különbség alatt olyan hangelfedési jelenséggel számolhatunk, amelynek következtében a szubjektív érzékelés szempontjából a zajterhelésnek nincs jelentősége.

A környezet adottságait tekintve — helikopteres repülés vonatkozásában — a hátterterhelés lesz a meghatározó. Ezt szemléletesen úgy tudjuk jellemezni, hogy adott területen, a szubjektív módon észlelt zajszintekből milyen mértékben emelkedik ki a repülési zaj, vagyis az alapállapotú zajhelyzetet mennyiben változtatta meg a repüléstől származó, időegység alatt fellépő zajterhelés. Ez elsődlegesen a vizsgált terület beépítettségétől, ezzel összefüggésben a jellemző hátterterheléstől függ. Fontos megjegyezni, hogy sok esetben a zajforrások hiánya miatt nem is beszélhetünk hátterterhelésről, amire az alacsony átlagértékekből következtethetünk.

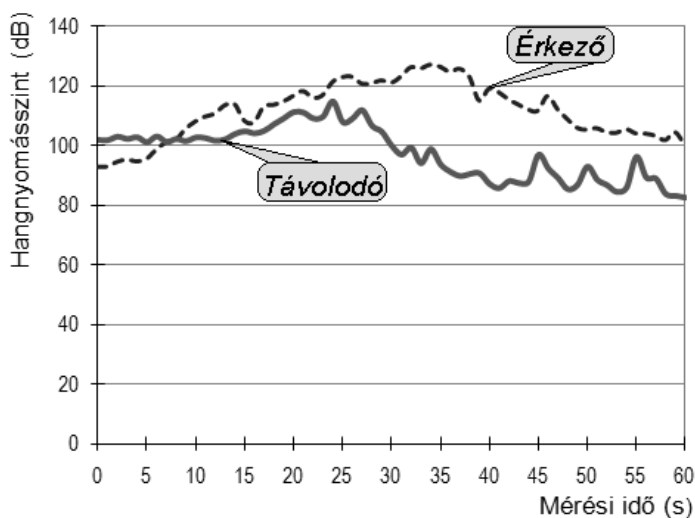
Milyen következtetéseket vonhatunk le a VIII.2.1. és VIII.2.2. ábrák alapján:

1. Zajvizsgálatnál mindig ki kell térni a repülésmentes időszakokban fellépő zajszenk mézésére is az alapzaj és/vagy a háttérterhelés frekvencia szerinti értékelésével, hogy kellő adat álljon rendelkezésre a környezet minősítéséhez, vagy a területen még fellelhető zajforrások azonosításához;
2. Háttérterhelés esetenként zavaró tényezőt jelent a zajmérések elvégzésénél, ami a zajmérés körülményeire nézve módosító tényezőt alkalmazását igényli.

VIII.2.1. AHOGY A ZAJMÉRÉS KEZDŐDIK

Zajmérésnél a hangnyomásszintek műszeres mérését végezzük el annak érdekében, hogy a helikopter és a repülési művelet által létesített hangtér jellemzőit, elsősorban a kialakuló hangnyomásszinteket pontosan meg lehessen határozni. Nem szabad feledni azonban azt a tényt, hogy érzékelés szempontjából érzékeny „műszer” az emberi fül, ezért minden esetben törekedni kell a hallott és szubjektív módon észlelt hanghatások, valamint a műszeres mérés adatai közötti kapcsolat megértésére.

Repülési zaj értékelését és a zavaró hatás mérlegelését segíti a zajeseményektől származó zaj t_1 és t_2 időpontok (lásd (II.4.31) egyenlet) által lehatárolt átrepülési időre vonatkozó, méréssel megállapított értékeinek szubjektív oldalról való áttekintése. Ugyanis mérésnél a t_1 és t_2 időpontok, azaz a mérés kezdeti és befejezési időpontjának megválasztása nem mindig egyszerű feladat, a helikopter érkezésénél a környezeti alapzajtól való kiemelkedés, távolodásakor a környezeti alapzajban való eltűnés adja a zajhatást, amit elsődlegesen szubjektív módon kell pontosítanunk. Erre mutat példát a VIII.2.3. ábra, ami földön kijelölt mérési pont feletti átrepülés esetében egy érkező és távolodó Mi-8 típusú helikopter átrepülése során, közvetlenül az átrepülési útvonal alatt műszeres méréssel meghatározott zajterhelés adataiból megrajzolt zajszenk-idő függvényt szemlélteti.



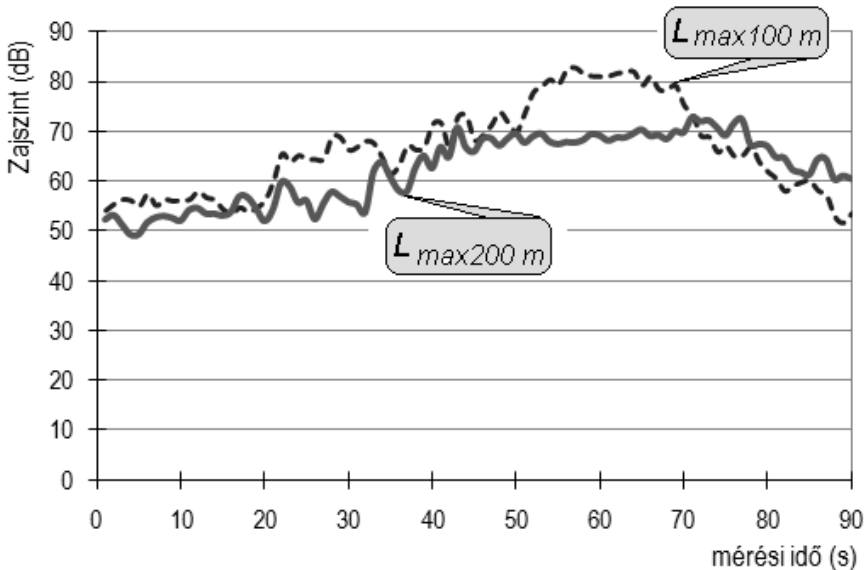
VIII.2.3. ábra Hangnyomásszintek Mi-8 típusú helikopter átrepülésénél

Megfigyelhető, hogy a helikopter érkezése, majd a távolodás időszakában a hangnyomásszint-idő függvény eltér egymástól. A helikopter által kifejtett hajtóműteljesítmény, a járműszerkezet és a forgószárnyak által lesugárzott zaj, valamint a környezeti jellemzők miatt a hangtér jellegében eltérés tapasztalható.

Azonos időszakra vonatkozó zajszint adatokban további szembetűnő különbség, hogy a legnagyobb L_{max} értékek nem közvetlenül akkor észlelhetők, amikor a zajforrás és a vizsgálati pont közötti távolság a legkisebb. A különbség elsődleges oka az, hogy a forgószárny lapátok és a farok légcsavar lapátok eltérő zajkeltése a hangtér deformációját okozza.

A repülésnél kialakuló hangtér másik jellemzője, hogy a távolodó helikopter esetében több, a vizsgált időben jelentkező kiemelkedő csúcshang is megfigyelhető, ami a szubjektív értelemben is észlelt zajhatás növekedéséhez vezet. Több megismételt mérésorozatot vezettek arra a megállapításra, hogy az észlelési pont és a térben mozgó zajforrás közötti távolság növekedésével a kigyorsítás sebességétől függetlenül észlelhetők az újra és újra kiemelkedő hangnyomásszintek.

Ehhez hasonló jelenség figyelhető meg a repülési magasság növelésekor. Talajszinten és az előzőekkel megegyező körülmények mellett kijelölt vizsgálati pont felett, de már eltérő magasságban átrepülő helikoptertől származó zajterhelés értékeit szemlélteti a VIII.2.4. ábra. Jól megfigyelhető, hogy a 100 m-en és a 200 m-en megválasztott repülési magasság esetében a kimutatott zajszintek jellegükben nem különböznek egymástól. Ezzel együtt a maximális értékek között csak rövidebb időszakokban van különbség.



VIII.2.4. ábra Átrepülési zajszintek eltérő repülési magasságnál

Az idő függvényében rögzített maximális A-hangnyomásszintek (L_{max}) és az időegységre vetített eseményszintek közötti különbséget a VIII.2.1. táblázatban foglaltuk össze.

Átrepülési magasság: h = 100 m		Átrepülési magasság: h = 200 m	
$L_{\max.}$	L_{AX}	$L_{\max.}$	L_{AX}
81,8 dB	73 dB	72,3 dB	63 dB

VIII.2.1. táblázat Zajesemény szintek és $L_{\max.}$ értékek eltérő magasság esetén

Minden zajmérési feladat tehát a repülési tevékenység, a művelet jellemzőinek (le- és felszállások) és a környezet adottságainak áttekintésével kezdődik. Lehetőleg adjunk részletes leírást a vizsgált környezetről és az alkalmazott repülési módozatról, ezzel együtt az elsődlegesen észlelt hangnyomásszintekről és azok megítéléséről.

VIII.2.2. ZAJMÉRÉS ELMÉLETE

A VII.2.1. táblázatban áttekintést adtunk a helikopteres repülésre vonatkozó jogszabályokról és műszaki előírásokról. Repülési zaj műszeres mérésére, a vizsgálati eredmények megállapítására és közlésére vonatkozó követelményeket az alábbi műszaki előírások tartalmazzák:

1. A környezeti zaj vizsgálata és értékelése című **MSZ 18150-1:1998 számú szabvány**. Tárnya az épületek környezetében, helyiségeiben és bármely emberi tartózkodásra való területen észlelhető környezeti zaj általános vizsgálati és értékelési módszereinek előírása;
2. A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj című **MSZ 13-183-3:1992 számú szabvány**. Tárnya az épületek környezetében repülési forgalom miatt fellépő mértékadó A-hangnyomásszintek méréssel történő meghatározásának vizsgálati módszere;
3. A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj heliportok és kisrepülőterek környezetében című **MSZ 13-183-4:1992 számú szabvány**. Tárnya a heliportok és a 3,5 t felszálló tömegnél kisebb repülőgépek fogadására alkalmas repülőterek forgalma által okozott környezeti zajterhelés méréssel történő meghatározása épületek környezetében, illetve emberi tartózkodásra szolgáló területeken.

A gyakorlatban nem elegendőek a hangnyomásszint mérő műszerrel közvetlenül mért adatok, a leolvasott vagy rögzített szintértékekből számítással határozzuk meg azokat az értékeket, amelyeket a vizsgálat végeredményének tekintünk. A következőkben azokat a legfontosabb tudnivalókat ismertetjük, amelyek nélkül nem lehetséges a zajmérés elvégzése, illetve a rendelkezésre álló mérési adatok és vizsgálati eljárás megértése.

A továbbiakban alkalmazott jelölések az **MSZ 18150-1:1998**, az **MSZ 13-183-3:1992** és az **MSZ 13-183-4:1992 műszaki szabványoknak** felelnek meg, a fogalmakat szintén a műszaki szabványok alapján ismertetjük.

ZAJESEMÉNYSZINT egy tényleges helyzetben megvalósuló zajesemény során a mérési ponton mért adatokból a következő kifejezéssel számított zajsztint:

$$L_{AX} = 10 \cdot \lg \frac{1}{\tau_{ref}} \int_{t_1}^{t_2} \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \quad (\text{VIII.2.1})$$

ahol:

- τ_{ref} — 1 s;
- t_1 — zajesemény kezdetének időpontja [s], amikor az átrepülés során mért L_A hangnyomásszint az alapzajból határozottan kiemelkedik;
- t_2 — zajesemény végének időpontja [s], amikor az átrepülés során mért L_A hangnyomásszint az alapzajban elvész.

MÉRTÉKADÓ FORGALOM, M [repülő/d], évi legnagyobb forgalmú három hónap forgalmának egy napra eső átlaga. Heliportok és kisrepülőterek (felszálló tömeg $< 3,5$ t) esetében az átlagszámításban csak a repülési napokkal kell számolni.

MÉRTÉKADÓ A-HANGNYOMÁSSZINT a mért egyenértékű A-hangnyomásszint olyan korrigált értéke, amely:

- csak a repülésből származó zajokat tartalmazza, az alapzaj hatását korrekciókkal kiküszöbölték;
- a tényleges forgalomnál nyert mérési eredményekből a mértékadó forgalomra számítással határozzák meg.

MEGÍTÉLÉSI IDŐ az az időtartam, amelyre a repülésből származó mértékadó A-hangnyomásszint vonatkozik. Jele: T_M , értéke nappal (6 – 22 h óra között) 57 600 s, éjjel (22 – 6 h között) 28 800 s.

MÉRÉSI IDŐ elvileg napszakonként a megítélési idővel azonos időtartam, a gyakorlatban a repülések számától és a mérési pont helyzetétől függően rövidebb mérési időt is lehet választani. A t_m **mérési idő** minden mérési ponton akkora legyen, hogy a vizsgált napszakra nézve teljesüljön a következő egyenlőtlenség:

$$|L'_{AX,R}(t) - L'_{AX,R}(T_M)| \leq 3 \text{ dB} \quad (\text{VIII.2.2})$$

Az egyenlőtlenség baloldalának első tagja a mérési időre, a második tagja a teljes vizsgálati napszakhoz tartozó megítélési időre vonatkoztatott átlagos repülési zajeseményszint. Abban az esetben, ha a zajeseményszinteket csoportonként átlagoltuk, akkor a (VIII.2.2) összefüggésnek minden csoportátlagra külön-külön teljesülni kell.

REPÜLÉSI REND a repülőtéren, a heliporton vagy a leszállóhelyen jóváhagyott repülési műveletek összessége. Figyelembe vesszük: repülési irányok, útvonalak, repülési módozatok, magasság, stb. A zajmérések elvégezhetőek a tényleges forgalmi viszonyok között vagy a zajmérések céljából végzett repülési műveletek alatt. Mindkét esetben ügyelni kell arra, hogy a mértékadó forgalomnak megfelelően az összes mértékadó járműtípus minden előforduló zajos földi és repülési műveletére kellő számú zajmérés történjen.

MÉRŐBERENDEZÉS, a vizsgált zajesemény közvetlen meghatározására, vagy az

egyenértékű A-hangnyomásszint és a hozzá tartozó integrálási idő egyidejű mérésére alkalmas műszer vagy mérőrendszer, amelyik A-szűrőt is tartalmaz. A mért zaj keskenysávú jellege miatt tercszűrőkkel mért zajeseményszintek vagy egyenértékű terc-hangnyomásszintek rögzítésére alkalmas műszer használata szükséges.

METEOROLÓGIAI VISZONYOK hatásánál elsődleges a szélesebbesség. Zajmérésnél a szélesebbesség terepszint felett 3 m-es magasságban 5 m/s-nál kisebb legyen. Az időjárás mérést zavaró hatásai ellen a mikrofont szélvédő szivacs védi.

ZAJVIZSGÁLAT során méréssel meg kell határozni megfelelő számú helikopter repülési műveletének, fel- és leszállás, állóhelyi üzem zajeseményszintjét és terc-hangnyomásszintjeit. Minden zajeseményszint értékhez meg kell mérni az alapzaj értékeit is. Az alapzaj és a keskenysávú jelleg miatt korrigált zajeseményszintek, a mértékadó forgalom és a megítélési idő felhasználásával kell kiszámítani a repülésből származó mértékadó A-hangnyomásszintet.

ALAPZAJT a repülési művelet előtt vagy után mérjük ugyanolyan alapzaj-viszonyok mellett, mint amilyenek a repülési művelet közben voltak.

Alapzaj zajeseményszintjét mindig egy tizedes jegy pontossággal kell megadni. Mért értékéből határozzuk meg a **K_1 alapzaj korrekciót** a VIII.2.2. táblázatból.

Különbség, ΔL [dB]	Korrekció, K_1 [dB]
2 és kisebb	Repülési művelet zajeseményszintje az alapzajtól függetlenül nem határozható meg.
3	-3
4-5	-2
6-9	-1
10 és több	0

VIII.2.2. táblázat Alapzaj korrekció értékei

forrás: MSZ 13-183-3:1992

Repülési művelet (VIII.2.1) összefüggés szerint meghatározott $L_{AX,i}$ zajesemény-szintjének mérése kétféleképpen történhet. Egyszerűbb módszer, amikor a művelet $L_{AX,i}$ zajeseményszintjét a műszer közvetlenül meghatározza és kijelzi.

A gyakorlatban elterjedten használt mérőműszerekkel az $L_{Aeq,i}$ egyenértékű A-hangnyomásszintek mérésére van lehetőség. Ekkor a művelet zajeseményszintjét a következő összefüggés alapján határozzuk meg:

$$L_{AX,i} = L_{Aeq,i} + 10 \cdot \lg \frac{\tau_i}{\tau_{ref}} \quad (\text{VIII.2.3})$$

ahol:

$L_{AX,i}$ — számított zajeseményszint [dB];

$L_{Aeq,i}$ — mért egyenértékű A-hangnyomásszint [dB];

τ_i — $L_{Aeq,i}$ mérési ideje [s];

τ_{ref} — 1 s vonatkoztatási (normalizálási) idő.

Zaj keskenysávú jellege miatti K_{ton} **korrekciót** a mért zajeseményszintek tercésávonkénti hangnyomásszint értékei (lásd VII.3.6–7–8. ábraszorozat) alapján határozzuk meg a következő összefüggéssel:

$$K_{ton} = (\Delta L_{terc} - 4) \leq 6 \text{ dB} \quad (\text{VIII.2.4})$$

A K_{ton} **korrekciót** akkor alkalmazzuk, ha a repülési művelethez tartozó zajszint-frekvencia függvényt tekintve kettő vagy több tercésávban a hangnyomásszint legalább 5 dB-lel kiemelkedik a szomszédos terc-hangnyomásszintekből. A ΔL_{terc} a középső, kiemelkedő tercésávban és a szomszédos két tercésávban mért terc-hangnyomásszintek közötti különbségek közül a kisebbik érték, ami a VII.3.6–7–8. ábrákon is látható.

KORRIGÁLT ZAJESEMÉNYSZINT meghatározása minden mért repülési műveletre a következő összefüggés alapján történik:

$$L'_{AX,i} = L_{AX,i} + K_{1,i} + K_{ton,i} \quad (\text{VIII.2.5})$$

ahol:

$L'_{AX,i}$ — repülési művelet korrigált zajeseményszintje [dB];

$L_{AX,i}$ — repülési művelet mért zajeseményszintje [dB];

$K_{1,i}$ — alapzaj korrekció a VIII.2.2. táblázat szerint [dB];

$L_{ton,i}$ — zaj keskenysávú jellege miatti korrekció a (VIII.2.4) egyenlet szerint [dB].

Az átlagos repülési zajeseményszint számítása egy mérési pontra vonatkoztatva történik, az egyes repülési műveletekre VIII.2.5. egyenlet szerint kapott $L'_{AX,i}$ **korrigált zajeseményszintek** átlagát az alábbi összefüggéssel határozzuk meg:

$$L'_{AX} = 10 \cdot \lg \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot L'_{AX,i}} \quad (\text{VIII.2.6})$$

ahol:

$L'_{AX,i}$ — repülési művelet i-edik korrigált zajeseményszintje [dB];

N — vizsgálatnál figyelembe vett zajesemények száma [dB].

VIZSGÁLATI EREDMÉNY a megítélési pontokon kapott repüléstől származó mértékadó A-hangnyomásszint, amit a következők szerint kell meghatározni:

$$L_{AM, re} = 10 \cdot \lg \frac{\tau_{ref}}{T_M} \cdot M \cdot 10^{0,1 \cdot L'_{AX}} \quad (\text{VIII.2.7})$$

ahol:

$L_{AM, re}$ — repülésből származó mértékadó A-hangnyomásszint [dB];

- τ_{ref} — 1 s;
 T_M — megítélési idő [s];
 M — mértékadó repülési műveletek száma;
 L'_{AX} — átlagos repülési zajeseményszint a (VIII.2.6) egyenlet szerint [dB].

Ha a zajesemények átlagolása csoportonként történt, a következő eljárással kell a mértékadó hangnyomásszintet meghatározni:

$$L_{AM, re} = 10 \cdot \lg \frac{\tau_{ref}}{T_M} \sum_j M_j \cdot 10^{0,1 L'_{AX, j}} \quad (\text{VIII.2.8})$$

ahol:

- M_j — mértékadó forgalomból a j-edik csoportba sorolható repülési műveletek száma, $\sum M_j = M$;
 $L'_{AX, j}$ — j-edik csoport átlagos repülési zajeseményszint a (VIII.2.6) szerint [dB].

Zajeseményszintek csoportosítására abban az esetben kerülhet sor, ha a repülési műveletek zajeseményszintjei különböznek egymástól. Csoportosítva átlagolni a következők szerint érdemes:

- leszálló és felszálló helikopterek megkülönböztetése;
- repülési irányok megkülönböztetése;
- egyes helikopter típusok megkülönböztetése.

A repüléstől származó $L_{AM, re}$ mértékadó zajterhelést akkor alkalmas a vizsgált terület közlekedés okozta zajterhelésének minősítésére, ha nagyobb az előírt határértékeknél, vagy domináns meghatározója az eredő zajterhelésnek. A dominancia feltétele, hogy az $L_{AM, re}$ értéke legalább 9 dB-lal haladja meg az egyéb közlekedéstől származó eredő zajterhelést.

VIII.2.3. ZAJMÉRÉS GYAKORLATA

Helikopteres repüléstől származó zajterhelés pontos meghatározása érdekében a VIII.2.2. fejezetben tárgyalt módszert követve helyszíni műszeres zajmérést kell végezni.

A minősítéshez akkor kapunk pontos eredményt, amikor a leszállások és a kirepülések szokásos repülési eljárás szerint történnek, valamint a helikopter és a repülési műveletek adatait — műveletszám, leszállási zajszt, átrepülési zajszt, felszállási zajszt — a védendő területen kijelölt terhelési pontban méréssel határozzuk meg.

Az alábbi példában bemutatásra kerülő vizsgálat során, lakóterületen létesített leszállóhelyre érkező és onnan induló helikoptertől származó hangnyomásszintek mérésére került sor a forráshoz legközelebbi védendő homlokzatok elhelyezkedése szerint, kettő eltérő távolságban. A mérések zaj ellen védendő területen történtek, az észlelési pontok kijelölését a VIII.2.2 táblázat tartalmazza.

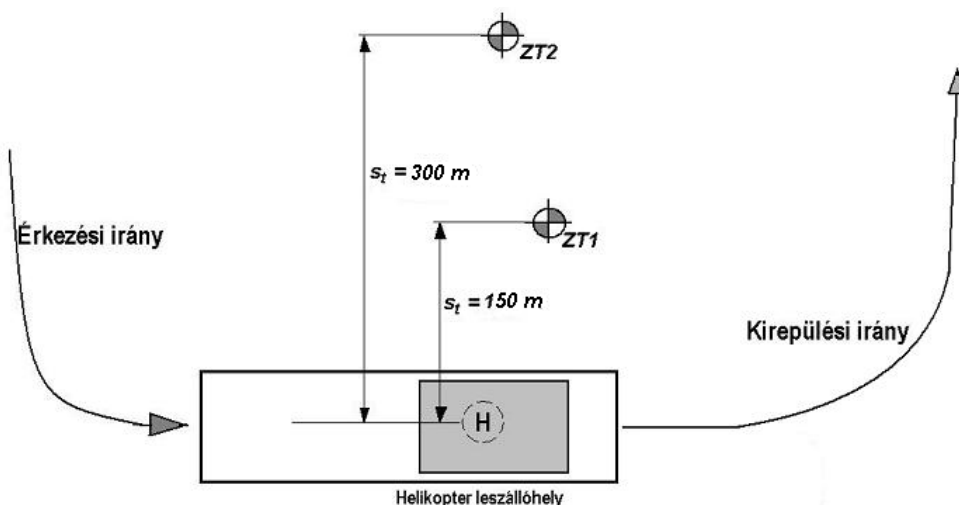
Zajmérési pont jele	Zajmérési pont kijelölése	Zajmérési pont elhelyezkedése	Zajmérési pont magassága
ZT1	repülési útvonaltól $s_t = 150$ m-re	lakóház védendő homlokzata előtt 2 m-re	1,5 m
ZT2	repülési útvonaltól $s_t = 300$ m-re	lakóház védendő homlokzata előtt 2 m-re	1,5 m

VIII.2.3. táblázat: Zajmérési pontok kijelölése

A vizsgált leszállóhely elhelyezkedését, a repülési útvonalat és a terhelési pontok kijelölését a VIII.2.5. ábra szemlélteti.

A leszállóhelyet a zajmérések során *Robinson R44 típusú helikopter* használta. A vizsgált repülési műveletek:

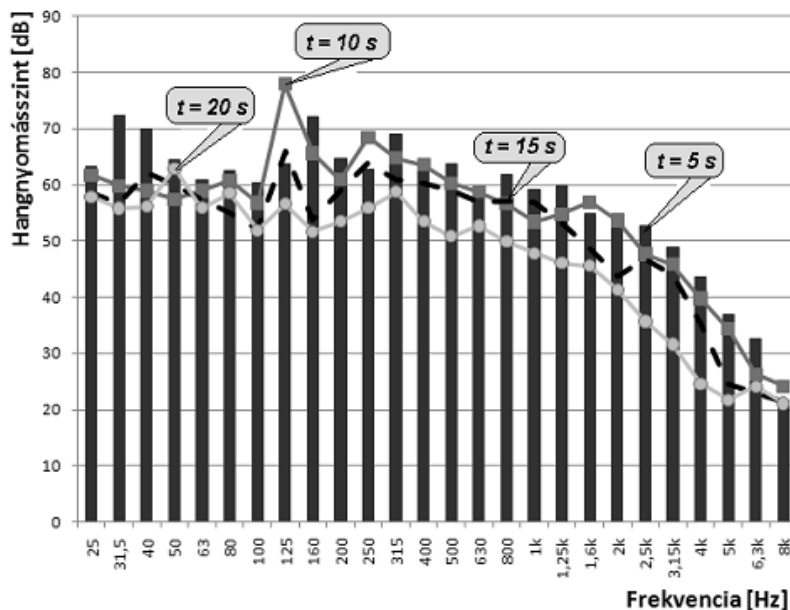
1. álló helyzet alpjáraton, üzemi fordulaton motormelegítés, felemelkedés, kirepülési irányra történő ráfordulás, fokozatos emelkedés közben kirepülés és távolodás;
2. érkezés, berepülés és fokozatos ereszkedés (repülési magasság csökkentése), leszállóhely megközelítése és fokozatos ereszkedés, alpjáraton a hajtómű hűtése.



VIII.2.5. ábra Leszállóhely és a vizsgálati pontok elhelyezkedése

A vizsgálati eredmények értékelését azzal a korábban tett megállapítással kezdjük, hogy a környezetben okozott zaj értékelését és szubjektív megítélését a zajeseményszintek mellett a különböző frekvencia sávokban mért hangnyomásszintek is meghatározzák. Mérések alapján a helikopter felszállásától származó zajszintekre a

frekvencia függvényében $t = 0-20$ s mérési időben, 5 s bontásban a VIII.2.6. ábra mutat példát. A helikoptertől származó hangnyomásszint-frekvencia jelleg jól láthatóan módosult a művelet során, ami a helikopter meghatározó rész-zajforrásaira (pl. farok légcsavar) vezethető vissza (lásd VII.3.2. fejezet).



VIII.2.6. ábra Emelkedés és kirepülés hangnyomásszint-frekvencia függvénye

Jól érzékelhető változás a helikopter elemelkedése után következett be, amikor a hajtómű és a forgószárny működésétől származó zaj mellett a farok légcsavar zaja is domináns módon befolyásolta az észlelt hangnyomásszinteket. Ez a változás a mért értékek mellett füllel, szubjektív érzékeléssel is jól követhető.

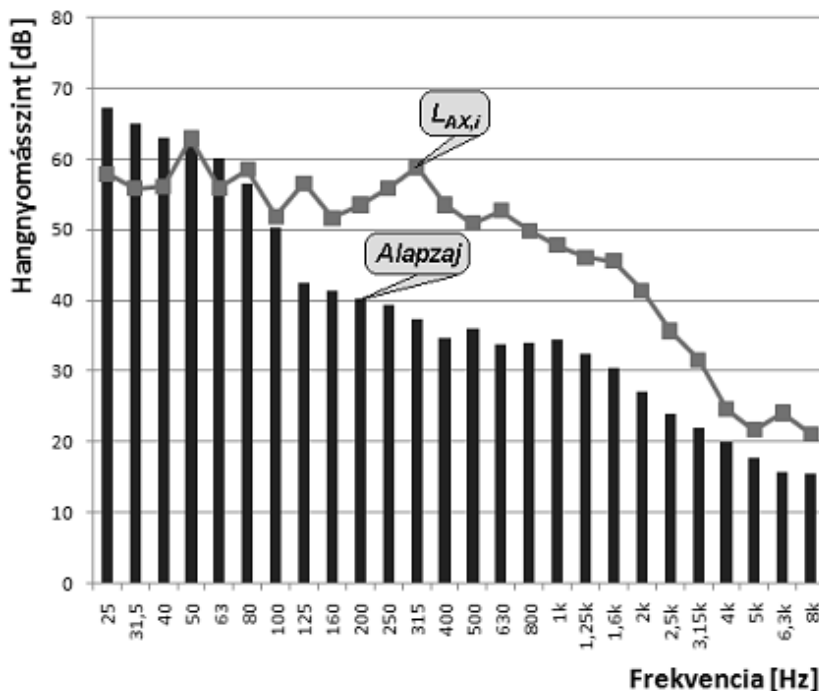
A zaj keskenysávú jellege miatti K_{ton} korrekciót a mért zajeseményszintek tercsávonkénti hangnyomásszint értékét alapján a VIII.2.3. táblázatban adjuk meg.

Figyelembe vett tercsávonkénti hangnyomásszint értékek			ΔL_{terc} (kisebb érték)	K_{ton}
125 Hz	160 Hz	200 Hz		
63,8 dB	72,1 Hz	64,8 Hz	7,3 dB	3,3 dB

VIII.2.4. táblázat: Tonális korrekció meghatározása

A K_1 alapszaj korrekció szükségességét és értékét a repülési művelet zajeseményszintje és az alapszaj zajeseményszint értéke alapján határoztuk meg vizsgáltuk a VIII.2.2. táblázat figyelembe vételével. Az érzékelt hangnyomásszintek és az adódó különbségeket a frekvencia függvényében a VIII.2.7. ábra szemlélteti. Az alapszaj korrekció értékének meghatározása egy művelet esetében a VIII.2.5. táblázatban

szerepel.



VIII.2.7. ábra Alapzaj és repülési művelet zajeseményszintje

L_{AX}	L_{AXa}	ΔL	K_1
70,5 dB	44,1 dB	26,4 dB	0 dB

VIII.2.5. táblázat Alapzaj korrekció meghatározása

Az $L_{AX,i}$ zajeseményszinteket ZT1 és ZT2 mérési pontokban a VIII.2.6. –7. táblázatok szemléltetik mérési pontonként, ahol a felszállás és leszállás műveletekre vonatkozó, több mérési eredményéből vett átlagos zajeseményszintek szerepelnek. Az eredő meghatározásánál a művelet időtartamát vesszük figyelembe, az összegzésnél a (II.4.15) összefüggés szerint járunk el.

Repülési művelet	Zajeseményszint	Átlagos zajeseményszint
Felszállás 1	$L_{AX,iF1} = 79,9$ dB	$L_{AX,iF} = 79,6$ dB
Felszállás 2	$L_{AX,iF2} = 79,2$ dB	
Leszállás 1	$L_{AX,iL1} = 77,9$ dB	$L_{AX,iL} = 77,4$ dB
Leszállás 2	$L_{AX,iL2} = 77,2$ dB	
Fel- és leszállás eredője		$L_{AX,i} = 78,6$ dB

VIII.2.6. táblázat Zajeseményszint a ZT1 mérési pontban

Repülési művelet	Zajesemény szint	Átlagos zajesemény szint
Felszállás 1	$L_{AX,iF1} = 68,9 \text{ dB}$	$L_{AX,iF} = 68,3 \text{ dB}$
Felszállás 2	$L_{AX,iF2} = 67,6 \text{ dB}$	
Leszállás 1	$L_{AX,iL1} = 66,5 \text{ dB}$	$L_{AX,iL} = 66,3 \text{ dB}$
Leszállás 2	$L_{AX,iL2} = 66,1 \text{ dB}$	
Fel- és leszállás eredője		$L_{AX,i} = 67,4 \text{ dB}$

VIII.2.7. táblázat Zajesemény szint a ZT2 mérési pontban

Ezek után meghatározzuk a repülési műveletek korrigált zajesemény szintjét, majd az átlagos repülési zajesemény szinteket mérési pontonként a (VIII.2.6) alapján. A repüléstől származó mértékadó A-hangnyomásszintet, azaz a vizsgálati eredményt a (VIII.2.7) szerint számítjuk szintén külön-külön mérési pontonként. A helikopter leszállóhelyet eseti jelleggel veszi igénybe helikopter, a vizsgálatnál figyelembe vett *zajesemények száma* $N = 4 \text{ db}$. Az eredményeket a VIII.2.8. táblázatban adjuk meg. A repülésekre nappali időszakban kerül sor, a megítélési idő $T_M = 57600 \text{ s}$.

ZT1 megítélési ponton kapott mértékadó A-hangnyomásszint			
$L_{AX,i}$	$L'_{AX,i}$	L'_{AX}	$L_{AM,re}$
78,6 dB	81,9 dB	81,9 dB	40,3 dB
ZT2 megítélési ponton kapott mértékadó A-hangnyomásszint			
$L_{AX,i}$	$L'_{AX,i}$	L'_{AX}	$L_{AM,re}$
67,4 dB	70,7 dB	70,7 dB	29,1 dB

VIII.2.8. táblázat Vizsgálati eredmény

A mérés és számítás részeredményeit egy tizedes jegy pontossággal számoljuk, a vizsgálat eredményét azonban már a kerekítés szabályait alkalmazva (0,5-ig lefelé kerekítve) határozzuk meg egész számban kifejezve. Ennek elsődleges oka, hogy a határértékek is egész számok, így az összevetésükre csak azonos számjegyek esetén kerülhet sor. Például: $40,3 \text{ dB} \approx 40 \text{ dB}$, ami kisebb, mint az előírt 60 dB .

VIII.3. HELIKOPTERZAJ SZÁMÍTÁSA

Amennyiben egy helikopter leszállóhely használatából származó zajterhelés értékeit még a létesítést megelőzően szeretnénk megismerni, számításokra alapozott becslést végezhetünk a légi járműre vonatkozó hangnyomásszintek, az ebből meghatározott zajszint adatok felhasználásával.

A továbbiakban áttekintjük, hogyan lehet a helyszíni zajmérések eredményeit felhasználni és alkalmazni a várható zajterhelés minél pontosabb meghatározása érdekében, egyben keresve annak lehetőségeit, hogy az előzetes becsléssel kimutatott zajszint adatok a későbbi üzemeltetésnél célszerűen felhasználhatók legyenek.

VIII.3.1. ZAJSZÁMÍTÁS ELMÉLETE

A környezeti zajterhelést számos tényező befolyásolja, a tényleges érték az adott környezeti jellemzőkkel összefüggő, hangterjedést módosító tényezők, valamint a repülési eljárás függvényében is változhat. Számításoknál törekedni kell a minél kisebb bizonytalanság elérésére, mert a tévesen számolt zajterhelés értékekből levont helytelen következtetésből a repülési műveletek korlátozása vagy a repülési eljárás módosítása adódhat. A kijelölt repülési útvonalat a környezetvédelmi követelmények mellett számos más tényező is (pl. repülésbiztonság, légtérhasználat) befolyásolja, így megváltoztatására esetenként nincs lehetőség.

A tervezési folyamatban három meghatározó tényező van, ami a végeredményt alapvetően meghatározza:

1. helikopterre vonatkozó leszállási-, átrepülési- és felszállási zajsztint. Vagy a légijármű zajbizonyítványában szereplő adat, vagy a helikopter esetében egyedi vizsgálattal meghatározott érték;
2. repülési műveletek száma az adott időegységre vonatkoztatva;
3. légi jármű, mint zajforrás és a védendő létesítmények, azaz a kijelölt terhelési pontok közötti távolság, mint legfontosabb tényező.

Leszállóhelyek tervezése és későbbi üzemeltetése során a légi jármű jellemzőit, így a maximális és az egyedi átrepülésekre vonatkozó zajsztinteket mindig alapadatként vesszük figyelembe. A repülési művelet adatai, mint a le- és felszállási irányok, vagy a repülési magasság, valamint a környezeti adottságok közötti kapcsolatot minden esetben egyedileg szükséges rögzíteni és igény szerint módosítani, mivel ezek a helyszín és a repülési tevékenység függvényében változó tényezők. A tervezés folyamatát ezért minden esetben ki kell terjesztenünk a repülési művelettel érintett terület vizsgálatára is, vagyis a beépítettség és a hangterjedést befolyásoló környezeti jellemzők bemutatására. Helikopter leszállóhely használatától származó zajterhelést számítással a következők céljából szükséges vizsgálat alá vetni:

1. határértékek teljesülése mellett még megengedett legnagyobb műveletszám meghatározása mért zajsztint adatok figyelembe vételével;
2. várható zajterhelés meghatározása rögzített műveletszám és repülési módzatok mellett, majd értékelés a határértékkel való összevetés alapján.

A legnagyobb műveletszám meghatározása a gyakorlatban helyszíni mérésekhez kapcsoltnak szükséges. Ekkor azt a legnagyobb napi műveletszámot keressük, amely mellett a leszállóhely környezetében található védendő területeken a helikopteres repüléstől származó zaj még nem haladja meg az előírt zajterhelési határértékeket, illetve nem okoz kimutatható zajhatást. A vizsgálat eredménye segítséget nyújt ahhoz is, hogy a megfelelő szabályozási előírások megtételére kerüljön sor.

Amikor a műveletszám valamely okból rögzített adat, annak előzetes becslése szükséges, hogy a napi repülések miatt fellépő zajterhelés mekkora zajterhelést okoz a

védendő területeken, illetve ekkor előzetes számítással célszerű annak igazolása, hogy a várható zajterhelés nem haladja majd meg a határértékeket. A számítás ebben az esetben arra is rámutat, hogy a tervezett repülési tevékenységgel szemben felmerülő zajvédelmi szempontból kizáró ok.

Mindkét esetben a műveletszám, az átlagos repülési zajesemény-szint és az alkalmazott vonatkoztatási idő jelenti a számítás alapját. Számításnál a repülési zaj mértékadó A-hangnyomásszintjét (VIII.2.7) alapján a következő összefüggés adja:

$$L_{AM, re} = 10 \cdot \lg \left[M \cdot \left(\frac{\tau_{ref}}{T_M} \right) \cdot 10^{0,1 \cdot L'_{AX}} \right] \quad (\text{VIII.3.1})$$

ahol:

- $L_{AM, re}$ — repülésből származó mértékadó A-hangnyomásszint [dB];
- τ_{ref} — 1 s;
- T_M — megítélési idő [s];
- M — mértékadó repülési műveletek száma;
- L'_{AX} — átlagos repülési zajeseményszint a (VIII.2.6) szerint [dB].

A (VIII.3.1) alapján a számítási eljárás meghatározó eleme az M érték, azaz a *mértékadó repülési műveletszám*. A mértékadó A-hangnyomásszint módosítására csak a műveletszám megváltoztatásával, csökkentésével vagy növelésével nyílik lehetőség. Amikor a megengedett legnagyobb műveletszámot keressük, a következő egyenlőség szerint számunk:

$$L_{AM, re} = L_{TH} = 10 \cdot \lg \left[M \cdot \left(\frac{\tau_{ref}}{T_M} \right) \cdot 10^{0,1 \cdot L'_{AX}} \right] \quad (\text{VIII.3.2})$$

ahol:

- L_{TH} — repüléstől származó zaj terhelési határértéke [dB].

A megítélési idő módosítása csak a napszakok vonatkozásában kap értelmet, mivel értékét jogszabály és műszaki szabvány írja elő. A gyakorlatban a nappali repülési tevékenységet részesítjük előnyben — nemcsak környezetvédelmi, hanem egyéb, pl. a látva repülés szabályai miatt —, amelynek következménye, hogy a nappali zajterhelési határértékek és a $T_M = 57\,600$ s megítélési idő figyelembe vétele indokolt a számításoknál is.

Az L'_{AX} átlagos repülési zajeseményszint módosítása csak a helikopter és a repülés jellemzőinek módosításával, pl. a forrás és a terhelési pont közötti távolság növelésével lehetséges. Egyedüli változó érték tehát az M műveletszám.

A számítást és eredményét a következő példán keresztül szemléltetjük. Egy *MI-2 típusú* és egy *EC 132 T2 típusú* helikopter esetében elvégzett műszeres zajmérés alapján kapott hangnyomásszintek felhasználásával számítással meghatározzuk, hogy mekkora lehet a legnagyobb napi műveletszám. Követelményérték a jogszabályban előírt zajterhelési határérték, esetünkben $L_{TH} = 60$ dB.

A repülési műveletektől származó zajterhelést a leszállóhely szélétől 25 m-re kijelölt terhelési pontban határoztuk meg. *Vizsgált művelet:* helikopter érkezése és leszállás, leszállóhelyen tartózkodás 60 s időtartamban, emelkedés és kirepülés. A számításhoz az L'_{AX} átlagos repülési zajeseményszint értékeket használtuk fel, amit a VIII.3.1. táblázatban adunk meg. A zajterhelési határérték figyelembe vételével megengedett legnagyobb műveletszámok számítási eredményeit a VIII.3.2. táblázat tartalmazza.

MI-2 helikopter			EC 132 T2 helikopter		
leszállás	állóhely	Kirepülés	leszállás	állóhely	Kirepülés
94,5 dB	91,9 dB	95,7 dB	90,1 dB	87,3 dB	91,5 dB
94,3 dB			90,0 dB		

VIII.3.1. táblázat Repülési műveletektől származó zajterhelés

Repülésből származó mértékadó A-hangnyomásszint, $L_{AM, re}$					
MI-2 helikopter			EC 132 T2 helikopter		
5 repülési művelet	10 repülési művelet	20 repülési művelet	10 repülési művelet	20 repülési művelet	40 repülési művelet
53,7 dB	56,7 dB	59,7 dB	52,4 dB	55,4 dB	58,4 dB
$L_{TH} = 60$ dB			$L_{TH} = 60$ dB		

VIII.3.2. táblázat Legnagyobb műveletszám meghatározása

A tervezés folyamatában a helikopterektől származó hangnyomásszintek mellett az időegységre — leggyakrabban a napi 16 óra megítélési időre — vonatkoztatott napi átrepülések száma lesz a meghatározó. Ez a feltétel, jelentős korlátozást jelenthet a leszállóhely használatában, hiszen a repülési műveletszámok betartása a későbbi üzemeltetés során kötelező érvényű lesz. Azonban a helikopteres repülés zajvédelmi szabályozása terén jól alkalmazható eszköz az előzetesen meghatározott műveletszám, ami mellett még biztosított a határértékek teljesülése.

VIII.3.2. VÁRHATÓ ZAJTERHELÉS SZÁMÍTÁSA

Leszállóhelyek előzetes vizsgálata vagy tervezése, esetlegesen a várható hatások előzetes beclése során nincs lehetőség a későbbiekben megvalósuló, tényleges leszállóhely használatától származó zaj — erre csak próbaüzem esetén lehet sort keríteni — mérésére. Amikor a létesítmény kiépítése előtt kell megmondanunk, hogy a tervezett elhelyezéssel, valamint már kialakult környezeti viszonyok mellett mekkora zajterhelés várható a védendő területeken, a légijármű adataira és a szokásosan alkalmazott számítási eljárásokra hagyatkozhatunk.

Ekkor ideális esetre vonatkozó elméleti összefüggések felhasználásával, a zajforrás és a terhelési pont közötti távolság figyelembe vételével a leszállási-, átrepülési- és felszállási zajszintekből számítjuk a várható zajterhelést. Az alkalmazott eljárás a hangnyomás gömbsugárzóra jellemző terjedését tételezi fel, a felhasznált

zajszint érték tartalmazza az irányítottsággal összefüggő tényezőt, illetve kiegészül a levegő hangelnyelése miatti hangnyomásszint csökkenésből eredő tényezővel. A számítást referencia adatok alapján elvégezhetjük az alábbi összefüggés szerint [VIII.1]:

$$L_t = L_{ref} - 20 \cdot \lg \frac{d}{d_0} - \alpha \cdot (d - d_0) \quad (\text{VIII.3.3})$$

ahol:

- L_t — repüléstől származó zajterhelés számolt értéke [dB];
- L_{ref} — referencia magasságra meghatározott zajszint [dB];
- d — repülési magasság, illetve terhelési pont távolsága [m];
- d_0 — referencia távolság;
- α — levegő hangelnyelése miatti csillapítási tényező.

Az α tényező értékei jelentős mértékben függenek a levegő hőmérsékletétől és nedvességtartalmától. Tervezési célokra, így helikopterzaj számításánál a II.5.1. táblázat 70 % relatív nedvességtartalomhoz tartozó értékeit célszerű használni a hőmérséklet függvényében, általános esetben 10 °C levegő hőmérsékletre.

A (VIII.3.3) összefüggésnél a számítás kiinduló adata az *effektív érzékelt zajszint*, ami tartalmazza a helikopter által lesugárzott zaj jellemzői miatt szükséges korrekciókat, amelyek meghatározása külön vizsgálati eljárásban történik súlyozó tényezők alkalmazása mellett. Ezek az adatok a helikopter zajbizonyítványa alapján állnak rendelkezésünkre, így felhasználásukra csak a zajbizonyítvány megléte esetén van lehetőségünk.

Helikopterre vonatkozó, *EPNL* effektív észlelt zajszintek felhasználásával, a (VIII.3.3) szerint elvégzett számításra mutat példát a VIII.3.3. táblázat, melyben a leszállás, a felszállás és az átrepülés műveletekre határoztuk meg a várható zajterhelést erre a célra kijelölt terhelési pontokban. A zajterhelést EC 132 T2 típusú helikopterre vonatkozó adatok alapján számítottuk.

Leszállás			Felszállás		Átrepülés
$L_{ref} = 94,9 \text{ dB}$			$L_{ref} = 88,3 \text{ dB}$		$L_{ref} = 85,7 \text{ dB}$
Távolság $s_t = 250 \text{ m}$			Távolság $s_t = 300 \text{ m}$		
Leszállás	Felszállás	Átrepülés	Leszállás	Felszállás	Átrepülés
67,5 dB	60,9 dB	58,3 dB	54,4 dB	47,8 dB	45,2 dB

VIII.3.3. táblázat Számítási eredmények *EPNL* értékek alapján

Helikopteres repülésnél alacsony magasságokban történik a művelet, ezért a zaj a földfelszín közelében terjed. Emiatt a számolt értékeknél szükséges a földhatásból és a növényfedettségéből eredő hangelnyelés figyelembe vétele, ami egyes frekvenciákon jelentős mértékű lehet. Az így megnövekedett zajszint-csillapítás figyelembe vételével a számított maximális zajszinteket is csökkenteni kell.

Zajterhelés előzetes számítása konkrét kiindulási adatok felhasználásával is

lehetséges, amennyiben ismertek a helikoptertől vagy a repülési művelettől származó zajszintek. A gyakorlatban találkozhatunk azzal a feladattal is, amikor a referencia távolságnál kisebb távolságokra, egy tényleges repülési műveletre kell előzetesen megmondani a várható zajterhelés mértékét. Ilyenkor természetesen figyelembe kell vennünk a helikopter jellemzőit, a művelettől származó tényleges zajszint értékeket, melyek már tükrözik a műveleti idő és a környezeti adottságokkal összefüggő — pl. hangterjedés vagy hangelnyelés, a beépítettség miatt fellépő hangvisszaverődések — hatásokat is.

Ehhez a mért hangnyomásszint adatokra támaszkodva, a helikoptertől 50 m-re és ennél nagyobb távolságokban a következő tapasztalati összefüggést használhatjuk fel, ami jó közelítést ad a számolt zajterhelés értékére:

$$L_t = L_{AXmért} - 20 \cdot \lg \frac{d}{d_0} - \alpha \cdot [10^{0,1(L_{max} - L_{AX})} - (L_{max} - L_{AX}) + 3] \quad (\text{VIII.3.4})$$

ahol:

- L_t — repüléstől származó zajterhelés számolt értéke [dB];
- $L_{AXmért}$ — mért zajesemény-szint [dB];
- L_{max} — mért legnagyobb zajszint érték a zajesemény idején [dB];
- d — terhelési pont számított távolsága [m];
- d_0 — mért repülési művelet távolsága [m];
- α — levegő hangelnyelése miatti csillapítási tényező.

A helikopter közelében, így 50 m-nél kisebb távolságokban a gömbsugárzó jellemzőit, az ebből adódó hangterjedési körülményeket és a környezet hangelnyelési adottságait tekintve már jóval kisebb a hangnyomásszint-csökkenés mértéke, ezért a hangterjedésre vonatkozó tapasztalati összefüggés az alábbiak szerint írható fel:

$$L_t = L_{AXmért} - 20 \cdot \lg \frac{d}{d_0} + 3 \quad (\text{VIII.3.5})$$

A jelenleg rendelkezésünkre álló, helikopterekre vonatkozó zajszint adatok, és a tapasztalati összefüggések csak egy idealizált állapotra vonatkozó becslést tesznek lehetővé. Ennek elsődleges oka, hogy valós helyzetben a tényleges zajterhelést a legnagyobb hangnyomásszintek mellett a repülési művelet, azaz a zajesemény időtartama is befolyásolja, ami esetenként eltérő. A leszállóhely megközelítését és a kirepülést ugyanakkor számos tényező módosítja, így a szél iránya és sebessége, vagy a tereptárgyak és a környező magas épületek.

A (VIII.3.3) és (VIII.3.4) összefüggések egyik meghatározó eleme a levegő hangelnyelése miatti α csillapítási tényező. Értéke a II.5.1. táblázat alapján a levegő hőmérséklete és páratartalma függvényében, így akár évszakonként vagy napszakonként is változhat, ami a hangterjedési viszonyokban okoz eltérést. Ezért nem árt egy-egy zajvizsgálat vagy számítás idején tájékozódni a repülési műveletek idejéről, az időszakról és amennyiben rendelkezésre áll, akkor a napszokról. Általános esetben javasolt ugyan a 70 % relatív nedvességtartalomhoz és a 10 °C levegő

hőmérsékletéhez tartozó α csillapítási tényező alkalmazása, azonban lehetőség szerint a tényleges környezeti jellemzőkhöz válasszunk korrekciós értéket.

Helikopter leszállóhely környezetében mért zajszint értékek felhasználásával, a (VIII.3.4) egyenlet szerint elvégzett számításra mutat példát a VIII.3.4. táblázat, melyben a leszállás, a felszállás és az átrepülés műveletekre határoztuk meg a várható zajterhelést védendő homlokzat előtt kijelölt terhelési pontban. A zajterhelést *Bell 206 Jet* típusú helikopterre vonatkozó adatok alapján számítottuk. Mérési távolság: $d_0 = 10$ m, védendő homlokzat távolsága: $d = 75$ m. A leszállóhelyet tév szerint nyári hónapokban veszik igénybe, így a levegőcsillapítási tényező értékét 70 %-os nedvességtartalomra és 20 °C hőmérsékletre választottuk.

Leszállás ($d_0 = 15$ m)		Állóhelyen tartózkodás ($d_0 = 15$ m)		Kirepülés ($d_0 = 15$ m)	
$L_{\max}=105,2$ dB	$L_{AX}=100,5$ dB	$L_{\max}=98,0$ dB	$L_{AX}=92,3$ dB	$L_{\max}=108,7$ dB	$L_{AX}=101,8$ dB
$d = 75$ m		$d = 75$ m		$d = 75$ m	
$L_{AX} = 83,9$ dB		$L_{AX} = 76,2$ dB		$L_{AX} = 85,7$ dB	

VIII.3.4. táblázat Számítási eredmények mért zajszint értékek alapján

Az eddigiekben tárgyalt számítási eljárás a gyakorlatban jól alkalmazható helikopter leszállóhelyek tervezéséhez, vagy a repülési műveletekben bekövetkező változásokkal összefüggő zajhatás előzetes becsléséhez. A számításokhoz ma már természetesen rendelkezésre állnak különböző számítógépes programok is, melyek segítségével az összetettebb tervezési feladatok is gyorsan elvégezhetőek. Ezekhez rendelkezésre kell, hogy álljon többek között megfelelő digitális térkép is, ami a vizsgált környezetről pontos adatokat tartalmaz (pl. épületek elhelyezkedése, magassága). Azonban ebben az esetben is alapvető a környezeti jellemzők pontosítása, valamint a hangterjedési viszonyokra gyakorolt hatások figyelembe vétele.

A gyakorlatban a tényleges zajesemény-szintekből adódó különbségből, és a hangnyomásszint csökkenésből eredő eltérések miatt a zajterhelés nem határozható meg maximális pontossággal. A különböző számítási eredményekben tapasztalatok szerint a mért értékekhez hasonlóan 0,5-2,5 dB-es eltérés mutatkozik. Ezért többnyire célszerű a számítást is az adott körülmények melletti legrosszabb esetre elvégezni, és a levegő hangelnyelését vagy a környezeti adottságokat (pl. talajhatás) is ennek megfelelően megválasztani.

VIII.4. ZAJCSÖKKENTÉS GYAKORLATI KÉRDÉSEI

A helikopteres repüléstől származó zajterhelés mértékét alapvetően meghatározzák a helikopterek adottságai és ezzel összefüggésben a lesugárzott hangnyomásszintek, valamint a repülési műveletek jellemzői. A gyakorlatban ezek rögzített értékek, amit a méréseknél és a számításoknál kiindulási adatként veszünk figyelembe. A szokásosan alkalmazott vizsgálati eljárások sajátosságaként kell ugyanakkor említeni, hogy a zajterhelést a hatásidő függvényében minősítjük, amit a repülési idő mellett a műveletszám is befolyásol, amire sok esetben, mint egyetlen szabályozási eszköz

tekintünk. Azonban nem lehet kizárólagos megoldás a zajcsökkentési gyakorlatban a repülés olyan jellegű szabályozása, amikor kizárólag a zajesemények számát korlátozzuk, mert ez állandó konfliktushelyzet kialakulásához vezet.

A helikopterzaj a védendő létesítmény és a zajforrás (helikopter vagy repülési útvonal) közötti távolság növelésével hatékonyan csökkenthető. Védőtávolság alkalmazására akkor nyílik lehetőség, amikor a védendő építmény vagy a leszállóhely, esetleg mindkettő elhelyezését meg lehet változtatni, települési környezetben azonban a távolságtartás, mint zajcsökkentési megoldás korlátozottan jöhet számításba. Ennek ellenére leszállóhelyek kijelölésénél, illetve a kirepülési és megközelítési útvonalaknál minden esetben törekedni kell a minél nagyobb távolságok megtartására.

Általános szabályként elmondható, hogy hosszú távon akkor tartható fenn egy leszállóhely, ha a megfelelő távolságok biztosítása mellett, a környezetben okozott zajterhelés ismeretében és a repülés körülményeire való tekintettel hozunk döntést a zajcsökkentés érdekében. Tehát nem követünk el hibát, ha a szokásosan használt helikopter típusokra a rendelkezésre álló, mért zajeseményszint adatokat vesszük figyelembe, amire a VIII.4.1. táblázat mutat példát.

Helikopter	Zajesemény-szint 1 db műveletre (leszállás – állóhelyi üzem- felszállás)	
	Távolság	L_{AX}
MI-24 Hind	80 m	86 dB
Bell 206 Jet	80 m	83 dB
Bell 206 Jet	40 m	89 dB
Gazella	40 m	91 dB
Eurocopter	40 m	88 dB

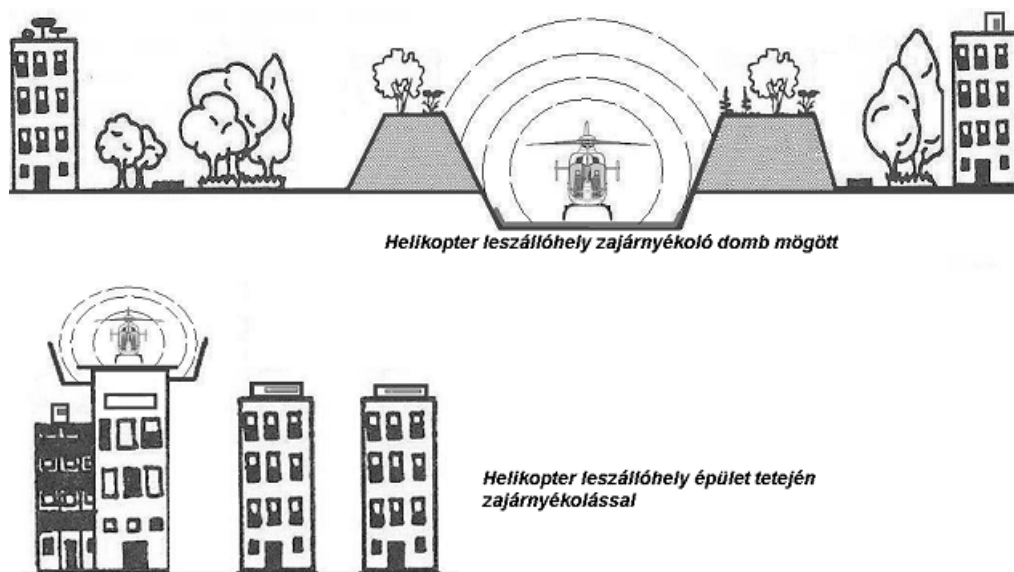
VIII.4.1. táblázat Különböző helikopterek zajeseményszint értékei

Az eddigiekből is látható, hogy a forrás és az észlelés helye közötti távolság alapvetően meghatározza a zajterhelés mértékét. Ezért a működő leszállóhelyeknél is arra kell törekedni, hogy a védendő terület határa a későbbiekben se kerüljön túl közel a zajforráshoz, vagyis a létesítésnél kijelölt távolságokra figyelemmel a lakóházak és a repülés közötti semleges, még beépítetlen területet célszerű tartósan fenntartani, ha szükséges a lakóépületektől kell védeni a beépítés korlátozásával vagy tiltásával a helikopteres repülést.

Mint ahogy azt az előző (például VII.3.2) fejezetekben bemutattuk, a repülési művelet fázisai önmagunkban is jelentős zajterhelést okoznak a környezetükben, így érdemes egy-egy rész-művelet zajcsökkentési lehetőségeit külön-külön is vizsgálni adott körülmények mellett. Ilyenkor lehetséges zajcsökkentési megoldásként számolhatunk leszállóhelyek környezetében a különböző zajárnyékoló, vagy a környezet hangelnyelő képességét növelő létesítmények kialakításával. Ugyanis leszállóhelyen tartózkodó, vagy 1-2 m-es magasságban lebegő helikopter működésétől származó zaj még csökkenthető olyan, a célnak megfelelően kialakított építménnyel, ami egyrészt a tér hangelnyelő felületét növeli, másrészt a védendő homlokzatok irányába a hangsugarak terjedését akadályozza. Leszállóhely mellett elhelyezett

zajárnyékoló létesítményre mutat példát a VIII.4.1. ábra.

Természetesen az elért hatást befolyásolja a zajesemény időtartama is, illetve nem tekinthetünk el attól sem, hogy milyen a zajforrás – terjedési út – zajárnyékoló létesítmény – védendő építmény egymáshoz viszonyított helyzete.



VIII.4.1. ábra: Zajárnyékolás leszállóhely mellett

VIII.5. ZAJVÉDELEM JÖVŐBENI FELADATAI

Az emberi tevékenységekkel összefüggésben lévő környezetterhelésben a repülési zaj nem önálló hatásként jelenik meg, mivel a repüléssel érintett területeken különböző zajforrásoktól származó együttes zajterhelés érvényesül, ami egyben a háttérterhelést is okozza. A különböző források miatt fellépő zajterhelés figyelembe vételével a repülési zaj csak módosítja az alapállapot zajhelyzetét.

Különböző időpontokban végzett mérések eredményeit tekintve a környezeti zajterhelés megváltozása a repülés — leszállás, felszállás, földi üzemeltetés — hatásával együtt a települések vagy az érintett területek zajvédelmi szempontú összetettségétől is függ. Mindez egyben rávilágít arra is, hogy számos zajproblémával találkozunk a mindennapokban, amelyek újabb feladatot jelentenek a zajcsökkentéssel foglalkozó szakemberek számára.

A helikopteres repülés meghatározó szerepet kap a zajvédelem rendszerében, aminek elsődleges oka a környezeti zajhelyzetre gyakorolt hatás. Ezért az eddigiekben elvégzett vizsgálatok főként a helikopterzaj káros következményeire, illetve a zajjellemzőkön keresztül a zajvédelem lehetőségeire irányulnak, ugyanakkor nem tulajdonítanak kellő jelentőséget a helikopterzaj és más eredetű zajterhelés együttes elemzésének és kezelésének.

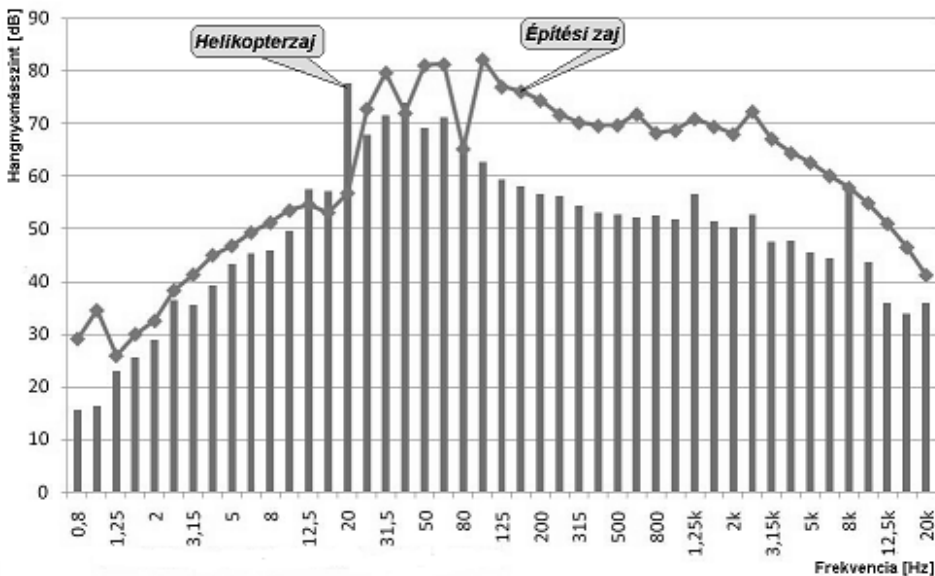
Pedig érdemes annak lehetőségét is számításba venni, hogy a helikopteres

repülés az aktuális zajhelyzetet tekintve megoldást jelenthet egy másik, jelentős zajkibocsátással működő technológia kiváltásában. A gyakorlatban több problémával is találkozhatunk, amikor a helikopterzaj önmagában jóval kisebb vagy elviselhető környezetterhelést jelent, mint a zajproblémát okozó tevékenység. Ilyen helyzet például a különleges építmények megvalósításához szükséges ideiglenes utak kialakítása, nagyobb gépek telepítése vagy védett területre való bejuttatása.

Érdeemes hát másképp megközelíteni a gyakorlatban előforduló és legtöbb problémát eredményező zajos tevékenységeket annak mérlegelésével, hogy milyen egyéb, az eredeti technológiák kiváltására alkalmas technológia áll rendelkezésünkre a zajcsökkentés érdekében. Nem lehet követelmény, hogy az új technológia teljes egészében zajcsökkentett legyen, de célkitűzés, hogy kedvezőbb zajhelyzet alakuljon ki az érintett környezetben. Példaként említést érdemelnek a különböző építőipari tevékenységek, ahol hagyományos módon nehéz vagy körülményesen megoldható feladat a zajcsökkentés. Ezen a területen megoldásra vár például a nagyobb tömegű gépészeti berendezések beemelése és rögzítése a magas épületek tetejére, elektromos vezetéktartó oszlopok vagy szélgenerátorok bejuttatása lápos-mocsaras, illetve természetvédelmi területekre.

IPARI HELIKOPTERES REPÜLÉS alkalmazása megoldást jelenthet az építőipar eddigiekben vázolt problémáira is, vagy az anyagmozgatás és szállítás terén jelentkező feladatokra, amit a következő példával szemléltetünk.

Ha megvizsgáljuk egy-egy építőipari kivitelezés zajhatását, láthatjuk, hogy a zajosabb építési fázisok közül többet is el kellene hagyni ahhoz, hogy adott helyzetben megfelelő eredményt érjünk el a zajcsökkentés vonatkozásában. Ezt csak úgy tudnánk megvalósítani, hogy a folyamatot megváltoztatjuk, és a legzajosabb építési fázisokat, vagy a legnagyobb környezetterheléssel járó tevékenységeket elhagyjuk.



VIII.5.1. ábra Helikopterzaj és építési zaj összevetése

Számos esetben fordult elő például, hogy az eredeti környezeti állapotot megváltoztatva szállítójárművek számára utakat építünk természetvédelmi területen ahhoz, hogy egy tartóoszlopot elhelyezzünk a területen. Ez a fajta építési tevékenység a későbbiekben feleslegessé váló területfoglalással, talajterheléssel, vízelvezetési problémákkal és az eredeti környezeti állapot megváltoztatásával, ezzel együtt a legtöbbször jelentős zajjal jár.

Mindezt kiválthatja az *ipari helikopteres repülés*, amit igénybe vehetünk a tartóoszlop légi úton történő szállításához és beemeléséhez. Ekkor a viszonylag rövid időtartamban jelentkező zajterheléstől eltekintve, más környezeti hatással nem kell számolni, vagyis az eredő környezetterhelés kisebb mértékű lesz. Ehhez természetesen vizsgálni kell a továbbiakban, hogy a helikopteres repülés a zajhatást tekintve valóban a környezetvédelem problémakörébe tartozik-e? Megítéléséhez nyújt segítséget a VIII.5.1. ábra [VIII.5].

Környezeti zajvédelem további feladata még a helikopteres repülés vonatkozásában a jelenleg használt határérték rendszer korszerűsítése. A gyakorlatban sok zajprobléma vezethető vissza a hosszú megítélési idővel meghatározott zajterhelés és a határérték viszonyára.

Az alkalmazott értékelési eljárás következménye az is, hogy a közlekedési zajjal érintett területekre előírt határértékeket teljes egészében kitöltjük, ami hosszú távon a területek *fokozatos elzajosodásához* vezet, ezzel egyre kedvezőtlenebb körülményeket teremtve a lakosság számára. Szükségszerű tehát olyan határérték rendszer kidolgozása, amelyben megjelennek az egyedi határértékek, a zajeseményekre vonatkozó maximális értékek, vagy a rövid időszakokban megjelenő zaj esetében a hatásidő kiemelt figyelembe vétele.

Mindemellett nem feledkezhetünk meg arról a törvényszerűségről, hogy a hulladékokat összegyűjtjük és újrahasznosítjuk, a keletkező szennyvizet elvezetjük és megtisztítjuk, a levegőbe kerülő anyagokat erre alkalmas eszközökkel leválasztjuk, de ahol az ember egyszer megvette a lábát, ott megjelenik a zaj is, és hosszú távon ott is marad.

VIII.6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [VIII.1] Dr. Buna Béla: A közlekedési zaj csökkentése, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1982.
- [VIII.2] A környezeti zaj vizsgálata és értékelése című MSZ 18150-1:1998 számú szabvány.
- [VIII.3] A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj című MSZ 13-183-3:1992 számú szabvány.
- [VIII.4] A közlekedési zaj mérése. Repülési zaj heliportok és kisrepülőterek környezetében című MSZ 13-183-4:1992 számú szabvány.
- [VIII.5] Bera József: Ipari helikopteres repülés környezeti hatása, Műszaki Tudomány az Észak Alföldi régióban 2010, Nyíregyháza 2010., pp. 89-94.