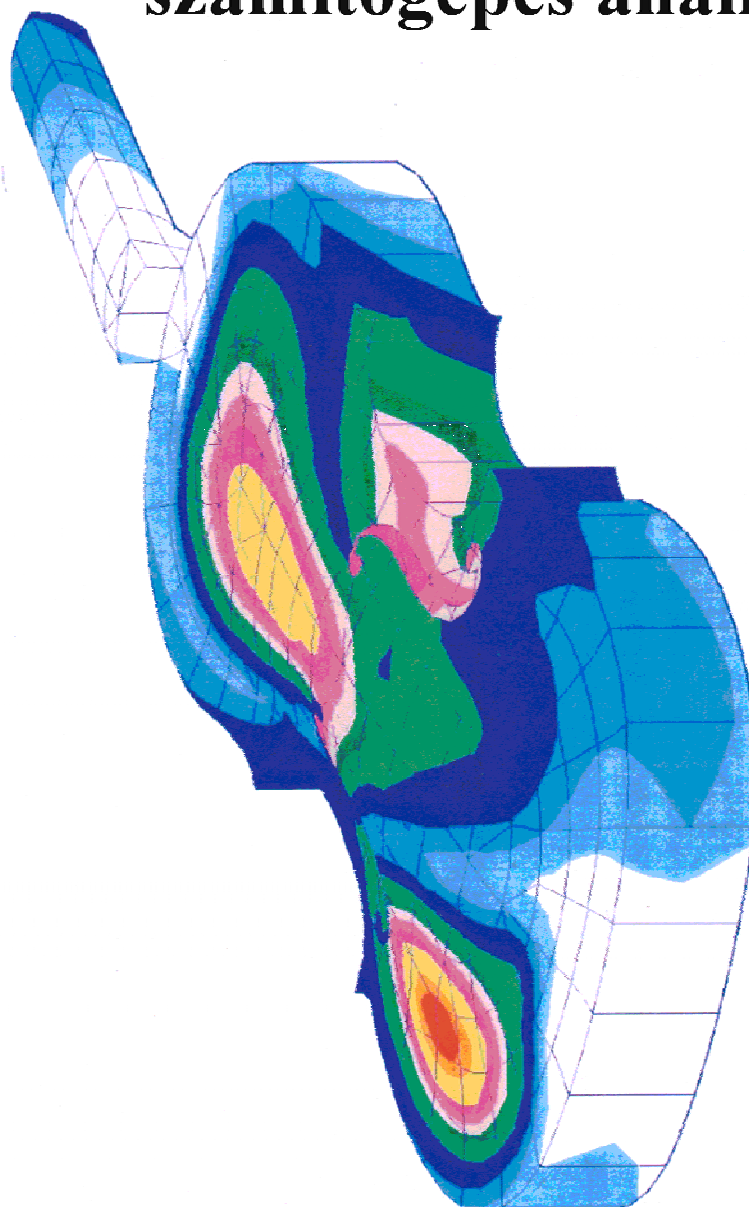


Tassy András

# **A hegedűkorpusz statikus feszültségeloszlásának számítógépes analízise**



1998

## S Z A K D O L G O Z A T

Készítő: Tassy András

Dátum: 1998.márc.28.

(Elektronikus formára átdolgozva 2009)

Cím:

**Hegedű korpusz statikus feszültségeloszlásának számítógépes analízise.**

Tartalom:

- Köszönetnyilvánítás
- Bevezetés
- 1. A feladat leírása.
- 2. A felhasznált elméleti és technikai háttér rövid ismertetése.
  - Mi a végelelemes módszer?
  - Hardver
  - Szoftver: - geometria ( ANVIL 5000 )
    - végelelemes analízis ( NASTRAN )
    - elemfelosztás, megjelenítés ( PATRAN )
- 3. Háromdimenziós felületmodell felépítése
  - egyszerűsített kontúr kialakítása
  - domborítás, szintvonalak ( tető - hát főmetszetei)
  - szabadformájú felületek kifeszítése (Spline görbe. Bezier fel.)
  - káva, gerenda, lélek felvétele
- 4. Végelelemes felosztás
  - kétdimenziós elemek alkalmazása
  - csomóponti vastagsági méretek felvétele
- 5. Peremfeltételek és számítási adatok meghatározása
  - statikus terhelések: húrfeszítésből, láb nyomásából
  - megfogások, kényszerek
  - mechanikai anyagjellemzők meghatározása ( különböző faanyagokhoz az anizotrópia figyelembevételével)
- 6. Feszültségeloszlások és deformációk csomóponti számítása
- 7. Feszültségeloszlások képi megjelenítése (húzó, hajlító, redukált)
- 8. Értékelés, következtetés
- 9. Dinamikai vizsgálatok (sajárfrekvenciák számítása)
- 10. Név és tárgymutató, magyarázatok.
- 11. Felhasznált irodalom
- 12. Tartalomjegyzék

## Köszönetnyilvánítás

Lehet szokatlan egy szakdolgozatot köszönetnyilvánítással kezdeni, mégis idekívánkozik ez, mert létrejöttéhez több ember támogatására, segítségére volt szükség, akik ezáltal kicsit részesei is e munkának.

Elsősorban a Hangszerkészítő Szövetségnek, illetve a magyar hegedűkészítőknek szeretném megköszönni, hogy befogadtak maguk közé, és nem csak megtűrték, mint amatőrt, hanem velük egy porondon vehettem részt az immáron hagyományosnak tekinthető Magyar Hegedűkészítők országos kiállításain. Ez példásan mutatja a mai hazai szakma nyitottságát, őszinteségét és rugalmasságát.

A legtöbb köszönettel mégis Kónya Lajos hegedűkészítő mesternek tartozom, aki amatőr törekvéseimet mindvégig önzetlenül támogatta, és szakmai tanácsaival a bennem lévő vágyat és szeretetet a hegedűkészítés iránt oly mértékűre lendítette előre, hogy szakvizsga letételére vállalkozzak.

A dolgozat közvetlen elkészítésében nélkülözhetetlen segítséget nyújtott munkatársam Csiszár András, aki országos viszonylatban élenjáró szakember a számítógépes végelelemes feldolgozásokban, és a gépészeti gyakorlattól távol eső, különlegesnek számító és speciális igényű feladatban is jól helytállt.

Köszönetet kell mondjak Dr Szalai Józsefnek a soproni Erdészeti és Faipari Egyetem Műszaki Mechanika Tanszék vezető professzorának, kinek könyvéből, amely egy évtizedes kutató munkájának eredménye, készen vehettem ki a számításhoz szükséges mechanikai alapadatokat.

Nem utolsó sorban köszönetemet fejezem ki azon passzív segítőimnek, akik elviselték megszállottságomat, e témával való lekötöttségemet ezzel segítve munkámat. Itt természetesen a közvetlen környezetemben lévőkre gondolok, mind a családomban, mind a munkahelyemen.

## Bevezetés

A számítógépet, mint emberi találmányt megalkották és mára már oly mértékben tért hódított, hogy átalakította az emberiség jelentős részének egész életét. Nem lehet ezt egyértelmű örömmel fogadni. Mára kiderült, az átalakult életmódnak a napos oldala mellett van árnyékos is. Itt elsősorban nem az egész társadalmat érintő hatásokra gondolok, miszerint adataink egyre növekvő adatbázisokban rögzítődnek egy számhalmazként, amiben elvész az egyéniség, a személyiség, ezek helyett egy nagy tömegbe olvasztva minket. Tehát itt inkább az egyéneket közvetlenül érintő hatásokra gondolok. Hiszen a képernyő elé merevedett ifjúság, aki elszedül az új vizuális varázslat csábításától, játékszenvedélyével hasonlónak válik a narkomániához, felcseréli a valós természetet a virtuális valósággal. A saját területünkről példát véve: a digitális zenei tárolás robbanásszerű elterjedése kiszorítja a közönséget kívánó, szórakoztató, alkotó jellegű élő zenét az otthonokból. Az üzleti hajszákényszerében néhány csinált sztár privilégiumává teszik a zenei előadás lehetőségét. A könnyen elérhető zenehallgatás örömeivel csábított közönség pedig nem veszi észre a nagy becsapást, hogy miközben a élőzene-teremtés kollektív élményétől van megfosztva, eközben magányos, elszigetelt walkman-es emberekké vált. Ezt is sínyli jelenleg a hangszer- készítő szakma.

Talán meglepő, hogy egy számítógép felhasználását igénylő dolgozat bevezetőjeként panaszt emelek a számítógép ellen. Teszem ezt azért, mert a számítógép kerülendő hatásai ma egyre nyilvánvalóbbak. Nem vagyok meggyőződve az üzletekben bizonytalan arccal billentyűket keresgélő pénztáros láttán, hogy neki a számítógép hallatlan sebességével és tévedhetetlenségével gyorsítja és egyszerűsíti a munkáját. Inkább az jut eszünkbe, hogy kiszorítja a cselekvésből az emberi szellemet, tovább fokozva a munka kiüresedését, gépiesítését, az individuumok elszigetelődését sőt az ember feleslegessé válását.

A számítógépnek persze óriási előnyei is vannak, és itt nem csak a mindenki által jól ismert technikai, informatikai eredményekre gondolok, amelyek számítógép alkalmazása nélkül nem valósulhattak volna meg. Inkább azt említem meg, amire gyakran nem is gondolunk, hogy számítógép nélkül nem suhanhatnánk olyan gyönyörű formatervezésű autókban, mert csak a számítógépes vezérlés szabadította fel a tervezés és gyártás korlátjait úgy, hogy semmi ne szabjon határt a végtelen fantázia megvalósításának. A mennyiségi változás, mivel a számítógéppel millió műveletet tudunk rövid idő alatt elvégezni, meghozta a minőségi változást.

A számítógépet is, mint mindent, az emberi jó- és rosszakarat eszközévé lehet tenni. Önmagában semmi nem jó vagy rossz. Az eszközt használó ember akarata és célja a meghatározó.

Hiszem, és munkámban ez serkent, hogy jó célú és hasznos számítógépes alkalmazást választok, amikor összekapcsolom két érdeklődési körömet a hegedűkészítést és a számítógép felhasználást. Lehet, hogy Magyarországon még úttörő tevékenységnek számít ez, de azon az úton amin a „fejlett nyugat” már jár, a mi fiatalságunknak és a jövő generációjának is elkerülhetetlenül járnia kell majd.

A hegedűkészítés a maga egyedi, kézműves jellege miatt eddig dacolt a technika térhódításával szemben. Részben azért, mert olyan finom és érzékeny műveleteket kíván, hogy a gyári produktum minősége soha nem tudta felülmúlni a mesterek munkáját, ellentétben néhány más hangszerrel, ahol is megjelentek a nagynevű, márkás gyári kivitelek és eltűntek az egyéni készítők. Másrészt meg azért, mert az elődök olyan megmásíthatatlan keretek közé szorították a hegedű kialakítását, hogy nincs sok helye a kutató útkeresésnek, az újításnak, a szabad formaalkotásnak.

A technika viszont megállíthatatlanul fejlődik és a hasznot keresők felhasználják eszközként, hogy betörjenek mindenhova, még az eddig intimnek számító, individuális szférák területeire is. Nem kell hozzá jóstehetség, hogy a jövőről azt képzeljük, a jó hangzással vesződő, fárigcsáló mester helyett az elektronikus keveréssel bármilyen hangzásigényt kielégítő elektromos hegedű uralma jön, ahol a hangerő korlátlan, s így nem csak egy zseni által készített hangszer tud a pódium királynőjévé válni.

Nem vagyok mégsem pesszimista, vagy reményvesztett, hiszen akkor az elektronika felé fordulnék és nem a hegedűkészítés rejtelsei felé. A technikának is be kell futni a maga köreit, megismerve lehetőségei határát. A technika korlátlanságába vetett hitünk már rég megtorpant. Az ember végül belátja, hogy a természetes mindig magasabb rendű.

A hegedű az anyagának köszönheti, hogy soha nem válik olyan élettelen tárggyá, ami tömeggyártható. Amíg a hegedű fából készül, addig nem veszíti el élő jellegét és egyediségét. Addig a minőségért meg kell harcolni a fával és ezt a harcot csak a szellemmel és lélekkel vezérelt emberi alkotó munka képes megtenni. Ezért had higgyem, hogy a hegedű mindig az lesz amire az ideák világában az istenek szánták: a művészetet szolgáló művészi alkotás.

A hagyományok túlzott tiszteletben tartása akadály lehet a fejlődésnek. Ha a hegedű jó irányú, új fejlődési szakasznak fog indulni, az csak úgy lehetséges, hogy a már megcsontosodottnak tűnő, misztifikált, lényegét veszített hagyományokat áttöri egy bizonyító erejű szemléletváltás, egy újszerű tudás, ami a technika által eddig ismeretlen finom anyagi törvényszerűségek felfedezésével és alkalmazásával lehetséges. Az ember számára láthatatlan rezgő és hullámzó világot csak a technika tudja láthatóvá és ezáltal megérthetővé tenni.

*"Amit az ember lát, az csupán burok, a dolgok héja, ami hangzik az láthatatlan. ...a hangban van meg az emberfölötti hatalom, amely a természetre teremtő hatást gyakorol. Ezért volt a zenének minden hagyományban oly nagy jelentősége."* (Hamvas Béla: Eksztázis)

#

Ezzel a szakasszal örömmel egészítem ki e bevezetőt. A hegedű számítógépes modelljét 1996 őszén kezdtem és azt reméltem, hogy 1997- ben kész szakdolgozatként leadhatom. A munka sokkal nagyobb lett, mint előre felmértem, ezért a tervezett időpontra nem készült el. Akkor célként csak statikus vizsgálatot mertem kitűzni, mégis a feladat óriási lett. Egy év telt el azóta, s ezt az időt nem csak az elkezdett téma befejezésére tudtuk felhasználni, hanem sikerült továbblépni és a dinamikai vizsgálatokat is elvégezni. Ez olyan eredményt adott, amit remélni sem mertünk az elején. A teljes hegedűtest rezonáns viselkedése tárult fel szinte bármely frekvencián. Így vált teljessé a számítógépes analízis.

E bevezető nem csak a jelen dolgozat elé kívánczik, hanem azon új útkeresés elé is, aminek első lépései közé tartozik a szakdolgozat tárgyát képező numerikus feldolgozás. Hiszem, hogy a minket követő, fiatal hangszerkészítők a jövőben bátran és értőn fognak nyúlni a számítógépes lehetőségekhez mint eszközökhöz a jobb eredmények érdekében. Remélem tehát, hogy folytatása lesz e terület kis szeletét felölelő munkának, s a hatalmas kutatási tartományt be fogják járni az erre vállalkozók. Nekik ajánlom elsősorban a dolgozatomat.

Megjegyzések:

- Jelen munkának három egymástól nagyon távol eső szakterületen is meg kell felelnie, ki kell állnia a kritikát:

- hegedűkészítő szakma,
- mechanika, szilárdságtan,
- számítástechnika

Tehát a hármas igénynek megfelelően, ha nem is maradéktalanul, de igyekeztem mindegyik területet érintően a dolgozatba foglalni a legszükségesebbeket, hogy érzékeltető képet nyújtsak a végeredményt megelőző munka teljességéről. Ezért kerültek bele olyan részek is, amik a hangszerkészítő szakmát közvetlenül nem érintik.

- A dőlt betűs szavakhoz magyarázat található a tárgymutatóban.

## 1. A feladat leírása

A szakdolgozatban azt a célt tűztük ki, hogy egy megszólaltatásra kész, tehát felhúrozott és felhangolt hegedűtesten meghatározzuk a húrok feszítő erejéből adódó statikus feszültségeloszlást és deformációt. Mindezt egy olyan számítógépes modellen, ami a legnagyobb részletességgel, híven tükrözi egy valós hegedű geometriai, felépítésbeli sajátosságait és anyagi tulajdonságait. A feladat eredményétől, tehát a feszültségeloszlás ismeretétől azt vártuk, hogy az hasznos lesz a hegedűkészítés, elsősorban a korpusz szilárdságát érintő munkafázisaiban.

Egy felhangolt hegedű korpuszának a húrok feszítése miatt aránylag nagy erőket kell elviselni. A feszülő húrok egyik végükkel a kulcsszekrény felől, a nyakon keresztül, a másik végükkel az alsó nyergen valamint a gombon keresztül terhelik a hegedűtestet. A lábon, mivel az megtöri a húrerők irányát, egy eredő erő keletkezik, ami a tetőt terheli. Ezek a hegedűtestre ható külső erők. Ha a négy húr erejét közös erővel helyettesítjük, akkor három, egymással egyensúlyban lévő erővel modellezhetjük a testre ható erőket. (Alul a húrtartó zsinórjának nyeret nyomó erőkomponense és a gombról felfelé ható erő, az alsó tőkében semlegesítik egymást, ezért a számításnál nem vettük figyelembe a helyi kis deformációs többletet.) A hegedűtest a külső erőkre rugalmasan deformálódik és belső erőkkel válaszol, miáltal egyensúlyba kerül a rendszer. A külső erőkkel a belső erők tartanak egyensúlyt. A belső erők a test, jelen esetben a fa terheléssel szembeni ellenállásából, azaz teherviseléséből, szilárdságából adódnak. Tehát a felhangolt hegedűben a külső erők hatására, egy *statikus* feszültségi állapot keletkezik. Ennek a feszültségnek a nagysága és eloszlása nem közömbös különösen a tetőnél, ahol a puha és vékony falemez szilárdsági képessége közel a felső határáig van kihasználva, és ez a rezgőképességét is befolyásolja. A tetőn lévő feszültségi viszonyok egyébként is érdekesek, mert a lábról ható horpasztó terhelést nem bírná sokáig a vékony tető, de a lélek miatt a terhelés a nagyobb teherviselésre képes hátra adódik át. Így a tetőn a lábtól nem messze közel feszültségmentes állapot van, ami segíti a nagyobb amplitúdójú szabad rezgést. A gerenda és az "f" nyílások további befolyással bírnak. Mindehhez még hozzájárul a tető és hát boltozatos kialakítása, ami szintén a szilárdságot fokozza. A jó hangzás fontos összetevője annak a nem véletlenül misztifikált középútnak az eltalálása, ami az egyik végletben a nagy belső feszültségek vagy a túl nagy belső szilárdság miatti nehezebb rezgőképesség, vagy a feszültség nélküli kis ellenállású túlrezgés között húzódik. Nem érdektelen tehát a tető és a hát feszültségi eloszlásának ismerete, mert ebből látható, hogy hol lehet a hangzás szolgálatában, büntetlenül vékonyítani, vagy hol kell vastagítani azokat szilárdsági okokból. A dolgozat célkitűzése tehát az, hogy egy hegedű feszültségi és alakváltozási analízisét elvégezzük, számszerűsítsük és az eredményeket szemléletes formában tálaljuk.

Régi vita, hogy az alacsonyabb vagy a magasabb boltozat a jó. Az alacsony jobban rezonál (esetleg túl jól), a magas boltozat merevebb de több rezonáló levegőt fogad be. Ugyanígy kérdéses az ellenív szerepe, nagysága, vékonysága. A különböző nagyságú boltozat kialakítások és vastagságok kombinációin végzett feszültség és deformáció analízis közelebb vihet a tudatos, egyértelmű válaszadáshoz. Igaz, hogy a számítógépes modellezés lehetőséget kínál e nagy számú variáció modellezéséhez és kiértékeléséhez, de a valóság az, hogy a mi rendelkezésünkre álló eszközökkel még mindig óriási munka egy háromdimenziós számítógépes modell létrehozása. A legmodernebb programok képesek csak az ún. paraméteres kezelésre, ami pl. egy más boltozatmagasság megadásával automatikusan átszámolja az összes geometriai pontot. Az általunk elérhető és használt program ezt még nem tudta, tehát célul csak egy geometriával meghatározott modellalak felépítésére és kiértékelésére szorítkozhattunk. A cél, amint azt már említettük a hegedűtestben lévő statikus feszültségi állapot meghatározása, amire tökéletesen alkalmas a használt rendszer. A variációk vizsgálata egy jövőbeni, fejlettebb eszközökkel bíró érdeklődő feladata lesz.

A hegedű megfigyelésével és a témán való gondolkodással könnyen elképzelhető az erők és feszültségek alakulása, de a valósághoz közelebb jutni, tényleges számszerű értékek ismerete nélkül nem lehet. Viszont azokat megkapni csak egy pontos modellalkotással és azon bonyolult számítási módszerek alkalmazásával lehetséges. (A hegedű nem alkalmas arra, hogy közvetlen feszültségmérési technikát alkalmazzanak rajta. Ismereteink szerint holografikus úton deformáció meghatározás már történt, amiből a feszültségi állapotokra lehet következtetni. Azonban ilyen eszközök elérése még nehezebb mint a számítógépes háttér, ugyanakkor ha a faanyag anizotrópiáját figyelembe akarjuk venni, akkor a matematikai probléma szintén egy meg nem oldható feladattá nő. Ezért a holografikus módszert inkább a dinamikus, tehát rezgésállapot vizsgálatára használták, tekintettel arra, hogy a statikus deformáció és a dinamikus deformáció nagyságrenddel eltér, a holografikus módszer pedig nagyon érzékeny.) A valódi feszültségértékek ismerete azért jó, mert a fa szilárdsági értékeivel összevetve már pontosan következtethetünk sokmindenre: pl. konkrétan mennyire lehet elvékonyítani a tetőt, vannak e túlterhelt, vagy indokolatlanul terheletlen területek. A falvastagságon való változtatás, aminek akusztikai következményei vannak, hogyan befolyásolja a szilárdságot stb. A szilárdsági és akusztikai igények együttes figyelembevételével optimálisabb geometria alakítható ki. Ezt a gyakorlatban elvégezni csak számítógépes módszerekkel lehetséges. Ez a módszer sokirányú felhasználásra alkalmas formában, a mai technikai fejlettség mellett rendelkezésre áll, aminek alapja a *végeselemes analízis*.

## 2. A felhasznált elméleti és technikai háttér rövid ismertetése

### - **Mi a végeelemes analízis?** (FEM=Finite Element Method)

A hazai hegedűkészítő szakma tudomásom szerint eddig nem igen használt ilyen módszereket, de a műszaki tervező és kutató területeken már széleskörű gyakorlattá vált az elmúlt néhány évtizedben e technika fejlődése és terjedése miatt. A hangszerkészítő szakmában való alkalmazásakor szükségesnek tartom ennek a *numerikus* módszernek a rövid ismertetését.

Természetesen az elméletébe mélyen nem mehetünk bele, egyrészt mert nem is a dolgozat feladata, másrészt a matematikai és programtechnikai háttere sok-sok mérnökév munka eredménye. Ezért mi magunk is csak mint program-felhasználók vagyunk jártasak ebben a témában.

A végeelemes módszer kialakulása.

A tervező munka során akkor mondhatunk szilárdsági szempontok alapján ítéletet egy szerkezetről, ha a feltételezett terhelések hatására ébredő elmozdulásokról, feszültségekről elegendő információ áll rendelkezésre. A klasszikus mechanikai elméletek is ezekre a kérdésekre keresik a választ, de csak mechanikailag idealizált -pl. rudak, lemezek és egyszerű szerkezetek vizsgálatára alkalmasak. Az előbbi problémákkal a rugalmasságtan foglalkozik.

A geometriai kialakítás és a terhelési viszonyok szempontjából bonyolultabb feladatok megoldására az analitikus megoldások helyett numerikus módszereket kezdtek el alkalmazni, amit a modern számítógépek elterjedése tett lehetővé. A numerikus módszerek egyike a végeelemes módszer. Az első végeelemes módszerrel foglalkozó publikáció 1956-ban jelent meg az USA-ban. A módszer alkalmazása a Boeing Társaságnál kezdődött meg, a repülőgépek tervezésénél. Ma már nemcsak a repülőgépek és űrtechnikák, de mindennapos használati cikkeink tervezése sem képzelhető el végeelemes analízis nélkül.

A módszer sokoldalúságára jellemző, hogy nemcsak szilárdságtani problémák megoldására alkalmazható, hanem számos egyéb területen, (pl. dinamika, áramlástechnika, hőtan) is felhasználható.

Elemien egyszerű szilárdsági feladatnak tekinthető ha egy homogén, *izotróp* anyagból (mint a fém) hasáb alakú rudat erővel terhelünk a rugalmas tartományban. Az erők hatására a rúd deformálódik, és benne feszültség keletkezik. Ilyenkor egy lineáris anyagtörvény (*Hooke-törvény*) írja le a fajlagos deformáció és a feszültség közötti kapcsolatot aminek együtthatója az adott anyagra jellemző *rugalmassági modulusz* ( $E$ ). Aránylag egyszerű képletekkel kiszámítható a rúd deformált alakja is. A klasszikus mechanika kidolgozott "varázsképleteket" egyszerűbb alakok (tengelyek, rudak, tartók és ezekből összerakható alkatrészek) egzakt számítására, amelyek segítségével a kritikus keresztmetszetekben kiszámíthatjuk a feszültséget, a deformációt és az elmozdulást. Az utóbbi évtizedig tulajdonképpen így terveztek épületeket, hidakat, gépeket. Az hogy sokat kell számolni, az csak az egyik hátrány. A nagyobb probléma az, hogy a bonyolult alakzatok ezzel a hagyományos módszerrel még megközelítő pontossággal sem kezelhetők, számolhatók. Olyan bonyolult parciális differenciálegyenletekhez jut el az analitikus levezetés, hogy ezek megoldásáról a legtöbb gyakorlati esetben le kell mondani.

A mérnöki munkában gyakran előforduló feladat az, amikor a valós folyamatokat leíró matematikai modell parciális differenciál *egyenleteit* bonyolult, komplex tartományokon kell megoldani.

A nagyteljesítményű digitális számítógépek megjelenésével és természetesen ennek hatására a hatékony és általánosan alkalmazható *numerikus módszerek* fejlődésével megjelentek azok a technikák, amelyekkel kezelhetőkké váltak az előbb említett feladatok. Kifejlesztették ezen approximációs sémák és módszerek elméleti alapjait.

A közelítő módszerek közül talán a legelterjedtebben használt numerikus technika a *végeselemes módszer*, ami a mérnöki tevékenység szinte minden területén adaptálható és haszonnal alkalmazható.

Mint már említettem, valamely komplex tartomány (kontinuum) esetén valamely fizikai jellemző meghatározása zárt alakban általában lehetetlen.

Például a szakdolgozat témájánál maradva, ha megpróbálnánk felírni a hegedű esetén a rugalmasságtan egyensúlyi *parciális differenciál egyenleteit*, azokból mondjuk a feszültségeloszlásra vonatkozó összefüggést, azt zárt alakban nem tudnánk elállítani: Így, mint minden numerikus megközelítés, a végeselem módszer is azt az approximációt vezeti be, miszerint a kontinuumot reprezentáljuk, helyettesítjük egy véges számú ismeretlen tartalmazó rendszerrel, és az ismeretlenek számának függvényében a megoldás gyengébb, illetve pontosabb modelljét állítjuk fel.

Gondolatban könnyen elképzelhető, hogy bármilyen bonyolultságú alakzatot fel lehet építeni kis, geometriailag egyszerű és egyforma elemekből. Ahogy bármilyen alakzatú épület felépíthető az egyforma téglákból. Vagy a gondolat megfordításával, bármilyen bonyolult alakzatot fel lehet bontani sok, sok geometriailag egyszerű elemi részre. A megközelítés pontossága az elemfelosztás számának növelésével javul, amivel együtt jár az elemek méretének kisebbedése. Az elemeket aztán erőtanilag kapcsolatba hozzuk egymással úgy, hogy a szomszédos elemek közös csúcspontjain (az ún. csomópontokon) erőátvivő kötést létesítünk, mint ahogy a habarcs köti a téglákat egymáshoz. Tehát így adják át egymásnak az elemek a terhelő erőket. Ez a végeselemes felosztás. Véges, mert nem a végtelen kicsihez tartó differenciákkal operál, mint a differenciálegyenletek. Ugyan nagyon nagy számú elemmel dolgozik, de nem végtelen számúval.

A végeselem módszer esetén tehát a *kontinuumot*, vagy vizsgálandó tartományt ún. „végeselemekre” osztjuk fel, melyek a végeselem csomópontokon kapcsolódnak egymáshoz. Ezt a folyamatot hívjuk *diszkrétizációnak*. A végeselemek kitöltik magát a tartományt, nem fedhetik át egymást, ugyanakkor az ismeretlen változót ezen végeselemeken egy interpolációs függvénnyel közelítjük. Szerkezeti analízis esetén általában az elmozdulást interpoláljuk az elemeken, ezért is hívjuk gyakran a módszert *elmozdulás módszernek*. Tehát ebben az esetben az elmozdulás az ismeretlen változó a csomópontokban, ugyanakkor az elemeken belül az elmozdulást egy interpolációs függvény írja le. Az interpolációs függvények fokszámától függően szoktunk lineáris, kvadratikus, köbös, stb. elemekről beszélni. Ezek után a tartomány peremfeltételeit (megfogások, terhelések) is a csomópontok segítségével fejezzük ki, így végül felállítjuk a szerkezet *merevségi mátrixát* és *terhelési vektorát*, ami a modellezendő folyamattól függően egy lineáris vagy nemlineáris egyenletrendszerhez vezet, amelyben a csomóponti elmozdulások, mint ismeretlenek szerepelnek. A végeselem módszer sikere az egyenletrendszer megoldásának hatékonyságától függ.

A feladat tehát úgy módosul, hogy az egész rendszer belső erőtanilag egyensúlyának vizsgálata helyett - ami egyébként matematikailag megoldhatatlan- a csomópontokon kapcsolódó sok kis elem erőtanilag egyensúlyát keressük ami már felírható *analitikusan*, képletekkel. Ez persze ahhoz vezet, hogy ha a darabot sok száz, esetleg ezer elemre osztottuk, akkor ha egy elemnek nyolc sarka van, akkor már nyolcszor annyi csomóponttal, ennek háromirányú térbeli koordinátájával, és hat *szabadságfokával* kell számolni.

A magasabbrendű elemeknek nyolcnál is több csomópontja van. A szomszédos elemek csomópontjai egybe olvadva találkoznak. Belátható, hogy ilyen feladat megoldásakor sok ezer ismeretlent tartalmazó, egyenletrendszert kapunk. Ez kézi számítással már megoldhatatlan, ezért nem alkalmazhattak ilyen numerikus módszereket régebben, még ha az elméleti megoldást ismerték is. A számítógép

megfelelő fejlettségi szintjével viszont már lehetőség nyílt a minél szélesebb körű végelelemes alkalmazásokra.

A numerikus módszerek fejlődése és elterjedése szinte nem ismert határokat. A végelelemes módszer addig megoldhatatlan feladatok kezelésére adott lehetőséget. A szilárdságtan csak az egyik gyakori terület. A hőtani problémák, a dinamikus feladatok, szimulációk mind kezelhetőkké váltak. Ma már elképzelhetetlen, hogy e módszer alkalmazása nélkül tervezzenek repülőket, autókat.

Speciális számítógépes programok születtek a különböző feladatokhoz és folyamatosan fejlődnek a nagyobb kapacitás és jobb eredményesség érdekében. A számítógépnek mindent számszerűsíteni kell. Ezért nevezik numerikus módszernek. A keletkező roppant számhalmazokat csak számítógéppel lehet mozgatni, feldolgozni és kiértékelni.

A számítógép roppant sebességgel számol, és nem téved. Az előbbi példánál maradva 1000 ismeretlennél, 1000 ismeretlenes egyenletrendszer kell megoldani, ami 1000 egyenletből áll, melyek mindegyikében 1000 tag van. Ezt az  $1000 \times 1000$  méretű mátrixot kell tehát rábíznia a számítógép programjára, hogy addig adjon össze (mivel a számítógép csak azt tudja!), amíg mindegyik ismeretlent kiszámolja. Persze ekkora számhalmazt hiába nézegetnénk, ez az emberi agy számára áttekinthetetlen. Ennek a kiértékelése is olyan munka amit csak a számítógép képes elvégezni. Ehhez ismét egy alkalmas számítógépes program szükséges, ami ezt a roppant nagy számhalmazt átalakítja vizuális információvá. Ez az ún. posztprocesszor, az eredeti alkatrésze rávetít egy színes képet, ahol is az egyes színek hozzá vannak rendelve a deformáció vagy feszültség bizonyos értékeihez. Így jól látható a darabon a feszültségeloszlás, a semleges helyektől a kritikus helyekig, ami már számunkra is követhető és érthető.

A hegedű numerikus analíziséhez szükséges számítógépes háttérrel a RÁBA Rt. biztosította, ahol magam is dolgozom, és már 25 éve van a műszaki munka támogatására állandóan fejlődő számítógépes alkalmazás.

digital™



## - Hardver

-DEC 3000 munkaállomás (ld. a fotón)

Az amerikai Digital Equipment Corporation óriásvállalat a számítástechnikában.

Az alkalmazott munkaállomása egy ideális alapmodell *CAD* szoftverek futtatására.

A számítógép műszaki adatai:

Operációs rendszere: VHS

Processzor: DECchip 21064 CPU

Sebesség: 175 MHz 256 KB elsődleges cache  
memóriával kiegészítve

RAM memória: 32 Mbyte

HDD memória: 1 GB

SCSI-2 kártya a Hard Disk vezérléséhez

Grafikus kártya: 2D, 8 síkú, 1280x1024 felbontású

Ethernet interface

Nagysebességű adatátviteli ISDN port

EIA 232-es vonalcsatlakozó

Monitor: 21"-os színes

-Hewlett Packard Design Jet 230 plotter

-Hewlett Packard Desk Jet 670C színes nyomtató

-Háttértár: Digital Storage Expansion VAX 4000-100

Végeselemes futtatásra használt számítógép:

-Silikon Graphics Indigó R4000

RAM 80 Mbyte

-Hálózati kiépítettség

# CLASSIC CRAFTSMANSHIP FOR STATE-OF-THE-ART CADD/CAM/CAE

MCS, first in mechanical CADD/CAM, presents another software classic: ANVIL-5000® version 2.0, the most comprehensive 3-D mechanical CADD/CAM/CAE system in existence. ANVIL-5000 runs on more than 100 computer models, from mainframes to PCs. Its features include:

**Modularity:** Start with a stand-alone wireframe-modeling and drafting system and grow into a networked multi-user system with surface and solids modeling, finite element pre- and post-processing, numerical control, and specialized interfaces.

**Integration:** ANVIL-5000 unites all its modules in a single database, with immediate access to all functions at all times.

**Programmability:** GRAPL IV™ (new in version 2.0) is a Fortran based programming language that provides the most powerful tools available for parametric design, special applications, and custom interfaces.

**The Richest Construction Capabilities:** ANVIL-5000 has the most construction options of any CADD/CAM/CAE package. Create everything from points to freeform sculptured surfaces and solids. Plus, multiple definition methods let you choose the one that is best for your design.

**Associativity:** Dimensions, the 2-D drawing layout and numerical control are all fully associated

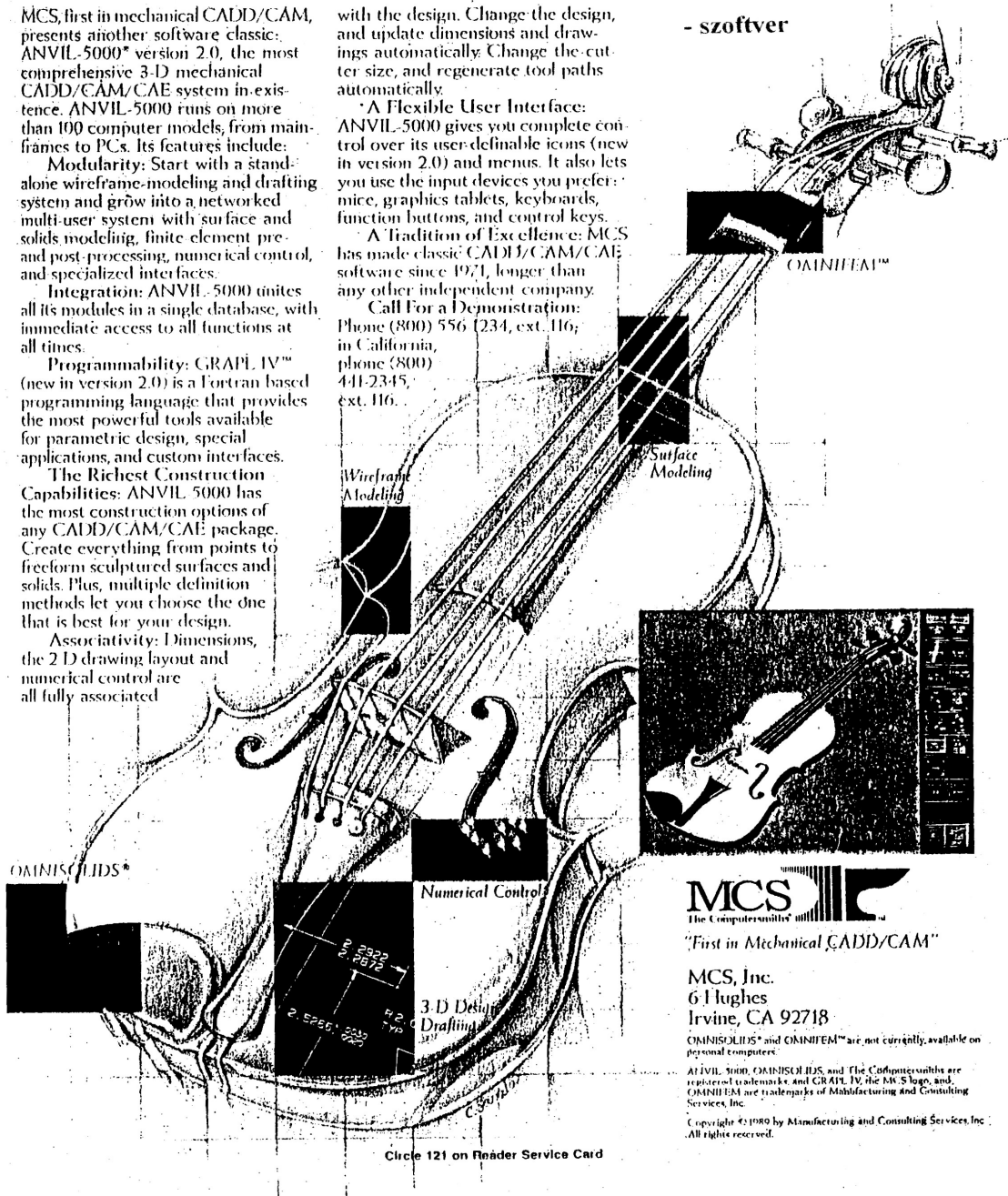
with the design. Change the design, and update dimensions and drawings automatically. Change the cutter size, and regenerate tool paths automatically.

**A Flexible User Interface:** ANVIL-5000 gives you complete control over its user-definable icons (new in version 2.0) and menus. It also lets you use the input devices you prefer: mice, graphics tablets, keyboards, function buttons, and control keys.

**A Tradition of Excellence:** MCS has made classic CADD/CAM/CAE software since 1971, longer than any other independent company.

**Call For a Demonstration:**  
Phone (800) 556-234, ext. 116;  
in California,  
phone (800)  
441-2345,  
ext. 116.

- softver



**MCS**  
The Computerized Mill  
"First in Mechanical CADD/CAM"

MCS, Inc.  
6 Hughes  
Irvine, CA 92718

OMNISOLIDS® and OMNIFEM™ are not currently available on personal computers.

ANVIL-5000, OMNISOLIDS, and The Computerized Mill are registered trademarks. And GRAPL IV, the MCS logo, and OMNIFEM are trademarks of Manufacturing and Consulting Services, Inc.

Copyright © 1989 by Manufacturing and Consulting Services, Inc. All rights reserved.

Circle 121 on Reader Service Card

## - Szoftver

Az emberi társadalom eddigi történetében több szakaszt az adott korra jellemzően felhasznált nyersanyagról neveztek el. Így volt kőkorszak, bronzkorszak és vaskorszak. A közelmúlt a műanyag korszaké, de mintha már elhagytuk volna a "nyersanyagok korát" és beléptünk volna az "információ korába", mert már nem a nyersanyag-felhasználás milyensége a gazdasági fejlettség mutatója, hanem a felhasznált programrendszerek jellemzik legjobban egy adott terület színvonalát. A számítógéppel támogatott tervezés azaz a CAD rendszerek ilyen meghatározói a mai ipari és tudományos tevékenységnek.

Mivel az analizált hegedűmodell ilyen rendszeren készült, röviden szóljunk a CAD-ról (Computer Aided Design)

A számítógéppel segített tervezés egy olyan számítógép bázisú rendszer, amelynek segítségével egy termék létrehozási koncepciójából kiindulva a teljes műszaki terv a részletes megvalósítási lehetőségekkel együtt elkészíthető.

A CAD által átfogott technikai tevékenység két fő kategóriára osztható:

- tervezés
- tervelemzés

A *tervezés* elsősorban a tervezendő termék geometriai alakjának megalapozására, továbbá az anyagkiválasztásra és a gyártás-előkészítésre irányul. A CAD-ban a műszaki információk számítógéppel történő kezelésére grafikus rendszereket alkalmaznak, ezekből számunkra most a FEM-el való kapcsolat az érdekes.

A *tervelemzés* a matematikai modellezési technikákat foglalja magában úgy, hogy elméleti úton meghatározza a termék várható működési tulajdonságait. Ide tartozik a termék feszültségállapotának, rezgéstani viselkedésének *termodinamikai*, hőátviteli és egyéb tulajdonságainak vizsgálatára szolgáló vége-selemes módszer. Ide sorolhatók a *kinematikai* szimulációs programok is, amelyekkel alkatrészek mozgásszimulációját lehet elvégezni.

### Grafikus rendszerek

A műszaki információkat általában műszaki rajzok, tervek formájában adják meg. A grafikus rendszerek szerepe a rajzok egyszerű létrehozásától a műszaki adatoknak a CAD-rendszerbe való beviteléig terjed. Ezeket a műszaki adatokat a legkülönbözőbb mérnöki feladatokhoz lehet felhasználni.

A számítógéppel segített tervezésben (CAD) fontos szerepet játszik a létrehozandó alkatrészek geometriai jellemzőit leíró ún. *geometriai modell*. Számos konstrukciós számítás is (pl. térfogat, súly, súlypont, *innercianyomaték*) a geometriai adatstruktúrából előállítható adatokon alapul.

A geometriai modellezés fejlődése során különböző modellezési elvek és eljárások alakultak ki. Az egyszerűbb geometriai modellezők nem teszik lehetővé összetett jellemzők meghatározását. Az igényesebb geometriai modellezők viszont jelentős számítástechnikai erőforrásokat igényelnek (nagy memória kapacitás és műveleti sebesség, intelligens program, nagy felbontóképességű megjelenítés stb.). Ma már ezek egyre jobban általánossá válnak, így egyre könnyebben elérhetőek.

A geometriai modellezési módszerek fajtái:

- rajzmodellező
- drótmodellező
- felületmodellező
- térfogat- vagy testmodellező rendszerek.

A *rajzmodellezés* 2D grafikus ábrák, műszaki rajzok létrehozására alkalmas.

A *drótmodellezők* már térbeli alakzatok megfogalmazására voltak képesek oly módon, hogy a kontúrokat, éleket írták le térbeli vonalakkal.

A *felületmodellező rendszerek* többnyire négyoldalú elemi felületek egymás mellé helyezésével írják le a testet. A fejlettebb felületmodellező rendszerek igazi előnye, hogy segítségével az ún. szabadformájú felületek is létrehozhatók és kezelhetők (ilyen egy hegedű is). Ezeknek a rendszereknek a hátránya a testmodellezővel szemben, hogy nem a csúcsok, lapok, élek struktúráját, hanem a közös határoló görbéik mentén egymás mellé helyezett felületek adatait tárolják. Ez a felületek áthatásának meghatározásánál jelentkezik hátrányként (pl. f-nyílások kialakítása). A felületmodell ennek ellenére számos alkalmazást tesz lehetővé és bonyolult feladatok megoldásához képes modellalkotásra. Ilyen ismertebb felületmodellező programcsomagok az elterjedt Auto-CAD, az általunk használt ANVIL, EUKLID stb.

A számítógépes geometriai modellezés legfejlettebb szintje a *testmodellezés*, amely a modellezett test geometriáját teljesen leírja, azaz a modell alapján a test valamennyi geometriai és topológiai jellegű adata kiszámítható. A testmodellezésnél egyszerű testekből kiindulva - hasáb, henger, kúp, gömb, tórusz - különböző transzformációk és halmazműveleti operációk segítségével igen összetett testek grafikus megjelenítése, nézeti és metszeti képek előállítása lehetséges. A perspektivikus, takartvonalas ábrázolás, árnyékolt képek sőt újabban színes fényeffektusok, tükrözés, csillogás alkalmazása a leglátványosabb szolgáltatása ennek a rendszernek, ami a virtuális valóság megteremtéséhez vezet. Természetesen a programok által nyújtott lehetőségek növekedésével, arányosan nő a hardver bonyolultsága is.

Ilyen program a Pro-ENGINEER.

A számítógép nem tud önmagától hegedűt rajzolni. A gép számára a hegedűalakot *digitalizálni* kell, ami azt jelenti, hogy a geometriáját jellemző pontjainak koordinátaival, a közbenső görbéket, valamint a felületeket pontos matematikai függvényekkel kell megadni. Ezáltal ismét egy hatalmas számhalmaz keletkezik. Ez a digitalizálás megint nem egy olyan feladat, amire az ember jószántából vállalkozna. Ezért megint számítógépes programot hívnak segítségül, mégpedig egy 3D-ben rajzoló programot, mint az ANVIL 5000. A program kezeli ezt a számhalmazt és a képernyőn megjelenít egy hegedű alakot, amit a bevitt adatok alapján rajzol meg. A szemléletes megjelenítés teszi lehetővé, hogy az ember gép párbeszéd létrejöjjön.

(A feladat elkezdésekor még Pro/Engineer program nem állt rendelkezésre.)

### **ANVIL 5000 - MCS (Manufacturing Computer System)**

A *CAD/CAM/CAE* rendszerek alkalmazásának érdekes példáját mutatja az a kép ( ld. 13.old. ), ahol az ANVIL programot éppen egy hegedűrajzzal reklámozzák, érzékeltetve a program kifinomultságát és alkalmazhatóságának széles körét, amiben még a művészetek sajátos területeinek is helye van.

#### **Áttekintés**

Az MCS-től származó ANVIL 5000 számítógép független, integrált, moduláris, 3 dimenziós tervező, ellenőrző és megmunkáló rendszer, főleg gépészeti alkalmazásokra. Az egyik legteljesebb és legátfogóbb rendszer.

Vegyük sorba mit is jelentenek a fenti jelzők.

Mivel az ANVIL 5000 számítógép független, ezért valamennyi nagygépes rendszeren működik, beleértve a nagyteljesítményű személyi számítógépeket és a nagygépes hálózatokat is. Ha több, különféle számítógépből álló hardver platformunk van kiépítve, akkor az alkatrészek file-jait minden fordító, konvertáló program használata nélkül át tudjuk vinni az egyik gépről a másikra.

Mivel az ANVIL 5000 integrált, így valamennyi funkció bármikor elérhető, fordító, másoló vagy újratöltő használata nélkül. Az adatok az ANVIL 5000-ben dupla pontosságú, 14 karakteres számábrázolású adatbázisban kerülnek eltárolásra.

Mivel az ANVIL 5000 moduláris, így csak azokat a részeit kell megvásárolni és telepíteni, amikre szükségünk van. Nem kell kompromisszumokat kötni és a jövőbeni továbbfejlesztésnek sincs korlátja.

A teljes ANVIL 5000 rendszer a következő hét programmodulból áll.

### 1. DESIGN/DRAFTING (tervezés/rajzolás)

Ez a tervező-rajzoló modul képezi az ANVIL 5000 rendszer magját. Segítségével különböző tervezési feladatokat lehet megoldani, mint pl. egyedi alkatrészek két- vagy három dimenziós (2D-3D) műszaki rajzát, összeállítási rajok szerkesztését. A rajzokat gépészeti vagy egyéb műszaki kiegészítésekkel, méretezéssel, rajzjelekkel, szimbólumokkal láthatjuk el különböző szabványos előírások szerint (ISO, DIN, ANSI, BSI stb.)

Az ANVIL 5000 azonban több, mint egy elektromos rajztábla. A kétdimenziós rajzok is tulajdonképpen a háromdimenziós térben készülnek de z-irányú elmozdulás nem történik. A rajzadási mélység értéke állandó.

Ha az egyes pontokhoz harmadik koordináta értéket is rendelünk, akkor a síkból kilépünk a térbe, s az ún, dróthálós megfogalmazáshoz jutunk, amire már térben felületeket is fektethetünk. A térbeli görbe- és felület-elemek nagy választékával szinte minden alakzat pontos térbeli felületmodellje leképezhető, megfogalmazható, létrehozható, leírható. Természetesen ezekhez a felületekhez nem rendelhető még anyagi tulajdonság, de az igen, hogy a felület melyik oldala néz befelé, a test felé és melyik kifelé a környezet felé. A felületek megjeleníthetők paraméteres vonalaikkal, de mód van arra, hogy a térben elhelyezett fényforrásról a fény-visszaverődési törvényeket követve egy árnyékolt és fénylő, tükröződő felületmegjelenítés történjen. Ez igen szemléletes testábrázolást ad (ld. 32-36 oldalon lévő ábrák).

### 2. GRAPL IV (grafikus leíró nyelv)

Az ANVIL 5000 tartalmaz egy bármikor lehívható, menüvezérelt belső grafikus leíró nyelvet, amellyel a felhasználó által készített, előre programozott rajzi objektumok hozhatók létre, pl. paraméteres rajzok, csapágyrajzok, csavarrajzok, szabványos alkatrészek rajzai stb.

A felhasználó által készített GRAPL IV programok futtathatók az ANVIL 5000 szoftveren belül, miközben a programozott rajzadási tevékenységet fogja végrehajtani. Menü-rendszerek és ikonok is definiálhatók.

### 3. EXTENDED GEOMETRY (kiterjesztett térgeometria)

Ez a modul alkalmazza a háromdimenziós görbék (spline-ok), az analitikus térgörbék, szabad formájú felületek stb. létrehozásához szükséges funkciókat. A rendszer segítségével geometriai és műszaki számítások is elvégezhetőek illetve tömegadatok elemzése. ( pl. súlypont, felület, térfogat, másodrendű nyomatékok stb.)

#### 4. OMNISOLIDS (testek, alapelemek)

Az ANVIL 5000 ezen modulja segítségével hozhatók létre a testmodellek, egyrészt geometriai primitívekből, Bool algebrai műveletekkel, másrészt már korábban elkészített drótváz vagy felületmodellekből.

Mivel a gyakorlati alkalmazásokban ennek a modulnak kiforrotlansága miatt másodlagos szerep jut, ezért az ANVIL CAD/CAM szoftver alapvetően felületmodellező rendszernek tekinthető.

#### 5. OMNIFEM (végeselemes modul)

Végeselemes elő- és utófeldolgozó modul (pre- és posztprocesszor), amellyel végeselem-modell (végeselem háló, anyagtulajdonságok, peremfeltételek, terhelések, megfogások) hozható létre, a már kész geometriai modell alapján, bármely végeselemes program számára (pl. a használt NASTRAN vagy ASKA). Valamint elvégzi a számolt eredmények vizuális megjelenítését is.

(Megjegyzés: A szakdolgozat készítése során az eddig felsorolt modulokat kellett használni. A teljesség kedvéért megemlítjük a többi modult is, amelyek a megmunkáló gépek vezérléséhez, szerszám pályák meghatározásához szükségesek.)

#### 6. CAM (megmunkáló modul a 2.5, 3 valamint 5 tengelyű NC megmunkáláshoz.)

A rendszer igazi előnye az elkészített modell megmunkálásában rejlik. Ezen műveletek között megtalálható a kivágás-lyukasztás, fúrás, esztergálás, huzalos szikraforgácsolás és marás.

A fentiek azt jelentik, hogy a hegedűről elkészült felületmodell alapján az ANVIL-5000 képes olyan programot generálni, ami úgy vezérelne egy NC szerszámgépet, pl. egy többtengelyes fúró-maró-művet, hogy az fából, tökéletes pontossággal kimunkálná a tetőt, hátat, de ha modellezve lenne akkor a csigát is. (Megjegyzem, hogy a program ilyen felhasználása nem volt céлом és a magas gépóra költség miatt nem is gazdaságos hegedű előállítására.)

#### 7. APPLICATIONS- INTERFACES modul (felhasználói érintkező felület)

Az ANVIL 5000 más CAD rendszerekkel való kommunikáció céljára számos lehetőséggel rendelkezik. Tartalmaz ún. szabványos interfészeket (IGES, VDAFS, DXF stb.) és rendelkezésre állnak közvetlen interfészek is (pl. az OMNIFEM modul esetén említett NASTRAN interfész).

Felhasználói interaktív felület.

Felhasználói felületnek nevezzük azokat a képernyőn látható képi és eszköz adottságokat, amellyel a program használó kommunikál a programmal, azaz adatbeadást, parancsokat, irányítást közölhet a számítógéppel és az eredményekről, a program működéséről, üzenetekkel tájékoztatva van.

Az ANVIL 5000 menü- és *ikon*vezérelt párhuzamosan. A felhasználó bármikor tetszés szerint menüpont kijelölésével, vagy ikon választással indíthatja a további tranzakciót. A programmal folytatott kommunikáció interaktívnak tekinthető, mert minden parancsválasztás, vagy adat beadás azonnal visszajelzést ad, a program működéséről is jelzést kapunk, így a kommunikáció kétoldali.

Az alapértelmezésű ikonok átszerkeszthetők s így a felhasználó saját elképzelése szerint alakíthatja ki az ikongeometriákat s a mögöttük lévő funkciókat, egyénien kialakítva így a felhasználói környezetet. A saját megfogalmazású ikonok egész sora elmenthető, s egyetlen billentyű lenyomására behozható.

A menüpontok is átkonfigurálhatók és így a felhasználó valamennyi sajátos igénye kielégíthető. A GRAPL IV programmal készült alkalmazások az ANVIL 5000 programon belül futtathatók, vagy menüponttal indíthatók.

Az ANVIL 5000 az adatbevitelt illetően rendkívül rugalmas. A rendszer támogatja az *egér* alkalmazást valamint a *tablet*-tet is. A képernyőn kirajzolt ún. forró billentyűk azonnali hozzáférést biztosítanak a legfontosabb rajzi funkciókhoz (pont, vonal, kör stb.) valamint az általánosan használt leggyakoribb beállításokhoz (zoom, színválasztás, vonaltípus meghatározás stb.)

Funkció-billentyűk használata is tartalommal, tölthetők meg.

Az ANVIL 5000 megjelenítő képességei.

A megjelenítés az ANVIL 5000-nél alapvetően a WINDOWS és UNIX *operációs rendszerek* kínálta ún. ablaktechnikához hasonló látványú.

A képernyő feloszlik munkafelületre és az ikonok által elfoglalt területre. A kellemes látvány érdekében minden színkombináció beállítható. Különböző nézet (előlről oldalról, axonometrikusan) állítható be, de egyidejűleg több nézet is megjeleníthető a képernyőn. A nagyításnak és kicsinyítésnek szinte nincs korlátja. Valamennyi nézetben külön-külön megválasztható a nagyítás mértéke.

A program lehetőséget ad a térben tetszőlegesen elhelyezkedő koordináta rendszerek felvételére, és ezen koordináta rendszerek közötti lépegetésre. A térbeni ferde koordináták képernyő síkjába forgatása a könnyebb adatbevitelt, ábrázolást teszi lehetővé. Az elemkijelölést szálkereszt, nyíl, valamint a kijelölt elem színváltása könnyíti meg és teszi egyértelművé.

## **-végelelemes futtatás (MSC/NASTRAN)**

MSC (Mac Noel - Schwender Corporation)

Az MSC legfontosabb terméke az MSC/NASTRAN, amely az ipari felhasználásban élenjáró végelelemes analízis program.

Olyan területeken, ahol a fejlesztés az eredmények bizonytalansága miatt dollármilliókat emészt fel, az MSC/NASTRAN újra és újra bizonyítja hatékonyságát és pontosságát. Ennek a programnak megmaradt elsősége a többi FEM program között, mert megtartotta előnyét a folyamatos fejlesztések miatt. Az új képességei a struktúra analízis algoritmusok.

Az MSC/NASTRAN széles választékát kínálja az analízis típusoknak, ide tartoznak a statikus rugalmas viselkedés, a normál móduszok, a hővezetés, az akusztikus analízis, a válaszfüggvény analízis, a tranziens viselkedés analízis, a spektrum analízis és a levegő elaszticitás vizsgálata.

Sok anyagtypust lehet modellezni, ennek szélső esetei a kompozit anyagok, és a hiperelasztikus anyagok stb.

Új fejlesztés a szuperelemek és azok szintézisének használata. Ezek, az erőteljes numerikus módszerekkel párosulva képezik az MSC/NASTRAN megalapozottságát, amely ugyanakkor minimális komputer erőforrást igényel. A szuperelemekkel a megközelítés pontossága megválasztható.

A ritka mátrixokkal való műveletek numerikus megoldása minden analízis típusban nagymértékben fokozza a megoldás sebességet és redukálja a szükséges memória helyet.

Maximum-, minimum számítások végezhetőek el a programmal.

A struktúra analízis használatához hozzáadódik az MSC/NASTRAN automatikus optimalizálási képessége. A felsorolt analízis típusokban kívánt paraméterek szerint lehet optimalizálni pl. a méreteket, súlyt, frekvenciát, elmozdulást stb. Vegyünk egy példát az adott szakterületről: Ha egy hegedűtetőtől azt kívánom, hogy konkrét számú legyen a sajátrezgése, akkor pl. a tető vastagság paraméteres megadásával a program kiszámolja az adott anyagi tulajdonságokhoz tartozó tetővastagságokat, amivel a kívánt frekvencia elérhető.

Tehát az MSC/NASTRAN olyan numerikus analízist kínál, amivel sokféle folyamat modellezhető, eredménye kiszámítható és értékelhető, amit csak igen költségigényes kísérletezéssel, tesztekkel lehetne elérni.

Az MSC/NASTRAN szorosan kapcsolódik a pre- és postprocessor programokhoz, támogatva az elő- és utámfeldolgozási lehetőségek megválasztását.

## **-megjelenítés, eredmények kiértékelése (MSC/PATRAN)**

A végelelemes eredmények kiértékelése az ún. poszt-processor programokban történik. Általában a végelelemes *pre-processor* (előfeldolgozás) és *poszt-processor* (utófeldolgozás) teendőit egy szoftver tartalmazza. Esetünkben ez a szoftver az MSC/PATRAN. A végelelemes program futása közben a NASTRAN egy ún. eredmény fájlt generál a PATRAN számára. Ezt az eredmény fájlt beolvasva a PATRAN-ba a végelelemes eredmények (elmozdulás, feszültségeloszlás, stb.) könnyen és gyorsan megjeleníthetők és ezek alapján kiértékelhetők.

Az MSC a világ vezető cége azok között, akik műszaki, komputerrel támogatott tudományos eredményekkel látják el a világot. Megoldásokat kínál a modellezésre, az elemzésre és az eredmények kiértékelésére.

Könnyen lehet használni a tervezéstől a gyártási folyamatig, szimulálva a termék teljesítményét és a gyártási folyamatot. Az MSC/PATRAN tartalmaz elő- és utó feldolgozó modulokat (pre- és postprocesszort); modellező elemzéssel, adatintegráció elemzéssel, szimulációs elemzéssel és eredménykiértékelési képességgel. A menüvezérelt grafikus interfésszel az MSC/PATRAN könnyen használható elő- és utófeldolgozó megoldást kínál. Az MSC/PATRAN közvetlen hozzáférést szolgáltat a világ vezető CAD rendszereihez és a szabványos adathalmazokhoz.

Az MSC/PATRAN az eszközök tárházát nyújtja egy új geometria felépítéséhez, vagy a meglévő geometria manipulálásához. Olyan képességekkel rendelkezik mint pl. a teljesen automatizált hálózás, a behálózott területek összekapcsolása, a csomópontok és elemek egyedi szerkesztése. A terhelések és peremfeltételek változtathatók és összekapcsolhatók a tervezési geometriával vagy az elemző modellel.

Az MSC/PATRAN hatásos eszköze az eredmények vizuális megjelenítésének. Képes meghatározni a kritikus információkat beleértve a minimum és maximum értékeket, a trendeket és a korrelációkat.

A szín-, a csoport- és az animációs technikák használata segíti megérteni az adatelemzést. Felhasználási kapcsolatot nyújt sok elemzési megoldáshoz a saját kiválasztó képességei szerint. Az MSC/PATRAN teljes integrált termékcsaládot foglal magába. Ezek: a szerkezeti analízis, a progresszív szerkezeti analízis, a hőanalízis, a fárasztásos szimuláció, az összetett réteges modellezés, az elemzések kezelése és az anyagkiválasztás.

### 3. Háromdimenziós felületmodell felépítése

#### - kontúr kialakítása

A kidolgozásra került számítógépes modell formai, geometriai paraméterei saját választásúak, szerkesztésűek (ld. az ábrát a 25. oldalon). A szerkesztés kiindulásaként Dr. Vadon Géza [9] Stradivari modelljei ("Messias" és "Vieuxtemps" hegedűk) voltak a példák, a máshol nem tapasztalt precíz szerkesztési módszer (pl. a C környékének finom követése), és a teljes geometria egzakt meghatározása miatt. A hegedűkontúr igényes kiválasztása nem a szilárdsági elemzés feltétele, hanem az esztétikáé. Természetesen hatással voltak rám más régi és mai mesterek munkái is. Elsősorban Gio Batta Morassit említeném, és nem utolsó sorban fiát Simeone Morassit, akinek formai kifinomultságát tökéletesnek tartom.

Megjegyzendő, hogy abszolút esztétikai kategóriák nincsenek. A "tökéletes" a "szép" matematikailag nem leírható fogalmak. Mi több, egy emberben is idővel változik az ideálkép, ami számára a szépet jelenti. S ebben az egyéni szabadságot fent is kell tartani.

#### - domborítás, színtvonalak megszerkesztése

Nem is hihető mennyi próbálkozás, számítás, rajzolás eredménye a kialakult görbesereg. A nehézséget nem a forma milyenségének elképzelése okozta, hanem az, hogy minden görbének matematikai függvényt meghatározhatónak kellett lennie, mert csak így lehetett a számítógéppel megrajzoltatni. A megvalósítás részletezése ezért érdemel itt helyet.

A tető és a hát domborításának meghatározásához egyenként 6 főmetszeti görbét vettem fel.(ld. a 26. oldali ábrát) Ezeket az alábbi módon határoztam meg:

(1) metszet tetőnél Sacconi könyvében [7] megadott pontokra fektetett *Spline-görbe*, matematikailag korrigálva és simítva. (ld. a 27. oldali ábrát)

(1) metszet hátnál Fibonacci-sor szerinti ponthalmazra fektetett *Spline-görbe*, ld. [6] irodalom. Ezt a görbét a szélek felé a visszahajló részen több körívvel egészítettem ki. (ld. a 27. oldali ábrát)

(2)(3)(4)(5)(6) görbéket Stradivari "Cremonese" 1715 hegedűjéről a [10] irodalomból vett görbékre fektetett *Spline-görbékkel* rajzoltam, azzal a korrekcióval, hogy az így kapott hat görbe valamint a kontúrgörbe minden szükséges helyen találkozzanak a metsződésnél egy pontban. (ld. a 28-29. oldali ábrákat)

Egy jónak és szemre szépnek tartott görbe diszkrét pontjai koordinátaival lettek a számítógépbe beadva. A pontokra megrajzolásuk után számítógéppel egy matematikailag megfogalmazható görbesereget fektettem (*Spline-görbe*).

Ezt követte a görbe korrekciós folyamata, amikor több lépésben a görbe alakjának, elhelyezkedésének kicsi változtatásával egy ún. folytonos görbéhez jutottam amely már mentes volt a mérési pontatlanságoktól. Ez akkor érhető el, ha a görbe első *derivált-görbéje* is folytonos, tehát törésmentes, sőt erősebb irányváltozásoktól is kisimított. Ez utóbbi a második derivált-görbe folytonossága esetén teljesül. Ezen korrekciók eredménye szemmel ugyan már alig követhető, kis változtatásokat okoz, de a gépi feldolgozáshoz előnyös, sőt kívánatos a görbékre fektetett felületek folytonos kapcsolódása miatt. A valóságos hegedűfaragáskor készülő felületeket is így közelítjük meg a modellel a legjobban, mert a szemmel (súroló fénnel) történő ellenőrzés során a legkisebb egyenetlenségek is meglátszanak, amiket kijavítunk, tehát jó folytonos felületeket készítünk.

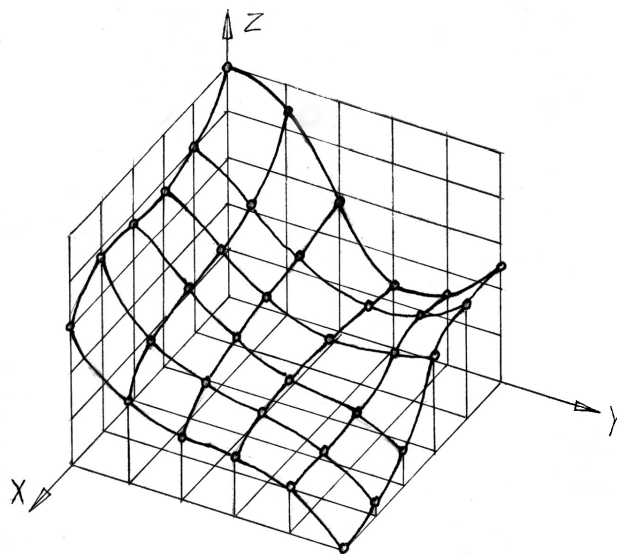
(A számítógépes modellnél használt alak és geometria a valóságban is elkészült egy hegedűn.)

A leírt görbesereg meghatározása után a kávéval érintkező alapsíkra 2 mm-es emelkedéssel fektettem a szintvonalak síkjait. E síkok és a görbék metszéspontjai adták a szintvonalak alappontjait. Ezen pontokon átmenő, kizárólag egymásba simuló körökből alakítottam ki a szintvonalakat.

(ld. a 30-31. oldal ábráit)

## - Felületek képzése

A hegedű tető- és hátfelületeit a szabadformájú felületeket követni képes ún. Bezier-felületekkel borítottuk be. A Bezier-felület 4 egymást metsző 3D-s Spline-görbére kifeszíthető felület. (ld. az alábbi rajzot)



Bezier-felület ábrázolása

- **tőkék, kávák, gerenda és lélek felületeinek meghatározása**

Ezeket az elemeket sík-, henger- és kúpfelületekből lehetett képezni.

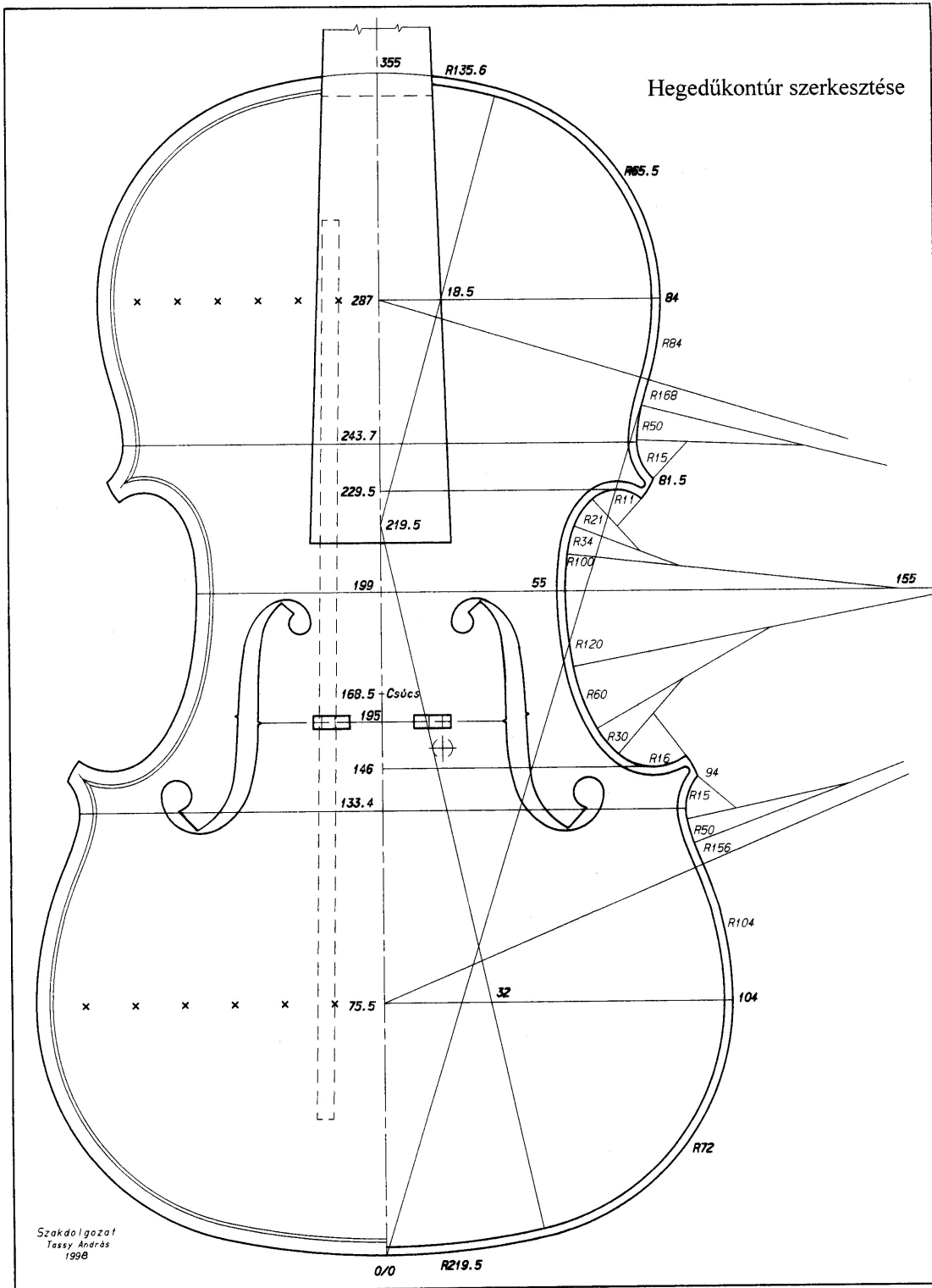
- **nyak leegyszerűsített formája**

A csigát elhagytuk, mert a szilárdság alakulásában nem vesz részt. Viszont a fogólap a nyak alsó végéig fontos teherviselő elem. A test felé nyúló része viszont (ha nem játszanak a hegedűn) terhelést nem kap, tehát a modell szempontjából elhagyható.

A következő oldalakon (32-36 old.) az ábrák ennek a felületmodellnek elkészülési fázisait tartalmazza.

Az így létrejött felületmodell (a csigától eltekintve) formailag teljesen hűen és precízen követi egy valóságos hegedű minden részletét, mind kívül, mind belül. Ugyanakkor ez a modell ebben a formában csupán vastagság nélküli, anyagi tulajdonságokat még nem hordozó, matematikailag megfogalmazott felületekből áll. Ahhoz, hogy szilárdsági vizsgálatokat lehessen végezni, ebből a papírhártyaként elképzelhető felületmodellből kiindulva, szinte erre felrakosgatva, egy másik már anyagi jelleggel felruházott modellt kellett létrehozni, és ez a végeselemes modell, ami a már említett kis anyagi kockák nagy sokaságából épül fel.

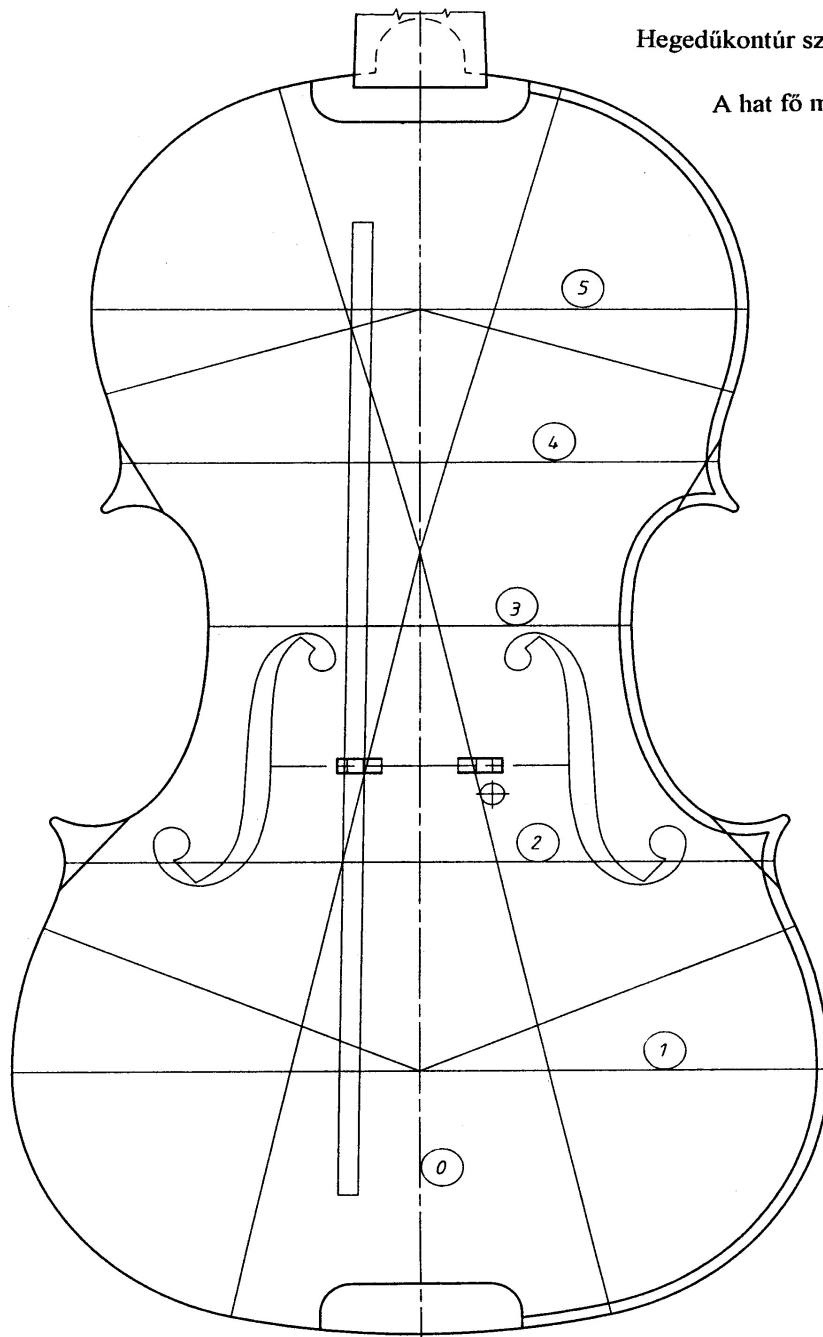
Hegedűkontúr szerkesztése



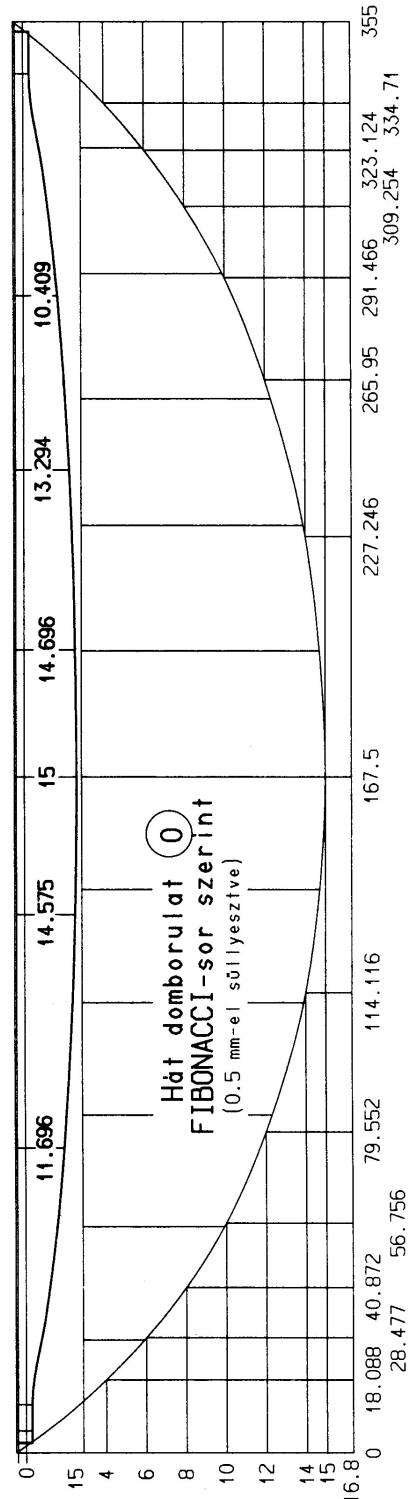
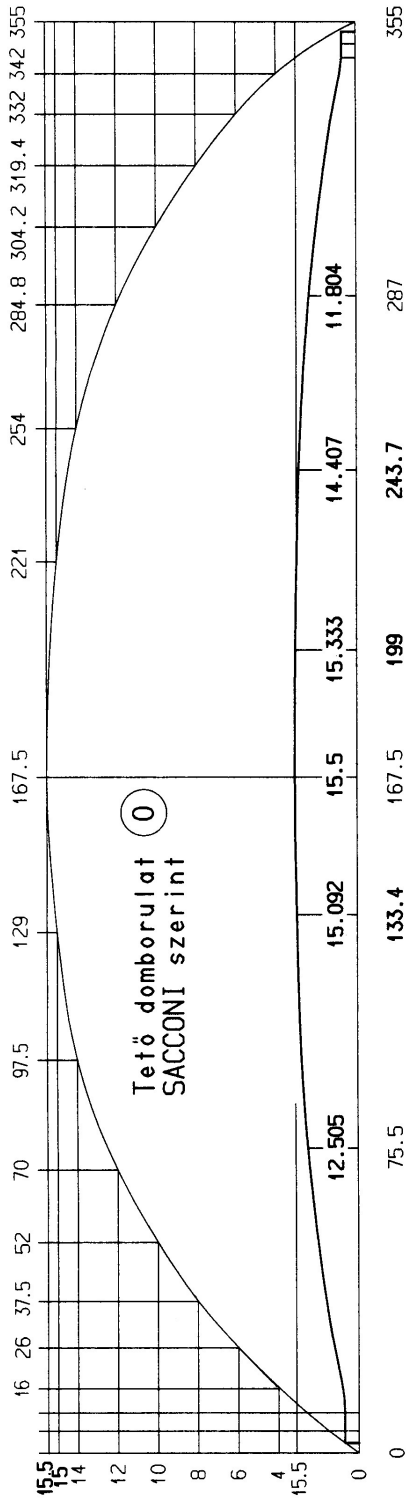
Szakdolgozat  
Tassy András  
1998

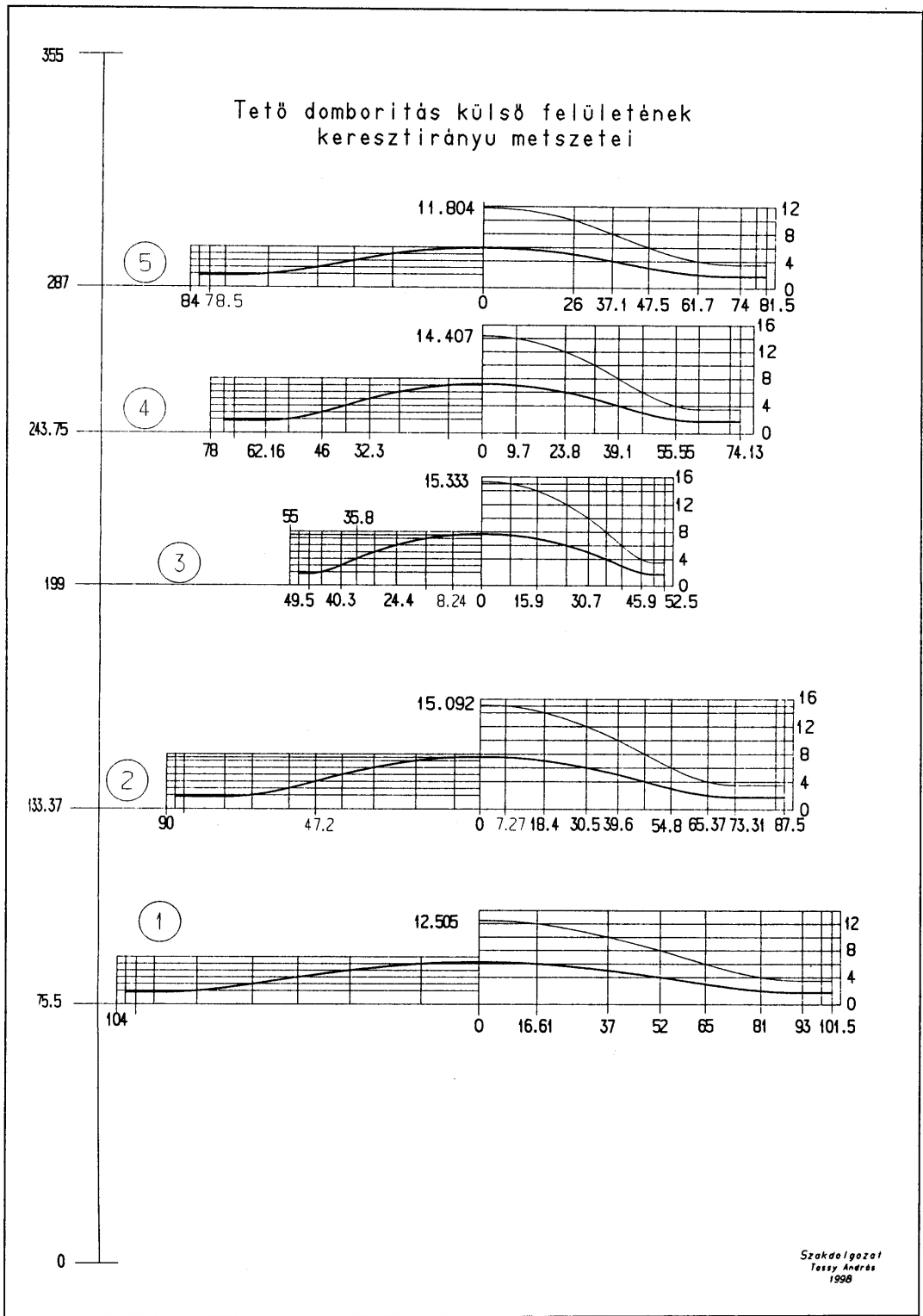
Hegedűkontúr szerkesztése

A hat fő metszet

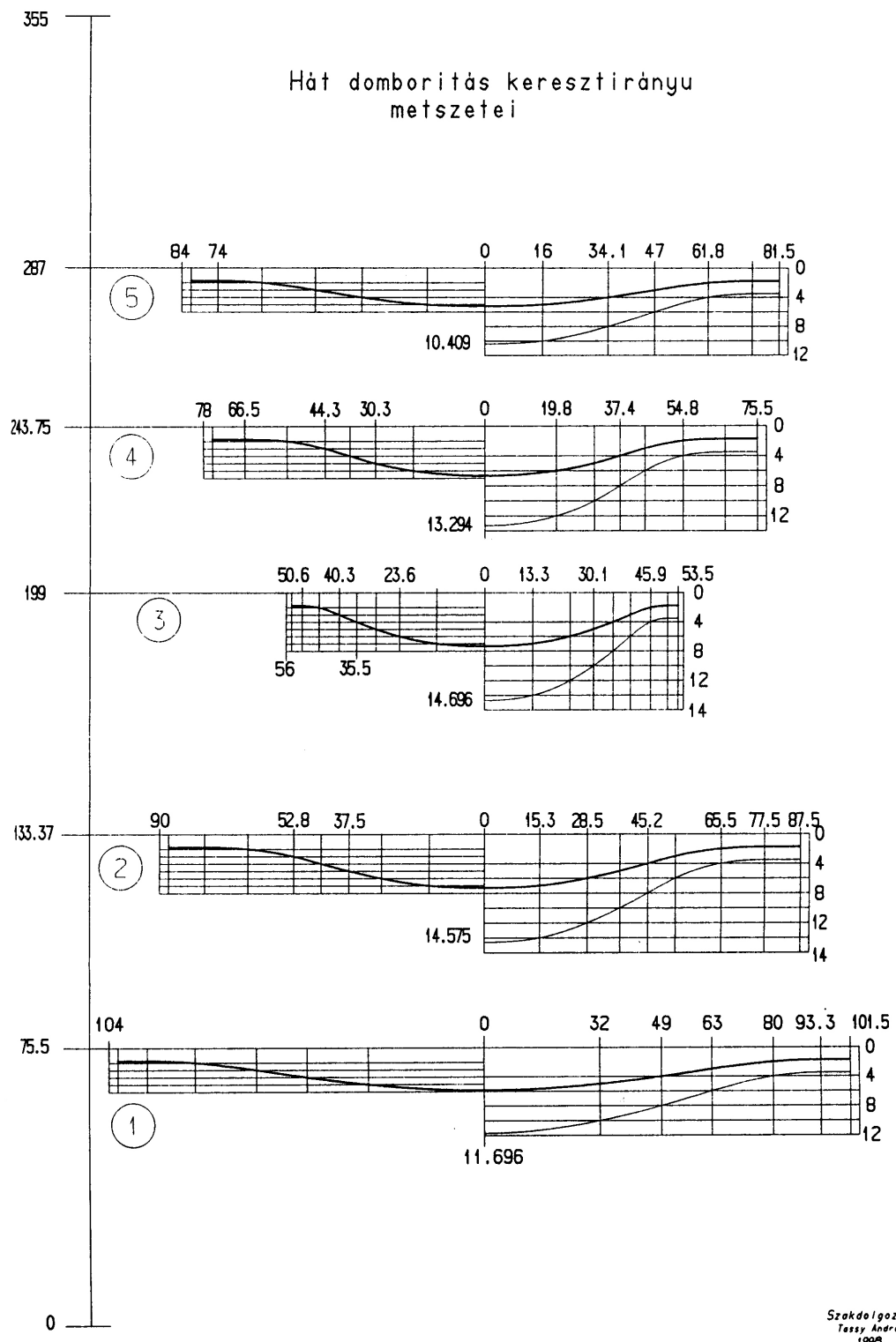


Szakdolgozat  
Tosny András  
1998



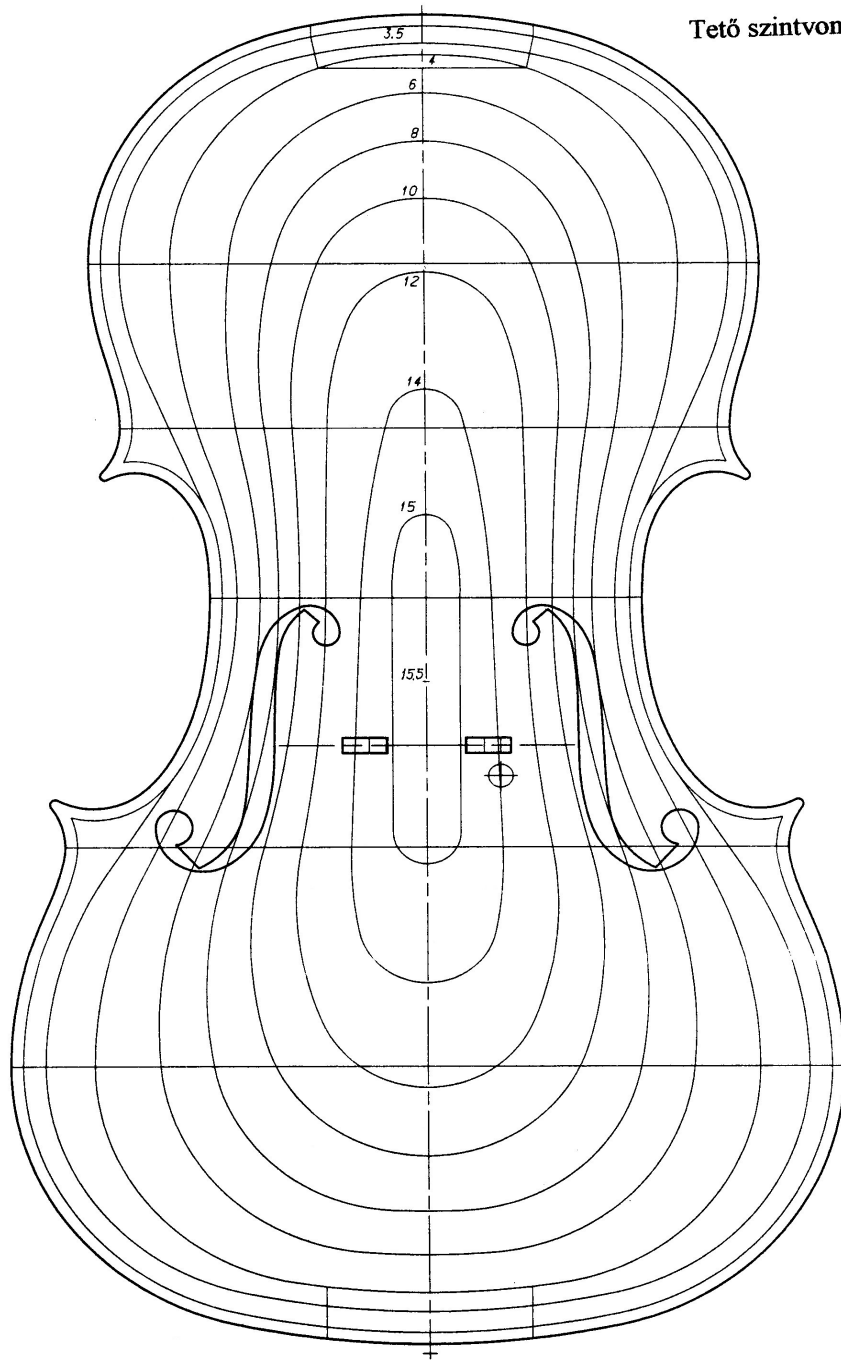


### Hát domborítás keresztirányú metszetei



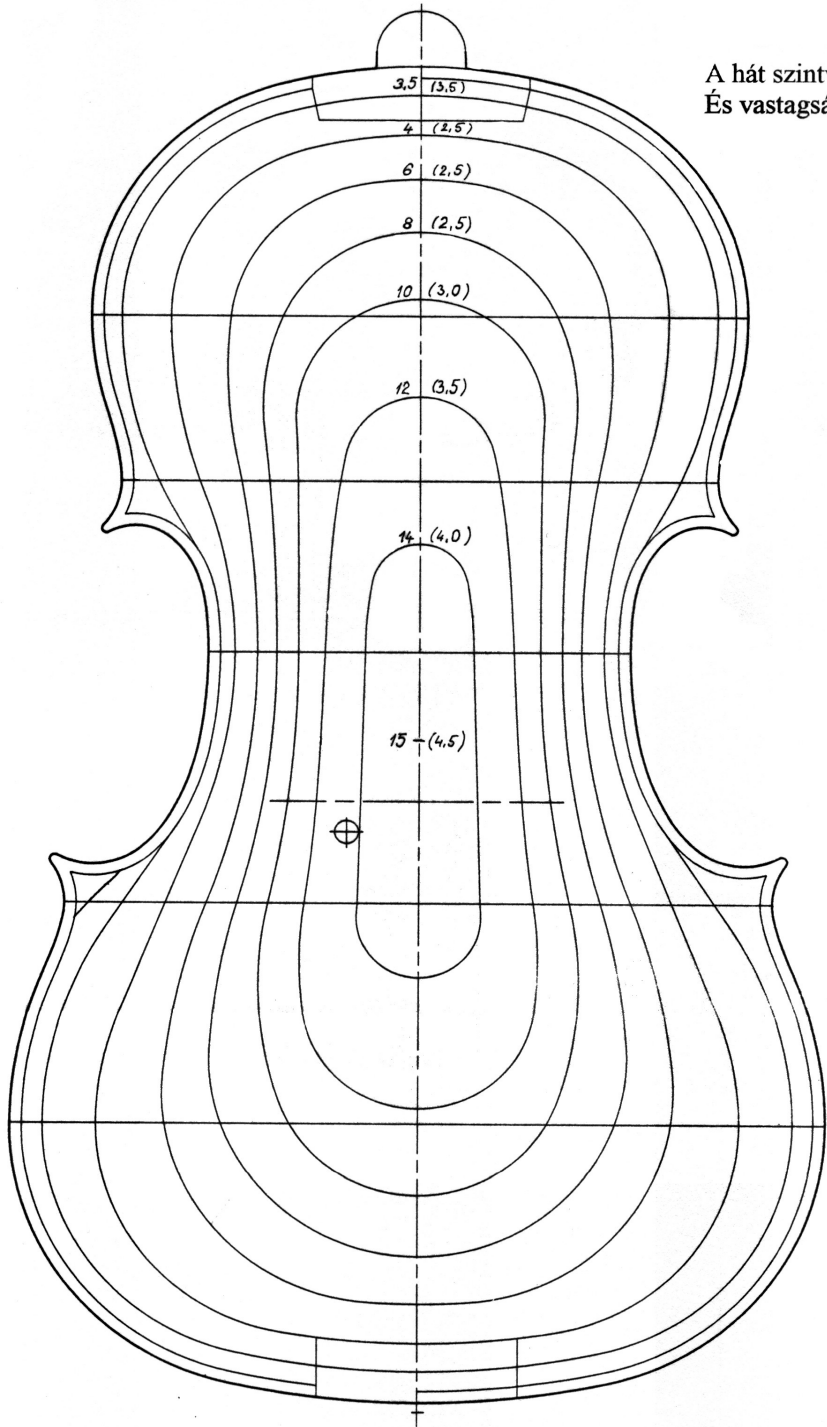
Szakdolgozat  
Tessy András  
1996

Tető szintvonalai

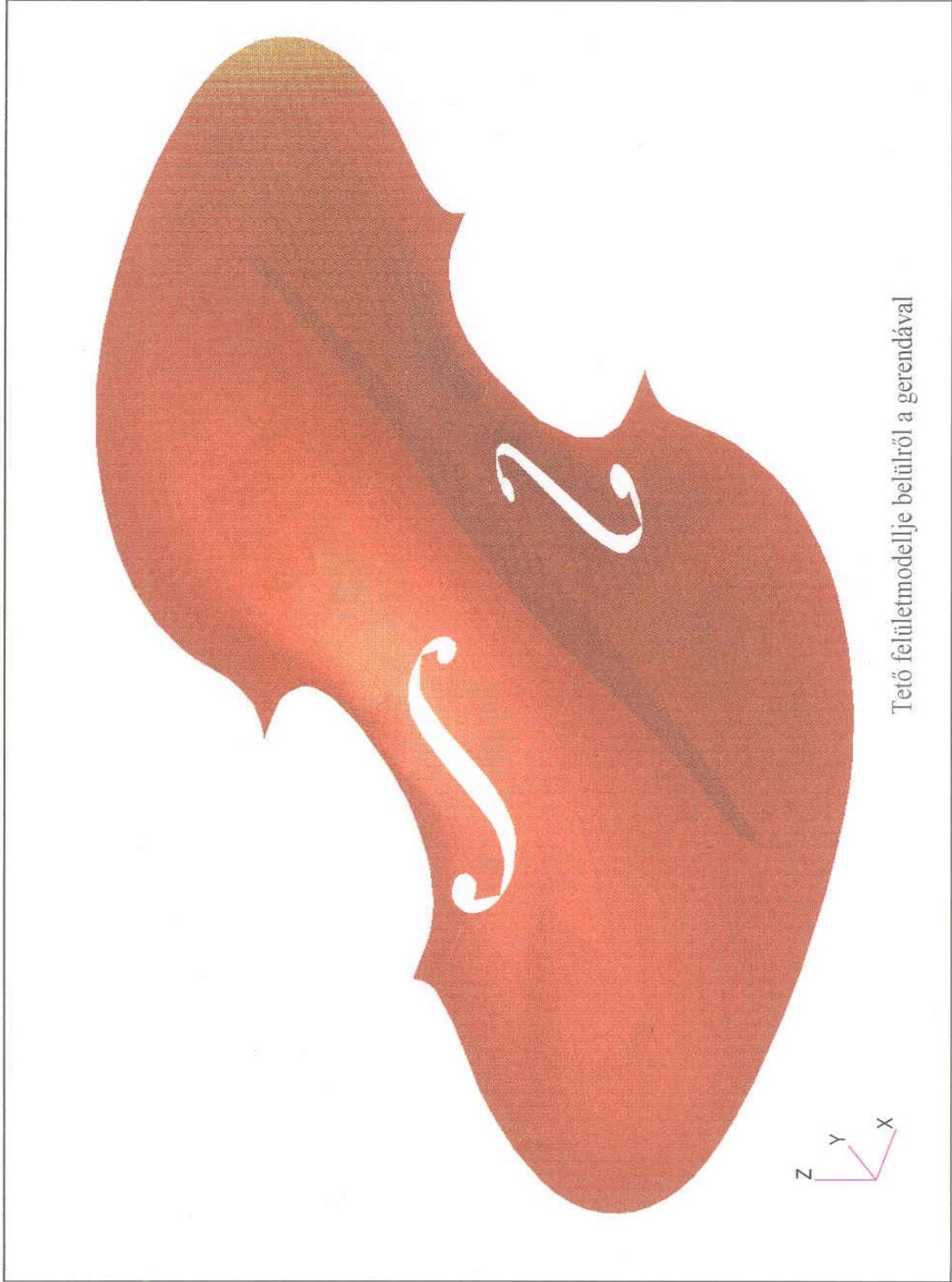


Szakdolgozat  
Tessy András  
1998

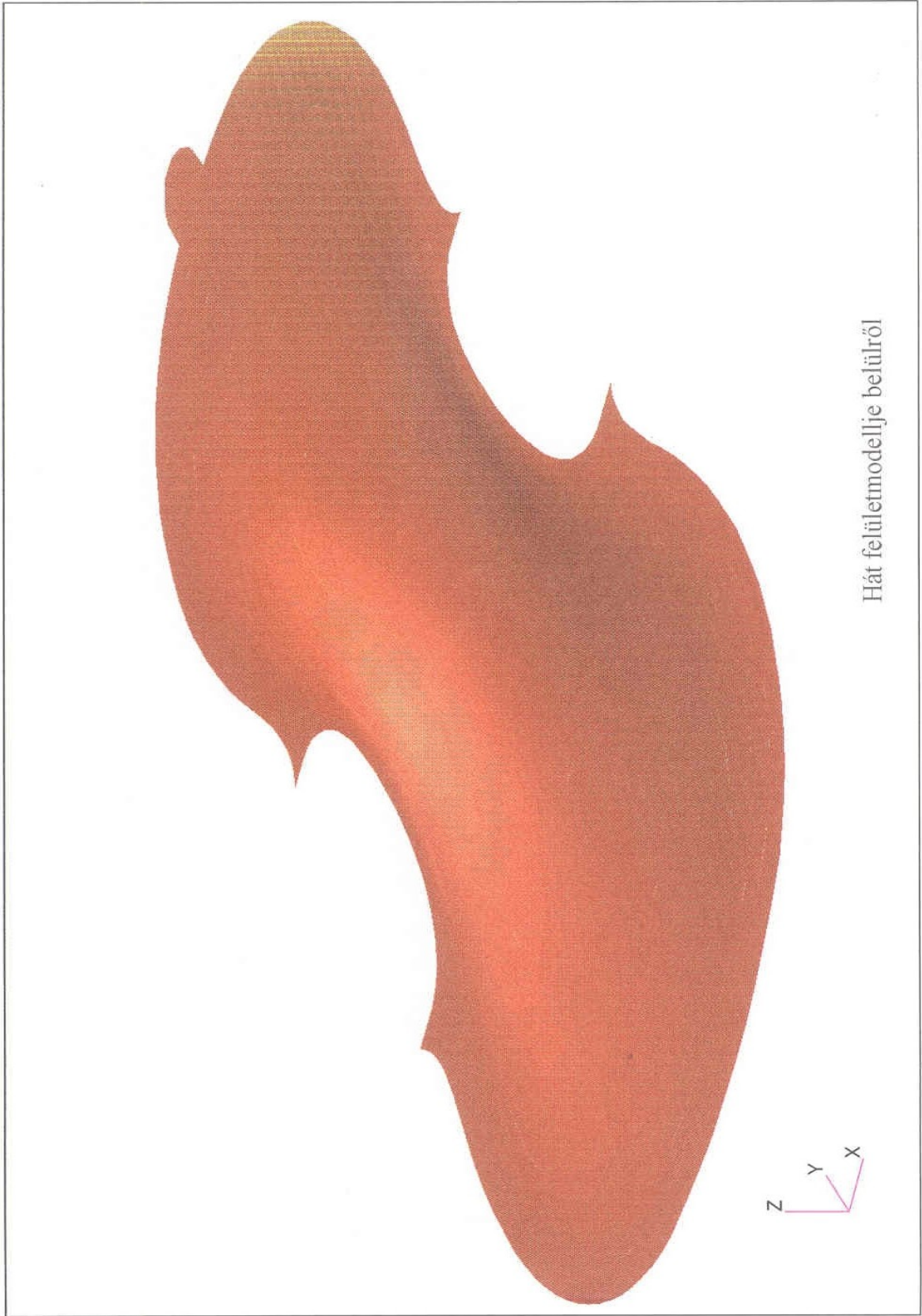
A hát szintvonalai  
És vastagságai

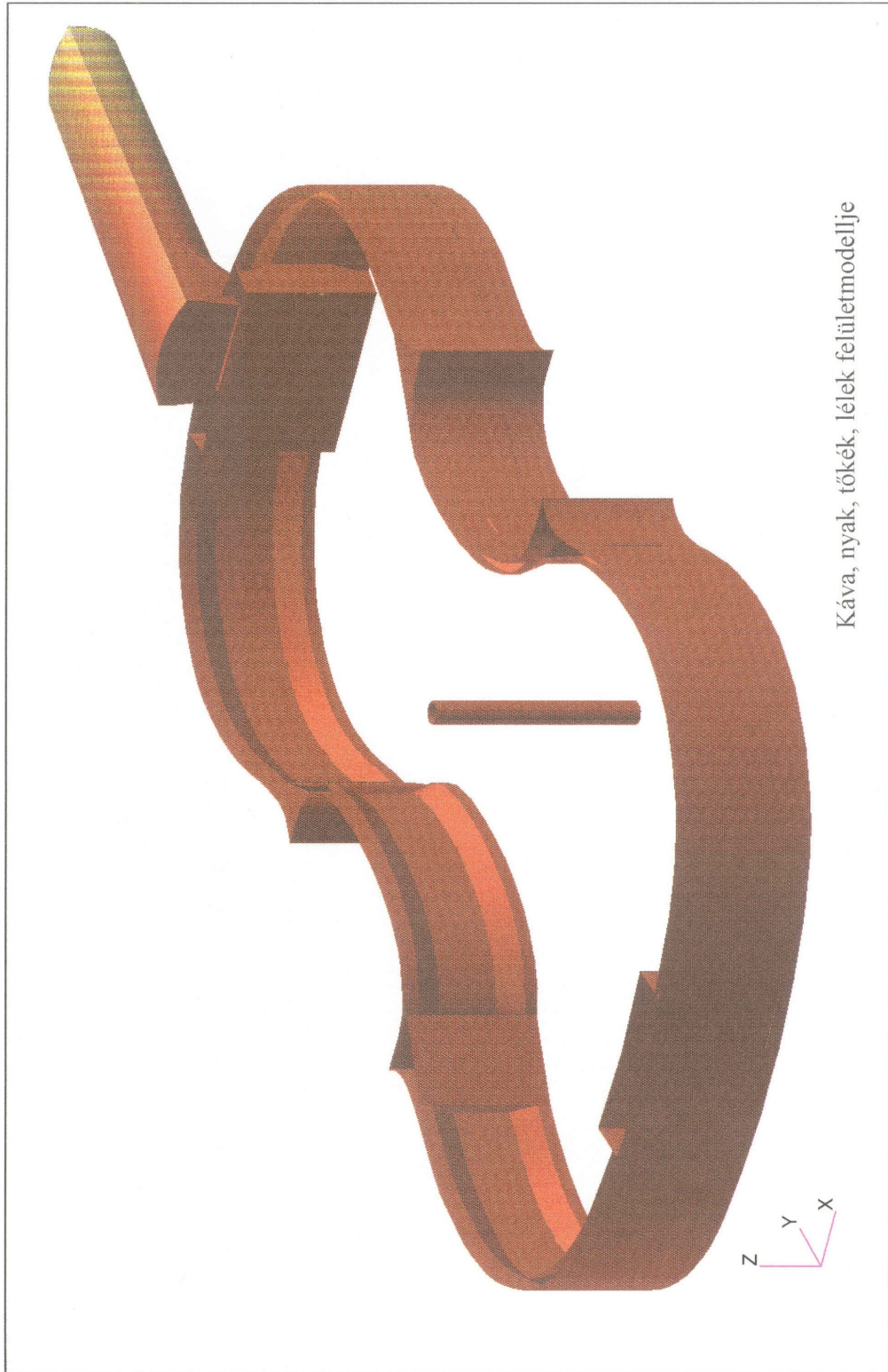


Szakdolgozat  
Tóssy András  
1998

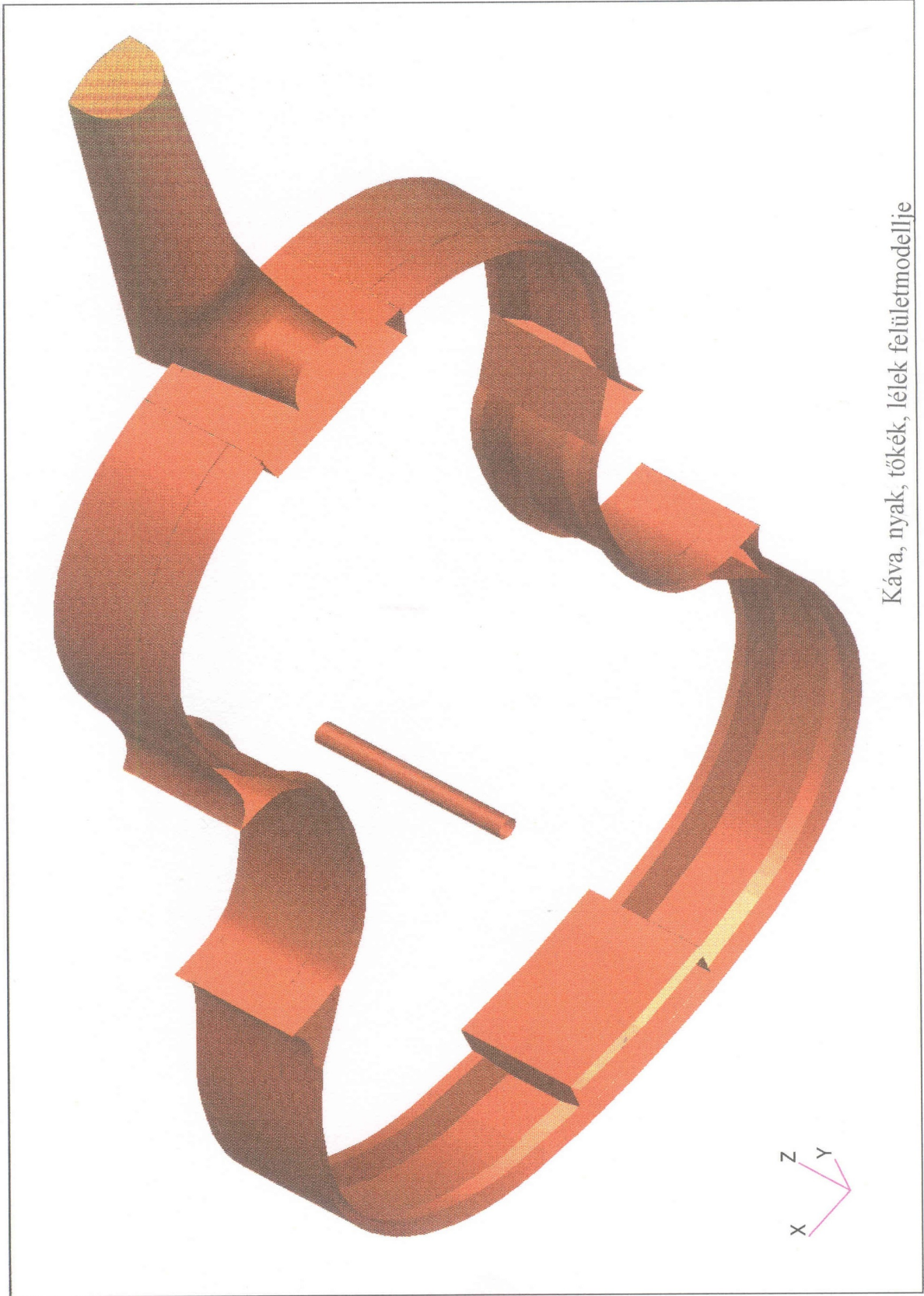


Tető felületmodellje belülről a gerendával

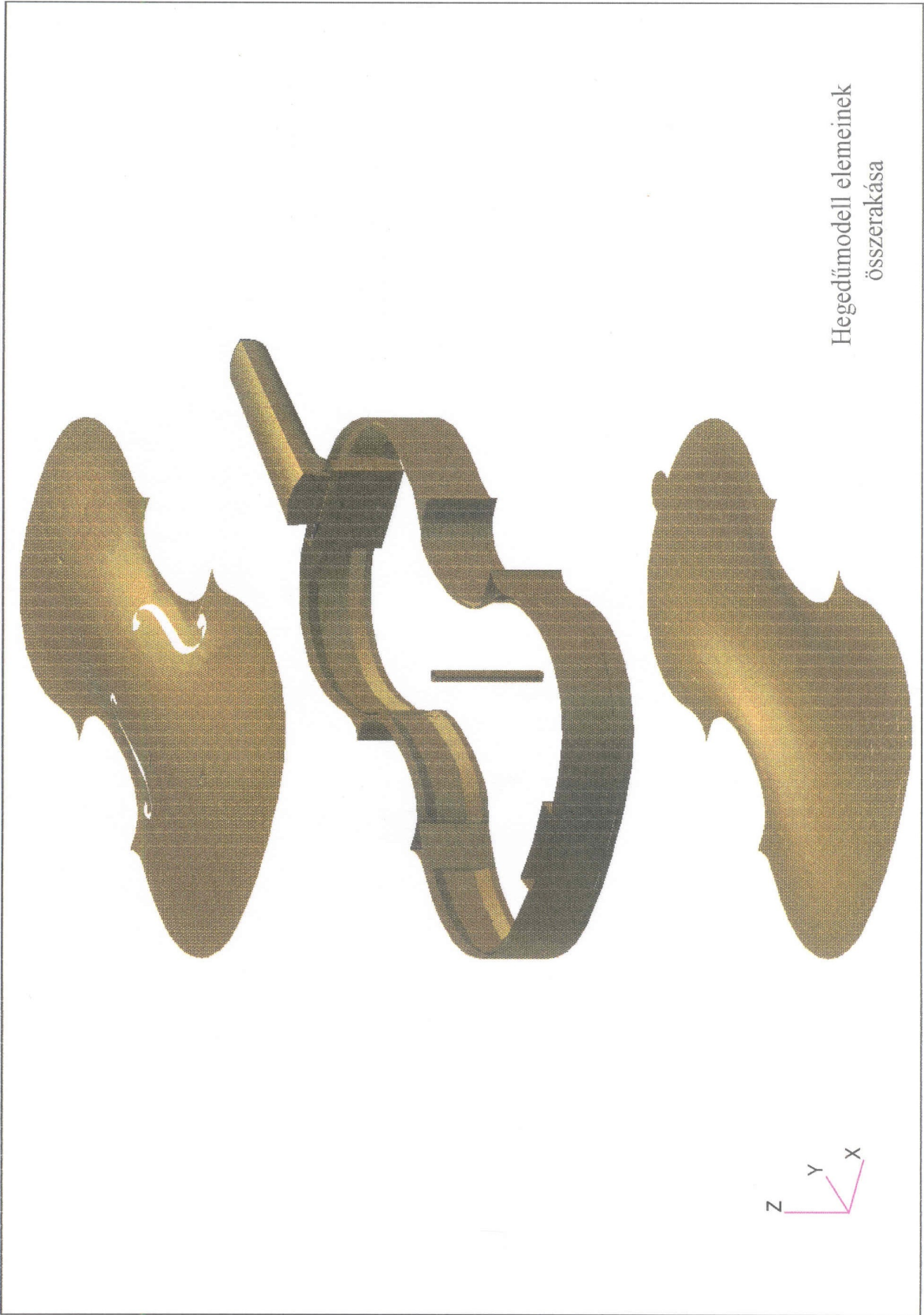




Káva, nyak, tóké, lélek felületmodellje



Káva, nyak, tőkék, lélek felületmodellje



Hegedűmodell elemeinek  
összerakása

#### 4. Végeselemes felosztás

A FEM-nek az iparban való elterjedését számítógépes, végeselemes programcsomagok kifejlesztése tette lehetővé. Az egyik ilyen programrendszer a NASTRAN volt, amelyet a NASA megbízásából fejlesztett ki, közös munkával több amerikai kutatóintézet és vállalat. A kívülállóknak rögtön felmerül a kérdés, miért van szükség a FEM alkalmazásához bonyolult és drága programrendszerre?

A végeselemes módszer általános lépései

A matematikai és mechanikai részleteket teljesen mellőzve, amelyek nem tartoznak a dolgozathoz, megjegyezzük, hogy a csomópontok elmozdulásainak segítségével a végeselem többi pontjainak elmozdulásait is ki lehet fejezni egy numerikus interpoláció segítségével. Az elmozdulásokból számíthatók az alakváltozások (fajlagos értékek). A végeselemben ébredő feszültségeket a rugalmas anyagviselkedést leíró Hooke-törvény alapján kapjuk meg az alakváltozásból.

$$\underline{\sigma} = \underline{E} \cdot \underline{\epsilon}$$

ahol a  $\underline{\sigma}$  vektor a feszültségkomponenseket, az  $\underline{E}$  mátrix pedig az anyagjellemzőket: az  $E$  rugalmassági modulusot és a  $\nu$  Poisson-számot, tartalmazza.  $\underline{\epsilon}$  pedig a fajlagos elmozdulás vektora. Az összefüggés, amely általános feszültségállapotra van felírva, formailag teljesen azonos pl. egy fémpálca húzókísérlete során a rugalmas tartományban kapott  $\sigma = E \cdot \epsilon$  összefüggéssel, csak míg az utóbbi képletbe skalár mennyiségek szerepelnek, addig az előzőben mátrixok. Érdekességnek közöljük egy anizotrop faanyag merevségi mátrixának alakját, és rugalmassági egyenletét.

$$\underline{\sigma} = \underline{C}^{-1} \underline{\epsilon} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2} & \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} & \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} & \frac{E(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2} & \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} & \frac{E}{1-\nu-2\nu^2} & \frac{E(1-\nu)}{1-\nu-2\nu^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A végeselemes módszer alapegyenlete egy elemre legegyszerűbben a virtuális munka elve alapján vezethető le. A rugalmas test egyensúlyának szükséges és elégséges feltétele, hogy a külső erők munkája a virtuális elmozdulás mentén (virtuális munka) egyenlő a testben felhalmozódott alakváltozási energia megváltozásával az elmozdulás közben. (Virtuális elmozduláson azokat az elmozdulásokat értjük, amelyeket a külső kényszerek és a szilárd testben ható belső kényszerek megengednek.)

### A FEM alkalmazásának problémái

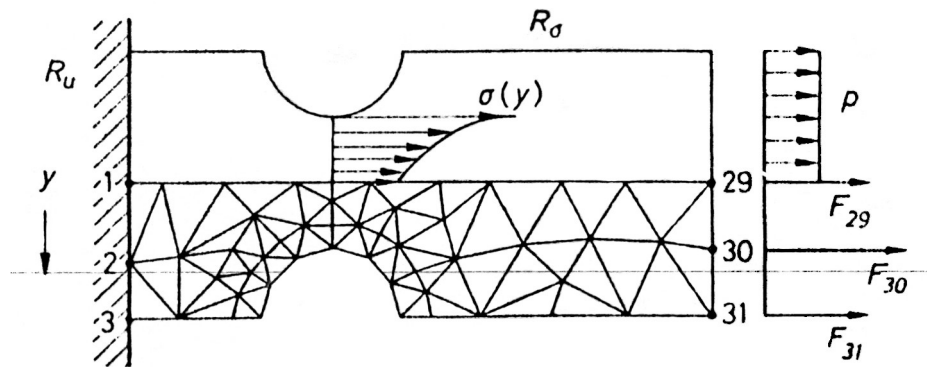
A végeselem módszer pontosságát több tényező befolyásolja. Ezek közül az első a modellalkotásnál jelentkezik, amikor a valóságos probléma mechanikai modelljét kell megadni (kényszerek, terhelések stb.). Két további alapvető tényező a végeselemes felosztás (az ún. háló) finomsága és az alkalmazott elemtípus hatékonysága. A felosztás finomsága alatt azt értjük, hogy az adott szerkezetet hány végeselemre osztjuk. A módszer annál pontosabb eredményt ad, minél több részre bontjuk a vizsgált testet. Az elemtípus hatékonysága az (1) összefüggésben leírt mátrixban szereplő interpolációs függvények fokszámával egyenesen arányos.

A fentiek alapján nyilvánvaló, hogy egy bonyolult geometriai kialakítású szerkezet analízise során a megoldandó egyenletrendszer rendkívül nagy méretű lehet és a számítási idő is tetemes. Az ismeretlenek nagy száma nem jelent problémát a modern, nagy teljesítményű számítógépeknek. A határt a tárkapacitás, és a műveleti sebesség szabja meg.

Amíg a számítógépes grafika fejlettsége nem volt megfelelő, addig a FEM alkalmazását nagyon nehezítette az adatbevitel és az eredmények kiértékelése, mert ezek óriási számhalmazok voltak. Ugyanis a szerkezet geometriáját csak a csomópontok sorszámokhoz rendelt koordinátáinak numerikus inputjával tudták megadni és az eredményeket is a csomópontokban kapták meg számszerű formában.

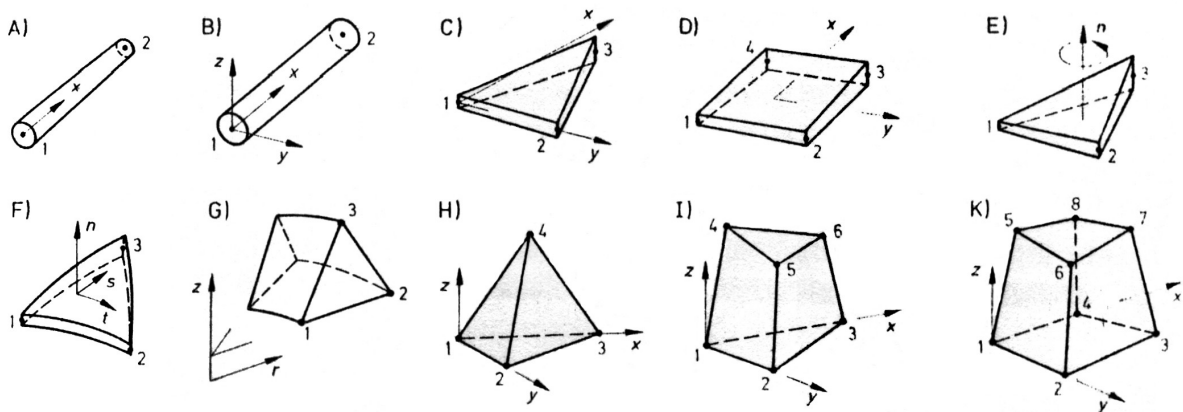
A végeselem programhoz illesztett grafikus rendszerek kifejlesztésével az adatbevitelt és az eredmények vizuális megjelenítését grafikus display-n lehet elvégezni. (Megjegyzendő, hogy a legmodernebb eszközök között már olyan digitalizáló berendezések is vannak, amelyek a testet letapogatva a mérési pontok koordinátáját automatikusan lemérik, számszerűsítik és számítógépben tárolják. Így pl. szoborszerű testek modellezhetők nagy pontossággal, hiszen a mérési pontok számszerű növelésének szinte nincs korlátja.)

- Egy példán mutatjuk be a végeleemes felosztást. Az ábrán látható konzolon a bemetszések miatt nem egyenletes a húzófeszültség eloszlása, hanem feszültségcsúcs keletkezik. Ezt analitikai úton nem lehet kiszámítani, csak kísérleti eredményekből következtethetünk a nagyságára. Az ábra alsó része mutatja azt a modellt, ami a végeleemekből épül fel, s alkalmas ennek a feszültségcsúcsnak megközelítő számítására. A választott elemnagyság, azaz a hálósűrűség hatással van a kapott eredmények pontosságára. Minél sűrűbb a háló, annál pontosabb eredményeket kapunk, viszont annál nagyobb a megoldandó feladat. Az adott hardver és szoftver korlátja lehet a választható feladatnagyságnak. ( A mi esetünkben a lehetőségek csekély részét kellett csak kihasználni.)



A következő ábra példákat ad a használatos elemtípusok alakjára.

B. Klein: Finite-Element-Methode im Maschinenbau



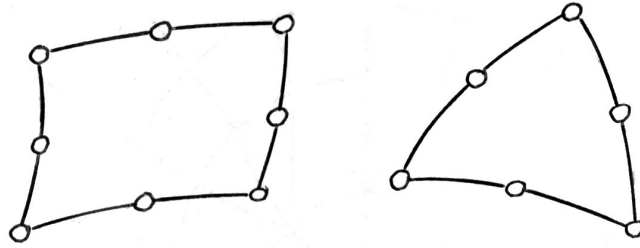
- A hegedű végeleemes modelljénél alkalmazott másodrendű elemek:

(ld. a 41 – 44. oldal ábráit)

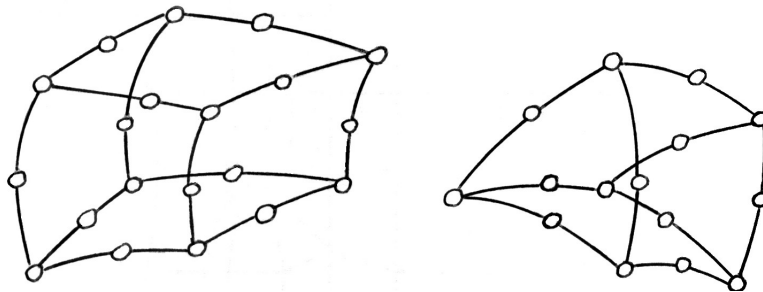
Rúdelemek: 13 db gerendához (nyomaték felvételére is képes elem)

1 db lélekhez (csak húzás, nyomás átvitelére képes elem)

Héjelemek: 448 db (8 csomópontos és 6 csomópontos elemek) tetőhöz, háthoz és oldalakhoz



Szolid elemek: 46 db (ezek 20 csomópontos hexa <tégla> elemek és 15 csomópontos penta <ék> elemek) tőkékhez és nyakhoz



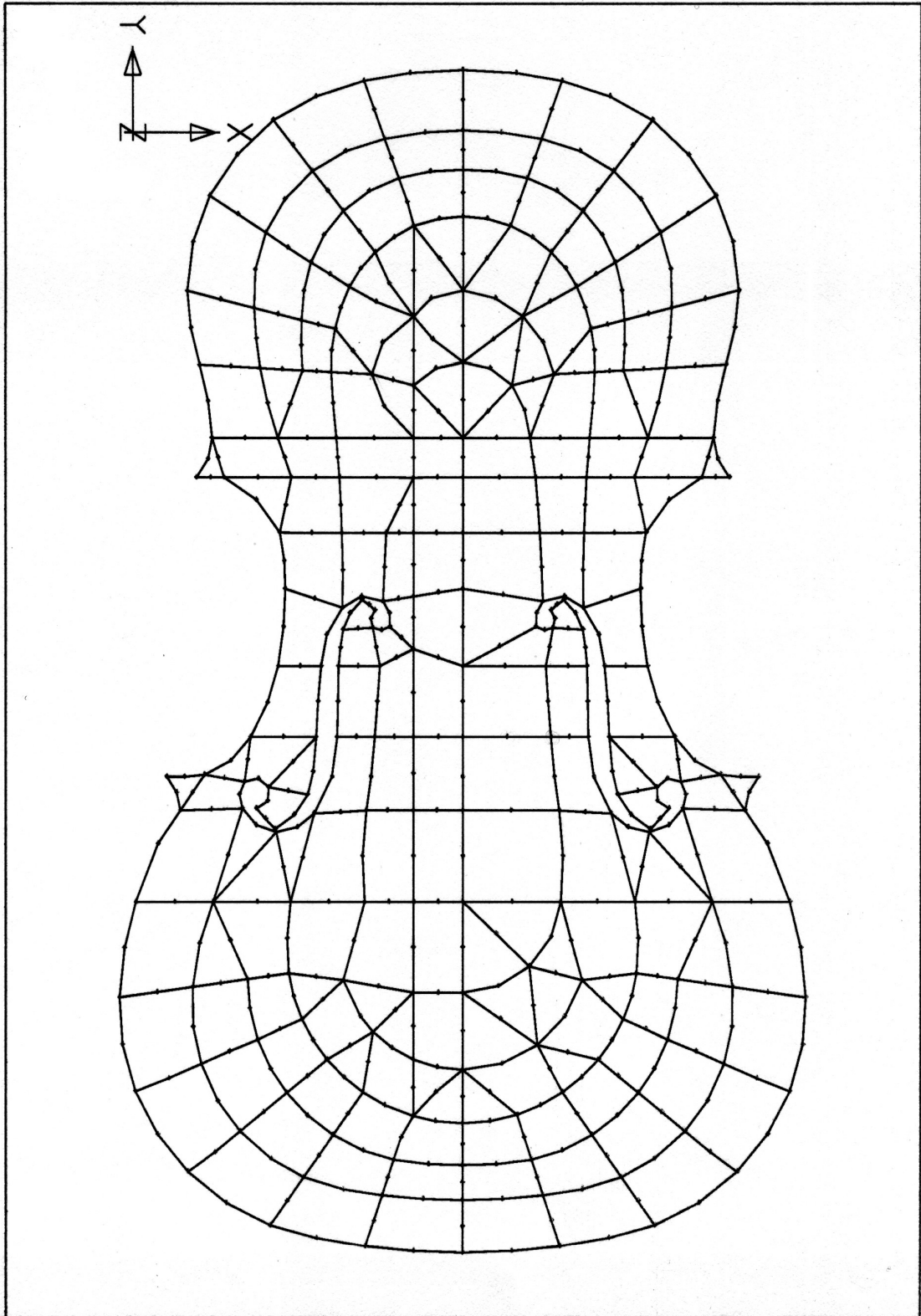
### - vastagsági méretek felvétele

Sokféle végelelemet lehet a programban generálni. A szolid elemekre viszont csak meghatározott élarányokat lehet alkalmazni, hogy a program futása zavartalan legyen.

Menet közben lettek megválasztva az alkalmazott elemtípusok. Mivel a hát vastagsága 2,5 - 4,5 mm, a hossz- és szélességi méreteihez képest nagyon kicsi, ezért ha szolid elemekből építjük fel, akkor az előbb említett okok miatt az elemszám nagyon nagy számúra adódott volna. Ezért a tetőnél és hátnál ún. héjelemeket alkalmaztunk. Így nagyobb felületűek lehettek az elemek, és csökkent a szükséges elemszám. Viszont a héjelemeknél a vastagság, tehát a harmadik kiterjedés csak külön csomópontként vihető be. Tehát a szintvonalakhoz lettek a vastagsági értékek rendelve (l. a 31. oldalt), és egyenként az elemek szintvonalakhoz tartozó csomópontjaira rátéve.

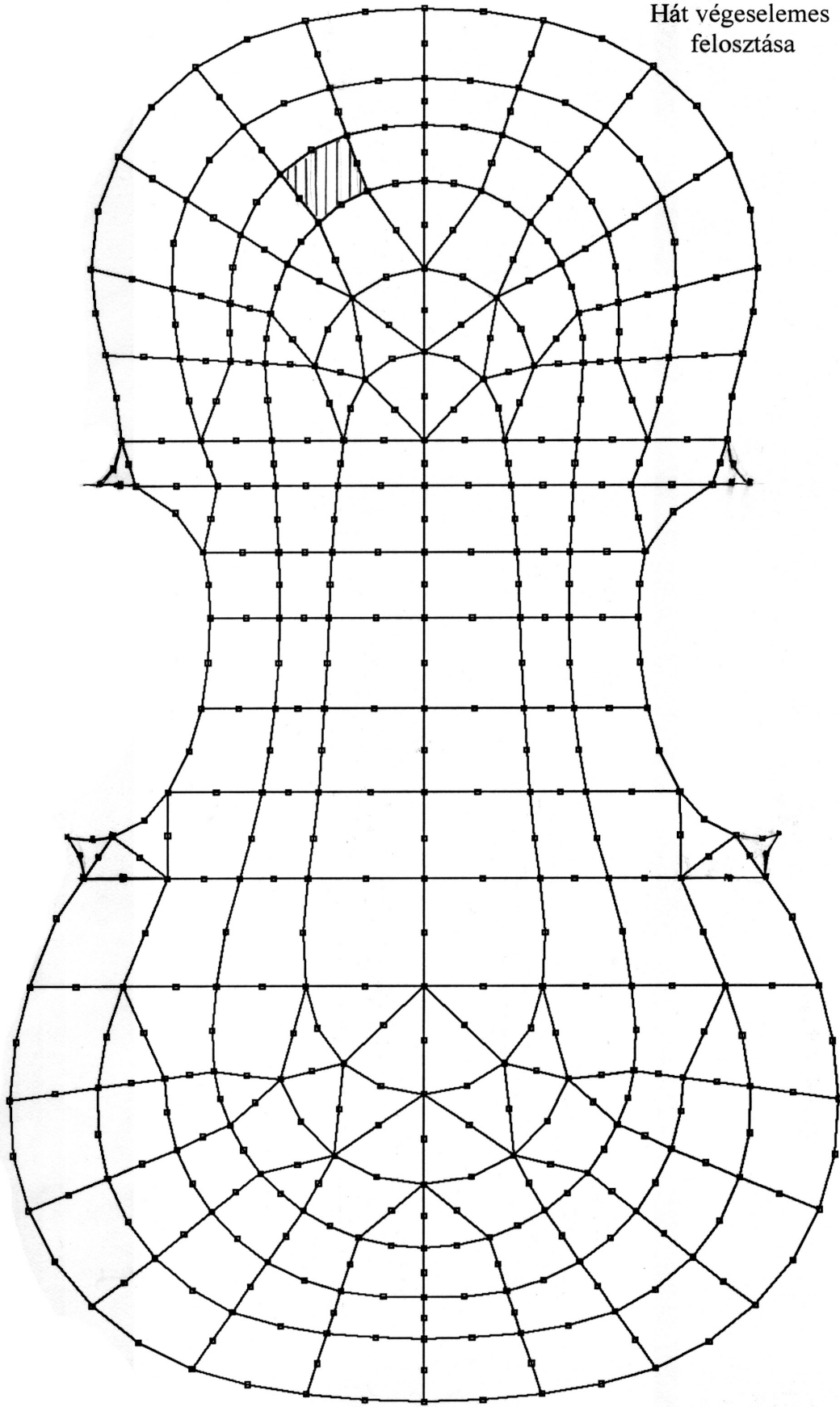
A kiskávák figyelembevétele is ugyanígy történt. Tehát a végelelemes modell ábráján nem jelenik meg láthatóan a tető és hát vastagság, valamint a kiskáva, de szilárdsági szerepük pontosan figyelembe van véve.

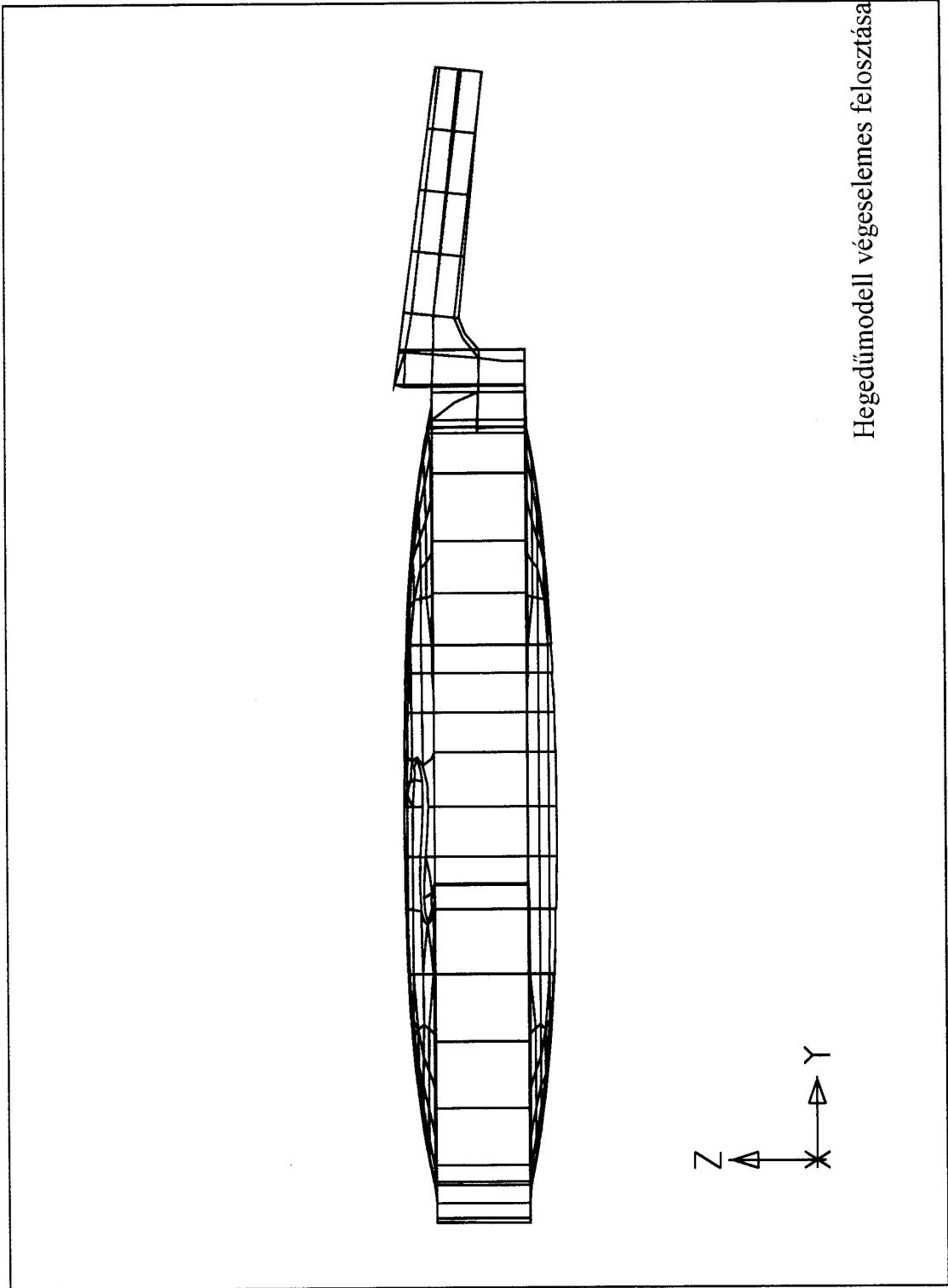
Hasonlóan a gerenda és a lélek sárga vonalként látszik a színes ábrákon, mert a program csak egyirányú kiterjedést rendel hozzá, de a teherviselő képessége a valódi méretű, vastagsággal bíró alkatrészével azonos. (ld. a 47. oldali ábrát)

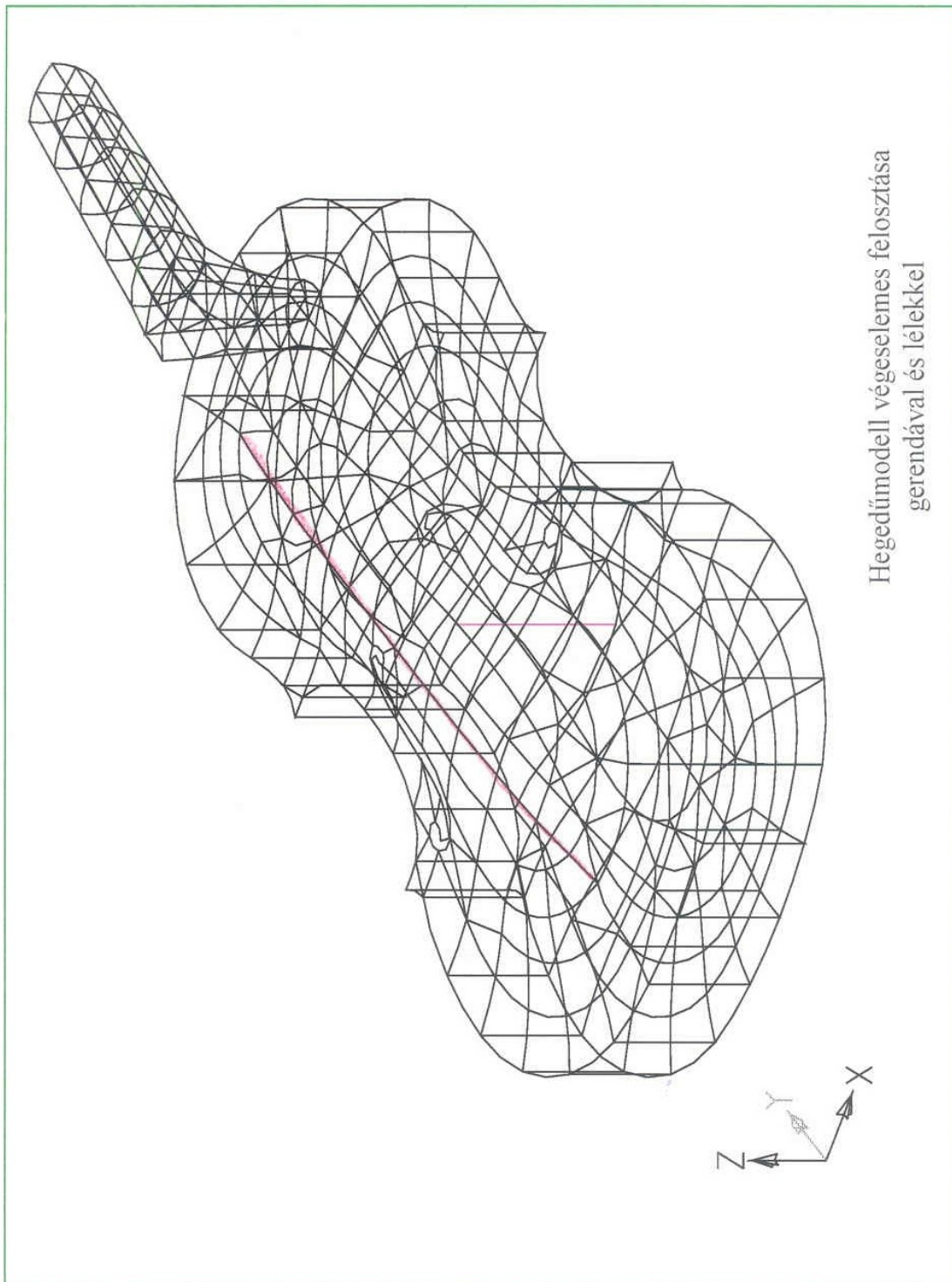


A tető végeleemes felosztása

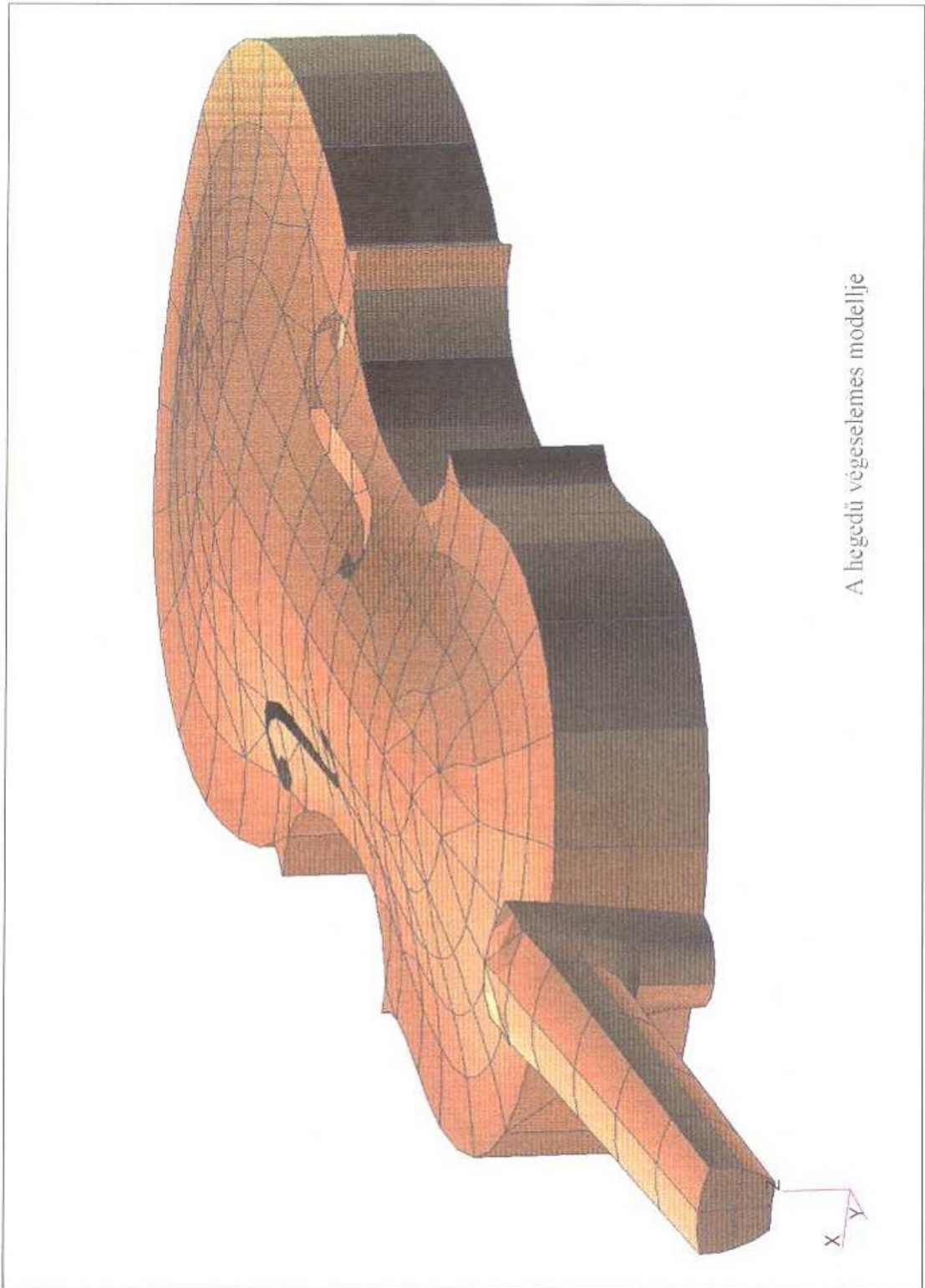
Hát végeselemes  
felosztása



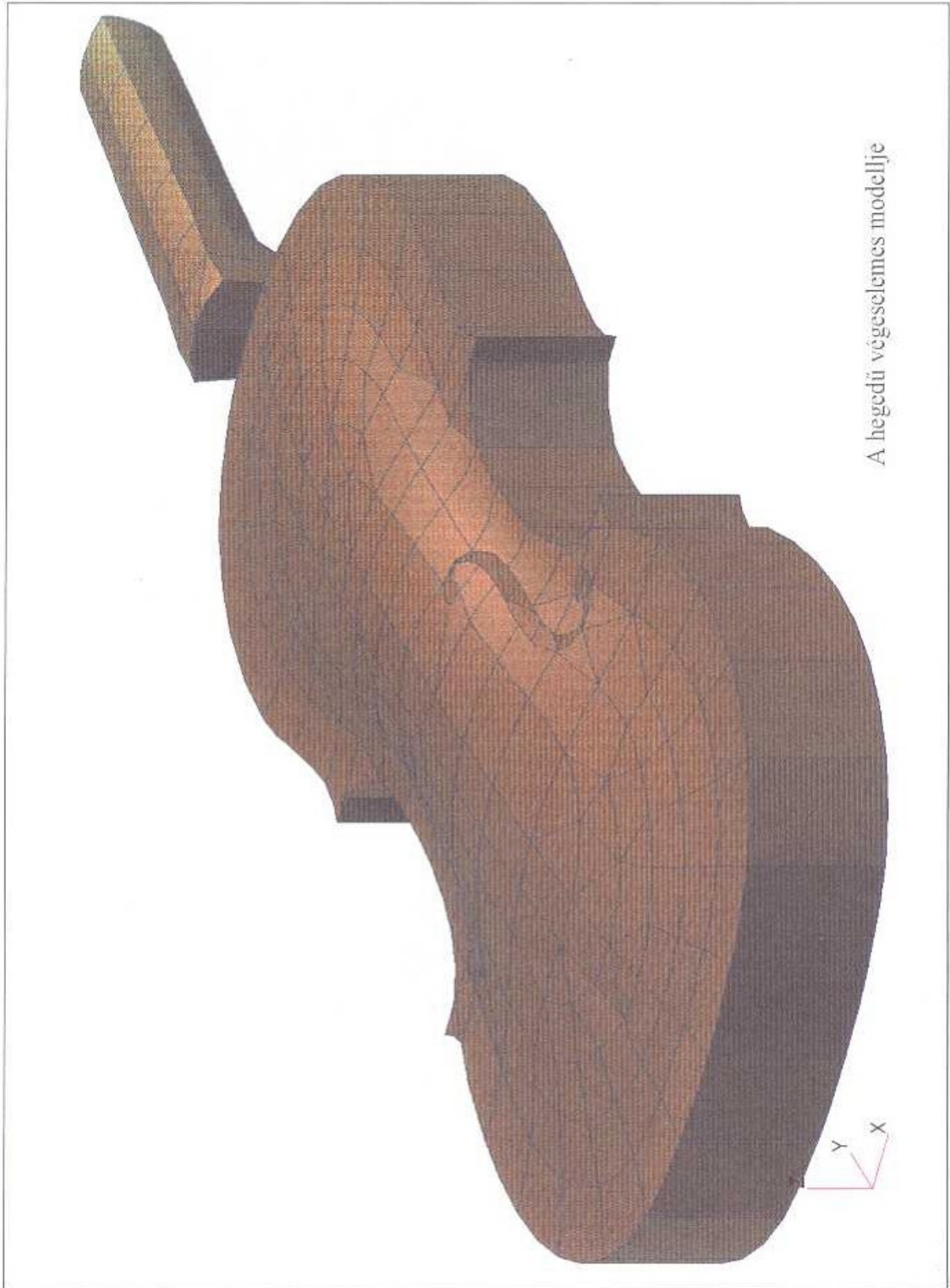




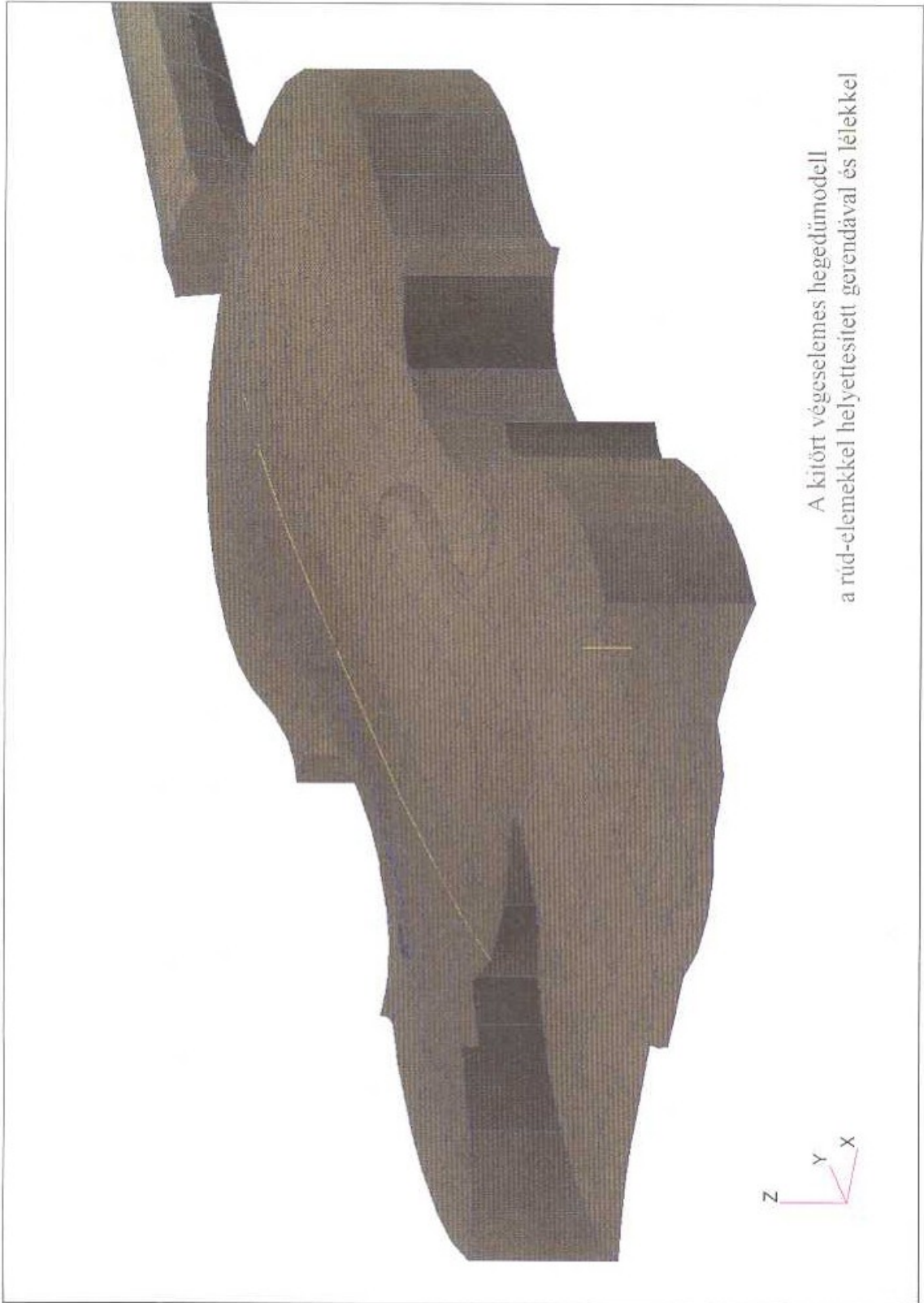
Hegedűmodell végelelemes felosztása  
gerendával és lélekkel



A hegedtű végeselemes modellje



A hegedű végeses elemes modellje



A kitört végeselemes hegedűmodell  
a rúd-elemekkel helyettesített gerendával és lélekkel

## 5. Peremfeltételek és számítási adatok meghatározása

### - statikus terhelések meghatározása

#### - húrfeszítésből

Dr Vadon Géza: Hangszerész (vonós) szakmai ismeretek című könyvéből vettem a feltételezett húrerőket. Az egyes felhangolt hurok feszítő ereje függ a húr típusától, de ez az eltérés a számítási eredményekre nagyságrendi változást nem okoz. A fenti ajánlást alapul véve, és a négy húr erejét összegezve adódott az alkalmazott 360 N erő.

#### - láb nyomásból

Szerkesztéssel meghatározva adódott a láb két oldalánál a húrrészek dölése  $8,3^\circ$  és  $16^\circ$ . A három erő egyensúlyából adódik a függőleges eredőként a láb felől a tetőre ható 154 N erő. Ez az erő a láb két talpán  $2 \times 77$  N-al terheli a tetőt. (ld a 49. oldal ábráját)

### - megfogások, kényszerek

A hegedű szabadságfokainak elvétele azaz a megfogás a nyak makk részének alsó pontjában történt, mivel a makk deformációt gyakorlatilag nem szenved. Itt a megfogás X, Y és Z irányú elmozdulást és elfordulást gátol.

### - mechanikai anyagjellemzők meghatározása

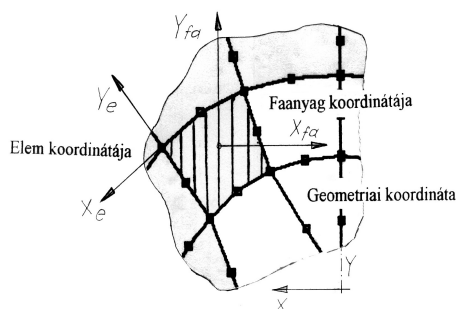
A faanyagok anyagjellemzőit Dr Szalai József: "A faanyagok és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana" című könyvében lévő, és a dolgozatban az 50 - 53. oldalon mellékelt, táblázatokból vettem.

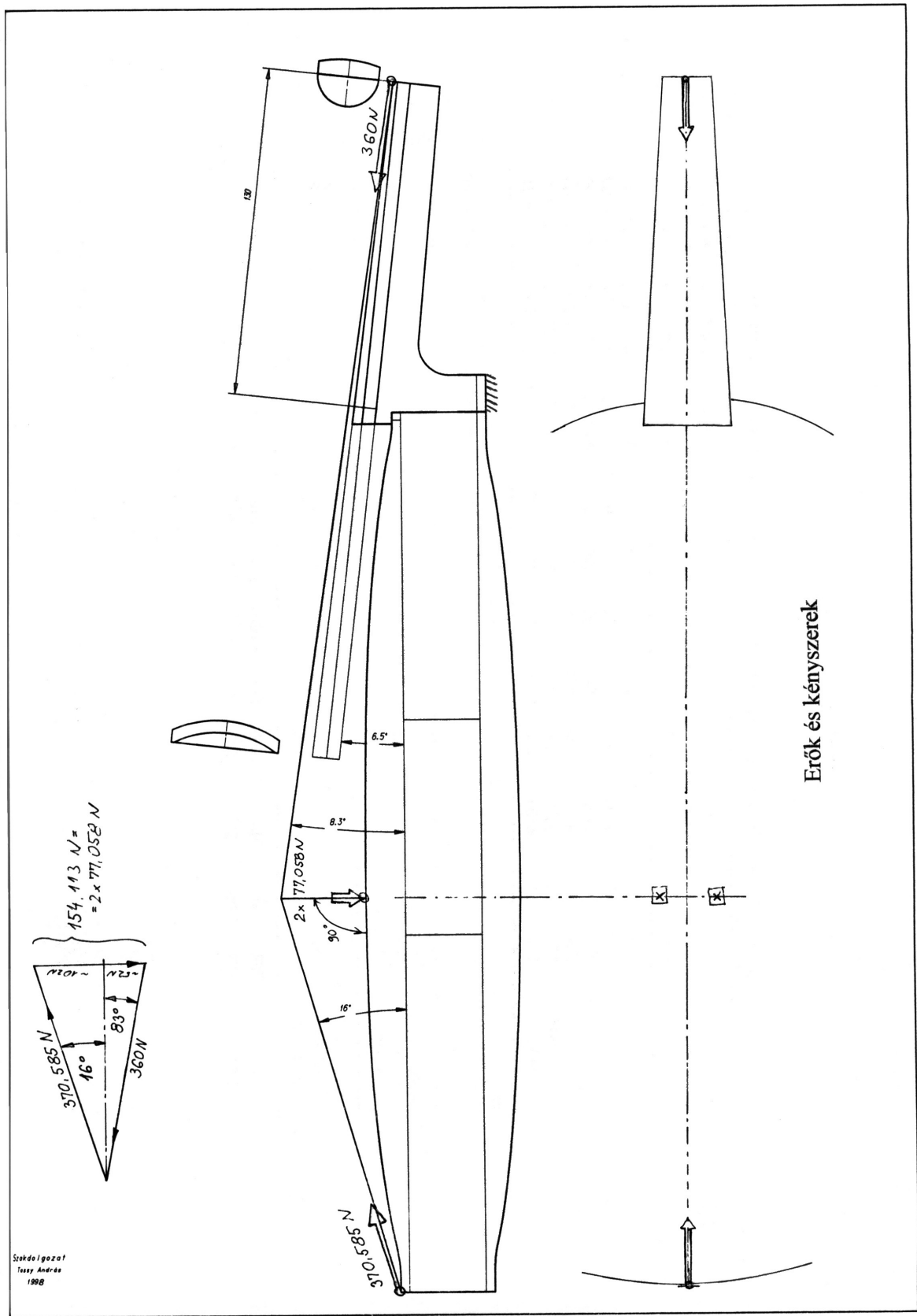
A hegedű szabadformájú felületei miatt az elemek alakja és elhelyezkedése nagyon változatos. Ezért, valamint a faanyag anizotróp tulajdonsága miatt az anyagjellemzők (merevségi mátrix) felvételénél figyelembe kellett venni az elemek lokális koordináta rendszere és a hegedű, ill, a fa struktúrájának megfelelő globális koordináta rendszer közötti eltérést.

Egy transzformáló programot kellett írni (ilyen kész modul nem lévén a gépészet kizárólag izotróp anyagokkal foglalkozó környezetében), ami ezt a transzformációt minden elemre elvégzi, a merevségi mátrixokat átszámolja.

(Ezt a speciális programozástechnikai munkát számítógépes kollégám végezte.)

A 42. old. látható háló egy elemén mutatom be a két koordinátarendszert.





Fafaj	Sűrűség g/cm <sup>3</sup>	Nedv. %	E <sub>L</sub> MPa	E <sub>R</sub> MPa	E <sub>T</sub> MPa	G <sub>RT</sub> MPa	G <sub>TL</sub> MPa	G <sub>LR</sub> MPa	V <sub>RT</sub> /N <sub>TR</sub>	V <sub>TL</sub> /V <sub>LT</sub>	V <sub>LR</sub> /V <sub>RL</sub>
<b>Duglaszfenyő</b>											
Pseudotsuga Menziesii Fr.	~0,48	~12	15700	1060	780	88	880	880	0,39/0,37	0,022/0,45	0,29/0,020
<b>Erdei fenyő</b>											
Pinus sil- vestris L.	0,55	10	16300	1100	570	66	680	1160	0,68/0,31	0,015/0,68	0,42/0,038
<b>Jegenye fenyő</b>											
Abies Alba Mill.	-	-	12700	930	480	140	750	930	0,60/0,14	0,020/0,75	0,45/0,030
<b>Lucfenyő</b>	0,37	12	9900	730	410	22	610	500	0,57/0,29	0,013/0,56	0,44/0,031
Picea excelsa L.	0,39	12	10700	710	430	23	620	500	0,51/0,31	0,025/0,51	0,38/0,030
	0,39	12	10900	640	420	26	590	580	0,64/0,32	0,019/0,49	0,39/0,029
	0,43	12	13500	890	480	32	500	720	0,56/0,30	0,019/0,54	0,45/0,030
	0,44	10	15900	690	470	36	770	620	0,47/0,25	0,013/0,38	0,44/0,028
	0,50	12	16600	850	690	37	840	630	0,43/0,33	0,023/0,52	0,36/0,018
<b>Oregon fenyő</b>	0,59	9	16400	1300	900	79	910	1180	0,63/0,40	0,024/0,37	0,43/0,028
<b>Sitka fenyő</b>	0,39	~12	11600	900	430	39	720	750	0,43/0,25	0,020/0,47	0,37/0,029

táblázat: Tülevelű fajok anatómiai főirányokhoz tartozó rugalmas technikai állandói

		↓					
		Tölgy	Kőris	Nyír	Lucf.	Erdei f.	
nedv. t.		15	15	15	15	15	%
Nyomás	E <sub>L</sub>	14000	15000	15800	14200	11700	MPa
	E <sub>R</sub>	1290	970	600	590	620	MPa
	E <sub>T</sub>	910	–	450	360	500	MPa
Húzás	E <sub>L</sub>	14000	14000	18100	14300	11700	MPa
	E <sub>R</sub>	1100	–	600	620	510	MPa
	E <sub>T</sub>	830	–	420	420	430	MPa
hajl.	E <sub>L</sub>	15100	12800	15100	10600	12200	MPa
Nyírás	G <sub>RT</sub>	440	–	200	50	–	MPa
	G <sub>TL</sub>	910	–	800	–	710	MPa
	G <sub>LR</sub>	1320	–	1450	–	1140	MPa
csav.	G <sub>CS</sub>	800	–	1010	–	660	MPa
	v <sub>RT</sub>	0,830	0,740	0,810	0,480	0,790	–
	v <sub>TR</sub>	0,340	0,600	0,490	0,250	0,380	–
	v <sub>TL</sub>	0,090	0,043	0,040	0,031	0,037	–
	v <sub>LT</sub>	0,410	0,260	0,450	0,411	0,410	–
	v <sub>LR</sub>	0,430	0,430	0,580	0,440	0,490	–
	v <sub>RL</sub>	0,070	0,043	0,043	0,017	0,030	–

táblázat: Néhány Oroszországban honos fafaj,  
különböző igénybevételekkel meghatározott rugalmas technikai állandói

Fafaj	Sűrűség g/cm <sup>3</sup>	Nedv. %	E <sub>L</sub> MPa	E <sub>R</sub> MPa	E <sub>T</sub> MPa	G <sub>RT</sub> MPa	G <sub>TL</sub> MPa	G <sub>LR</sub> MPa	V <sub>KT</sub> /V <sub>TR</sub>	V <sub>TL</sub> /V <sub>LT</sub>	V <sub>LR</sub> /V <sub>RL</sub>
Balsafa	0,10	9	2440	114	38	14	85	124	0,66/0,24	0,009/0,49	0,23/0,018
Ochroma la- gopus Sw.	0,20	9	6300	300	106	33	203	312	0,66/0,24	0,009/0,49	0,23/0,018
Bükk											
Fagus silva- tica L.	0,75	11	13700	2240	1140	460	1060	1610	0,75/0,36	0,044/0,51	0,45/0,073
Dió											
Juglans re- gia L.	0,59	11	11200	1190	630	23	700	960	0,72/0,37	0,036/0,63	0,49/0,052
Dió (satin)	0,54	11	11930	1380	600	280	810	1180	0,70/0,30	0,022/0,43	0,36/0,041
Juhar (hegyi)											
Acer pseudo- Platanus L.	0,59	10	10000	1520	870	290	1100	1222	0,82/0,40	0,038/0,50	0,46/0,093
Khaya	0,44	11	10200	1130	510	210	600	900	0,60/0,26	0,032/0,64	0,30/0,033
Kóris	0,67	9	15800	1510	800	270	890	1340	0,71/0,36	0,030/0,51	0,46/0,051
Fraxinus ex- celstor L.	0,80	14	15000	1640	970	250	610	860	0,66/0,39	0,042/0,65	0,53/0,058
Mahagóni	0,50	12	11400	1220	730	320	750	980	0,60/0,33	0,034/0,53	0,31/0,033
Swietenai mahagóni Jacq.	0,53	13	12400	970	480	150	470	610	0,84/0,41	0,022/0,55	0,31/0,024

táblázat: Lombos fafajok anatómiai főirányokhoz tartozó rugalmas technikai állandói



## 6. Feszültségelosztások és deformációk csomóponti számítása

### Végeselemes futtatás

A végeselemes modell definiálása, majd a peremfeltételek meghatározása után az MSC/NASTRAN egy ún. input file-t generál a végeselemes megoldó modul, az MSC/NASTRAN számára. Ez az input file tartalmaz minden információt a végeselemes modellről, beleértve a topológiát (csomópontok, elemek), az anyagminőségeket, a megfogásokat, terheléseket és egyéb információkat (adatbázis file-ok, futási paraméterek stb.).

Az input file definiálása után indítható a végeselemes megoldó program, ami az adatok alapján összeállítja az elemi merevségi mátrixot, majd a terhelési vektort. Ezután elkészíti a szerkezet merevségi mátrixát, kiértékeli a kontakt definíciókat, és ha minden input adatot megfelelőnek talál, akkor elkezd megoldani a nemlineáris egyenletrendszert.

A végeselemes futtatással kapcsolatos fő paramétereket mutatja a következő táblázat:

Elemszám:	508
Csomópontok száma:	1474
Futásidő:	15 perc
Felhasznált háttértár és RAM:	80 Mbyte
Egyenlet nagysága:	8844 szabadságfok
Anyagtörvény:	- Két dimenziós orthotrop - Háromdimenziós, tengely- szimmetrikus orthotrop

Az alábbi képletek mutatják meg a kétféle elemtípushoz alkalmazott merevségi mátrix formáját és az anyagtörvényt:

### Two-Dimensional Orthotropic Material (MAT8)

The MAT8 entry is used to define a two-dimensional orthotropic stress-strain relationship shown in Eqs. (5-6) and (5-7). The MAT8 entry can only be used with the plate and elements. Equation (5-6) defines the in-plane stress-strain relationship. The transverse stress-strain relationship is defined by Eq. (5-7).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} \tau_{1z} \\ \tau_{2z} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{1z} & 0 \\ 0 & G_{2z} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma_{1z} \\ \gamma_{2z} \end{Bmatrix}$$

### Axisymmetric Solid Orthotropic Material (MAT3)

The MAT3 entry is used to define an orthotropic three-dimensional relationship in a cross-sectional coordinate system ( $x, \theta, z$ ). You can only use the MAT3 with the axisymmetric CTRIA6 element. The axisymmetric solid orthotropic material is defined by Eq. (5-4).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_\theta \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{\theta x}}{E_\theta} & \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & 0 \\ \frac{-\nu_{x\theta}}{E_x} & \frac{1}{E_\theta} & \frac{-\nu_{z\theta}}{E_z} & 0 \\ \frac{-\nu_{xz}}{E_x} & \frac{-\nu_{\theta z}}{E_\theta} & \frac{1}{E_z} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{zx}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_\theta \\ \sigma_z \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix}$$

## 7. Feszültségeloszlások képi megjelenítése

### Végeselemes analízis eredménye

A végeselemes feldolgozási folyamat futtatás utáni lépése az eredmények megjelenítése és kiértékelése. Általánosan jellemző a végeselemes futtatásokra, hogy jelentős nagyságú eredmény-file keletkezik. Ezek az eredmények a felhasználó kérésétől függően tartalmazhatják az elmozdulás eredményeket, a feszültségtenzor elemeit minden csomópontra, az alakváltozási tenzor elemeit stb. Ezek az adatok nemlineáris futás esetén lekérhetőek akár minden iterációs lépés esetén is. Így érthető, hogy ezeknek az adatoknak a feldolgozása számítógépes támogatás nélkül elképzelhetetlen.

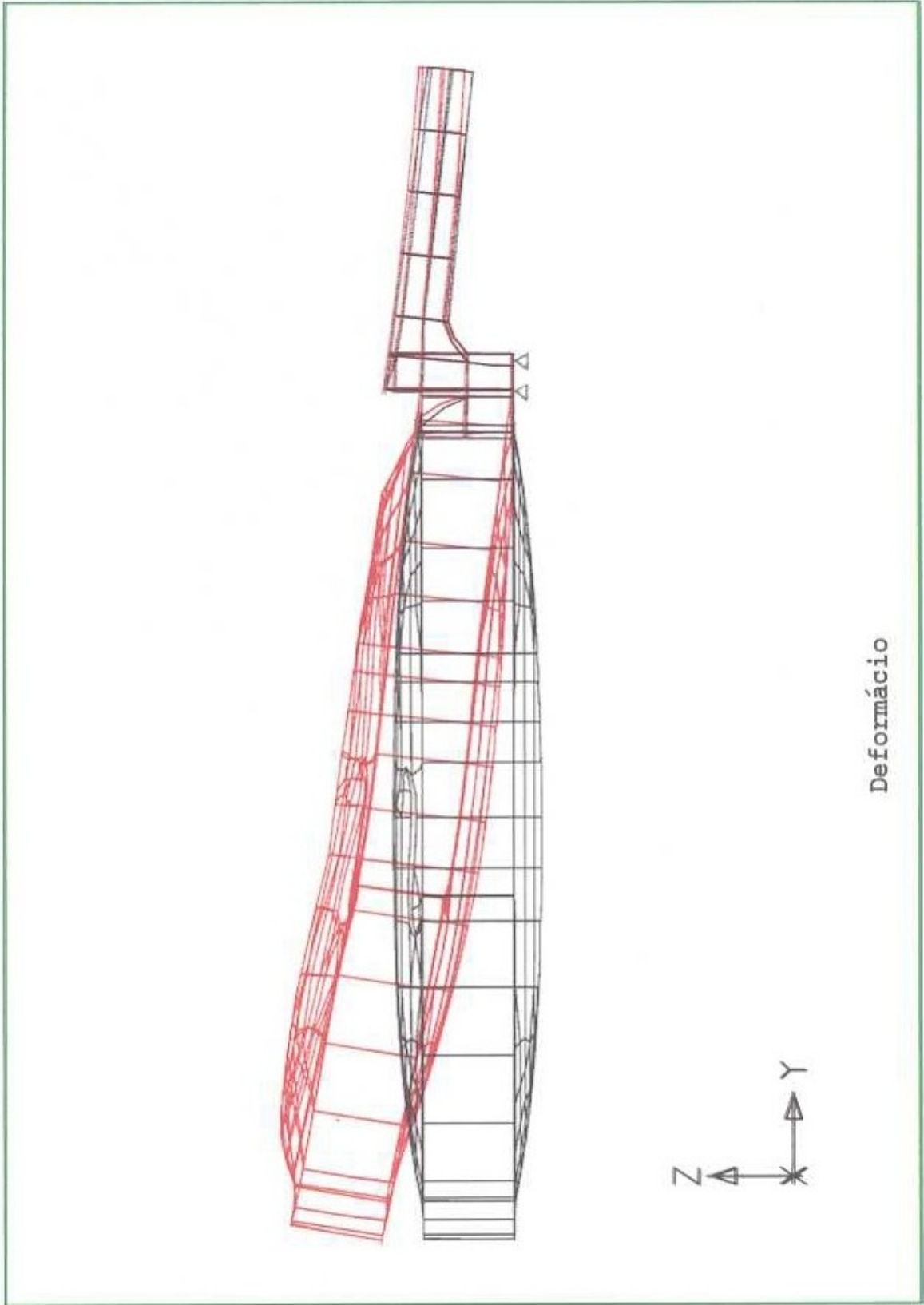
A végeselemes eredmények kiértékelése, mint azt már említettük, az un. poszt-processzor programban történik. Az alkalmazott szoftver az MSC/PATRAN.

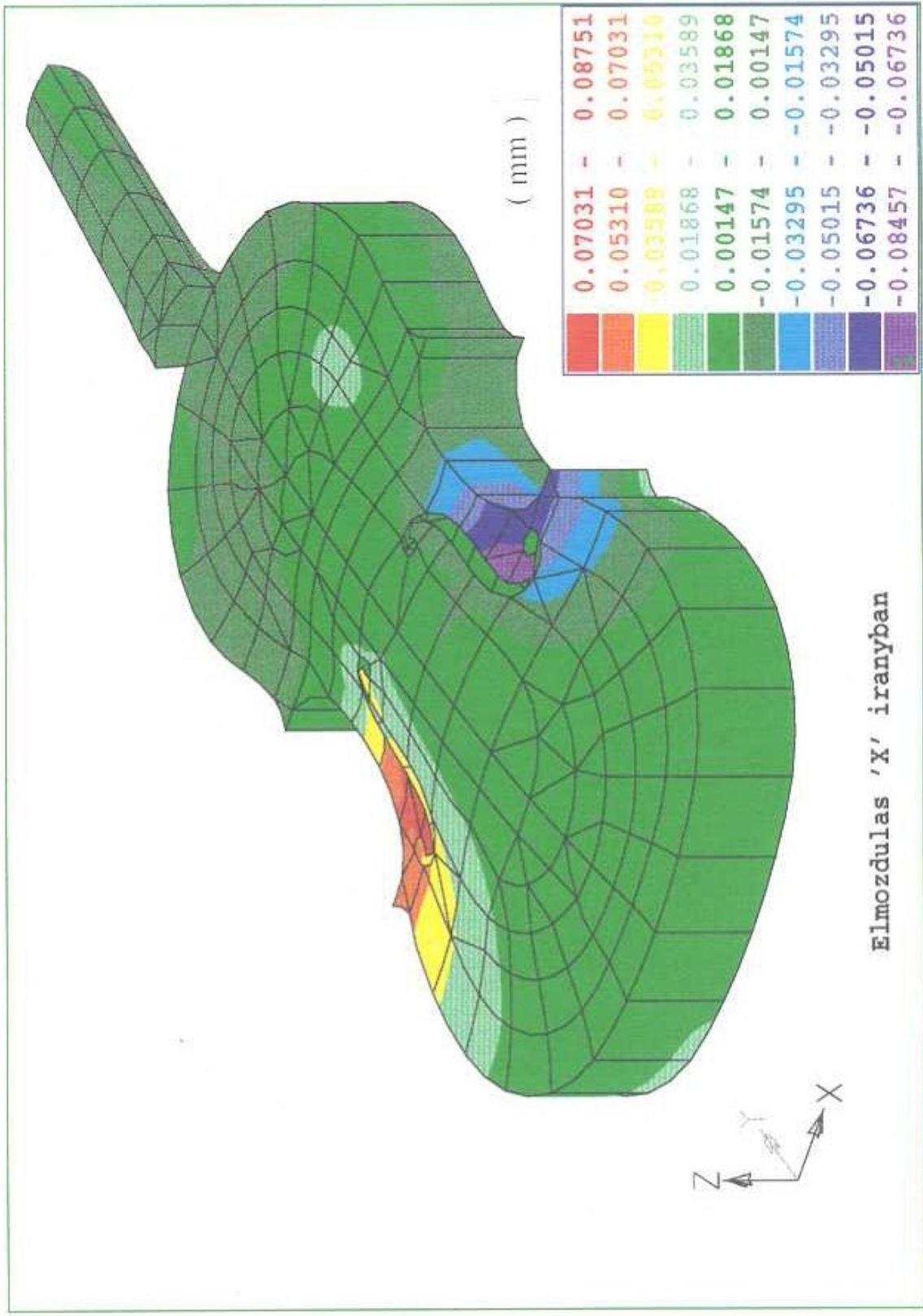
A PATRAN a számítás során kiadódó számszerű értékek maximum és minimum tartományát, legyen az akár elmozdulás érték, akár feszültségérték, tíz részre osztja fel, azután minden tartományhoz a színskálának megfelelően egy egy szint rendel, ami szimbolizálni fogja ezt a tartományt. Így alakulnak ki a színes feltábrák, amik szintvonalyszerű elkülönítéseknek tekinthetők. A tartományok határát tetszőlegesen változtatni is lehet, így más színhatás is elérhető.

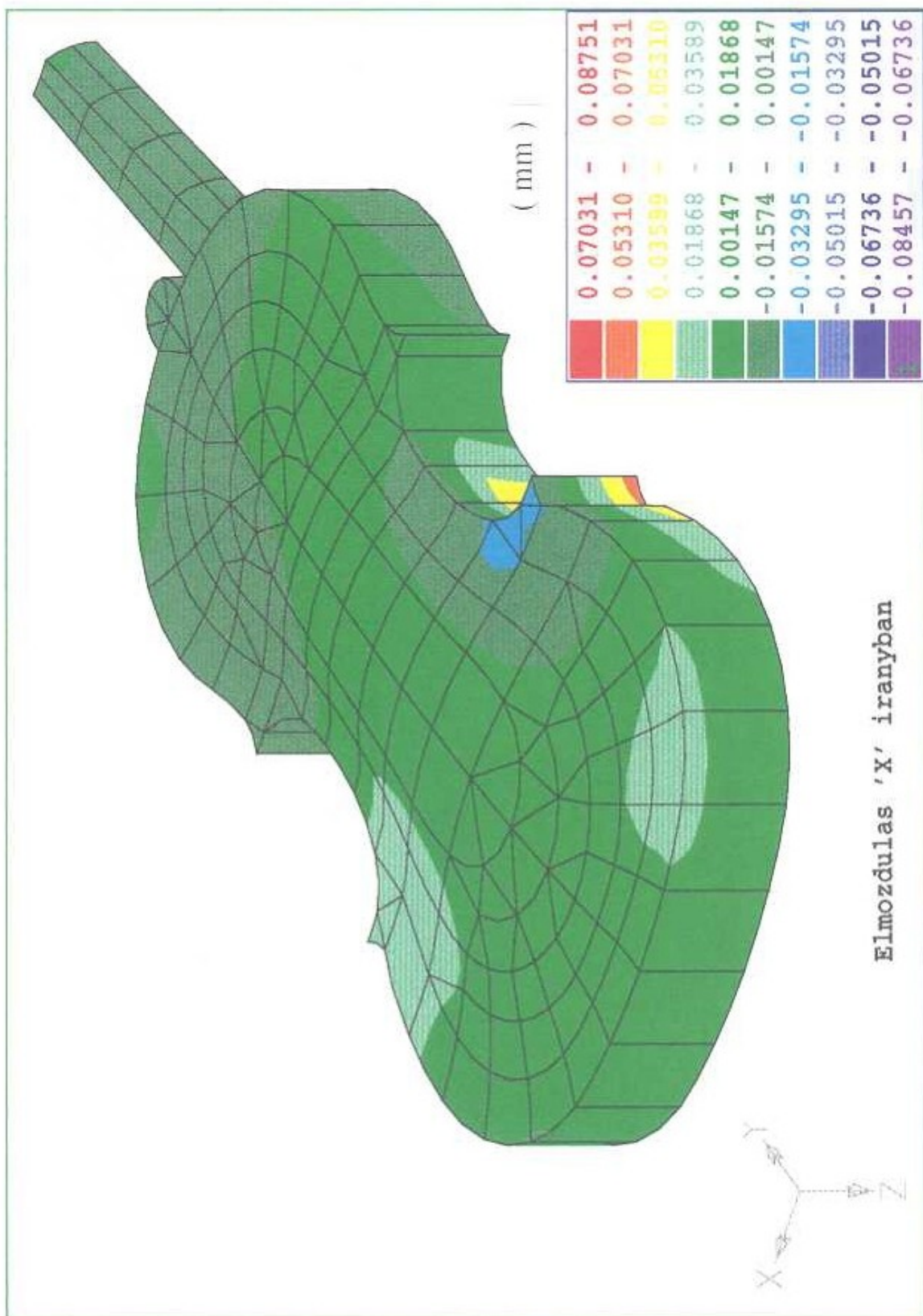
Megjegyzendő, hogy a számított értékek az elemeken a terület függvényében folytonosak, az éles határu elkülönítést a digitalizálás színhatárolása okozza.

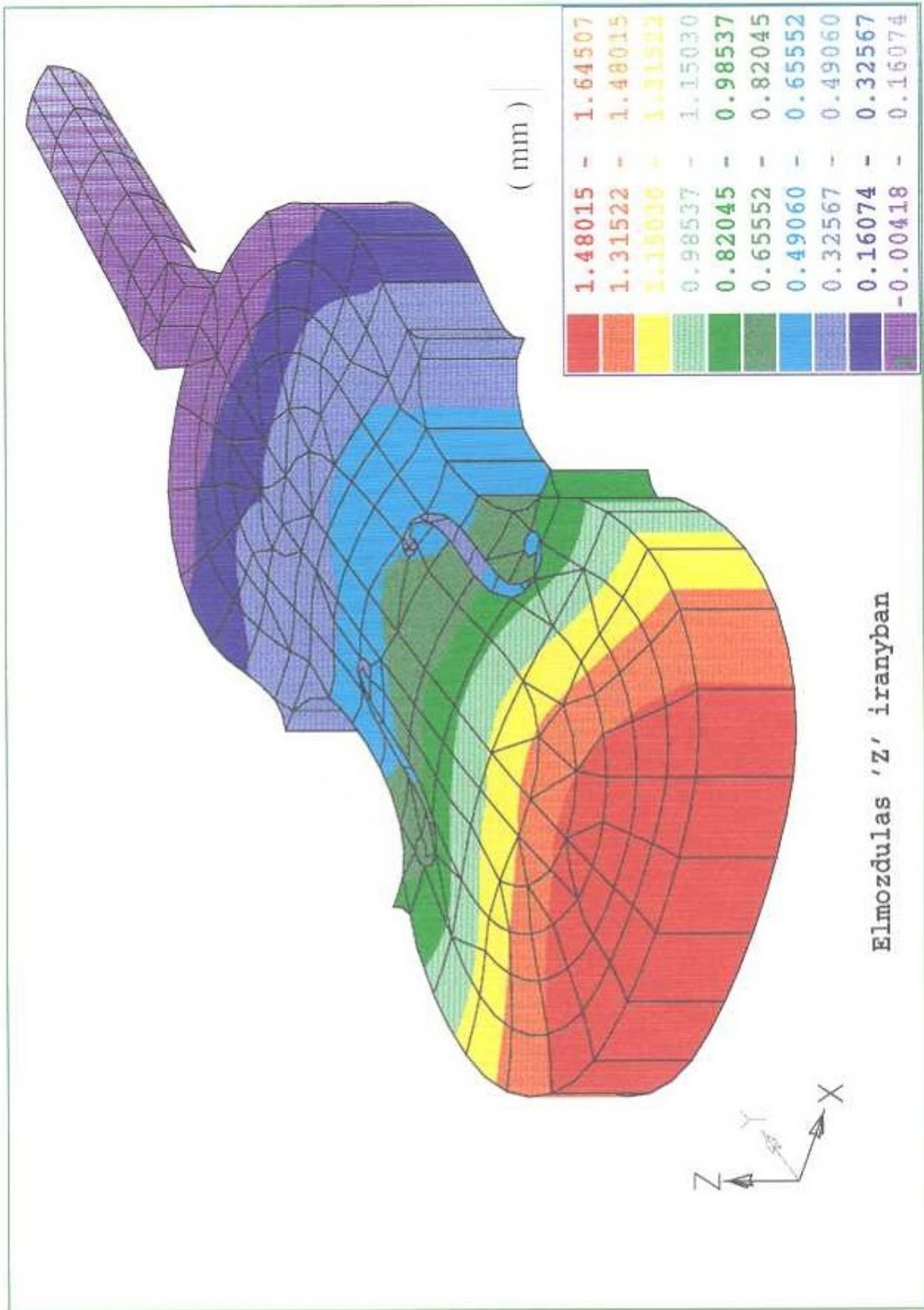
A PATRAN képes a deformált alakot jól láthatóan megmutatni, az elmozdulási lépték sokszorozásával. Erre mutat példát az 56. oldal ábrája, ahol a hegedű oldalnézetében a Z irányú deformáció látható. A maximális felhajlás a hegedű végénél 1.5 mm amikor a makk alsó része tekinthető "befogottnak", azaz a terhelés hatására nem elmozdulónak.

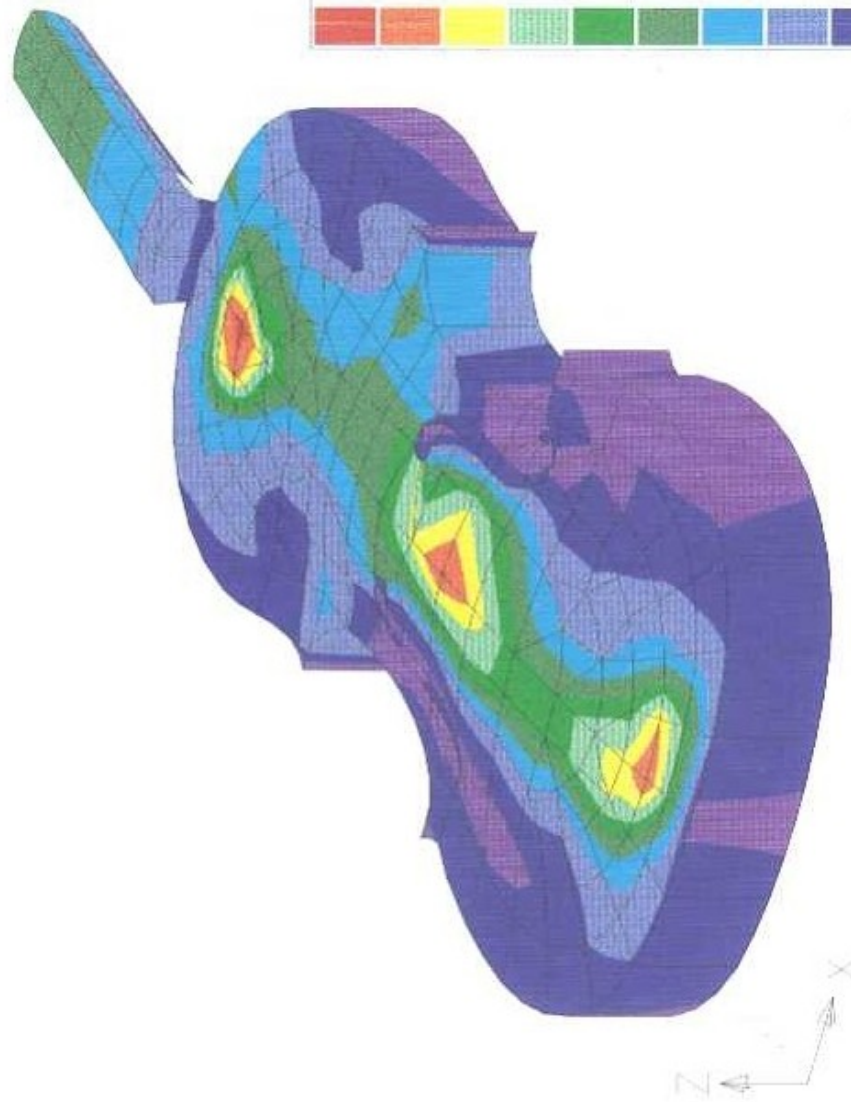
Az 57-65. oldalakig az elmozdulások és feszültségek színezett ábrái láthatók.





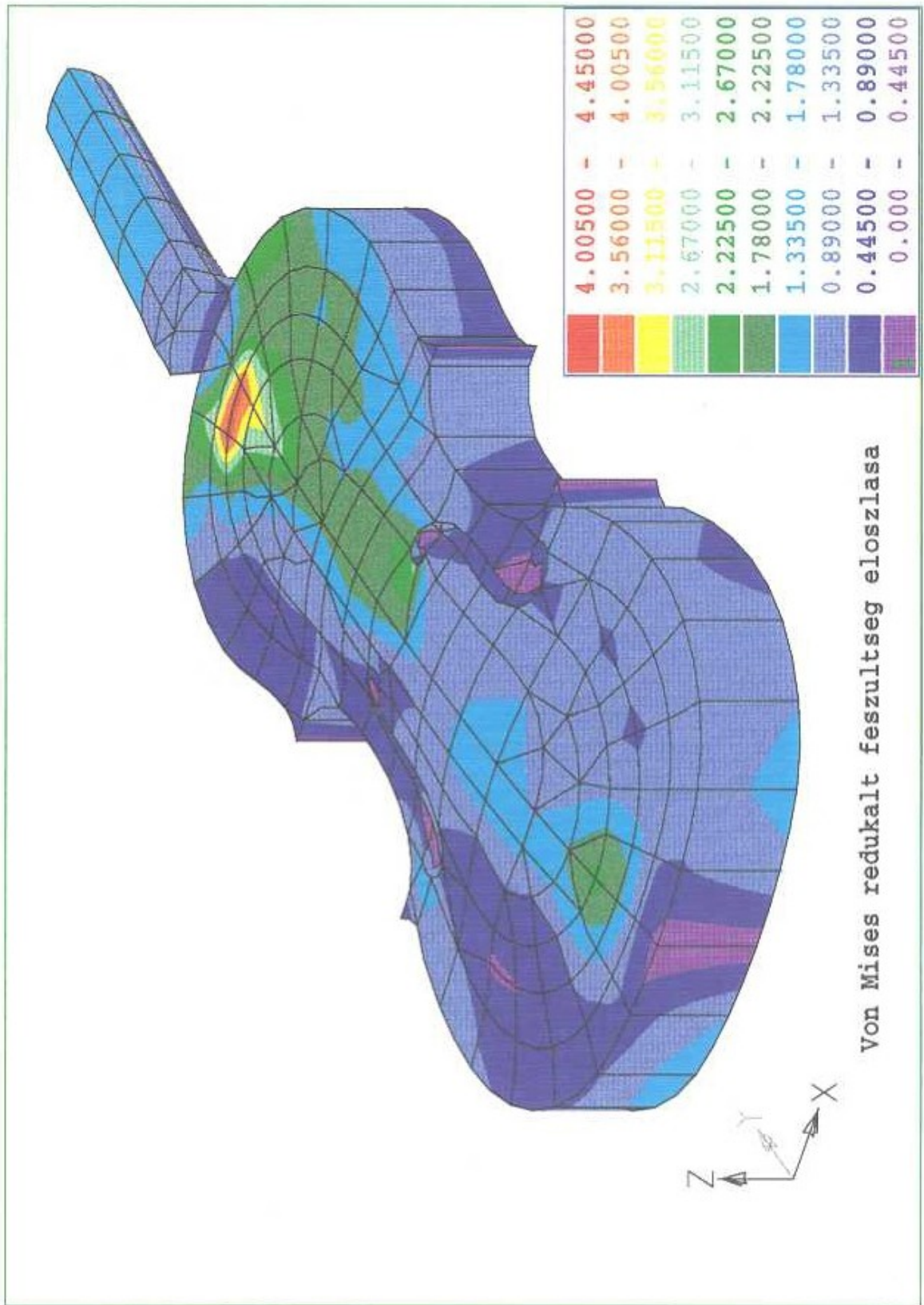


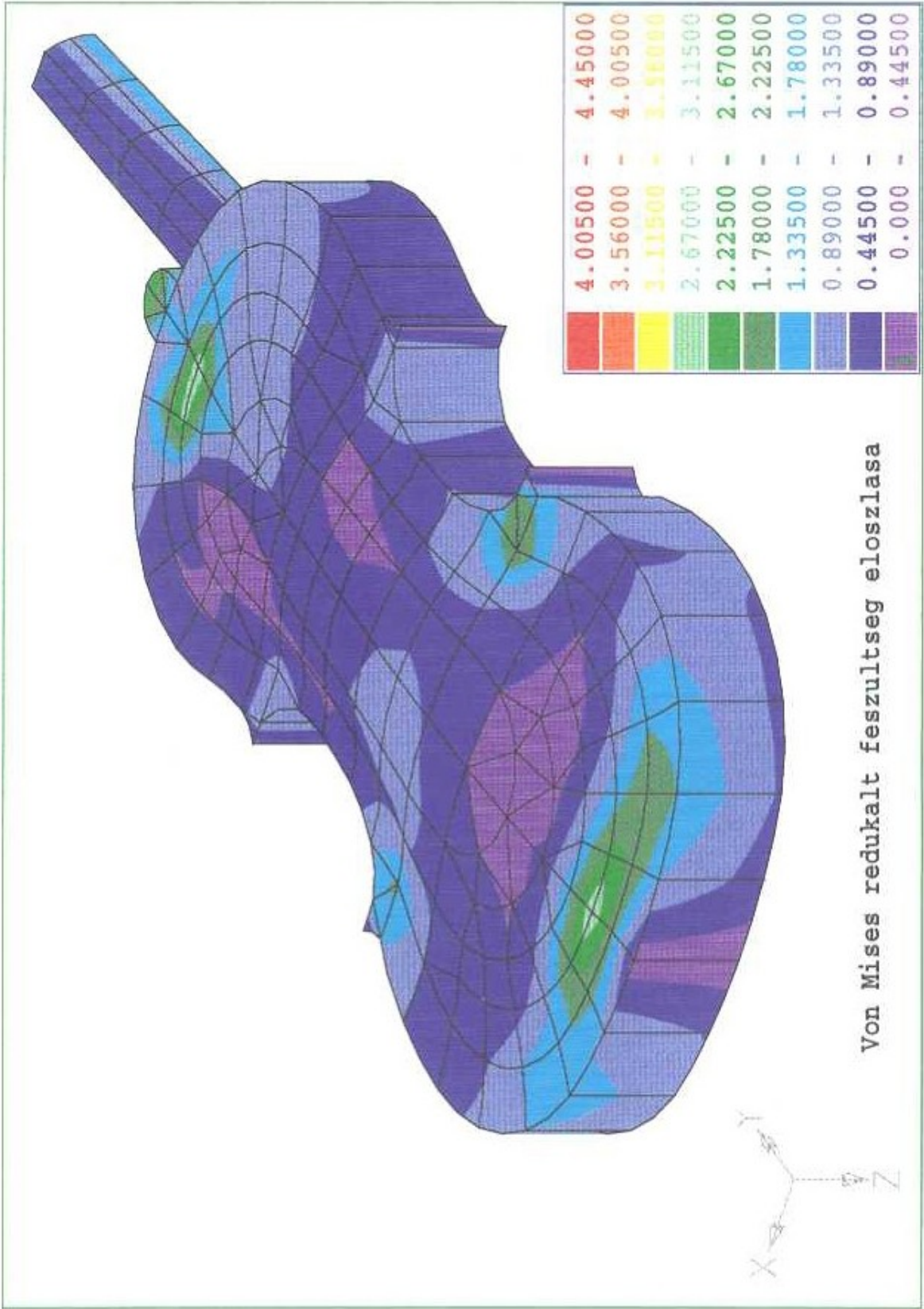


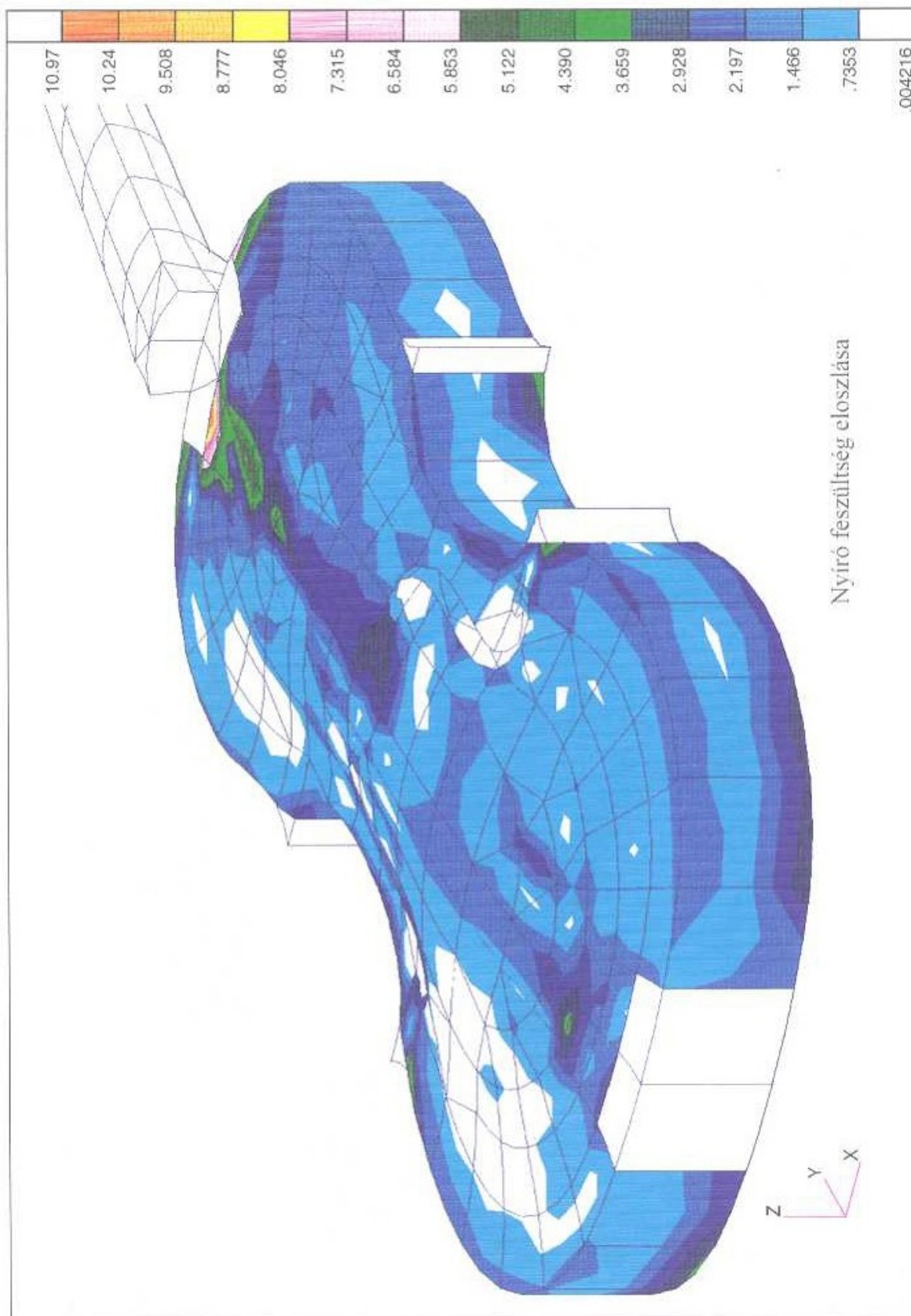


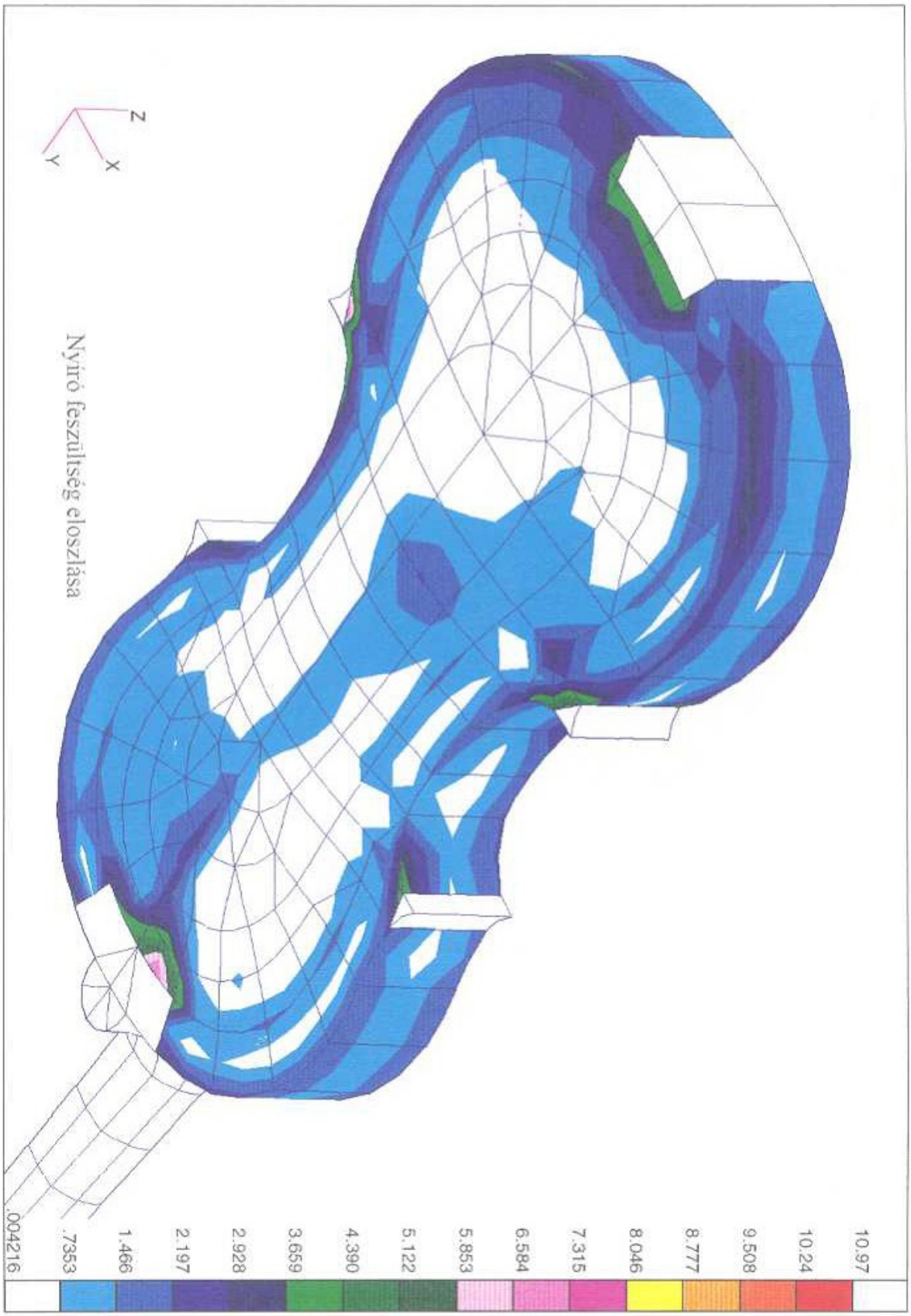
	3.42000	-	3.80000
	3.04000	-	3.42000
	2.66000	-	3.04000
	2.28000	-	2.66000
	1.90000	-	2.28000
	1.52000	-	1.90000
	1.14000	-	1.52000
	0.76000	-	1.14000
	0.38000	-	0.76000
	0.000	-	0.38000

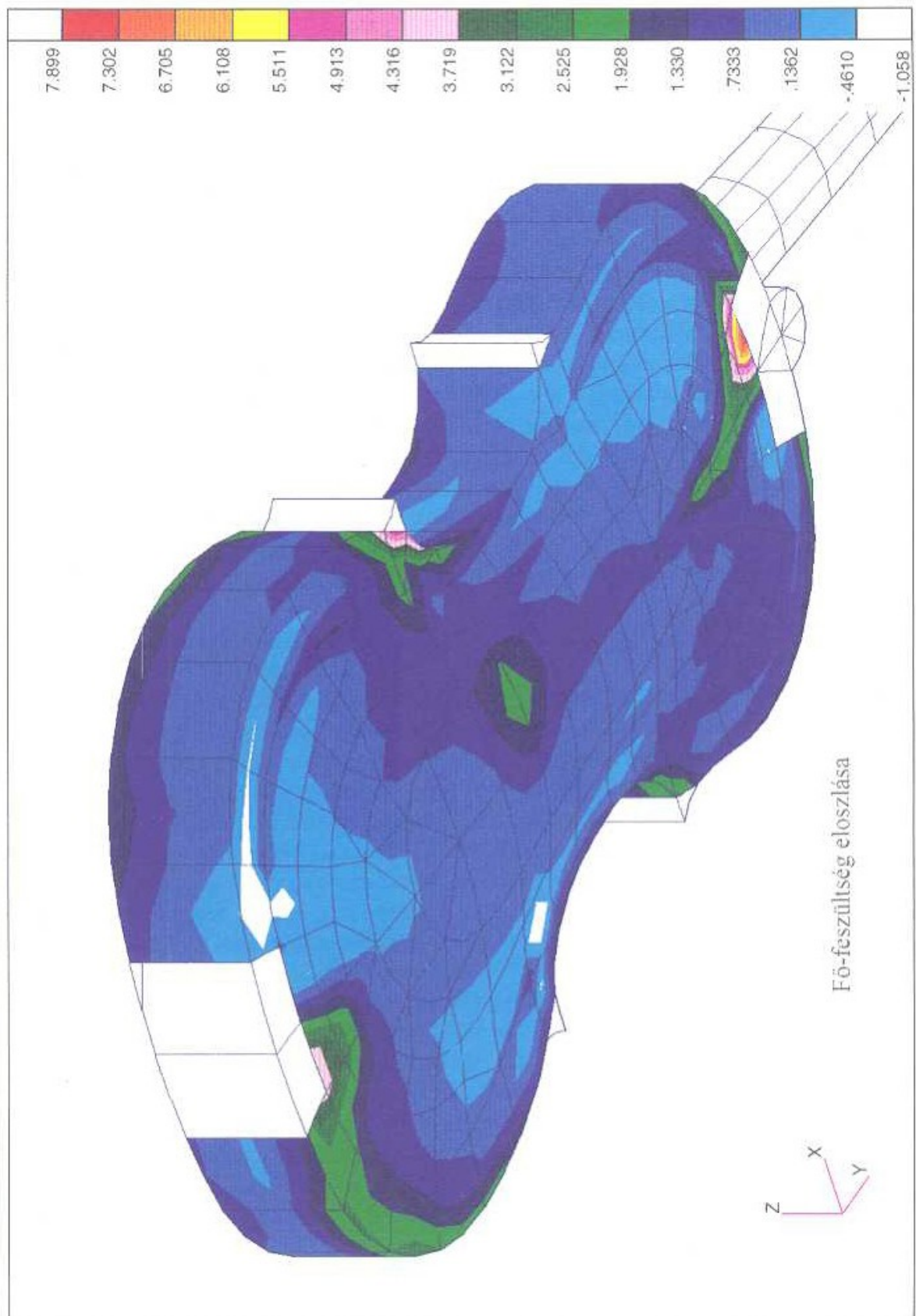
Huber - Mises – Hencky redukált feszültség











## 8. Értékelés, következtetés

### Eredmények értékelése

A kapott deformációs és feszültségi ábrákon jól látszik a hegedű viselkedése a húrok terhelő feszítése alatt. Az aszimmetria megmutatkozik, ami a gerenda és lélek befolyásából ered.

Látható, hogy a hegedű hosszanti felhajlása a legnagyobb deformáció, amint az várható volt.

A feszültségek alakulásából megfigyelhető, hogy a tető viseli a nagyobb feszültségváltozásokat. A 60. oldalon lévő ábrán jól kirajzolódik a három maximális feszültségű terület, nevezetesen a láb alatt és érdekes módon a fogólap test felé nyúló része alatt, valamint a húrtartó alatti területen. Ez magyarázatot ad a hegedűtető kipúposodására, illetve felhívja a figyelmet, hogy ezen területek túlzott elvékonyítása lerontja a hegedű szilárdságát, ami később repedésekhez vezethet. A hátnál ugyanez a jelenség sokkal kisebb mérvű. (ld. 62. oldali ábrát)

A 63-64. oldal ábrái jól mutatják, hogy a nem deformálódó tőkék és a vékony, deformálható tető és hát csatlakozásánál, helyi feszültségcsúcsok keletkeznek a nagy merevségváltozás miatt. Ezek a területek a tapasztalat szerint is gyakori kiindulási helyei a repedéseknek.

A háton a lélek hatása jól kivehető. ( ld. 64. oldali ábra )

### Következtetések

A számítógépes hegedű-modellen végzett végeselemes szilárdsági analízis eredményeinek gyakorlati felhasználása kettős.

Először a hegedű statikus feszültségeloszlásának ismeretével a konstrukció szilárdságilag gyenge, illetve túl erős területei feltárhatók, s ez támpontot ad az anyagelosztás olyan módosításához ami az egyenszilárdság elérése felé hat, megszüntetve ezzel a későbbiekben veszélyes repedési, törési helyeket, illetve a felesleges anyag többletet, ami szintén káros a rezgési energiák elnyelése miatt.

A másik terület a szilárdsági eloszlás és a rezgési kép összevetéséből adódó lehetőségek. Az egész hegedű rezgésének matematikai kezelése a dinamikai analízis feladata és ennek futtatása még nem történt meg. Ugyanakkor a hegedű fő darabjainak rezgési vizsgálata (elsősorban a tető és hát) jól kezelhető és a faragás közben is ellenőrizhető. Ki lehet tehát tűzni a kívánt önrezgésszám elérését és a rezgési kép alakját célként. (ld. Hutchins és Pap János munkássága valamint a 71-72 oldali ábrákon a saját kísérleti eredmények fotóit) Az ilyen faragáskor jó szem előtt tartani a szilárdsági következményeket, összevetve a rezgéskép kívánta terület továbbfaragását a szilárdsági igénybevétel miatt engedett mértékkel.

A hegedűnek elsősorban jó hangúnak kell lenni, tehát elsődleges szempont a faragásnál a rezgéskép alakja, de ismert jelenségek az idővel púposodó, vetemedő hegedű, vagy a tőkénél, f-nyílásoknál megrepedő tető, ami azért van, mert a nem egyenszilárdságú, gyenge részek idővel felmondják a szolgálatot. (Ehhez természetesen hozzájárul a nem megfelelően kiszáradt fa alkalmazása, és fokozott zsugorodás, a hő- és páratartalom erős változása miatt.)

A Chladni ábrák (ld. 71-72. oldalon lévő ábrákat) saját kísérletek, ill. egy hangszerkészítés közbeni állapotának megörökítéséből készültek, amikor Hutchins módszerét alkalmaztam. (Ennél a módszernél a lapokat nem elsősorban vastagságuk méretezésével faragjuk, hanem rezonáns frekvenciákra és az ún. Chladni ábrák megfelelő alakítása szerint.) A mellékelt fotók egy hegedű tető és egy hát Chladni-képeit mutatja a három meghatározó (1, 2. és 5.) sajátrezgéseknél és egy cselló tetőt és hátat, az első és második sajátrezgésénél.

Különös tekintettel kell lennünk a tető és hát eltérő statikus szerepére és ugyanakkor a hasonló rezgési szerepére. A cél a teljesen különböző feltételrendszer összehangolása.

A két feltételrendszer (rezgési és szilárdsági) összehangolása tovább bonyolítja ugyan a készítés folyamatát, de az optimális eredményért tenni kell. Ezek a módszerek további mélyebb betekintést engednek a hangszer rejtett világába, segítve annak megértését. Ha nem a láthatatlan, sőt eddig egyszerű eszközökkel érzékelhetetlen jelenségek határoznák meg a hegedű jó hangját, akkor nem lenne a mai napig is ilyen izgató, vitatott kérdés a kiugró hegedűk tulajdonságainak milyensége, és annak okai. Hiszem, hogy a tudomány sorra le fogja rántani a leplet ezekről a "titkokról", és a legendák, mende-mondák köddé válnak. Ez nem jelenti azt, hogy a jó hegedű készítése majdan egyszerű lesz, hanem éppen azt, hogy a nagyon sokrétű, bonyolult, szinte átláthatatlan sokparaméteres rendszert lehet majd kezelni, és elérhetővé válik az, amit eddig csak a nagy mesterek kivételes intuíciós képességükkel tudtak megvalósítani.

Magától adódik a végeselemes eredmények összevetése a rezgési képpel. Ebből az együtt szemlélésből kitűnik, hogy a lapok hangolásánál a feszültségi eloszlást is figyelembe kell venni, hogy a kívánt rezonáns frekvenciák, vagy rezgések elérésére való törekvés mellett ne hogy a fa (és itt elsősorban a tetőre kell gondolni) szilárdsági korlátait túllépjük.

Nem szabad ugyanakkor megfeledkezni arról, hogy a Hutchins módszer szabad lap rezonanciát vizsgál, a feszültséganalízisünk pedig az összeépített hegedűre vonatkozik.

Megállapíthatók az alábbiak:

- Az első módusz rezgésképénél a nem rezgő területeken vannak a feszültségcsúcs helyei. Tehát a megfelelő frekvenciára faragás ezt a területet nem érinti, ez kedvező.

- A második módusznál a tetőnél kritikus a faragás, mert maximális rezgő területen van a feszültségcsúcsok helye.

- Az ötödik móduszra faragásnál a középső rész túlzott elfaragásának, elvékonyításának veszélye áll fenn.

A Huthcins cikkének végén feltett kérdésre, hogy egy összeépített hegedű komplex rezonancia vizsgálata mikor lesz lehetséges, most, tizenöt évvel később azt felelhetjük, hogy a technikai feltételek már adottak. Az általa látott matematikai bonyolultság mára már megoldott.

A jelen dolgozatban felállított számítógépes modellen a vizsgálatok dinamikai kiterjesztése ad választ a feltett kérdésekre. A teljes hegedű sajátrezgései számolhatók és összevethetők pl. egy hegedű Holografikus rezgésmérésének képeivel. (ld. ROTTENKOLBER HOLO-System GBBH/München cég kísérleteit)

A számítógépes támogatás további lehetőséggel bír, amit jelen esetben mint azt már említettük, még technikai feltételek hiányában alkalmazni nem tudunk, ez az optimalizálás. Ezzel akár egy megkívánt sajátfrekvenciát tűzhetünk ki célul, s a számítógépes program rákeres azokra a paraméterekre, amelyek teljesülése esetén megvalósul a kitűzött cél. Lehetne különböző domborítások, vastagságeloszlások hatását elemezni.

Egy másik szakterületről had mutassak az optimalizálásra példát. Petzvál József magyar matematikus 1840 -ban az első nagyfényerejű objektívjének kiszámolását évekig végezte. Ez egy tipikus optimum keresési feladat. Ma egy ilyen számítás percek alatt lefut a számítógépen. Tehát nem csak egy eset kiszámítására van mód, hanem variánsok nagyszámú sorozatát lehet lefuttatni, és ezekből a számításokból a gép kiválasztja azt a legjobbat, ami egy vagy több paraméter szempontjából optimális. Egy ilyen vizsgálat a jövőben egy hegedűre is lehetséges.

Joggal várjuk az új technikáktól, hogy fellebbentse a fátylat több érthetetlen dologról és törvényszerűségről. Azonban nem lehet eléggé hangsúlyozni, hogy bármilyen pontos és sokoldalú modellt tudunk is létrehozni, az csak egy feltételezett esetet szimulál, de a valóságos hegedű mindig egyedi. Abban a pillanatban, ha már megismételhető technológiával (pl. számítógép vezérelte NC-gépen) munkálunk ki mondjuk egy tökéletes részletességgel megfaragott csigát, akkor éppen ez az egyedisége, a személyhez kötöttsége szűnik meg s vele az értéke is. Tehát meg kell találni az egészséges kapcsolatot az elmélet és gyakorlat között, az új fizikai törvényeket alkalmazni kell minden egyes darabra, külön külön és arra testre szabottan.

Továbbra is csak csodálattal lehet szemlélni a régi hangszereket, nem megfélemlítve arról, hogy olyannak alkották meg a múltban, hogy a mai, ún. tudományos és technikai kor csak ezek titkait próbálja kifürkészni, ezek minőségét elérni. Mennyivel nehezebb dolog volt ezeket megalkotni mindenféle előzmény nélkül, és rájönni, alkalmazni azokat a törvényszerűségeket, amiket ma a technika segítségével tárnak fel. Nem lehet feladni ugyanakkor azt a távoli reményt, amikor a vizsgálatok eredményeinek megértésével, a jelen legjobb hegedűinél is tökéletesebb hangszer megszületésére nyílik lehetőség.

Mi (és itt beleérttem a külföldön nagy erővel kutatókat is) a legmodernebb eszközökkel próbálunk rájönni arra amit a nagy elődök vagy tudatosan vagy nem tudatosan, de műveltek. Mennyivel könnyebb egy meglévő dolog működésére rájönni, mint azt kitalálni és először megalkotni. Tehát az elődök előtti főhajtás és a csodálattal vegyes tisztelet talán még nagyobb mérvű ahogy látjuk mennyi energiával lehet egy aprót előre lépni a tudás mezsgyéjén.

A válaszokat keresve a hegedű titkaira a Biblia néhány sora kikerülhetetlenül kínál egy megoldást:

"És szóla az Úr Mózesnek mondván:

Ímé név szerint meghívtam Bésaléelt,...

És betölttettem őt Istennek lelkével, bölcsességgel, értelemmel és tudománnyal minden mesterséghez.

Hogy tudjon kigondolni mindent, a mit aranyból, ezüsből, rézből kell csinálni.

És foglaló köveket metszeni, **fát faragni** és mindenféle munkákat végezni."

(MózesII. könyve 31.1-5.)

Vajon ki volt a hegedűkészítés meghívottja...? És ilyen meghívás nélkül lehet-e bármily fáradsággal és eszközzel jelentősen előre lépni?

1997 augusztus.

## 9. Dinamikai vizsgálatok (sajátfrekvenciák számítása)

Mint a bevezetőben említettem, a modell-analízist utóbb kiterjesztettük dinamikai vizsgálatokra is, amelyek meglepően élethű eredményeket adtak.

A számítógépes program, jelen esetben az MSC/NASTRAN, egy sajátérték számítást és ezzel együtt egy sajátfrekvencia számítást végez. Ez kizárólag a geometriától és az anyagi jellemzőktől függ, tehát terhelések ilyenkor nincsenek figyelembe véve. Ezzel a számítással tehát a hegedűtest azon frekvenciáit lehet megtudni, amelyekre rezonál. A frekvencia nagyság tényleges számszerű értéke itt nem is olyan fontos, hiszen az a modellhez választott paraméterek függvénye, annál inkább érdekes az az elmozduláskép, ami az egyes sajátrezgésekkel párosul. A statikus feszültséganalízisnél már megismert színező technikával lehetett itt is szemléletesen láthatóvá tenni a test deformációs viselkedését a rezgés alatt. Az idevonatkozó szakirodalmakból már ismert modusz-képek tűntek elő az alsó tartományban. (ld. 81-86. oldalon lévő ábrákat) Ennél érdekesebb volt a frekvenciák magasabb értékeinél adódó rezgéskép, ahol is a hegedűtest különböző részein és kis területein jelentkeztek az amplitúdó csúcsok. (ld. 87-90. oldalig terjedő ábrákat)

Nagyon sok sajátfrekvenciát találtunk, mindegyiket nem is lehetett kiszámolni a számítási idő hosszúsága miatt. Néhány kiragadott példa mégis szemléletesen mutatja a frekvencia növekedésével járó változásokat, fokozódó bonyolultságukat.

Magától adódott a lehetőség, hogy a különálló tetőt és hátat is vessük alá a dinamikai vizsgálatoknak, hiszen ezek Chladni-képei már a szakirodalomból és a saját kísérleteimből is ismertek, és jó alkalmat adnak az összehasonlításra.

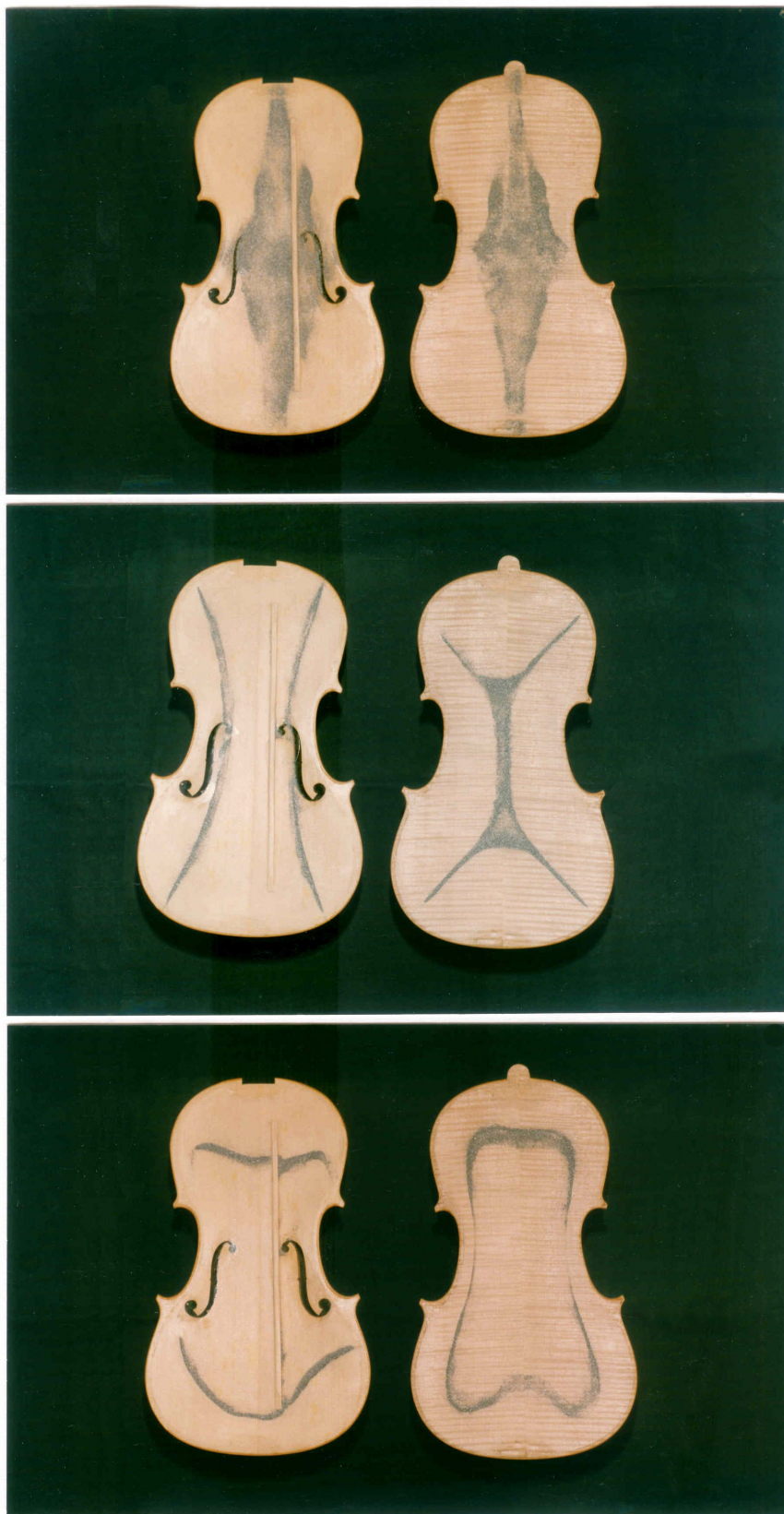
Amint a hosszas számítás után sorba tűntek elő a móduszok, az első meglepetést az okozta, hogy a Hutchins által elsőnek nevezett kép, csak a harmadik sajátfrekvenciára jött elő, ami azt jelenti, hogy mélyebb (nem hallható) tartományokban is van már a rendszernek sajátrezgése. A következő meglepetés már az volt, hogy ezután milyen tökéletesen adja ki a modell szimuláció a méréssel kapott eredményeket. Ez bizonyító erejű arra nézve, hogy a modell viselkedését más -mérésekkel nem igazolt- tartományokban is elfogadhatónak vegyük valamint a modellválasztás jó volt, és a végeselemes számítási módszer ezen a területen is bevált.

Megjegyezzük, hogy a dinamikai analízis eredményeként kapott rezgésképek gyakorlattal való azonossága ellenére, mégis elméleti jellegűek, mert nem egy gerjesztésre adott válasz-deformációt adják. A valóságban pedig csak így lehet rezgésre készíteni egy rendszert.

Tetézi még az eltérést, hogy a húrral vagy más gerjesztéssel létrehozott rezgésnél mindig jelen vannak a felharmónikusok is, amik tovább bonyolítják a

képet, azaz valójában az általunk kapott rezgések szuperponáltjai. Egy holografikus vizsgálat mutatja csak ki ezeket a tényleges rezgéseket.

Saját mérési eredményeket mutatnak a következő fotók:

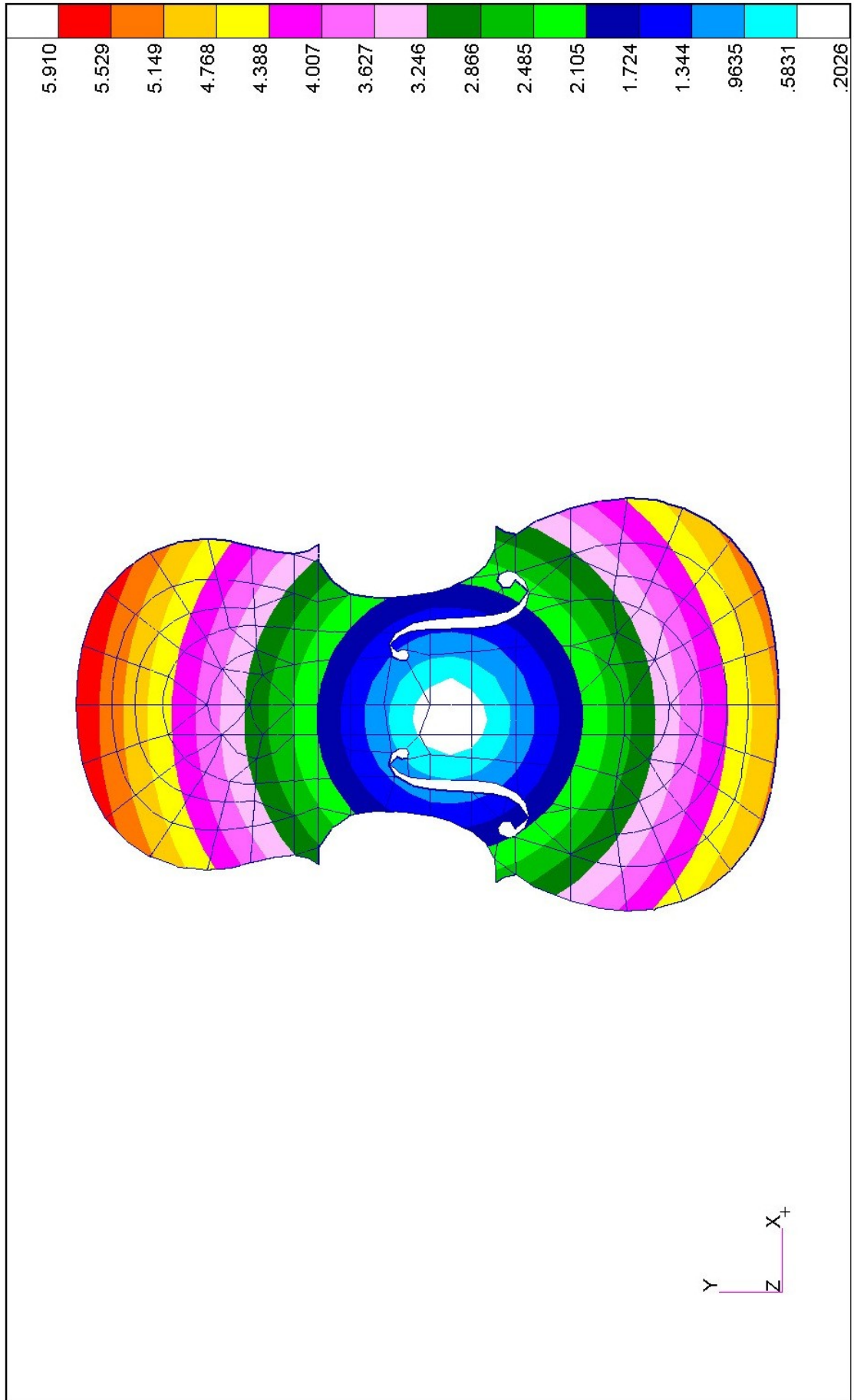


Hegedű tető- és hátlapjának Chladni-képei az 1. 2. és 5. rezonáns frekvencián

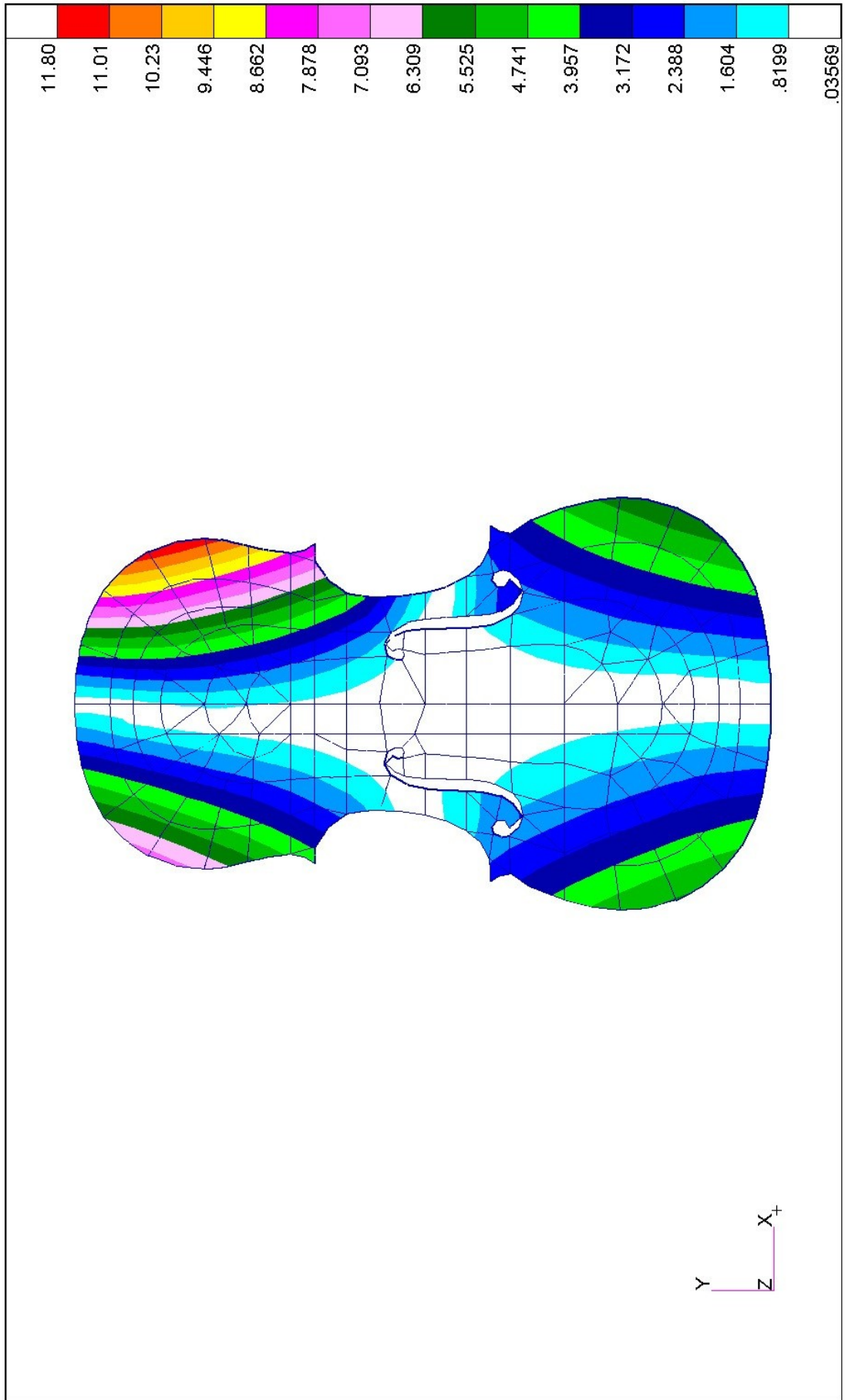


Csellótető  
Chladni-képei  
a 2. és 5. rezonáns  
frekvencián

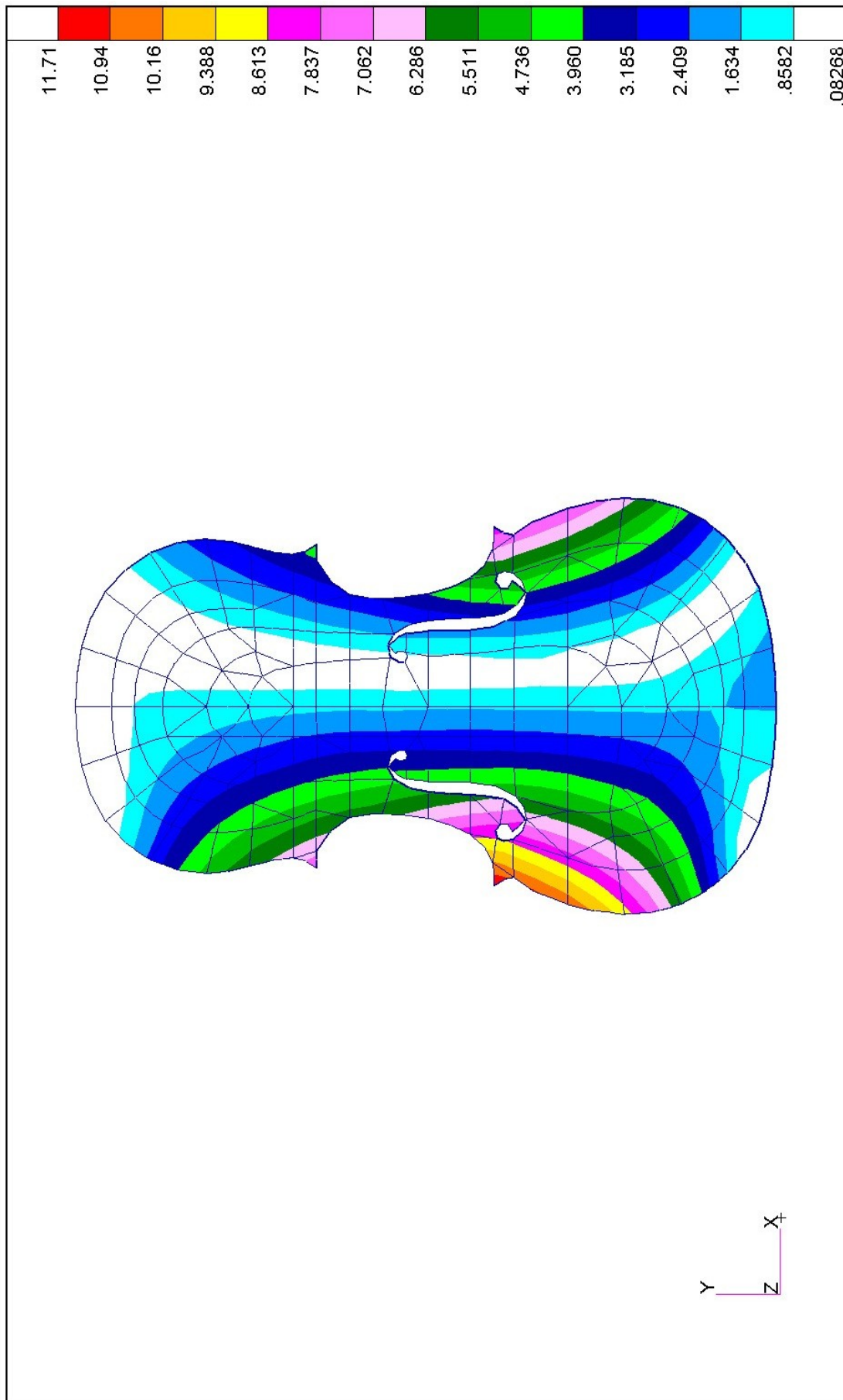




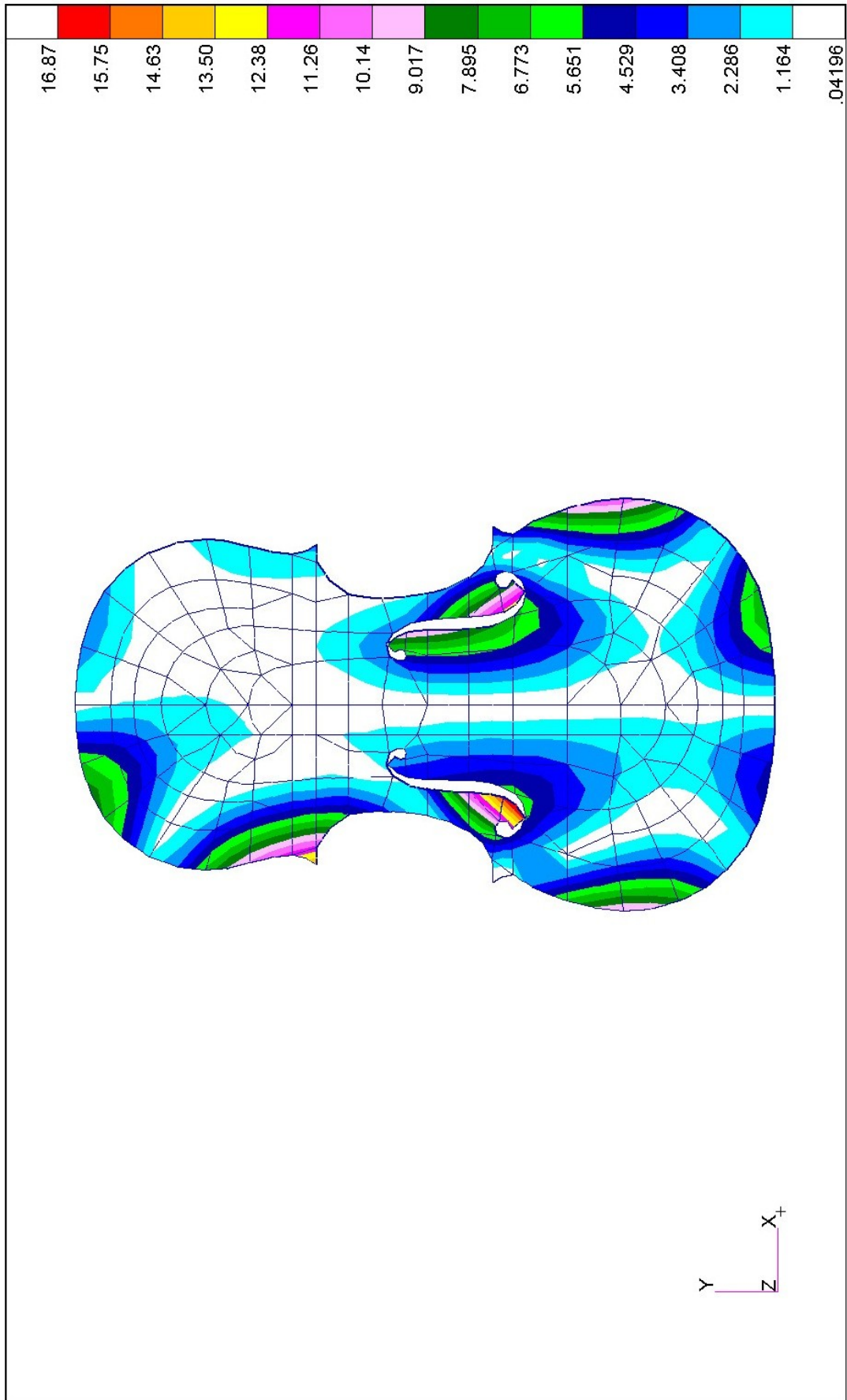
Tető rezonanciaképe



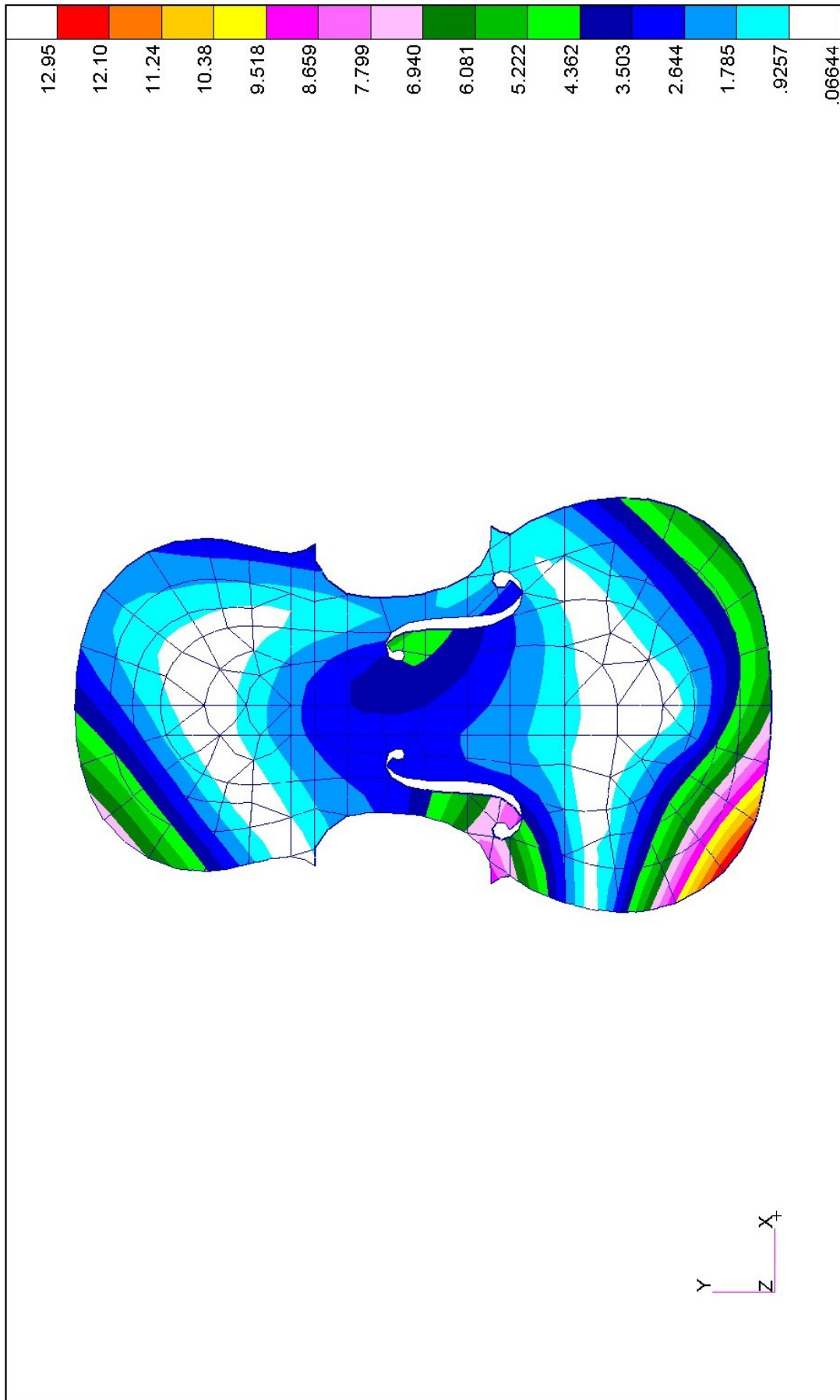
Tető rezonancia képe (Hutchins 1 Módusz)



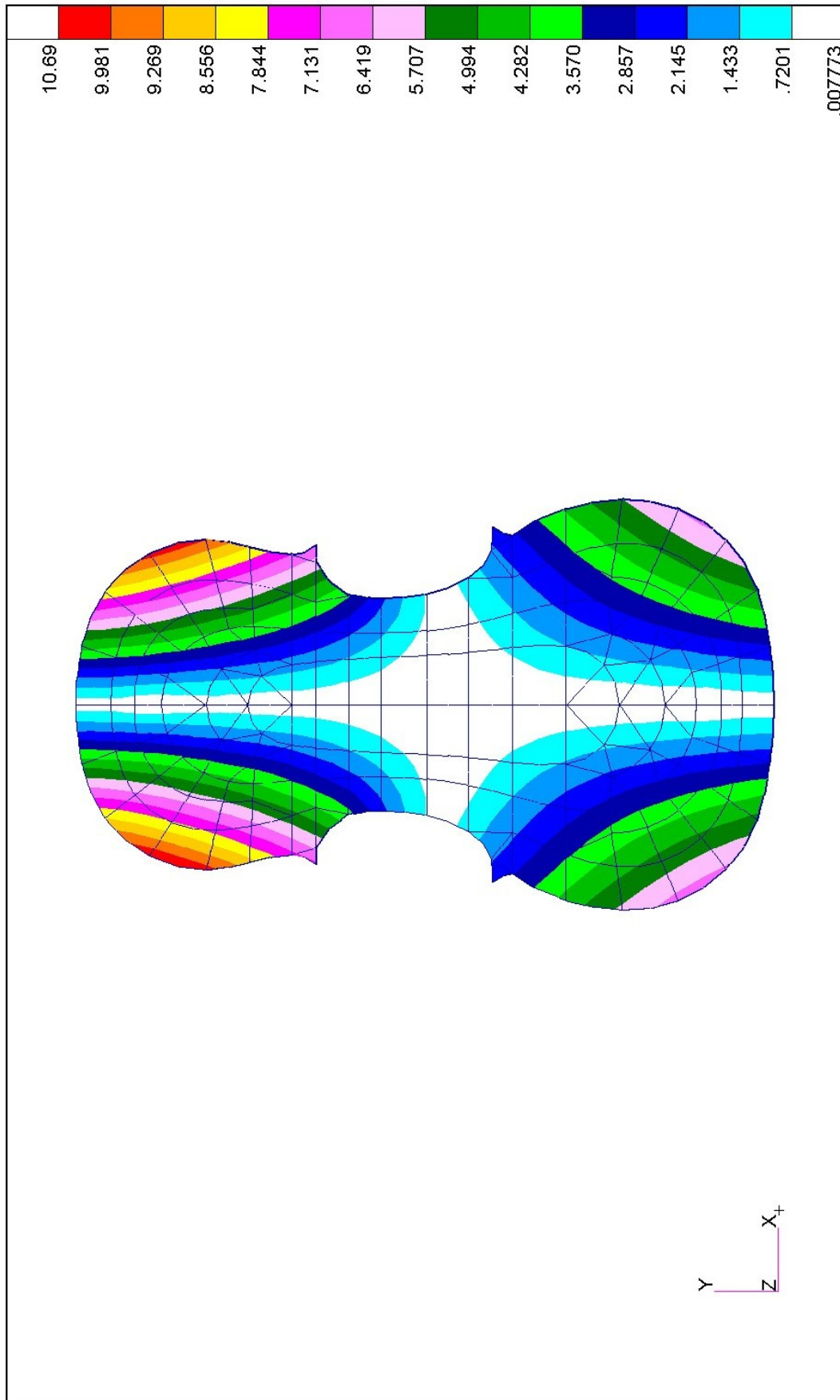
Tető rezonanciaképe (Hutchins 2 Módusz)



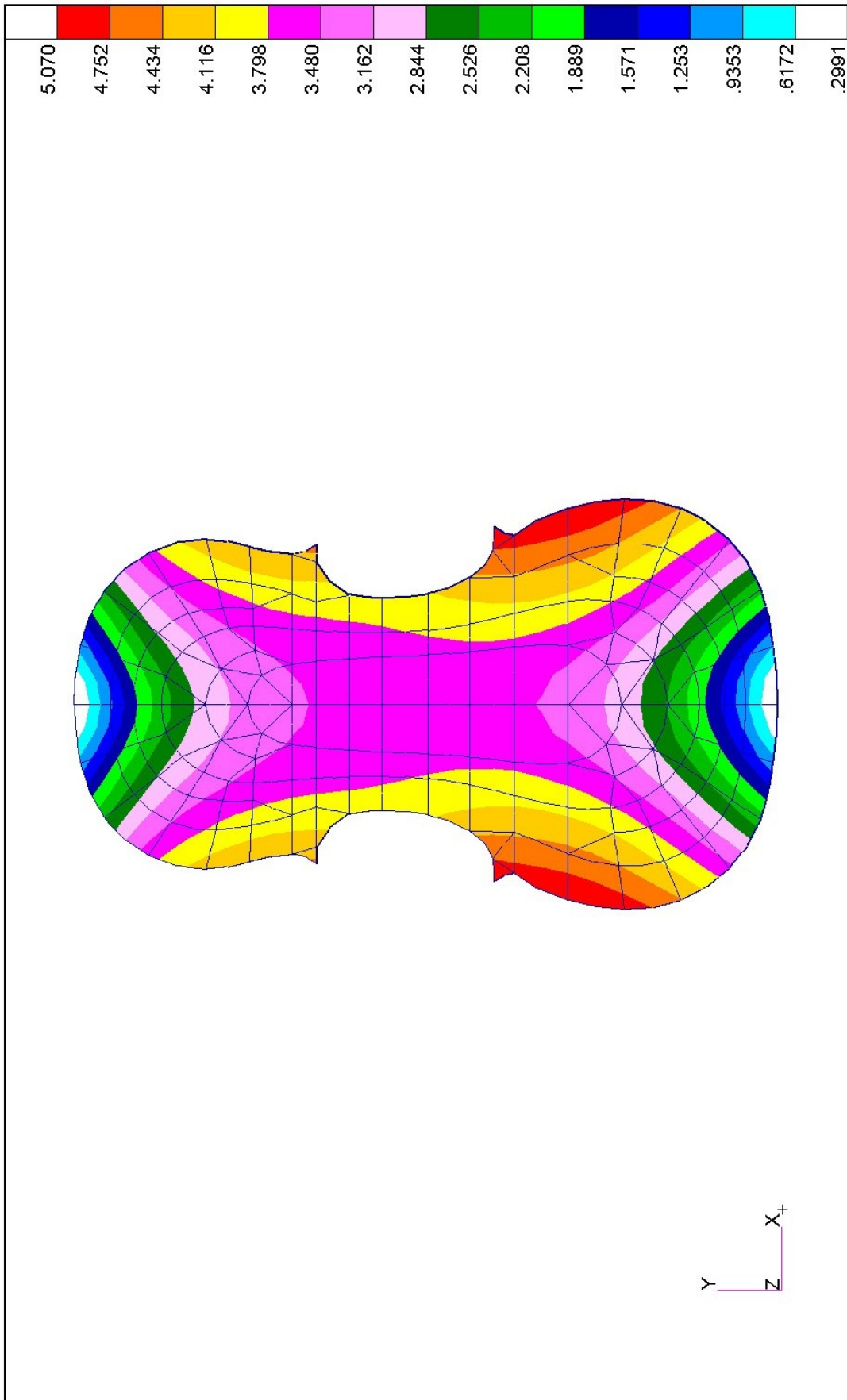
Tető rezonanciaképe ( 3 Módusz )



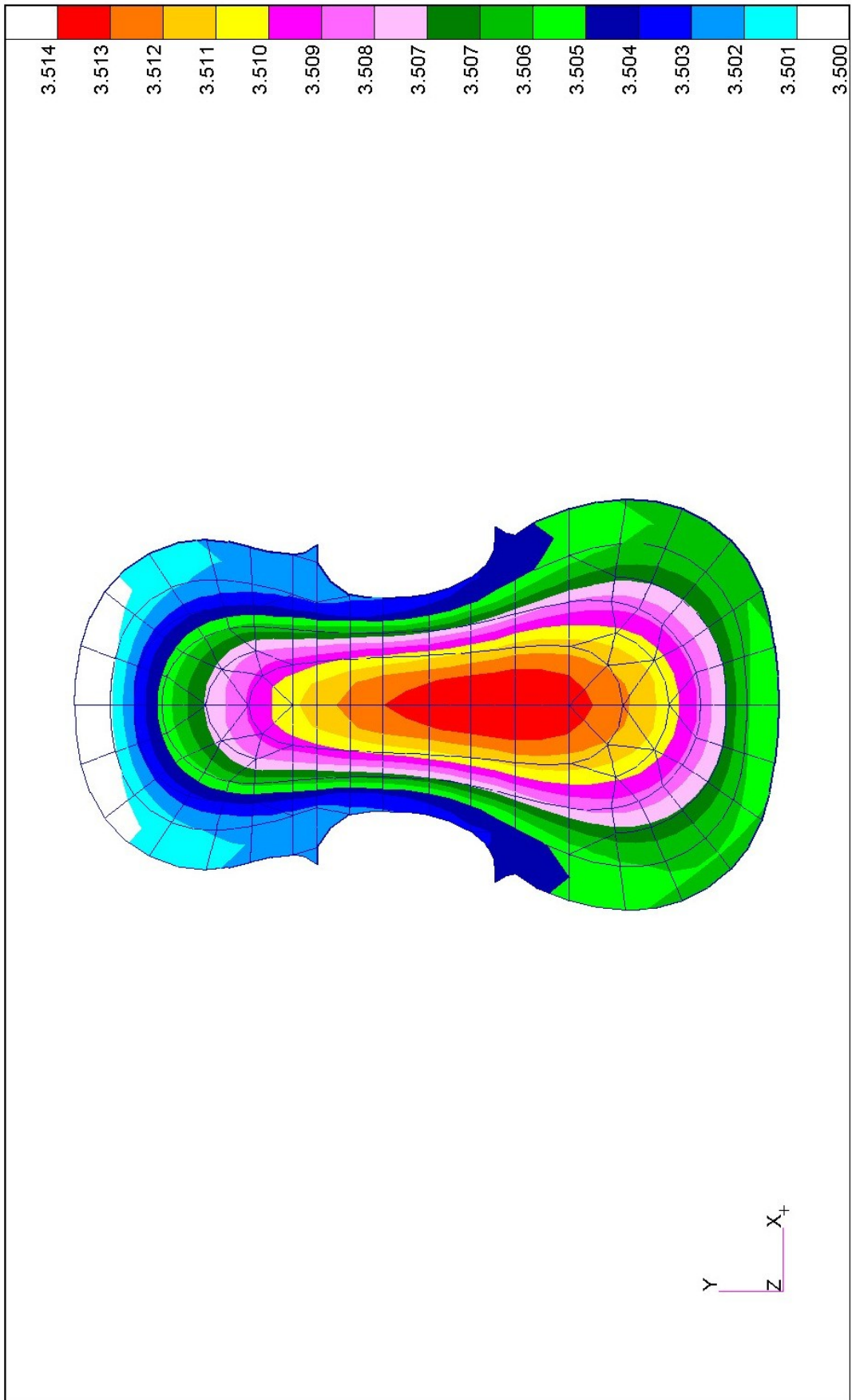
Tető rezonanciaképe ( Hutchins 5 Módusz )



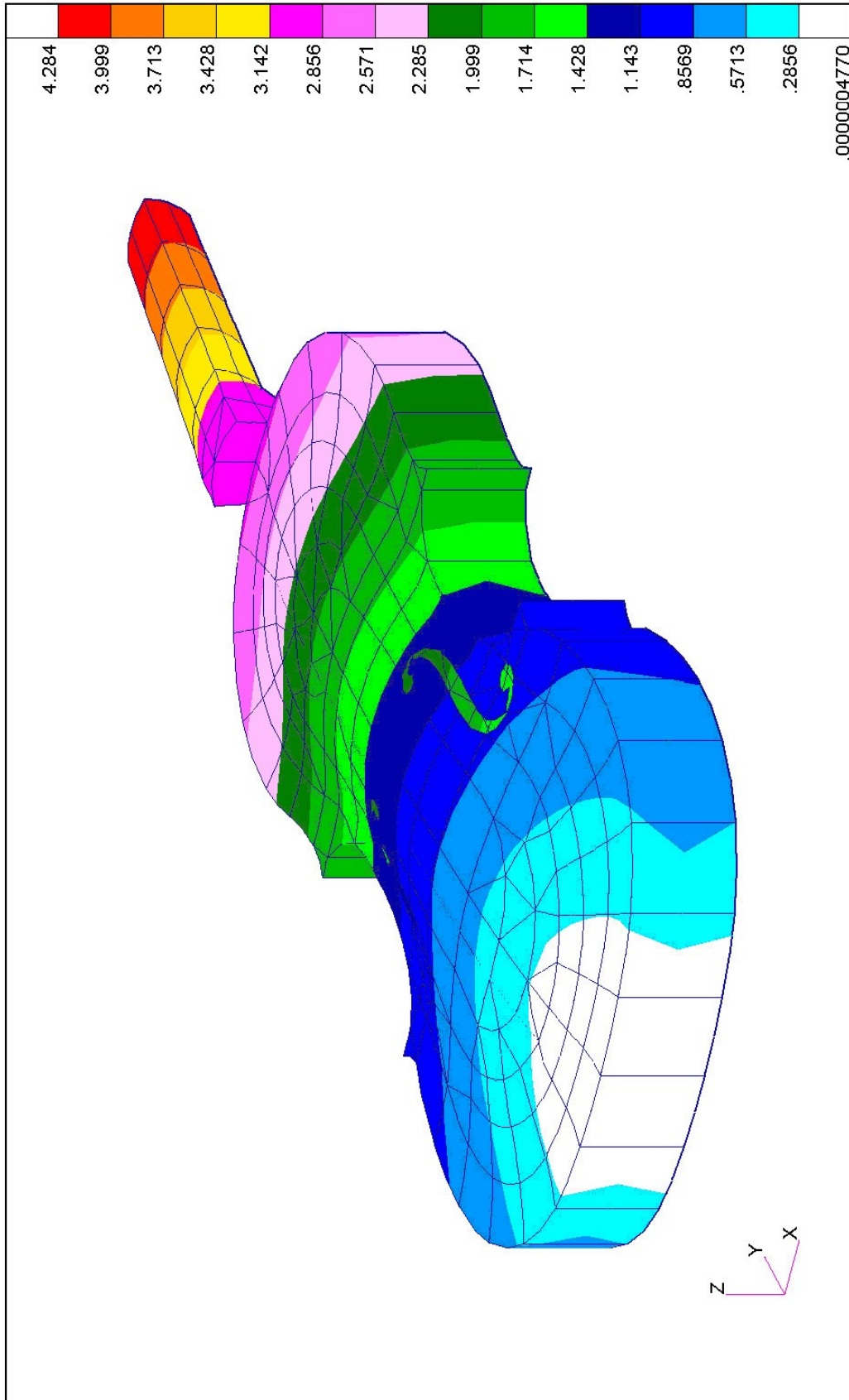
Hát rezonanciaképe (Hutchins 1 Módusz)



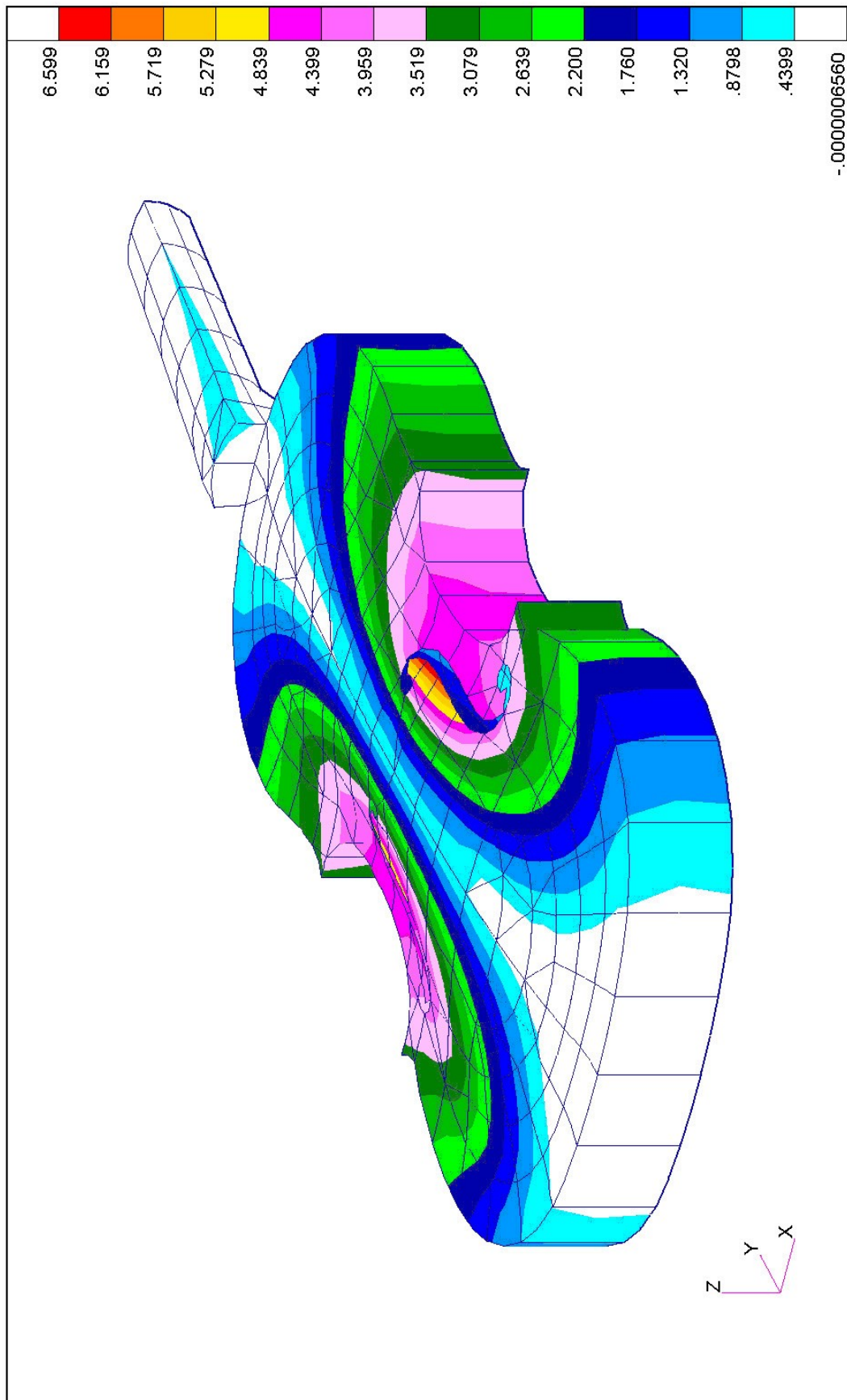
Hát rezonanciaképe (Hutchins Módusz 2)



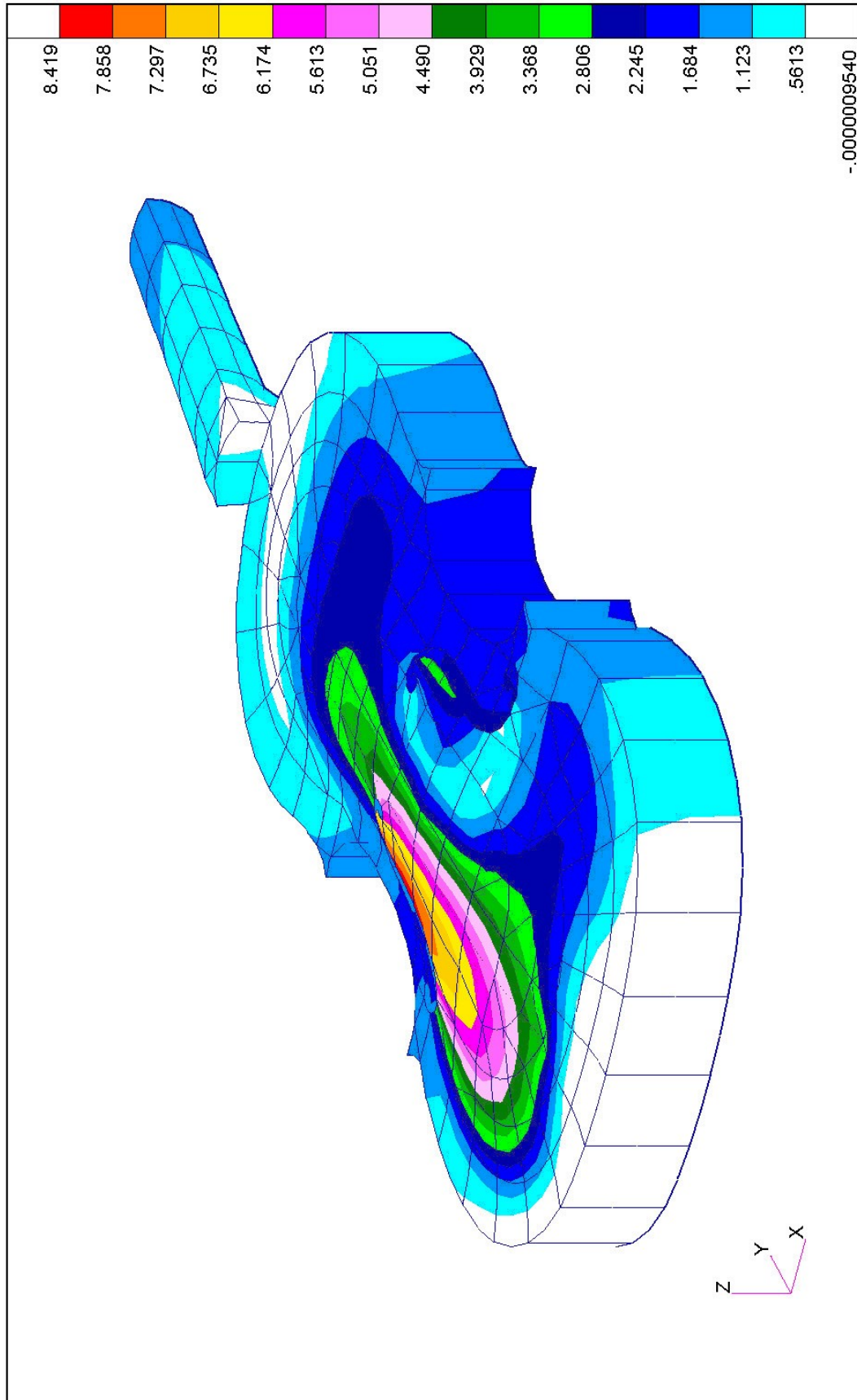
Hát rezonanciaképe ( Hutchins Módusz 5 )



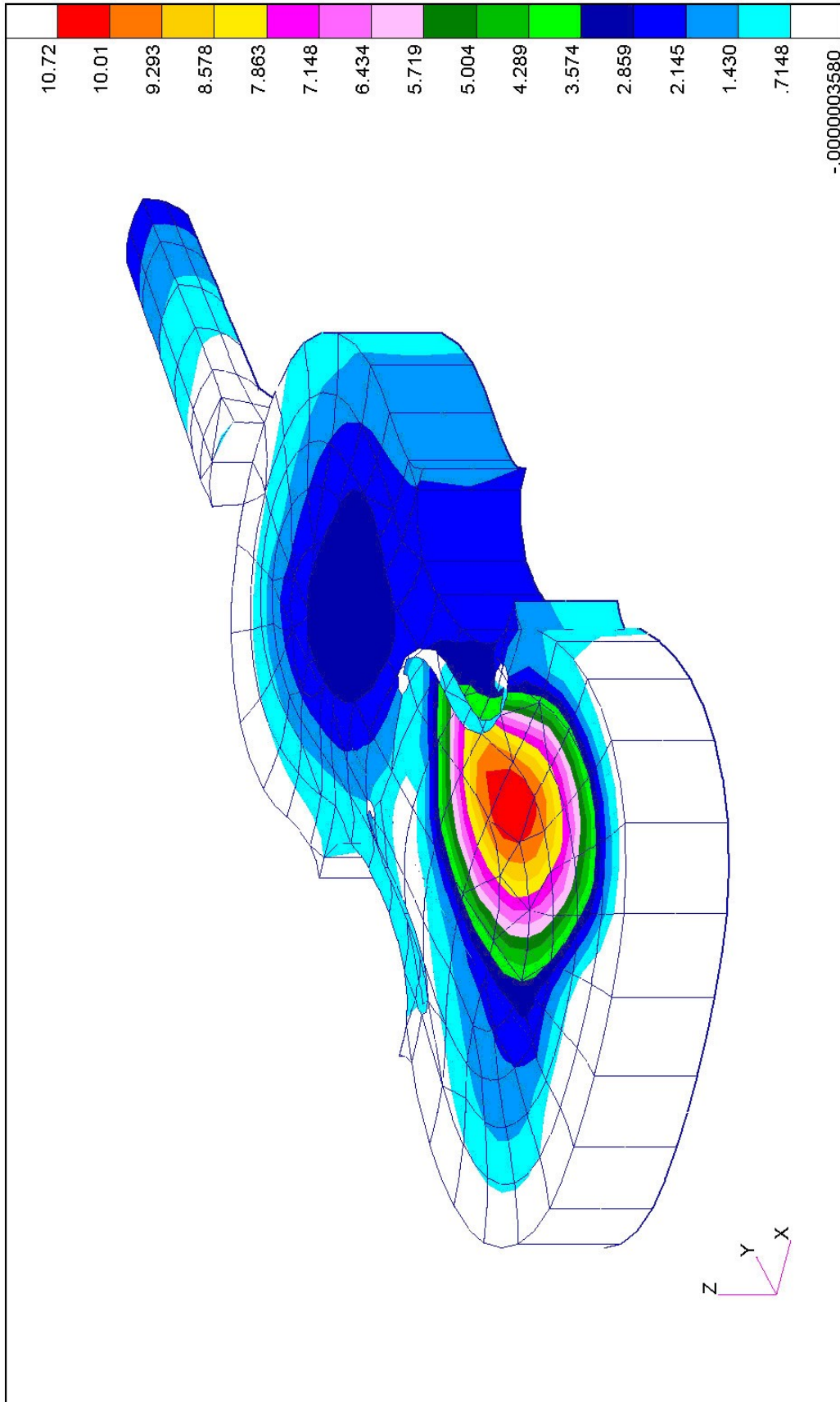
Teljes hegedűtest rezgése ( 1 Módusz )



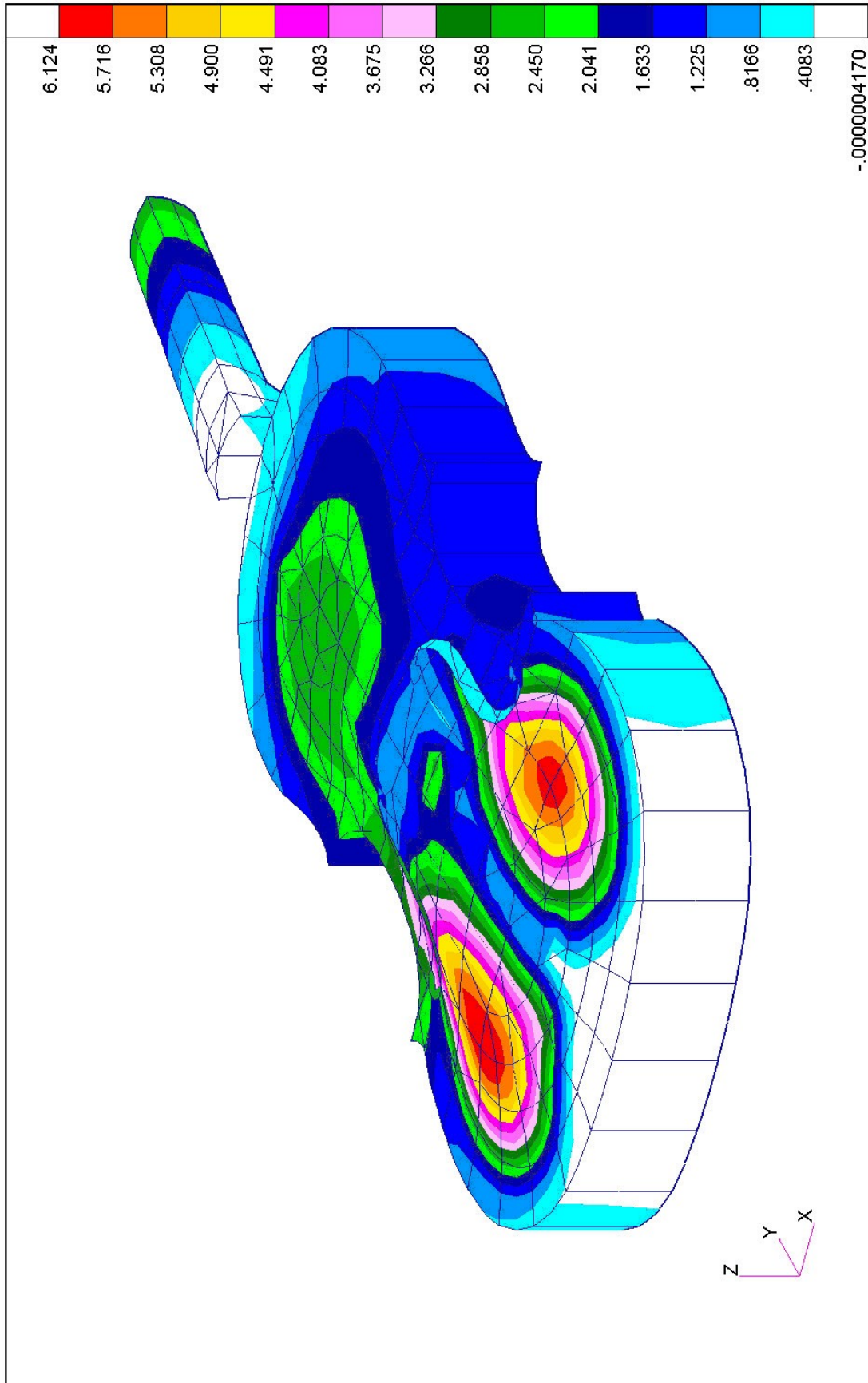
Teljes hegedűtest rezgésiképe ( 2 Módusz )



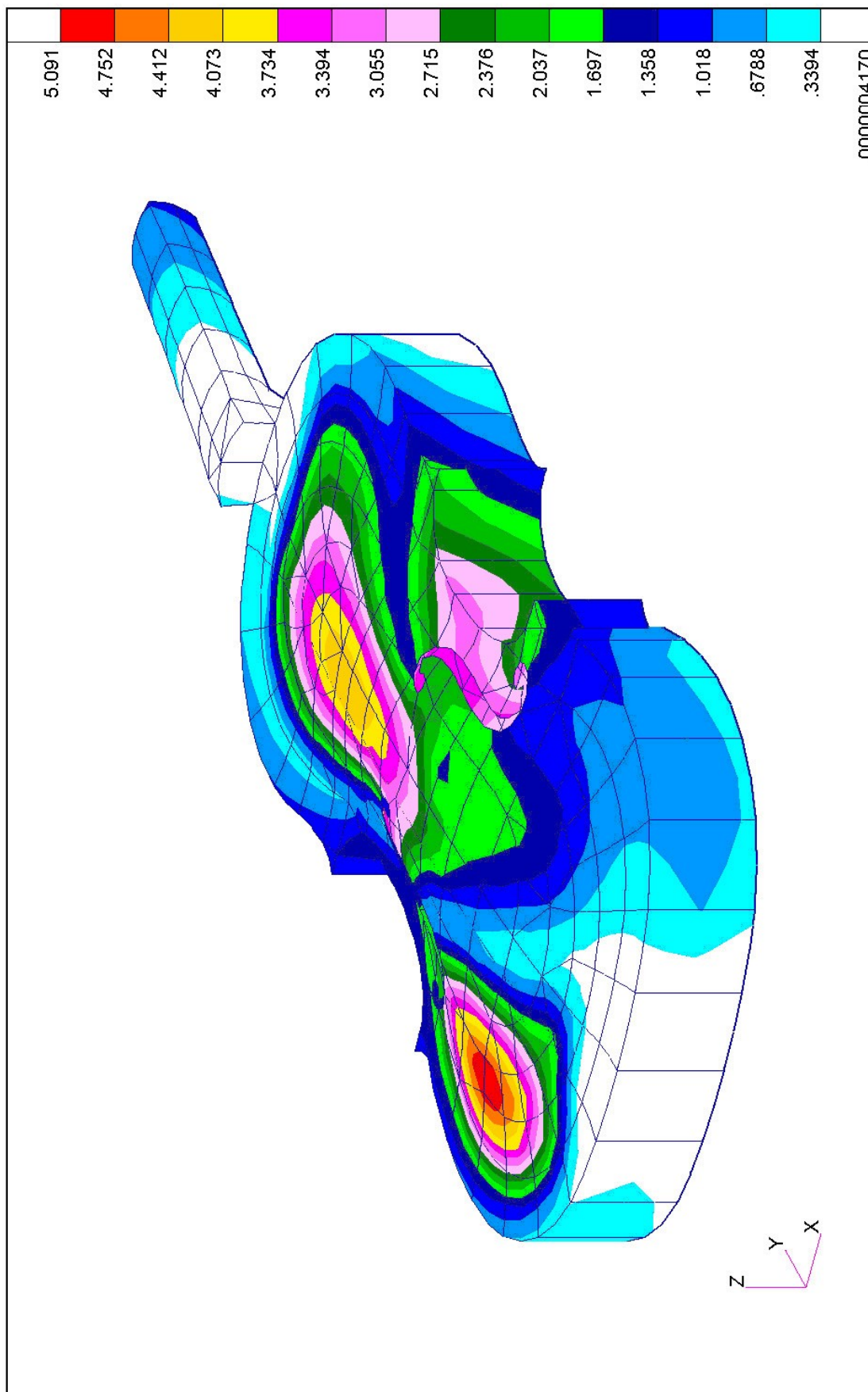
Teljes hegedűtest rezgése ( 3 Módusz )



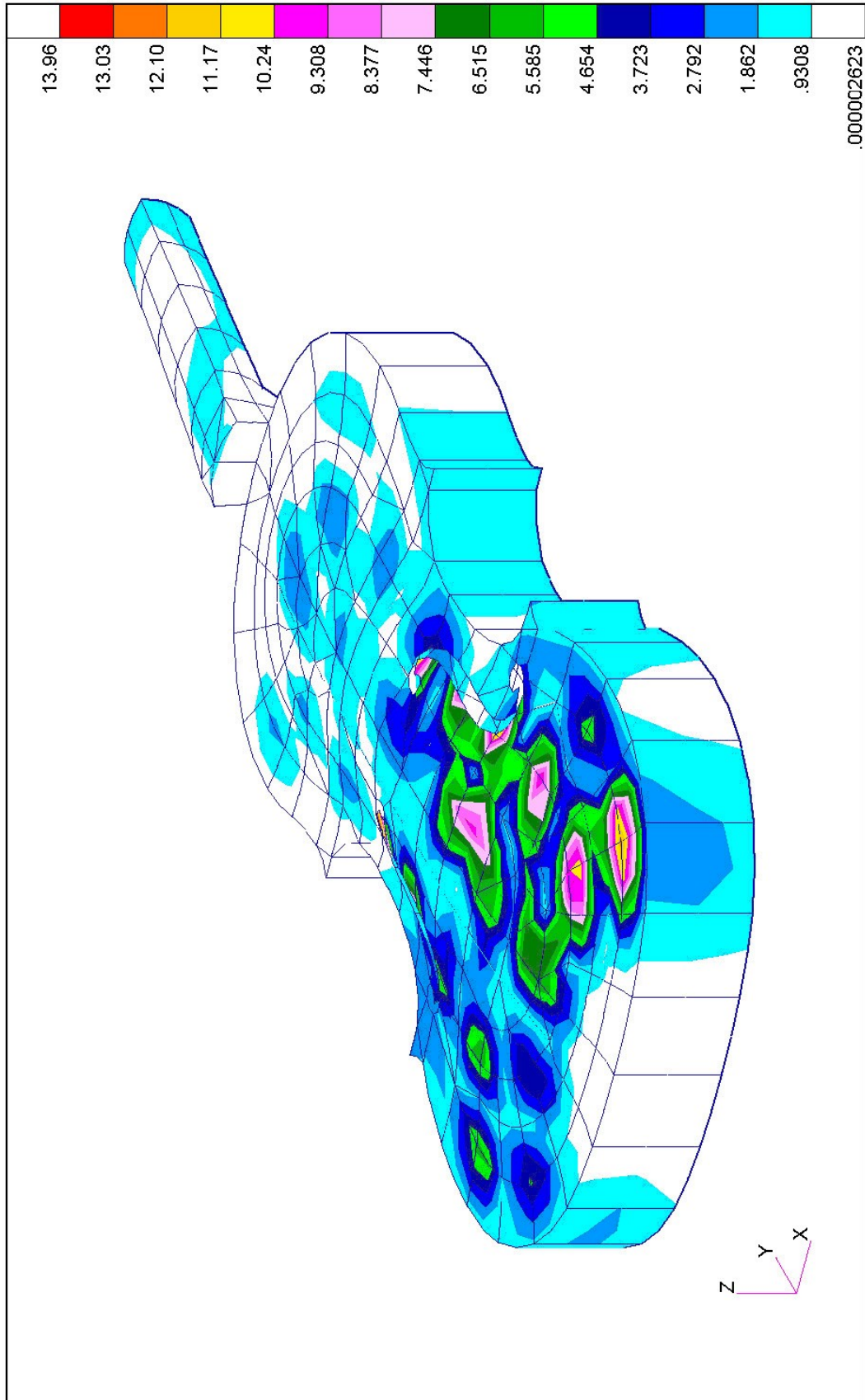
Teljes hegedűtest rezgésképe ( 3 Módusz )



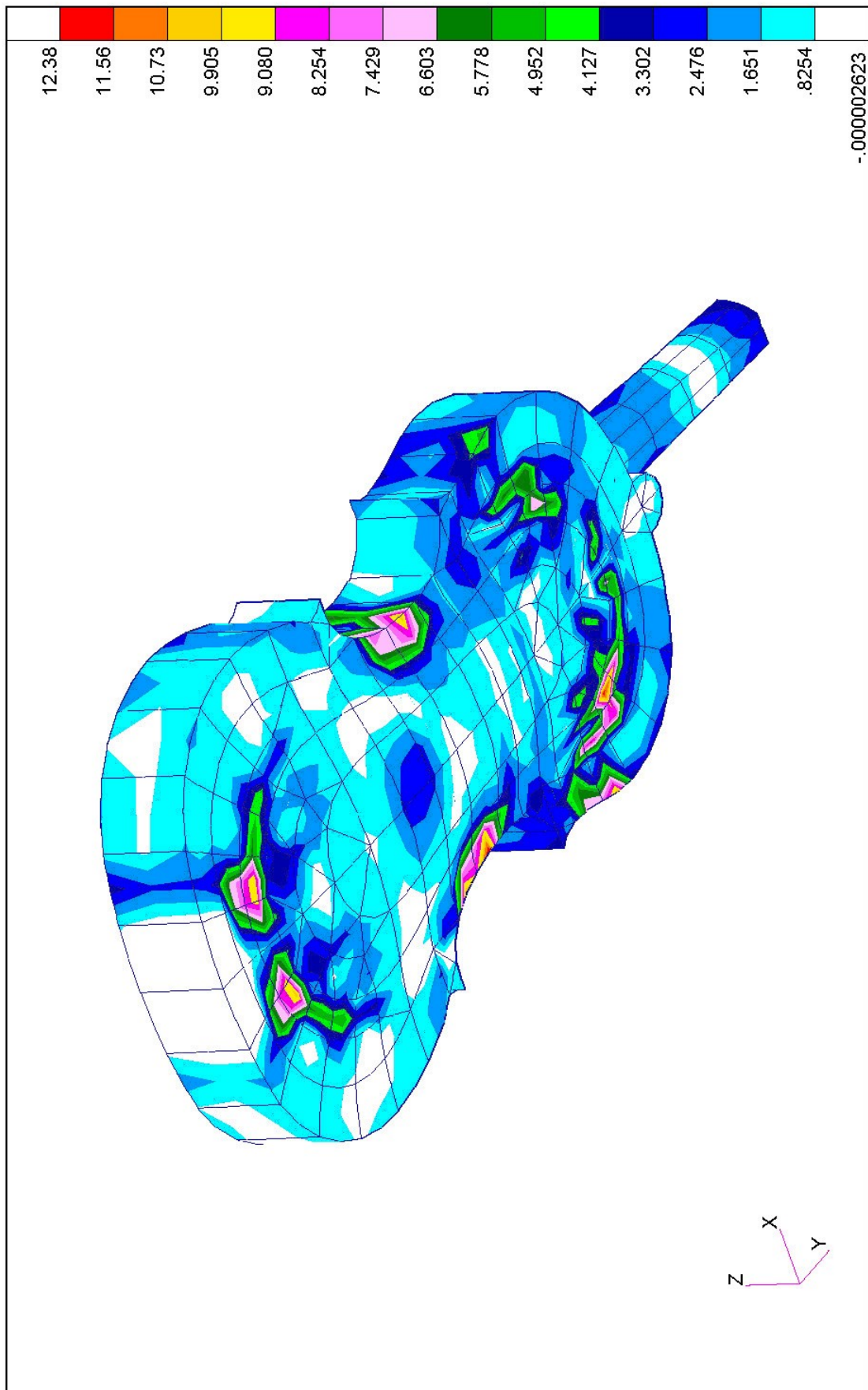
Hegedűtest rezgésképe (4 Módusz )



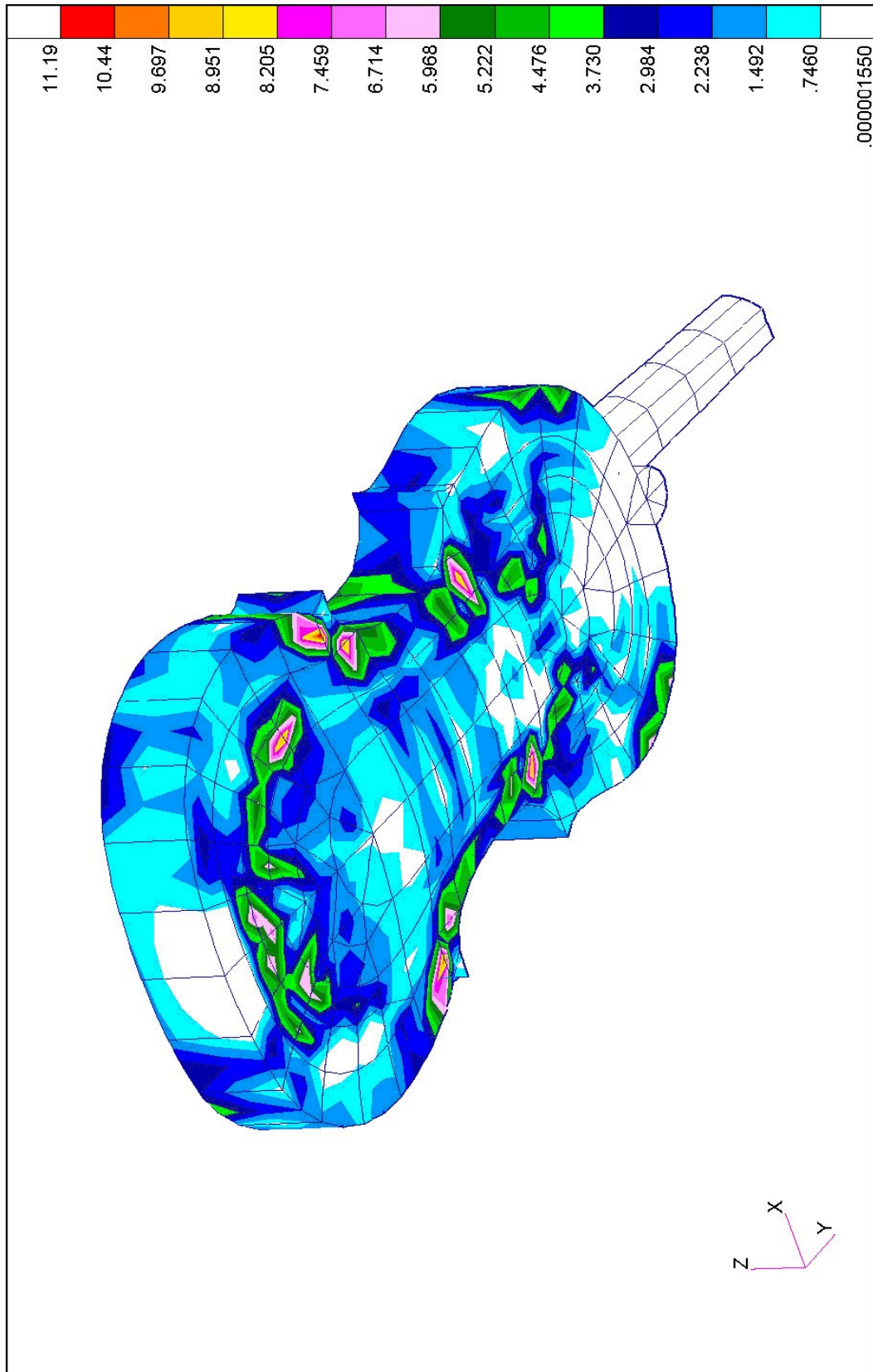
Hegedűtest rezgésképe ( 5 Módusz )



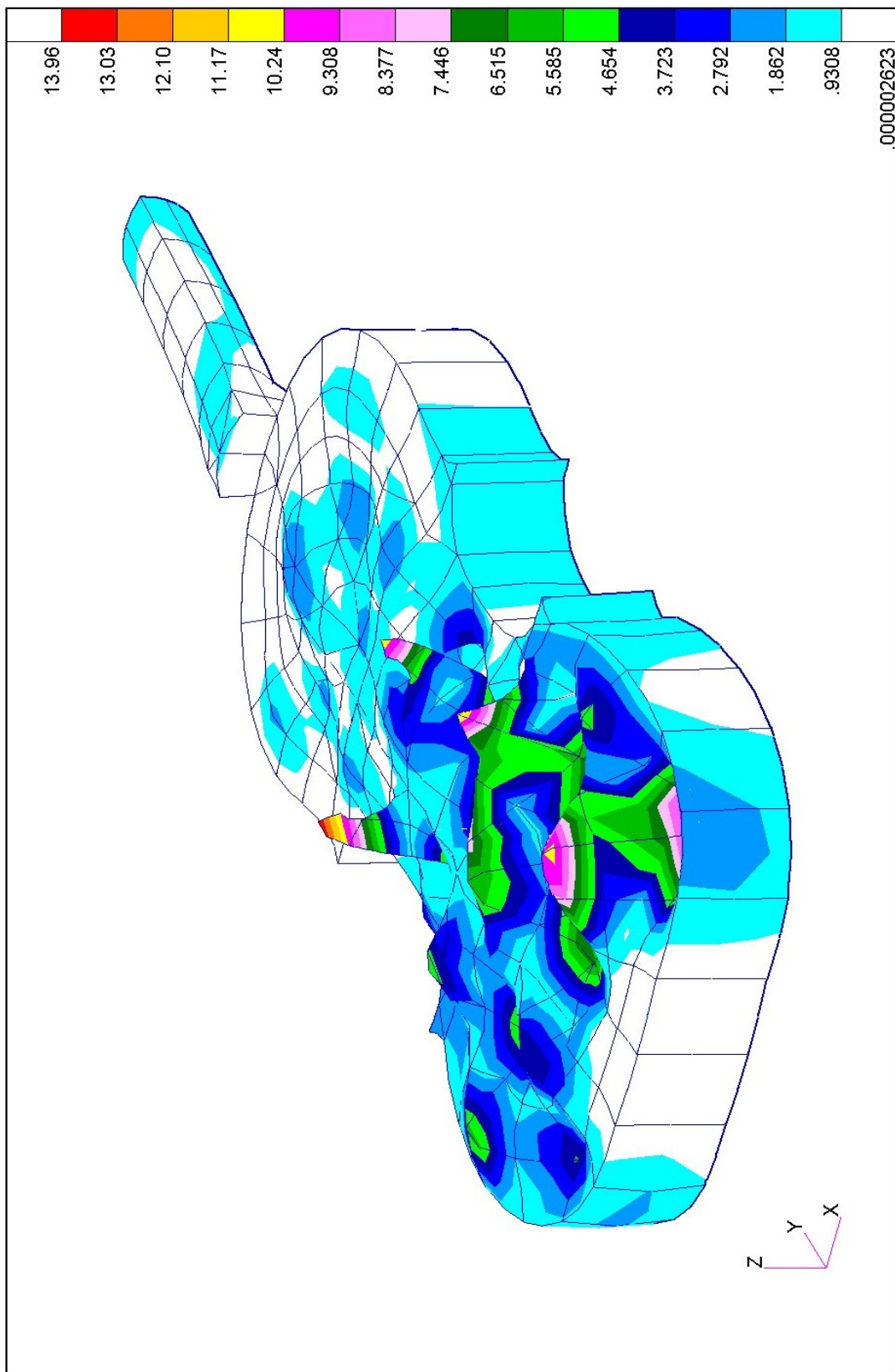
Hegedűtest rezgése képe magasabb felharmónikusoknál



Hegedűtest rezgésképe magasabb felharmónikusoknál  
 egyre bonyolultabb és sűrűsödő jelleget mutat



Hegedűtest rezgésképe magasabb felharmónikusoknál



Hegedűtest deformációs képe magasabb sajátrezgésnél, eltúlzott amplitúdó értékkel, szemléltetve a hegedűtető rezgés közbeni hullámzó mozgását

Ezzel a szakdolgozatban szereplő kutatás lezárult, de remélem, hogy a hegedűkészítő szakma a számítógépes analízisből adódó lehetőségeket a jövőben is ki fogja használni eredményei finomítására.

## 10. Név és tárgymutató

( szómagyarázat )

<i>analitikus:</i> (mat.)	a mennyiségek közötti kapcsolatot matematikai függvényekkel leíró
<i>anizotrop:</i>	különböző irányokban más fizikai tulajdonságokat mutató anyag
<i>Bezier-felület:</i>	szabadformájú felület leírására alkalmas, másodrendű felületekből összetett felületcsoport
<i>CAD:</i>	(Computer Aided Design )komputerrel támogatott tervezés
<i>derivált-görbe:</i>	Egy függvény adott pontjához tartozó derivált értéke a ponthoz tartozó érintő irány-tangense. Ennek minden ponthoz való ábrázolása adja a derivált görbét.
<i>differenciál:</i> (mat.)	végezen kicsi, ami hordozza még a teljes tulajdonságait, de benne a fizikai változás lineárisan leírható
<i>digitalizál:</i>	megszámlálhatóra felapróz és így számszerűsít
<i>diszkrétizál:</i>	nem folytonos, elkülönített részekre bont
<i>FEM:</i>	(Finite Element Method) véges elemes módszer
<i>feszültség:</i>	az anyag belsejében felületegységre jutó erő
<i>hardver:</i>	a számítógépes rendszerek fizikai része
<i>homogén:</i> (fiz.)	egynemű, minden pontján azonos tulajdonságokkal bíró (anyag)
<i>Hooke-törvény:</i>	a rugalmasságot leíró függvény ( $\sigma = E \varepsilon$ )
<i>ikon:</i>	jelképes, egyszerű ábra
<i>inercia nyomaték:</i>	tehetetlenségi nyomaték

<i>izotrop:</i>	minden irányban egyenértékű, azonos tulajdonságú	
<i>kinematika:</i>	mozgástan; a mechanikának a testek mozgását a mozgást okozó erőktől függetlenül vizsgáló ága	
<i>kontinuum:</i>	folyamatos, megszakítatlan (közeg)	
<i>mátrix:</i>	téglalap alakú táblázatszerű formába rendezett halmaz, ahol az elhelyezkedési pozíció nem tetszőleges	
<i>módusz:</i>	sajátfrekvenciához tartozó rezgésekép	
<i>numerikus módszer:</i>	digitalizált (számszerűsített) halmazokat kezelő matematikai módszer	
<i>operációs rendszer:</i>	szoftver-együttes, amely vezérli egy számítógépes rendszer erőforrásait és azokat felhasználó folyamatokat	
<i>parciális: (mat.)</i>	részleges, nem az egészre kiterjedő	
<i>PC:</i>	(Personal Computer)	személyi számítógép
<i>post-:</i>	valami után	
<i>pre-:</i>	elő- (szóösszetételek előtagjaként a vele összetett szónak, előzetes, valamit megelőző voltát jelenti)	
<i>processzor:</i>	A számítógép "agya". Értelmezi a programokat és az utasításokat végrehajtja.	
<i>Rugalmassági modulus:</i>	A Hooke-törvény együtthatója (E)	
<i>sajátrezgés:</i>	a legkisebb energiával fenntartható rezgés száma	
<i>Spline-görbe:</i>	tetszőleges görbét követő, másodrendű görbefűzér	
<i>statikus:</i>	nyugalmi, egyensúlyban lévő állapot	
<i>szabadságfok:</i>	egy test v. annak egy pontjának a térbeni elmozdulási lehetősége (max. 3 elmozdulás és 3 elfordulás)	

<i>szilárdság:</i>	az anyag ellenállása külső erőhatásokkal szemben
<i>szoftver:</i>	a számítógépes rendszer meg nem fogható, nem fizikai összetevője (Leggyakrabban a számítógépes rendszer által végrehajtott programokra vonatkozik a megnevezés.)
<i>tablet:</i>	adatbevivő eszköz (mint a billentyűzet v. az egér)
<i>tenzor:</i>	transzformációs mátrix
<i>termodinamika:</i>	a fizikának az az ága, amely a hőegyensúllyal, továbbá a hőnek és más energiafajtának kölcsönös átalakulásával foglalkozik
<i>vektor:</i> (mat.)	nagysággal, iránnyal és irányítottsággal (értelemmel) rendelkező mennyiség

## 11. Felhasznált irodalom

- [1] Dr Erdélyi Sándor: A hegedű  
(MTA Zenetudományi Intézet 1982)
- [2] Kristóf Zoltán: A végeeselemes analízis alkalmazása a  
CAD-rendszereken (Rába Fórum 1988-1)
- [3] Dr Michelberger-Horváth: Mechanika V.  
BME Közlekedési Kar jegyzet  
(Tankönyvkiadó 1985 )
- [4] C.M. Hutchins The Acoustisc of Violin Plates  
(Scientific American 1984/4)
- [5] Dr Pap János Tudomány vagy művészet?  
(A hegedű akusztikus problémái)
- [6] Paul Bowers: Calculated curves (The Strad 1990. VIII.)
- [7] Sacconi, Simone F. The "Secret"of Stradivari ( 1979 )
- [8] Dr Szalai József: A faanyagok és faalapú anyagok anizotróp  
rugalmasság- és szilárdságtana  
(Erdészeti és Faipari Egyetem  
Műszaki Mechanika tanszék 1994)
- [9] Dr Vadon Géza: Hangszerész (vonós) szakmai ismeretek  
(Műszaki Könyvkiadó 1975)
- [10] Kiadvány: Strumenti di Antonio Stradivari  
(Ente Triennale Internazionale degli  
strumenti ad arco, Cremona 1991)

## 12. Tartalomjegyzék

A Liszt Ferenc Zeneművészeti Főiskola  
Hangszerészképző Iskola hegedűkészítő szakvizsgájához

### S Z A K D O L G O Z A T

#### **Hegedű korpusz statikus feszültségeloszlásának számítógépes analízise.**

Köszönetnyilvánítás.....	1
Bevezetés.....	2
1. A feladat leírása.....	5
2. A felhasznált elméleti és technikai háttér rövid ismertetése.....	7
- Mi a végeselemes módszer?.....	7
- Hardver.....	11
- Szoftver: - geometria ( ANVIL 5000 ).....	14
- végeselemes analízis ( NASTRAN ).....	20
- elemfelosztás ( PATRAN ).....	21
3. Háromdimenziós felületmodell felépítése.....	22
4. Végeselemes felosztás.....	37
5. Peremfeltételek és számítási adatok meghatározása.....	48
6. Feszültségeloszlások és deformációk csomóponti számítása...	53
7. Feszültségeloszlások képi megjelenítése.....	55
8. Értékelés, következtetés.....	66
9. Dinamikai vizsgálatok.....	70
10. Név és tárgymutató, magyarázatok.....	91
11. Felhasznált irodalom.....	94
12. Tartalomjegyzék.....	95