



TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT

VERES MARCELL

2025

DUNAÚJVÁROSI EGYETEM



**TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI
DOLGOZAT**

*Megfogó sajátfrekvenciájának számítása
végeelem módszerrel*

**Témavezető:
DR. PÓR GÁBOR**

**Hallgató:
VERES MARCELL
GÉPÉSZMÉRNÖK BSc
2025**

Rezümé

A dolgozatomban az Ecotech Nonprofit Zrt. Élettartam Vizsgáló Laboratóriumában használt, a rázandó mintához tervezett megfogó eszköz modális analízisét végeztem el az Ansys szoftver segítségével. Az elemzés célja a megfogó sajátfrekvenciáinak és lengésképeinek vizsgálata volt, ami alapján megítélhető a megfogó stabilitása és megfelelése a rezgéstesztelési folyamatokhoz.

A dolgozat elején ismertettem a kutatás célját, amely a modális analízis elvégzése és a sajátfrekvencia meghatározása egy speciális rezgésdiagnosztikai megfogón. Ezután ismertettem a megfogó eszközt. A modális analízist az Ansys végeelem-módszerével készítettem, részletesen ismertetve annak menetét, elméleti háttereit és a szimulációban beállított paramétereket.

A megfogó modális analízisben kapott sajátfrekvenciáit, ezután egy LDS rázógéppel végzett véletlenszerű (Random) és pásztázó szinuszos (Swept Sine) vibrációs teszttel ellenőriztem, a teszt menetét részletesen ismertettem. Az eredmények egybevágtak, és a megfogó sajátfrekvenciáját egy százalékon belüli pontossággal 2260 Hz-nek ítélt meg.

Összességében a dolgozat célját sikeresen teljesítettem, a sajátfrekvencia pontos meghatározását az Ansys szimuláció és a laboratóriumi tesztek is igazolták.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Megfogó modális analízise, végelem módszerrel	2
2.1. Megfogó ismertetése	2
2.2. Végelem módszer, modális analízis menete	3
2.2.1. Anyag tulajdonságainak felvitele	3
2.2.2. Geometriai modellezés	5
2.2.3. Alkatrész közötti kapcsolat.....	5
2.2.4. Hálózás	7
2.2.5. Terhelések és peremfeltételek	14
2.2.6. Eredmények lekérdezése és kiértékelése	17
3. Sajátfrekvencia mérése rezgésdiagnosztikai géppel	21
3.1. A méréshez szükséges berendezések, eszközök	21
3.2. A mérés menete	22
3.3. Eredmények kiértékelése	26
3.3.1. Véletlenszerű (Random) rázás eredményei	26
3.3.2. Szinuszos (Swept Sine) rázás eredményei	28
3.4. Eredmények összevetése	29
Irodalomjegyzék	30
Ábrajegyzék	31
Táblázatjegyzék	33
Mellékletek jegyzéke	34

1. Bevezetés

Dolgozatom célja, egy rezgésdiagnosztikai rázógéphez legyártott megfogó modális analízise, sajátfrekvenciájának meghatározása volt. A megfogó egy olyan eszköz, amely megfogja és pozicionálja a terméket a vibrációs teszt megfelelő irányában. A megfogó pontos geometriai és dinamikai tulajdonságai meghatározása elhanyagolhatatlan, mivel a sajátfrekvencia elkerülése fontos szerepet játszik a rezgésdiagnosztikai tesztek során. Minden fizikai szerkezetnek van sajátfrekvenciája, ezek azok a frekvenciák, amelyeken a szerkezet hajlamos rezegni, ha bizonyos külső erőknek van kitéve és ez nagy károkat tud okozni. A modális analízist az Ansys nevű végeselem módszert használó szoftver segítségével fogom végezni és ennek menetét aprólékosan fogom ismertetni. Majd ezután a szoftver által kalkulált eredmény ellenőrzésére két vibrációs tesztet futtatok le, egy véletlenszerű és egy pásztázó szinuszos vibrációs tesztet. A rázóteszt menetét részletesen ismertetem. Végül a két teszt eredményét és a kalkulált eredmény összevetem és konklúziót vonok le belőle.

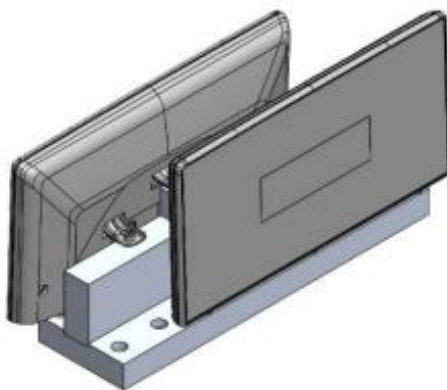
2. Megfogó modális analízise, végeelem módszerrel

A végeelem-módszer (VEM) egy numerikus technika, amelyet bármely fizikai jelenség végeselemes analízisének elvégzésére használnak. Ennek a módszernek több típusa van (pl.: Statikai analízis, Modális analízis, stb.), de mivel a megfogó sajátfrekvenciáját keresem, ezért a modális analízis a megfelelő választás.

A modális (modal) analízis segítségével meghatározhatjuk egy szerkezet rezgési tulajdonságait, például a sajátfrekvenciákat és a hozzájuk tartozó lengésképeket. Ezek az adatok kulcsfontosságúak egy dinamikusan terhelt szerkezet tervezésekor. A modális analízis eredményei alapként szolgálhatnak további, részletesebb dinamikai vizsgálatokhoz, mint például a tranziens dinamikai analízis, a harmonikus válasz elemzése, vagy a spektrumanalízis.

2.1. Megfogó ismertetése

Annak érdekében, hogy egy vizsgálandó tárgyat rá tudjunk helyezni és pozicionálni tudjuk a rázógépen, fontos legyártani egy olyan eszközt, amely azonos furatkiosztással rendelkezik, mint a rázógép armatúrája, ezzel biztosítva a megfogó és a rázógép kapcsolatát. Emellett a megfogónak olyan geometriával kell rendelkeznie, amely a vizsgálandó tárgyat az előírtak szerint megfelelő szögben pozicionálja.



1. ábra: B_ECO_23029 megfogó, termékkel felszerelve (saját kép)

Az 1. ábrán a dolgozatomban kidolgozott megfogó látható, amint a termékeket rögzíti. Egy terméket három darab M6-os csavar rögzít, amit 9Nm nyomatékkal kell lehúzni és magát a megfogót 16 darab M8-as csavar rögzíti a rázógép armatúrájára, amiket 25 Nm nyomatékkal kell lehúzni a biztos rögzítés érdekében.

2.2.Végeselem módszer, modális analízis menete

Az adott szerkezet rezgési karakterisztikájának meghatározására, vagyis a sajátfrekvenciáinak kiszámolására és a lengésképek bemutatására használjuk.

2.2.1. Anyag tulajdonságainak felvitele

Anyagmodellek elméleti alapjai:

Az anyagmodellek a végeselem-analízis során a fizikai anyagok viselkedését reprezentálják a terhelés hatására. Az anyagok viselkedése számos tényezőtől függ, beleértve a linearitást, homogenitást, irányfüggőséget és a szabadságfokok alapján történő csoportosítást. Az anyagmodellek segítségével különböző fizikai jellemzők, például feszültség, alakváltozás, hőmérséklet-eloszlás, illetve elektromos és mágneses tulajdonságok vizsgálhatóak.

Az anyagok linearitása szerint lehetnek lineárisak, ahol a terhelés és a válasz között arányos kapcsolat van, vagy nemlineárisak, ahol ez az arányosság nem áll fenn. A homogenitás alapján az anyagok lehetnek homogének, ahol az anyag tulajdonságai mindenhol azonosak, vagy inhomogének, ahol a tulajdonságok térben változnak. Az inhomogén anyagok jellemzői között gyakran szerepelnek az anizotrop, tehát irányfüggő tulajdonságok is.

Az irányfüggőség alapján az anyagokat két típus szerint lehet csoportosítani. Izotrópok, ahol a tulajdonságok minden irányban azonosak, vagy anizotrópok, ahol ezek különböző irányokban eltérőek. Az anizotropián belül megkülönböztetünk ortotrop és transzversz-anizotrop anyagokat is, ahol az anyag viselkedése különböző tengelyek mentén más és más.

Az anyagmodellek szabadságfokai alapján a modellek hőmérséklet, elektromos, mechanikai vagy kombinált hatások vizsgálatára alkalmasak.

A mechanikai anyagmodellek feszültség-alakváltozás kapcsolatuk alapján lehetnek lineárisak vagy nemlineárisak, rugalmasak, képlékenyek vagy viszkoelasztikusak. A lineáris rugalmas anyagok egyszerű Hooke-törvénnyel írhatók le, míg a nemlineáris modellek komplexebb viselkedést mutatnak, például a műanyagok, polimerek vagy fémötvözetek esetén. A viszkoelasztikus modellek figyelembe veszik az anyag időben változó viselkedését, például kúszás vagy feszültség relaxáció során.

Az anyagmodellek kialakítása során fontos a megfelelő anyagparaméterek meghatározása, amelyek definiálják az anyag válaszát a terhelésre. Ilyen paraméterek közé tartozik például a rugalmassági modulus, Poisson-tényező, hőtágulási együttható és a sűrűség. A dinamikai és hőmérsékleti viselkedést leíró paraméterek is fontosak a szimulációkban, különösen, ha a modell idő- vagy hőmérsékletfüggő viselkedést mutat. ^[1]

Megfogó anyagmodellje:

A modális analízis során csak lineáris anyagtulajdonságokkal lehet dolgozni, az anyag merevségét, a rugalmassági modulus és a Poisson-tényezővel lehet meghatározni, valamint a tömeget sűrűség formájában. A megfogót DIN 3.0205 alumínium ötvözetből gyártották le.

DIN 3.0205 alumínium ötvözet (más néven: EN AW-1200) főbb jellemzői:^[2]

Rugalmassági modulusa (Elastic Modulus): 70 GPa

Poisson-tényező (Poisson's Ratio): 0,3897

Anyag sűrűsége (Mass Density): 2700 kg/m³

DIN 3.0205 alumínium ötvözet összetétele:

Mn	Ti	Al	Cu	Zn	Egyéb
max	max	min	max	max	max
<0,05%	<0,05%	99%	<0,05%	<0,1%	<0,15%

1. táblázat: Az EN-AW-1200 anyag összetétele [2]

Az Ansys program rendelkezik anyag könyvtárral, azonban a DIN 3.0205 alumínium ötvözet (EN AW-1200), nem szerepel benne, így az anyag főbb tulajdonságait (anyag sűrűsége, rugalmassági modulus, Poisson-tényező) nekem kellett kikeresni és beírni.

Properties of Outline Row 5: DIN 3.0205 - AW-1200			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	2700	kg m ⁻³
3	Isotropic Elasticity		
4	Derive from	Young's Modulus and Poisson's...	
5	Young's Modulus	70000	MPa
6	Poisson's Ratio	0,3897	
7	Bulk Modulus	1,0577E+11	Pa
8	Shear Modulus	2,5185E+10	Pa

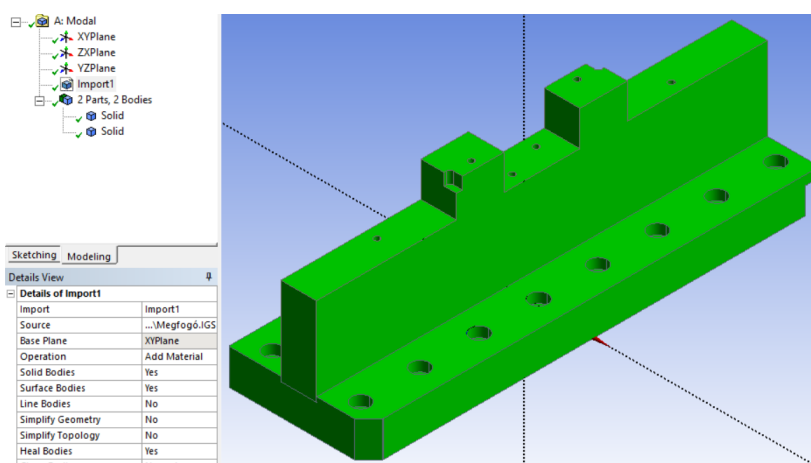
2. ábra: Anyag jellemzői (saját kép)

A 2. ábrán az Ansys anyagkönyvtárához általam hozzáadott DIN 3.0205 anyag jellemzői látható.

2.2.2. Geometriai modellezés

A konzol geometriai modellezése során fontos volt olyan CAD szoftver használata, amellyel a legjobban tudtam megszerkeszteni a testet, a pontos eredmény érdekében. Geometriáját a Solidworks nevű CAD programmal készítettem, majd az eredményt hogy át tudjam vinni az Ansys programba, .IGS –fájlként mentettem el.

Miután kiválasztottam az importált fájlt, megnyitottam a DesignMolder segítségével és le generáltam a geometriát.



3. ábra: Importált fájl generálása (saját kép)

2.2.3. Alkatrész közötti kapcsolat

Kapcsolatok elméleti alapjai:

Az alkatrészek közötti kapcsolatokat kontaktoknak nevezzük, melyek lehetővé teszik a terhelések és kényszerek átadását az egyes elemek között. A kontaktok tulajdonságai meghatározzák az elemek egymáshoz viszonyított viselkedését. Kulcsfontosságú, hogy a kapcsolatokat úgy definiáljuk, hogy azok a valós szerkezeti viselkedést a legjobban tükrözzék. Különösen fontos a megfelelő kontaktok meghatározása olyan mechanikai esetekben, ahol az alkatrészek elmozdulnak vagy deformálódnak, mivel ezek jelentős nemlinearitást visznek a szimulációba.

A kontaktproblémák két fő nehézsége abból fakad, hogy nehéz előre meghatározni, mely területek fognak kapcsolatba lépni az analízis során, valamint abból, hogy a kontaktokon átadott mennyiségek (például súrlódási erő, hő vagy elektromos áram) nemlineáris jellegűek. Olyan szimulációk esetében, ahol nincs deformáció (például bizonyos

elektromágneses vagy hőtani analízisek), a kontaktok beállításaira kevesebb figyelmet kell fordítani.

A mechanikai analízis során a kontaktproblémák két fő típusa a merev-rugalmas és a rugalmas-rugalmas kapcsolat. A merev-rugalmas kapcsolatnál az egyik test rugalmas, míg a másik merev vagy sokkal merevebb. Erre tipikus példa a fém és polimer közötti kapcsolat, vagy a fémek képlékenyalakítási eljárásaiban a szerszámok és munkadarabok közötti kapcsolat. A rugalmas-rugalmas kapcsolat esetén mindkét alkatrész deformálható vagy hasonló merevségű. [1]

A kontaktokat a következő módon lehet csoportosítani geometria szerint:

Csomópont – Csomópont

Csomópont – Felület

Él – Él

Él – Felület

Felület – Felület

Szerkezeti analízis alapján a kontaktok lehetnek:

Súrlódásos: A felületek eltávolodhatnak és a súrlódási erő ellenében elcsúsznak egymáson.

Súrlódásmentes: A felületek akadálymentesen elcsúszhatnak egymáson és eltávolodhatnak egymástól.

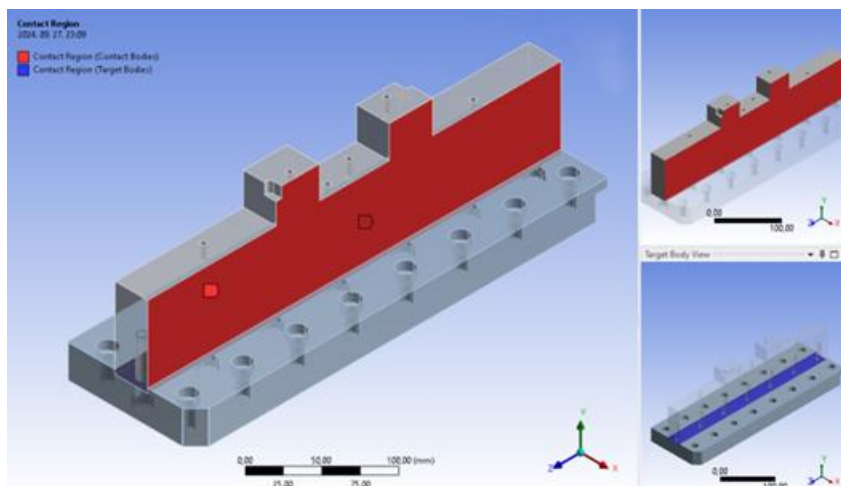
Síkban maradó: Az előbbi egy speciális esete, annyi különbséggel hogy ilyenkor nem távolodhatnak el egymástól.

Tapadó: Csúszásmentes kontakt, a felületek nem csúszhatnak el egymáson, de eltávolodhatnak.

Ragasztott: A kapcsolódó felületeket egymáshoz fixen rögzítő kontakt.

Megfogó kapcsolatai:

Abból adódóan, hogy Solidworks szoftverrel készítettem el a geometriát, így az ansysban ezzel nem volt különösebb dolgom, csak leellenőrizni, hogy biztos jól olvasta be a program.



4. ábra: Alkatrész közötti kapcsolat (saját kép)

Mint a 4. ábrán is látható a program megfelelően olvasta be. A kapcsolat típusa „bonded contact”, ez biztosítja, hogy a két elem közötti kapcsolat merev legyen, ami a valóságban rögzített, összehegesztett vagy összezsavart kapcsolatot modellez. Ez a mi esetünkben csavarkötés. Geometriai kapcsolatuk szerint él – él kapcsolat. Mechanikailag a kapcsolat merev – merev, így nem áll fenn kontaktprobléma lehetősége. Szerkezeti analízis alapján, pedig ragasztott kontakt, a kapcsolódó felületek egymáshoz fixen rögzítve vannak.

2.2.4. Hálózás

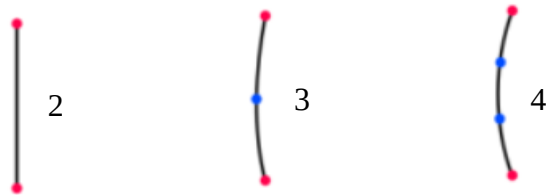
Hálózás elméleti alapjai:

Hálózásnak azt a folyamatot nevezzük, amikor az adott geometriát kis elemekre osztjuk fel, ez nagyon fontos lépés a végelem szimulációk során. A végelem modell létrehozásához ki kell választani a megfelelő elemtípust és a hálózás sűrűségét. A legtöbb program ezt a lépést automatikusan elvégzi, azonban lehetőséget ad kézi beállításokra.

Az elemeket alakjuk és foksámuk alapján lehet csoportosítani:

Az analízisben 1D-s vonal, 2D-s felületi vagy 3D-térfogati elemet lehet alkalmazni, illetve az ehhez tartozó foksám lehet lineáris, másodfokú és harmadfokú.

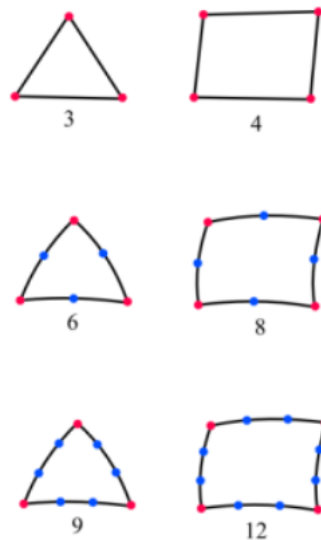
A vonal elemeket két vagy három csomópontot összekötő egyenes, vagy ív definiál. A vonalelem lehet rúd, gerenda vagy cső és tengelyszimmetrikus héj:



5. ábra: Lineáris, másodfokú és harmadfokú vonal elem [1]

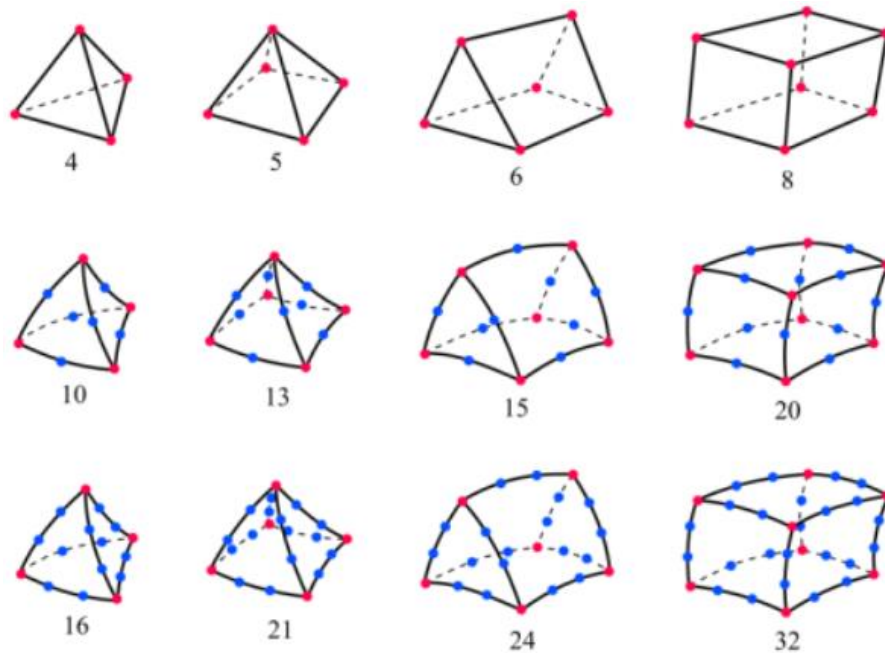
A képen látható legelső vonal elem lineáris 2 csomóponttal rendelkezik, a második elem már másodfokú és 3 csomóponttal rendelkezik, az utolsó harmadfokú elem 4 csomóponttal rendelkező elem.

A felületelemek háromszög vagy négyszög alakúak, 2D-s sík modell esetében beszélünk róla:



6. ábra: 2D-s háromszög és négyszög elem [1]

A térfogati elemek tetraéder, gúla, prizma vagy téglalakúak, 3D-s szilárd test esetében beszélünk róla:

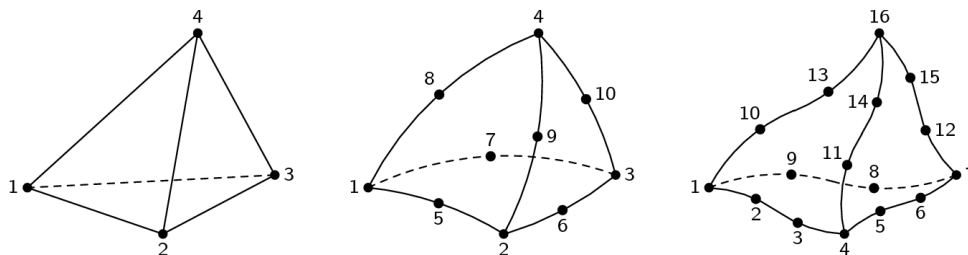


7. ábra: 3D-s elemek [1]

Megfogó hálózása:

Hálókészítés során mindig fontos először eldönteni milyen hálózási módszert akarunk használni, az én választásom a „tetrahedron mesh” módszerre esett. Ez a legáltalánosabban használt hálózási típus, bonyolult geometriai formák esetén, képesek követni a komplex formákat, azonban ez több elemmel jár, ami nagyobb számítási igényhez vezethet.

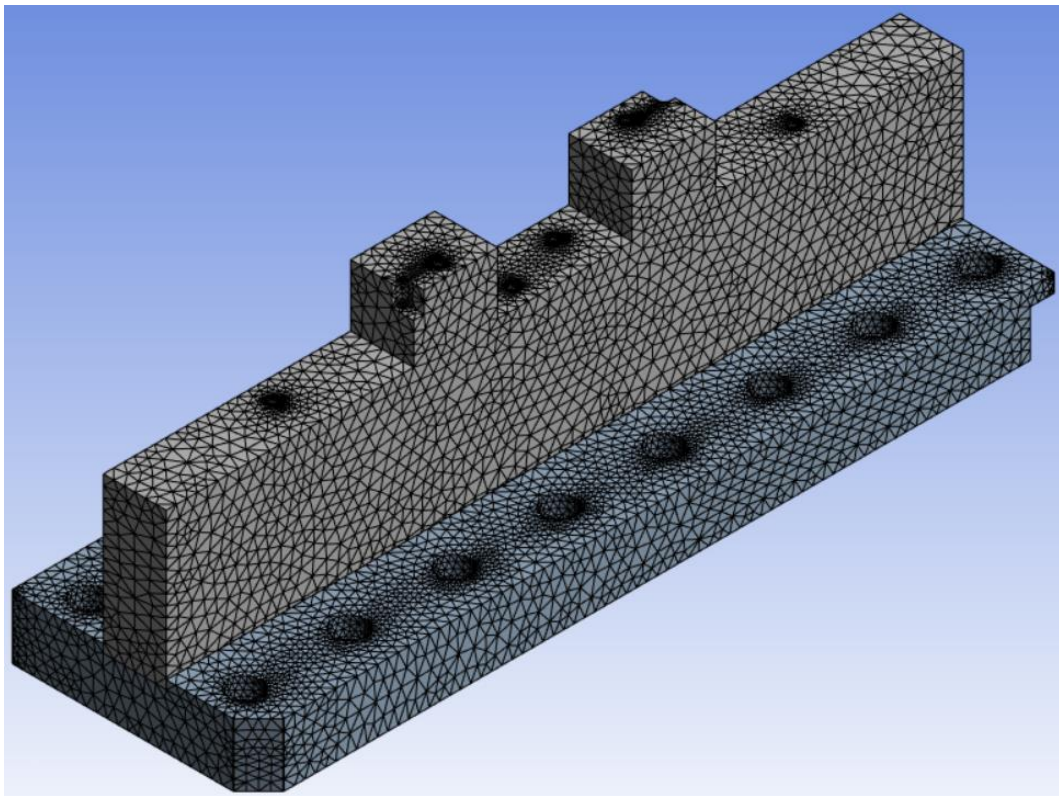
Hasznos lépés beállítani az elemek rendjét (element order), ezek a beállítások meghatározzák az elemek közötti összefüggéseket és a hálózás finomságát a végelem analízis során. A vizsgálatom során a kvadratikusan elemrendet (Quadratic – másodfokú) választottam, ekkor az elemek szélei görbültek lehetnek, ami pontosabb eredményeket ad, fontos megjegyezni, hogy ez több számítási erőforrást igényel. A másik lehetőség a lineáris elemrend, ekkor az elemek szélei egyenesek.



8. ábra: Lineáris, másodfokú és harmadfokú tetraéder elem [3]

A 8. ábrán három tetraéder (tetrahedral) elem látható, a bal oldali a lineáris négy csomóponttal rendelkező, a középső egy másodfokú (quadratic) változata, ami 10 csomóponttal rendelkezik, a jobb oldalon lévő a harmadfokú (cubic), ami 16 csomóponttal rendelkezik. Minél több a csomópont, annál pontosabb lesz az eredmény, azonban ez egyenesen arányos azzal, hogy annál több számítás kell az eredményhez.

A simítás (smoothing) opciónál érdemes a legmagasabb értéket beállítani, a simább háló generálása érdekében. Továbbá fontos az átmenetet (transition) is beállítani „slow”-ra, hogy az elemméret fokozatosabban változzon a háló különböző részein. Finomabb háló jön létre az átmeneti területeken, az átmeneti arány (transition ratio) alacsonyabbra állításával, ennek értéke 0,1. Ahhoz, hogy a finomabb részletek pontosabban jelenjenek meg a hálón (például: furatok körül), engedélyezni kell a „mesh defeaturing” funkciót. Finomabb rétegek érdekében a növekedési arányt (growth rate) csökkentettem 1,1-re és a rétegek maximális számát 10-re emeltem fel. A 9. ábrán az értékek beállítása után legenerált hálót láthajuk:

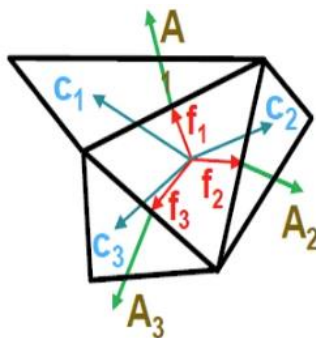


9. ábra: Alkatrész hálózása (saját kép)

Hálózás minőségének ellenőrzése:

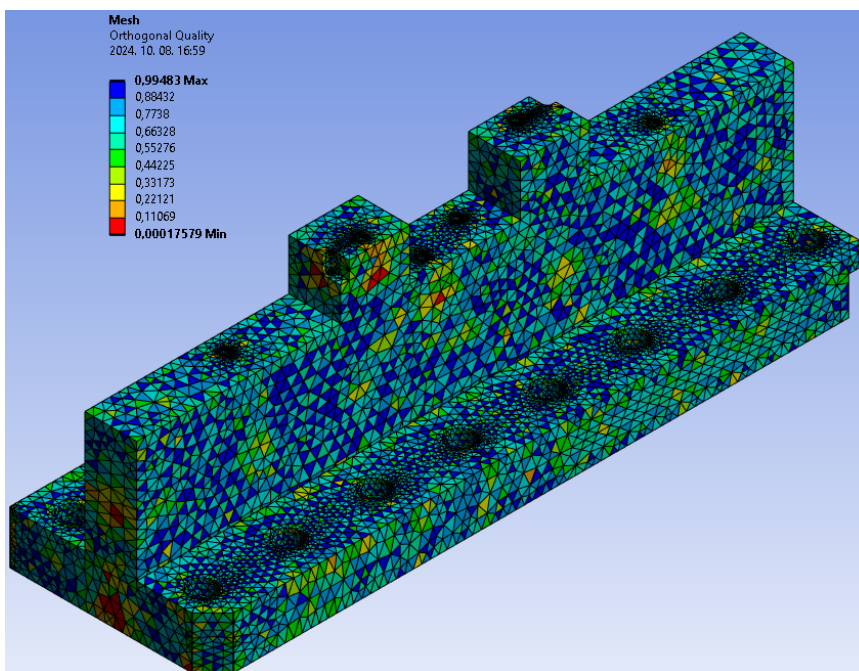
A hálózás egy nagyon fontos része a végelem módszeres vizsgálatoknál, nem megfelelő minőségű háló pontatlan eredményhez vezet. Ezért fontosnak tartom, hogy minőségellenőrzési lépéseket tegyek a pontos eredmény elérése érdekében. Ilyen az „**Orthogonal quality**” és a „**Skewness**” vizsgálat:

Az **Orthogonal Quality** magába foglalja a két hálócsofópontot összekötő vektor és az adott élhez tartozó egyes felületi integrációs pontok normálvektora közötti szöget. Az ortogonális minőség tartománya 0-1, ahol a 0 érték a legrosszabb, az 1 érték pedig a legjobb. [4]



10. ábra: Ortogonális vizsgálat alapjai [4]

A 11. ábrán látható vizsgálat az „Orthogonal Quality” metrikát jeleníti meg, amely az elemek tengelyhez való igazodását értékeli. Ez egy fontos minőségi mutató, amely azt méri, hogy az elemek oldalai mennyire közelítenek az ideális derékszögű helyzethez.

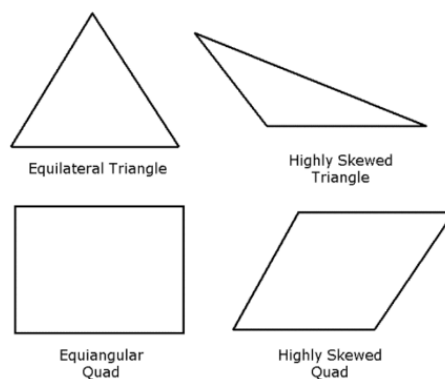


11. ábra: Ortogonális vizsgálat (saját kép)

A színskála mutatja az elemek derékszögűségét, ahol a kék színű elemek a legjobb merőlegességgel rendelkeznek, míg a pirosak a legrosszabbal. A modellben sok szín látható, ami azt jelenti, hogy az elemek merőlegességének minősége eltérő.

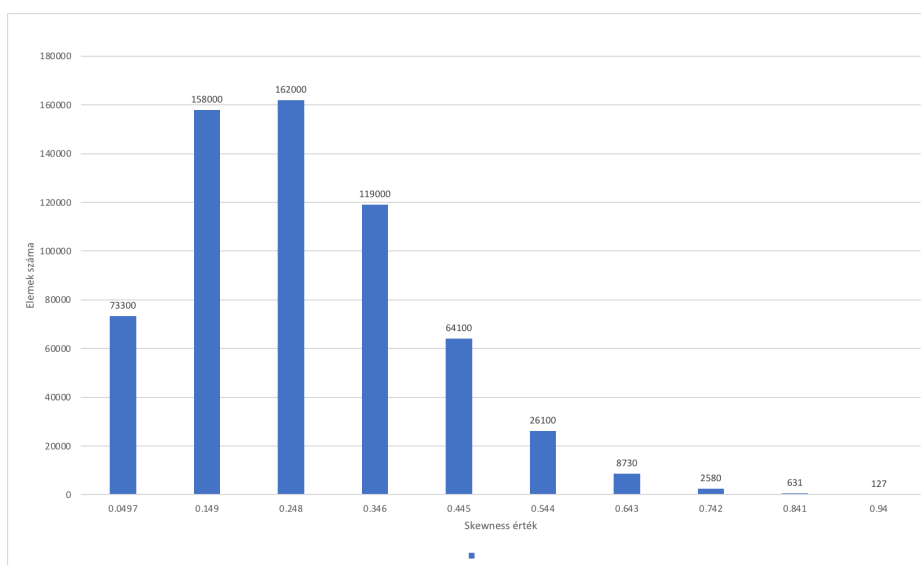
Összességében megállapítom, hogy a hálózás többnyire jó minőségű, azonban néhol van egy-két olyan elem, amin lehetne javítani. Ehhez sűrűbb hálóra lenne szükség és az oly módon igénybe venné a PC képességét, hogy a szimulációt nem lehetne végrehajtani.

A hálózási eredmények értékeléséhez hasznos segítséget nyújthat a „**skewness**” (ferdeség) mérőszám, amely az „Element Metrics” menüpontban található. A skewness azt méri, hogy mennyire tér el egy elem az ideális (egyenlő oldalú) formától.



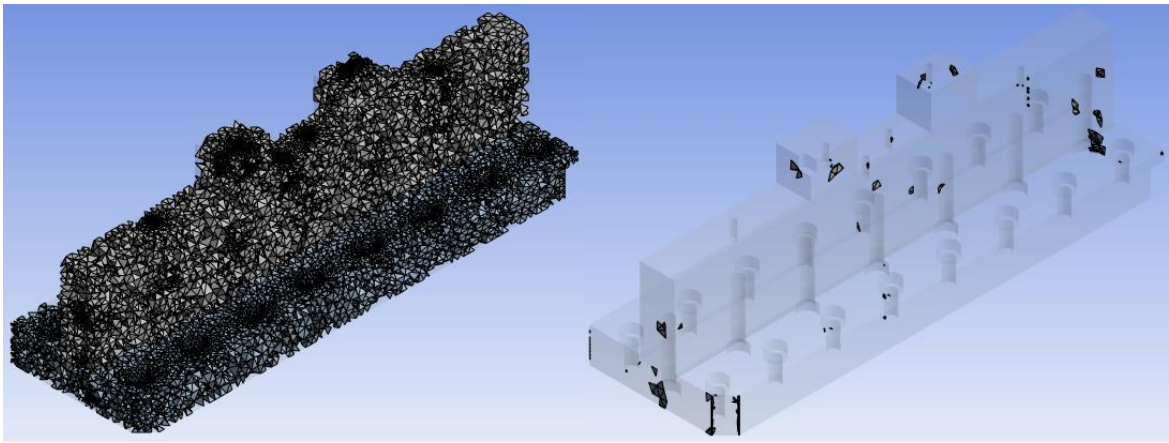
12. ábra: Egyenlő oldalú és magas ferdeségű elemek [4]

A 13. ábra grafikonján az elemhálózat "Skewness" (ferdeség) mérőszámának eloszlását látjuk az én eredményeim alapján:



13. ábra: Az elemhálózat ferdeségének értékei (saját kép)

Az oszlopdiagram az egyes ferdeségi értékekhez tartozó elemek számát mutatja meg. Az eredmények alapján a legtöbb elem a 0.00 és 0.25 közötti tartományban helyezkedik el, amely a skála szerint kiváló minőségű elemeket jelent. Ez azt mutatja, hogy a hálózás túlnyomó része nagyon jó minőségű, és minimális ferdeséggel rendelkezik. Van néhány elem a 0.25 és 0.50 közötti tartományban is, amelyek még mindig jó minőségűnek számítanak. Azonban egy kisebb, de nem elhanyagolható mennyiségű elem található a 0.50-0.80 tartományban, amelyek már közepes minőségűek. Nagyon kevés elem esik a 0.80 feletti tartományba, ami elfogadható, de már közel áll a rossz minőséghez. Az alábbi képeken a háló minőségére vonatkozó Skewness metrikát láthatjuk az Ansys szoftverben. Az első kép a legtöbb elemre vonatkozó eloszlást mutatja, míg a második a legkevésbé elemre vonatkozó eloszlást ábrázolja.



14.ábra: A legtöbb és legkevésbé elemre vonatkozó ferdeség elhelyezkedései (saját kép)

Összességében a hálózás minősége jónak mondható, mivel az elemek nagy része alacsony ferdeséggel rendelkezik, ami kedvező az elemzés szempontjából.

2.2.5. Terhelések és peremfeltételek

Terhelések és peremfeltételek elméleti alapjai:

A szimulációk során fontos lépés meghatározni a megfelelő terhelési feltételeket, mivel a végeelem analízis célja, hogy meghatározza, hogy egy szerkezet hogyan reagál bizonyos terhelésekre. Terheléseket a geometriai modell elemeire vagy akár közvetlenül a végeelem háló csomópontjaira állíthatunk be.

Peremfeltételek megadásakor rendkívül körültekintően kell eljárunk, amikor ezeket a külső hatásokat modellezzük. A peremfeltételek forrásai lehetnek közvetlenül az adott modellhez rendelt kényszerek, mint például a megtámasztás, elmozdulási kényszer vagy szimmetriafeltétel, illetve más alkatrészekkel való érintkezés, azaz kontaktusok. Általánosságban ezek a feltételek az adott szimuláció szabadságfokait korlátozzák. Mechanikai rendszerek esetén, ahol elmozdulási szabadságfokokról beszélünk, kinematikai kényszerek kerülhetnek alkalmazásra. Hőmérsékleti szabadságfokú termikus szimulációk esetén pedig megadott hőmérséklet-kényszerekről lehet szó. Az alábbiakban bemutatom azokat az analízistípusokat, amelyeknél különböző **peremfeltételek** definiálhatók: ^[1]

Szerkezeti analízis: Elmozdulás, elfordulás, sebesség kényszer vagy szimmetriafeltétel

Hőtani analízis: Hőmérséklet

Mágneses: Párhuzamos fluxus, vektor vagy skalár potenciál

Elektromos: Feszültség

Fix megtámasztáskor a peremfeltételek értéke 0, homogénnek nevezzük. Ellenkező esetben inhomogén és az az elmozdulás kényszer.

Az alábbiakban bemutatom azokat az analízistípusokat, amelyekben különböző **terhelések** definiálhatók: ^[1]

Szerkezeti analízis: Elmozdulás, sebesség, gyorsulás, gravitáció, erő, nyomás, hőmérséklet

Hőtani analízis: Hőmérséklet, hőáram sűrűség, konvekció, belső hőtermelés, végtelen felület

Mágneses: Mágneses potenciálok, mágneses fluxus, mágneses áramszegek, áramsűrűség, végtelen felület

Elektromos: Elektromos potenciál, elektromos áram, elektromos töltések, töltéssűrűség, végtelen felület

A terhelés lehet külső, a vizsgált test határoló elemeire (pl.: felületre, élre, pontra) ható koncentrált vagy megoszló terhelés, mint az erő, nyomaték vagy nyomás. Emellett hatással lehet a test teljes térfogatára is, mint a gravitációs gyorsulásból eredő súlyerő, vagy a rotációs és transzlációs gyorsulásból származó tehetetlenségi erő. A terhelések a testen való eloszlásuk alapján az alábbi kategóriákba sorolhatók: ^[1]

Erők: Koncetrált terhelés, ami egy csomópontra hat. Pl.: erő vagy egy nyomaték (szerkezeti analízis).

Felületi terhelés: Egy felület mentén megoszló erő. Pl.: nyomás (szerkezeti analízis).

Test terhelés: Mező vagy térfogat jellegű terhelés. Pl.: hőmérséklet (szerkezeti analízis).

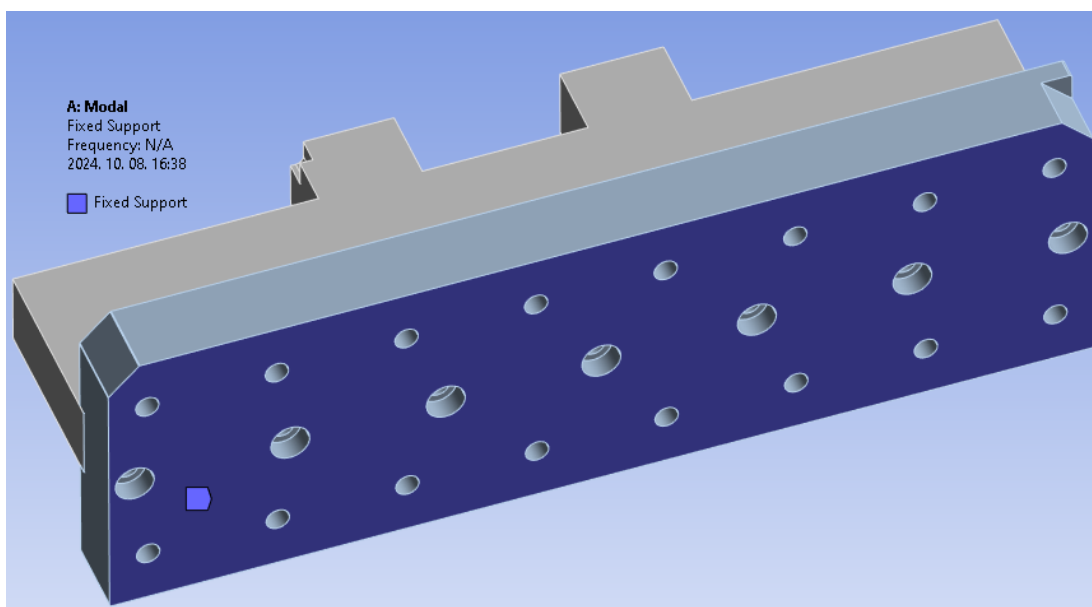
Inerciális terhelés: Test tehetetlenségének tulajdonítható terhelés. Pl.: gravitációs gyorsulás, szögsebesség és szöggyorsulás (szerkezeti analízis).

Csatolt tér terhelések: Az előbbi terhelések speciális esete.

Megfogyó terhelései és peremfeltételei:

A modális analízis sajátossága, hogy nem alkalmaz explicit terheléseket, mint például erők vagy nyomatékok, amelyek általában a statikus vagy dinamikus analízis során jellemzőek. Az analízis célja a szerkezet sajátfrekvenciáinak és lengésképeinek meghatározása, és ezek a jellemzők a szerkezet geometriájából, anyagtulajdonságaiból és peremfeltételeiből származnak.

Az előfeszítés alkalmazása ebben az esetben nem szükséges, mert a szerkezet alja csavarokkal rögzítve van, és ezt a rögzítést fixed support-ként definiáltuk. A fixed support biztosítja a megfelelő peremfeltételeket, amelyek rögzítik a szerkezetet, így a csavarok által okozott előfeszítő erők nem befolyásolják jelentősen a lengésképeket a modál analízis során.



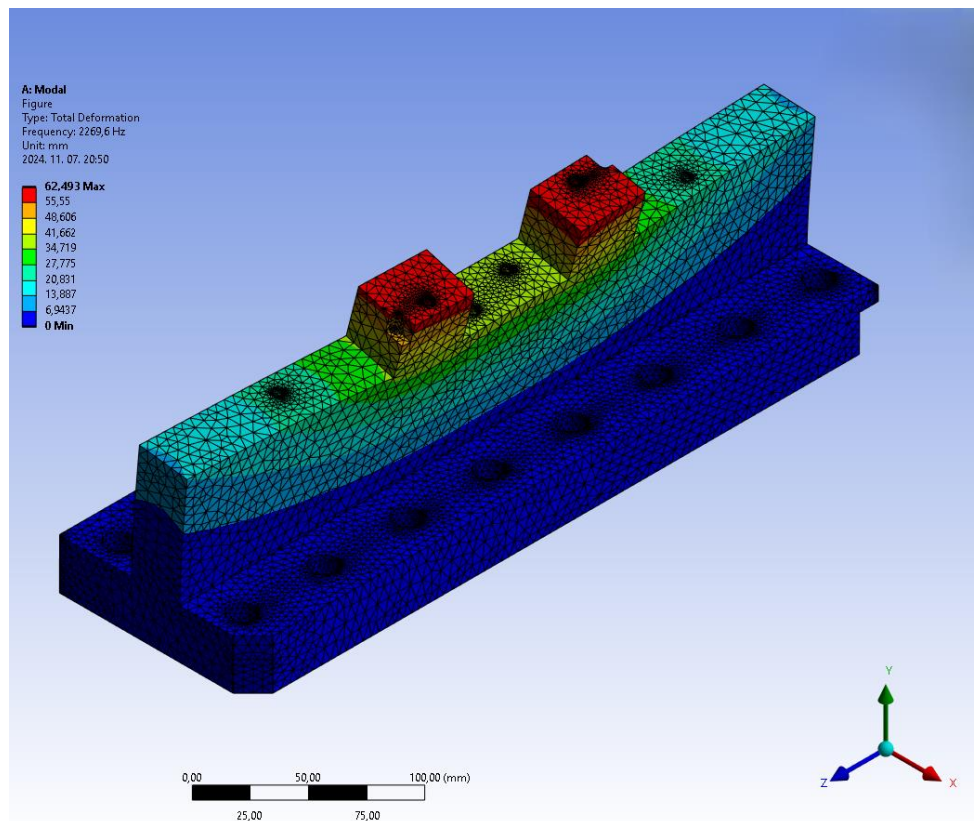
15. ábra: A modell peremfeltétele (saját kép)

Ez a peremfeltétel rögzíti a geometriát, megakadályozva minden mozgást az adott felületen vagy éleken. Ez a leggyakoribb peremfeltétel, amelyet modális analízis során használnak.

2.2.6. Eredmények lekérdezése és kiértékelése

A modális analízis eredményei elsősorban a szerkezet sajátfrekvenciáit és a hozzájuk tartozó lengésképeit mutatja meg. Bár bizonyos esetekben lehetőség van a feszültség és a fajlagos nyúlás lekérdezésére is, ezek abszolút értékei nem tekinthetők valósnak. Ezek az eredmények inkább a relatív eloszlásukat tükrözik, hasonlóan az elmozdulásokhoz. Az eredményeket animálhatjuk, ami a rezgési módokat vizuálisan, az elmozdulások időbeni változásának segítségével szemlélteti.

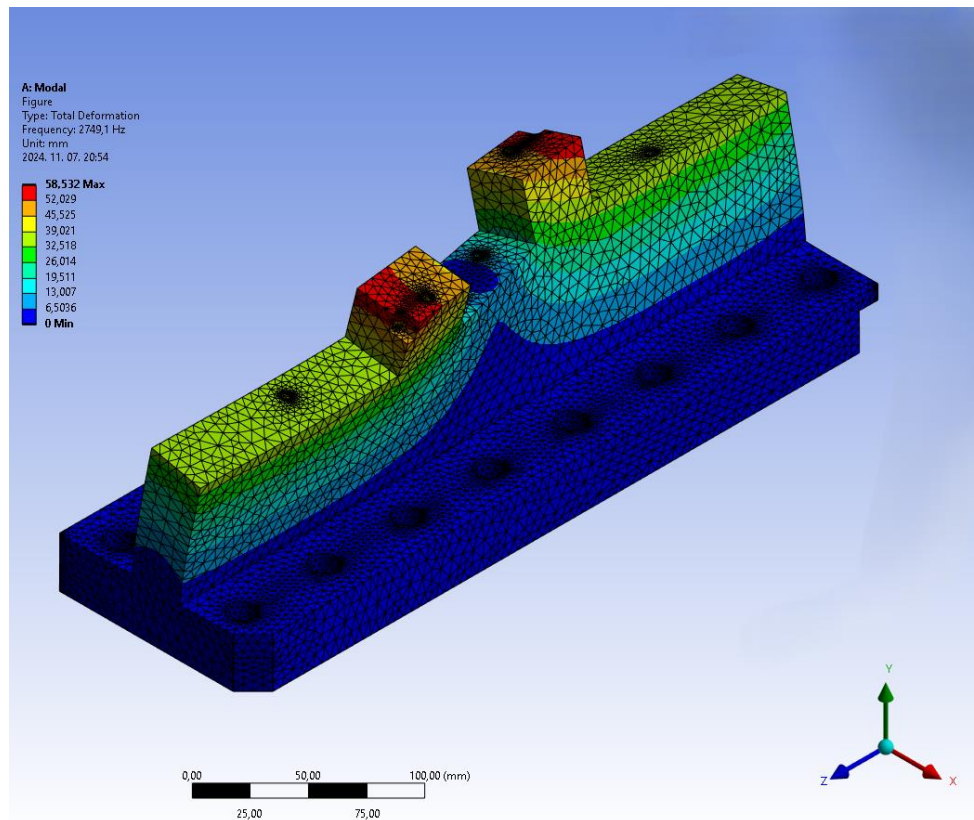
Első lengéskép és sajátfrekvencia:



16. ábra: Első sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció (saját kép)

A 16. ábrán a megfogó modális analízisének első sajátfrekvenciájához tartozó lengésképe látható. Ez a lengéskép mutatja a szerkezet legelső rezgési formáját, ami 2269,6 Hz frekvencián következik be, ez a megfogó első sajátfrekvenciája. A színskála, a deformáció mértékét jelzi, ahol a piros szín a legnagyobb elmozdulást, a kék pedig a legkisebbet jelöli. Mint leolvasható, a legnagyobb deformáció a megfogó felső részén van jelen. Ahogy közeledünk lefelé a rögzítési pontok felé, egyre csökken a deformáció mértéke.

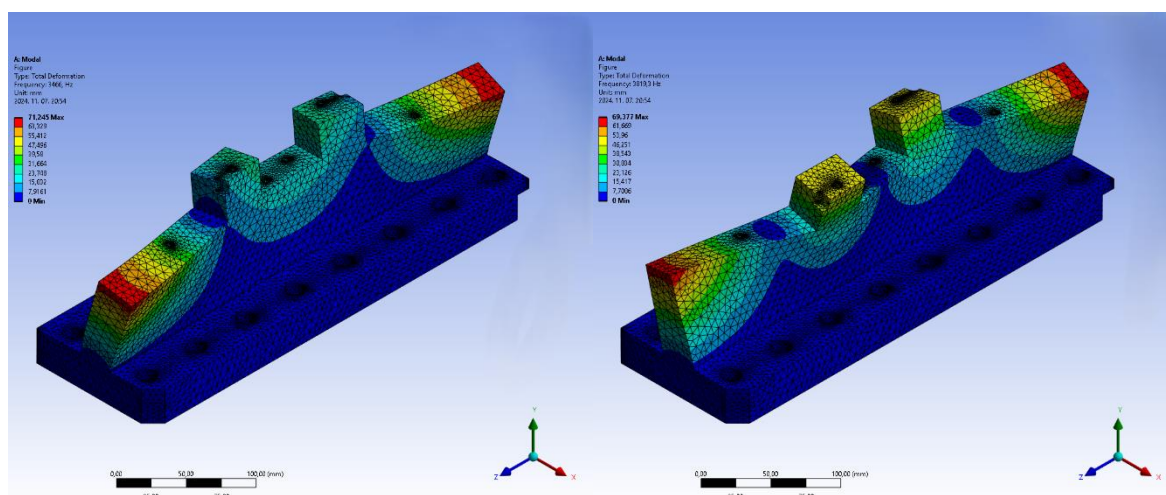
Második lengéskép és sajátfrekvencia:



17. ábra: Második sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció (saját kép)

A 17. ábra a szerkezet második sajátfrekvenciájához tartozó lengésképét ábrázolja, amely 2749 Hz-en jelentkezik. Ebben a rezgési formában a szerkezet több részén is jelentős elmozdulás figyelhető meg, abban az értelemben véve, hogy az előző eredményben a mind a két felső rész egy irányba deformálódott, ennél a lengésképnél viszont észrevehető egy úgynevezett „forgópont” (test közepén), ahol a test nem deformálódik és itt már a két felső rész ellentétes irányban deformálódik. A színek a relatív elmozdulásokat mutatják, ami a szerkezet dinamikai viselkedésének elemzése során fontos információ.

Harmadik és negyedik lengéskép és sajátfrekvencia:

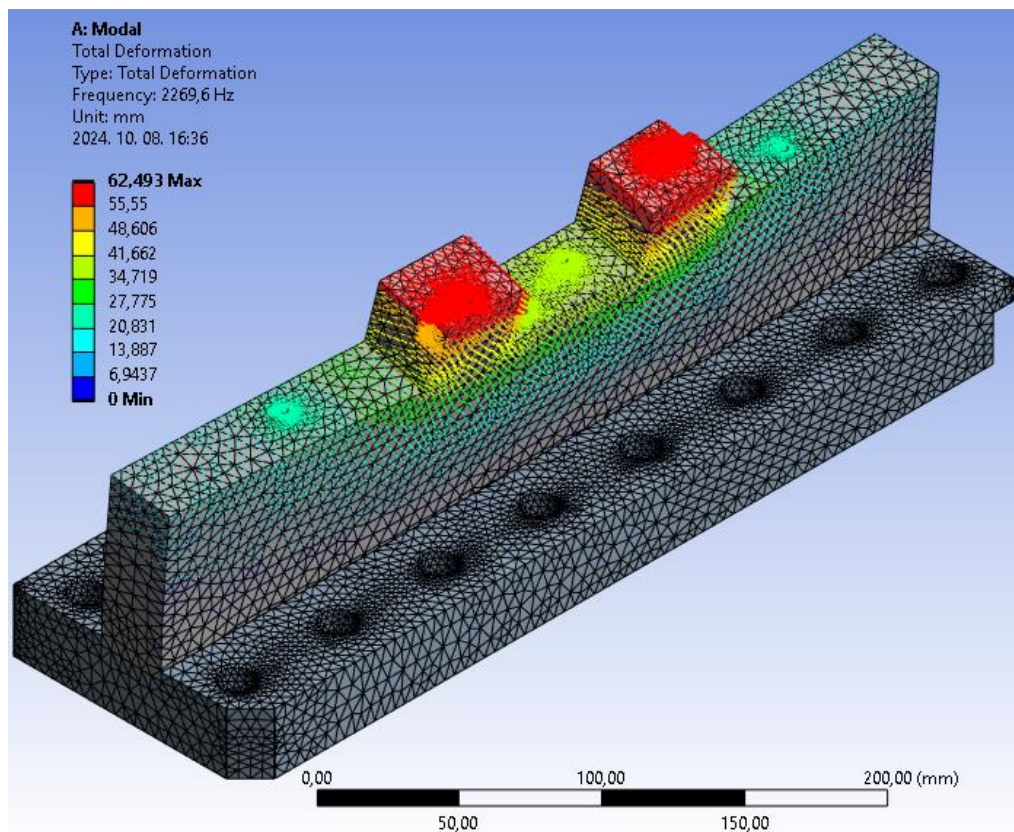


18. ábra: Harmadik és negyedik sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció (saját kép)

A 18. ábra a harmadik és negyedik sajátfrekvenciához tartozó lengésképeit mutatja, amely 3466 Hz-en és 3819 Hz-en jelentkeznek. Ezen képek bemutatásával szeretném szemléltetni, hogy a frekvencia növekedésével a test lengésképe egyre összetettebbé válik. Itt látható, hogy a szerkezet egy összetettebb rezgési formát vesz fel, ahol az elmozdulások eloszlása eltér az előző két frekvencián megfigyelt lengésképektől, itt az elmozdulások nagyobb mértékben koncentrálnak a szerkezet egyes részeire. A kép alapján észrevehető még az is, hogy a legnagyobb deformáció helye eddig a legfelső részen jelentkezett, azonban itt már a szélére kúszott ki. Ezek a képek jól szemléltetik, hogy a szerkezet hogyan reagál a különböző rezgési formákra. Azonban fontos megjegyezni, hogy a vibrációs tesztek során nem lesz lehetőségem ezeket ellenőrizni, mivel ez már olyan nagy frekvencián jön létre, ami magasan igénybe venné a rázógépet és ezért 3000 Hz felett nem lesz végrehajtva vibrációs teszt. Általában 2000 Hz-nél nagyobb frekvencián nem szokott előfordulni vibrációs teszt, csak kivételes esetekben.

A vektorok általában a sebesség, erő, elmozdulás, vagy más irányított fizikai mennyiségek megjelenítésére szolgálnak. A "vectors" parancsra kattintva a szoftver vektorokat rajzol a kiválasztott eredmények alapján, megmutatva azok irányát és nagyságát a modell egyes pontjain. Ez különösen hasznos lehet a különböző irányú erők vagy elmozdulások vizsgálatánál, mivel vizuálisan láthatóvá teszi, hogy mely irányba és milyen mértékben hatnak ezek az erők vagy mozgások. A vizualizáció segít jobban megérteni a modell viselkedését a szimuláció során, és lehetőséget ad arra, hogy más nézőpontból vizsgáljuk a test viselkedését.

A következő képen az első lengéskép vektori ábrázolását láthatjuk, amely szemlélteti a szerkezet különböző pontjain kialakuló elmozdulások irányát és nagyságát. Ez az ábra segít megérteni, hogyan viselkedik a szerkezet az adott frekvencián történő rezgés során.



19. ábra: Vektornyilakkal szemléltetett, első teljes deformáció (saját kép)

Az 19. ábrán a 2269 Hz-es sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció lengésképét láthatjuk, ahol a vektornyilak szemléltetik a deformáció irányát és nagyságát az egyes pontokon. A vektornyilak segítségével könnyen észrevehető, hogy a legnagyobb deformáció a piros színnel jelölt területeken történik, míg a minimális elmozdulás a kék színnel jelölt részekben figyelhető meg.

3. Sajátfrekvencia mérése rezgésdiagnosztikai géppel

Minden testnek vagy szerkezetnek van sajátfrekvenciája. Ezen a frekvencián kis gerjesztés behatására is felerősödik a rezgés amplitúdója. A sajátfrekvencia ezért fontos lehet a tervezésnél, például épületek, hidak vagy megfogók tervezésekor, mivel azoknak bizonyos sajátfrekvenciák elkerülése érdekében tervezni kell, hogy ne rezonáljanak káros módon külső rezgésekre vagy a szélhatásra. Szintén fontos az elektronikai rendszerek és más olyan területek tervezésében, ahol a természetes rezgési tulajdonságokat figyelembe kell venni. A sajátfrekvencia egyik kulcsfontosságú tulajdonsága az adott rendszer vagy test tömegének és merevségének aránya, amely meghatározza, milyen gyorsan rezeg a rendszer, ha valamilyen ingert kap. [5]

Következőkben bemutatom egy LDS rázógép segítségével végrehajtott két tesztet, melyek menetét részletesen ismertetem, és az eredmények elemzése alapján meghatározom a sajátfrekvenciát.

3.1.A méréshez szükséges berendezések, eszközök

A méréshez egy darab egytengelyű gyorsulásérzékelőt, két darab triaxiális gyorsulásérzékelőt és egy Ometron VH-1000-D érintésmentes rezgéssebességmérőt alkalmaztam.:

Brüel & Kjaer érzékelők és érzékenységei:

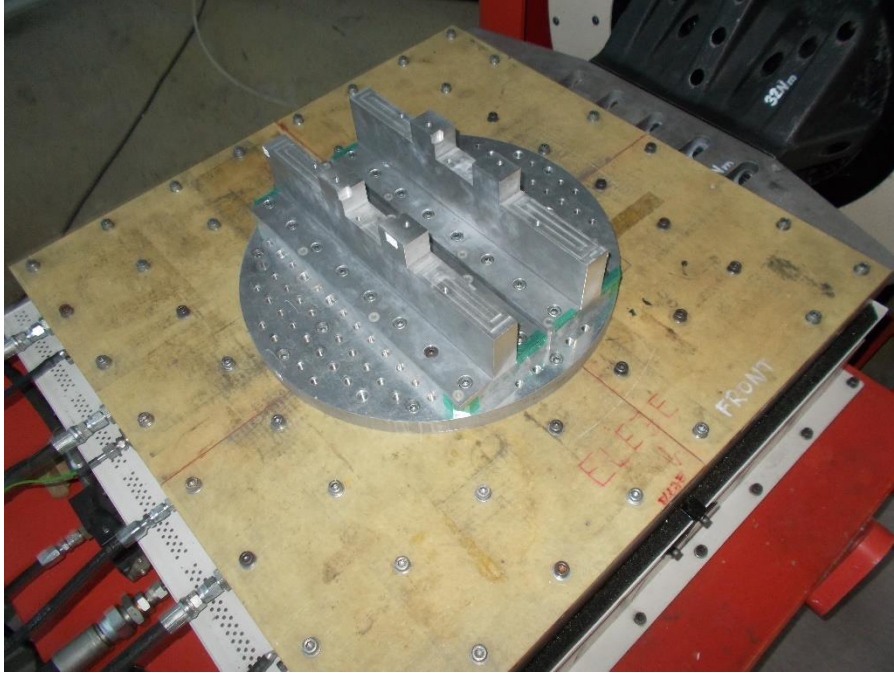
B&K 4526 x: 9,582 mV/ms⁻² (93,97 mV/g) (egyirányú)

B&K 4524 x: 9,972 mV/ms⁻², y: 10,24 mV/ms⁻², z: 10,12 mV/ms⁻² (háromirányú)

B&K 4524 x: 9,823 mV/ms⁻², y: 10,05 mV/ms⁻², z: 10,23 mV/ms⁻² (háromirányú)

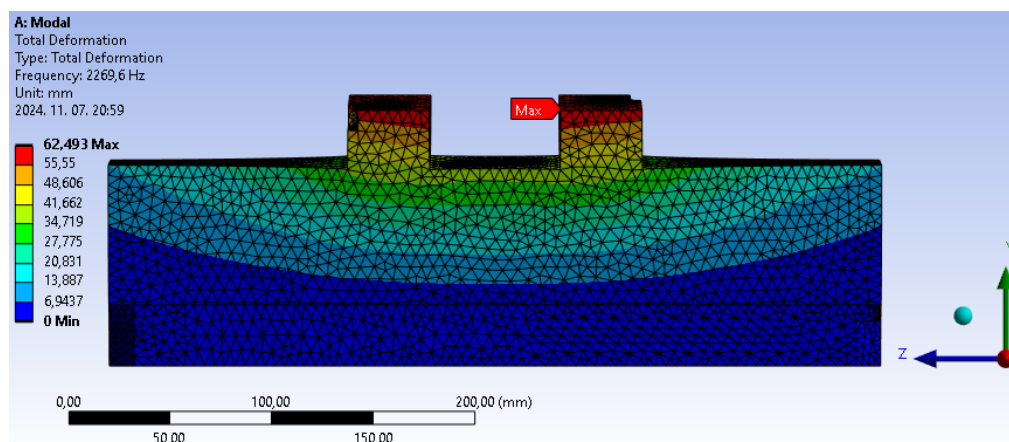
3.2. A mérés menete

A mérés első lépése a rázógép oldalra forgatása volt, abból az okból, hogy rá tudjam csatlakoztatni a csúszóasztalt. A megfogó felszerelése előtt megtisztítottam a felületet IPA (Isopropyl Alkohol) tisztítószerrel. A megfogó felszerelésekor gondosan ügyelni kell a csavarok helyes lehúzására, ami M8-as csavar esetén 25 Nm volt.



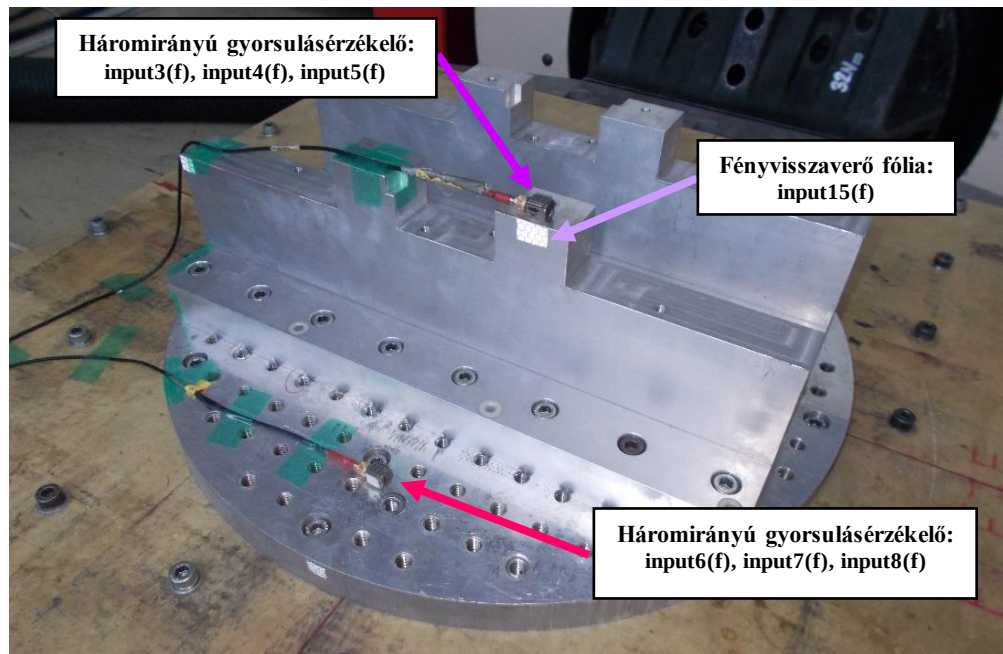
20. ábra: Csúszóasztalra felszerelt megfogó (saját kép)

A megfogó felszerelésre után az érzékelők felhelyezése következett, de előbb ki kellett gondolni hova helyezzem fel őket. Választásom arra a pontra került, ahol az Ansys szimulációban a legnagyobb deformáció keletkezett.

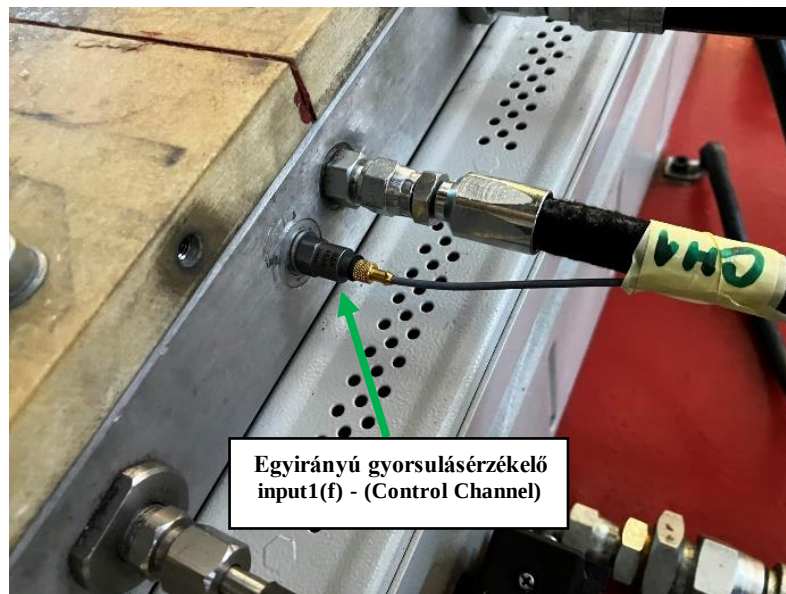


21. ábra: Legnagyobb deformáció (saját kép)

Felhelyezett gyorsulásérzékelők:



22. ábra: Felhelyezett gyorsulás érzékelők 1/2 (saját kép)



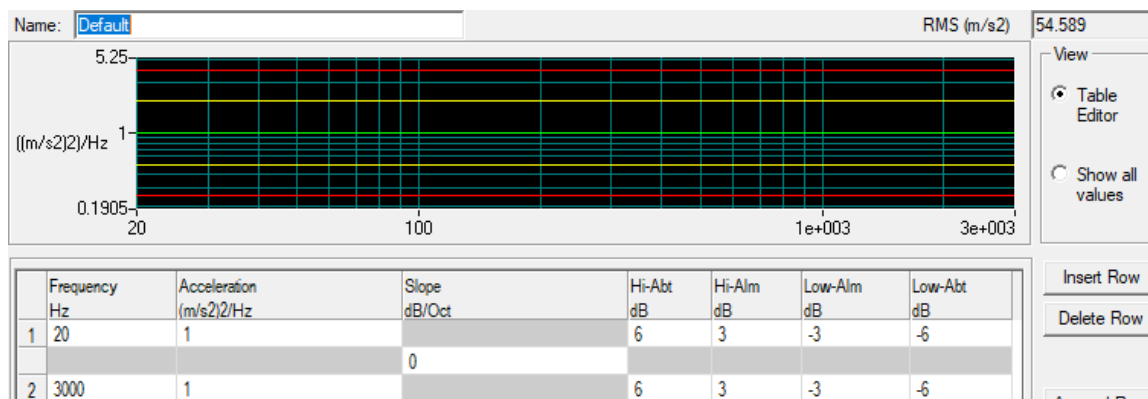
23. ábra: Felhelyezett gyorsulás érzékelők 2/2 (saját kép)

Kontrol stratégiának a „Single Control Channel”-t választottam, azaz a vezérlőjelet akár idő, akár frekvenciatartományban, egyetlen vezérlőcsatorna mérése alapján generálják.

Az érzékelők felhelyezése után a rázási profil elkészítése következett, amit az LDS-Dactron Shaker Control nevű szoftverben készítettem el. Két profil is el lett készítve, egy Véletlenszerű (random) és egy Pásztázó Szinuszos (Swept Sine) rázás. Mind a két esetben a frekvencia tartomány: 20-3000 Hz, mivel az Ansys eredmények alapján várhatóan az első sajátfrekvencia 2300 Hz körül fog jelentkezni.

Véletlenszerű (Random) rázás profilja:

A random rázás során a rezgésvizsgálatot véletlenszerű gerjesztési jel alkalmazásával végzik. Ennek célja, hogy valós, életbeli rezgéseket szimuláljanak, melyeket az egység működése során tapasztalhat. A rendszer a referencia spektrum alapján generálja a gerjesztési jelet, és a mért kimeneti spektrumot folyamatosan összehasonlítja ezzel a referencia spektrummal, így valós idejű korrekciókat alkalmazva biztosítja a helyes gerjesztést. A vizsgálat célja annak ellenőrzése, hogy az egység hogyan viselkedik a véletlenszerű rezgési környezetben. [6]

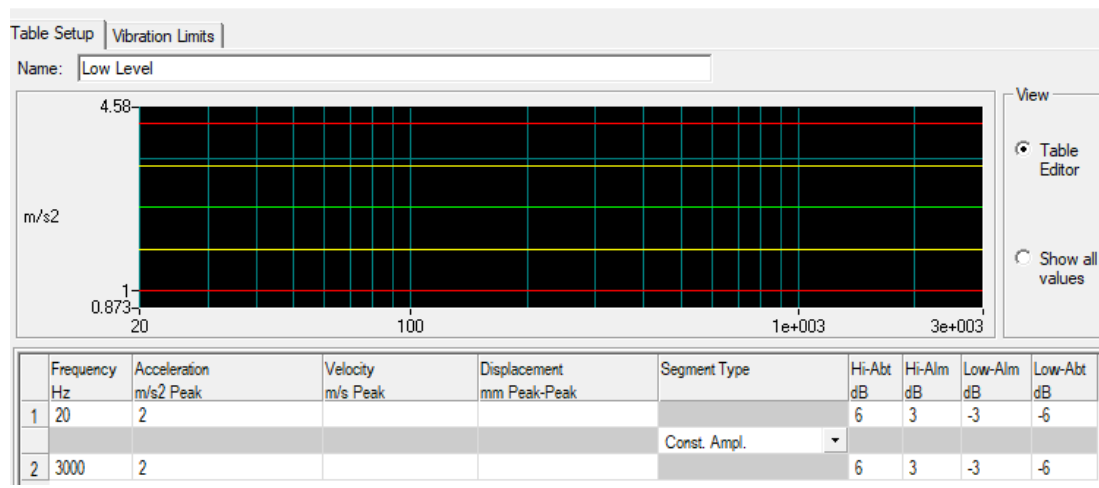


24. ábra: Random profil (saját kép)

A profilt 20 és 3000 Hz közötti rázásra állítottam, ebben a tartományban fogja véletlenszerűen rázni a megfogót. A gyorsulási értéket 1 (m/s²)²/Hz –re állítottam, amely megfelelő ahhoz, hogy a teszt végbemenjen sajátfrekvencia keresése céljából. Továbbá leolvasható még a képről a négyzetes középérték - RMS (Root Mean Square) ami 54,589 m/s², ezt az értéket a program magától számolja ki a beállított paraméterek alapján.

Szinuszos rázás profilja:

A Swept Sine rázás során a gerjesztési jel egy szinuszhullám, amely folyamatosan változik frekvencia-tartományon belül. A vizsgálat célja, hogy különböző frekvenciákon megmérjék az egység válaszát, így feltárva a szerkezet rezonancia-frekvenciáit. A vizsgálat során meghatározzák a frekvencia határokat, a szintet és a frekvencia változásának sebességét, valamint a vizsgálat időtartamát. [6]



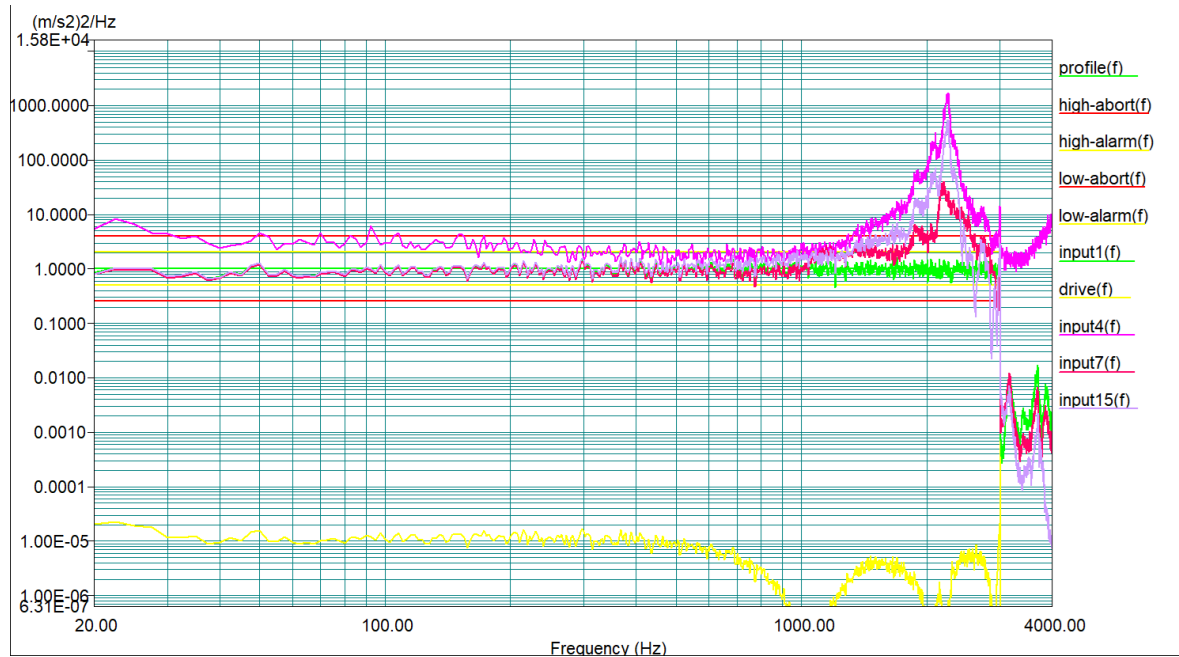
25. ábra: Szinuszos profil (saját kép)

A frekvencia spektrumát itt is 20-3000 Hz-re állítottam az előzőleg elmondottak alapján és a gyorsulásnak 2 m/s² értéket adtam.

3.3. Eredmények kiértékelése

3.3.1. Véletlenszerű (Random) rázás eredményei

Főirányok:



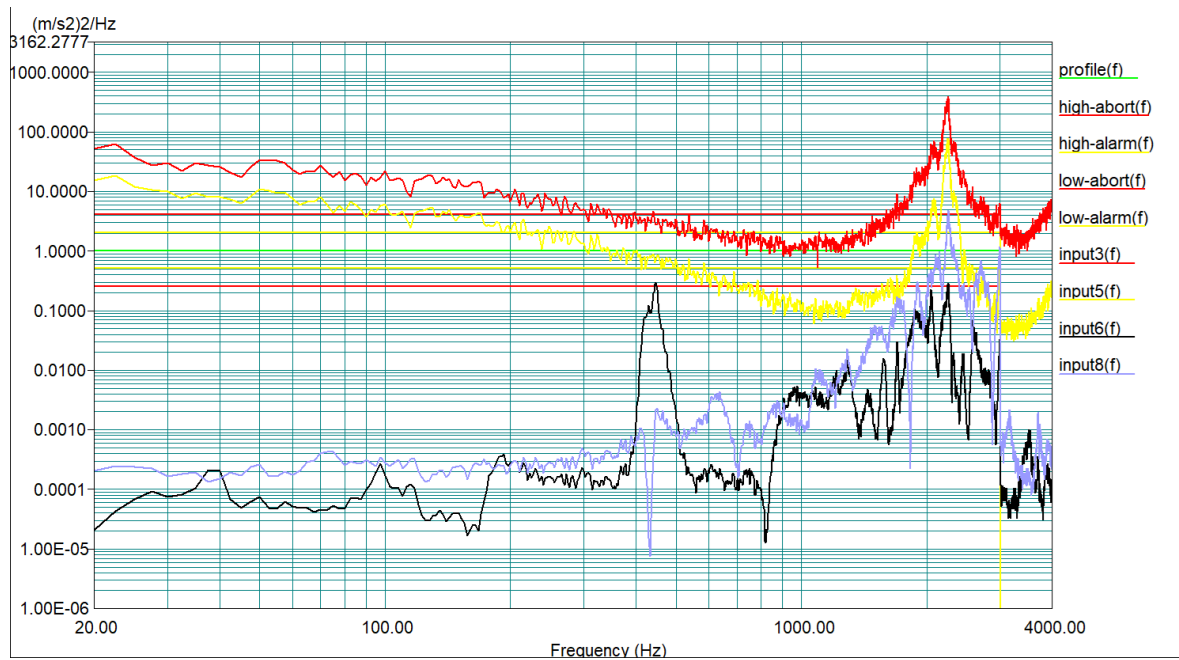
26. ábra: Random rázás főirányai (1. melléklet)

A 26. ábrán látható az alsó sárga színű spektrum a vezérlő jel. A piros színű határok alulról a -6dB-t, felülről a +6dB-t jelölik. A kettő sárga határ a -3dB és +3dB-t jelölik. A zöld szín a profilt mutatja. A rózsaszín, lila és piros színek a szenzorok gyorsulási értékeit mutatják.

A spektrumban észrevehető a vezérlőjel (sárga) kitérése 1100 Hz környékén, azonban ez a csúszó-asztal (armatúra) sajátfrekvenciája, nem pedig a vizsgált megfogóé. Ez az adat a rázógéphez tartozó gépkönyv, illetve korábbi tesztek alapján került meghatározásra. A sajátfrekvencia hatással van a vezérlő jelre, ugyanis ez mutatja azt az értéket, hogy mennyi energia kell a rázáshoz, azonban amikor sajátfrekvencián rázunk, olyankor ez az érték leesik, mert kevesebb energiára van szükség.

A diagrammról leolvasható, hogy 1400 Hz környékén a gyorsulásértékek átlélik a +6 dB-es határt, a növekedés egészen 2255 Hz-ig tart, ahol a 4-s csatorna (input4(f)) értéke $1627 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$, a 7-s csatorna (input7(f)) értéke $24,78 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ és a 15-s csatorna (input15(f)) értéke $527,43 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$.

Keresztirányok:



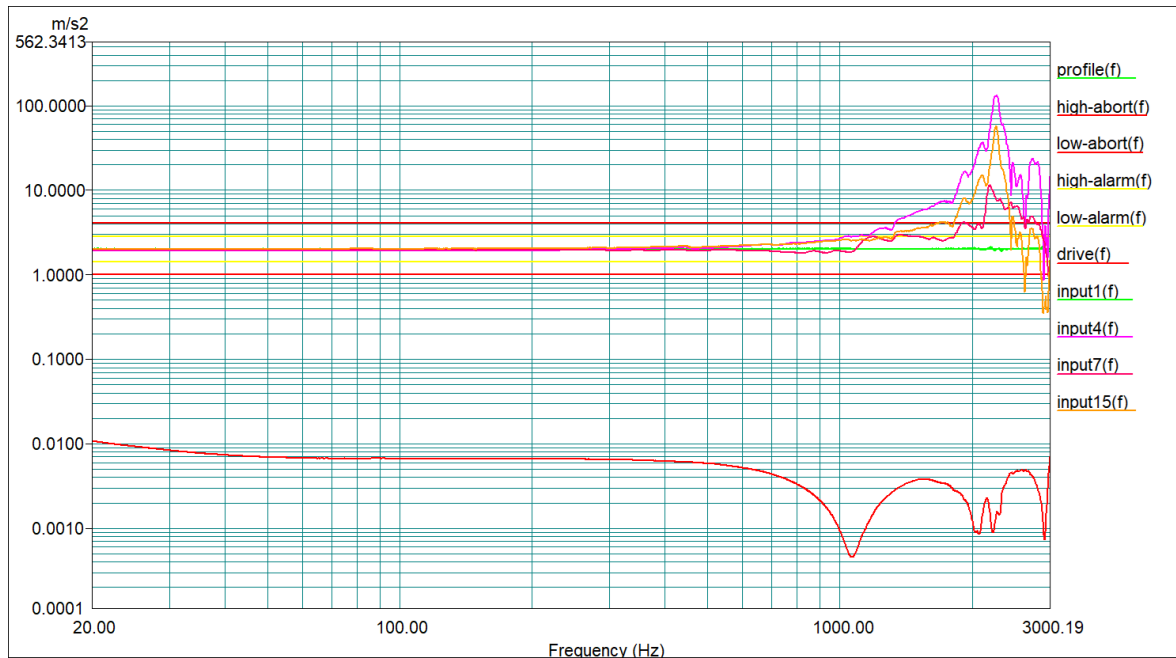
27. ábra: Random rázás keresztirányai (1. melléklet)

A felszerelt 2 db háromirányú gyorsulásérzékelő y és z irányban történő elmozdulását mutatja a 27. ábrán látható diagramm, másnéven ezek a keresztirányok. Látható, hogy 2255 Hz-nél itt is mindegyik csatorna értékei magasan kiugrik.

A fenti adatok alapján arra lehet következtetni, hogy a megfogó sajátfrekvenciája 2255 Hz-nél van.

3.3.2. Szinuszos (Swept Sine) rázás eredményei

Főirányok:



28. ábra: Szinuszos rázás főirányai (2. melléklet)

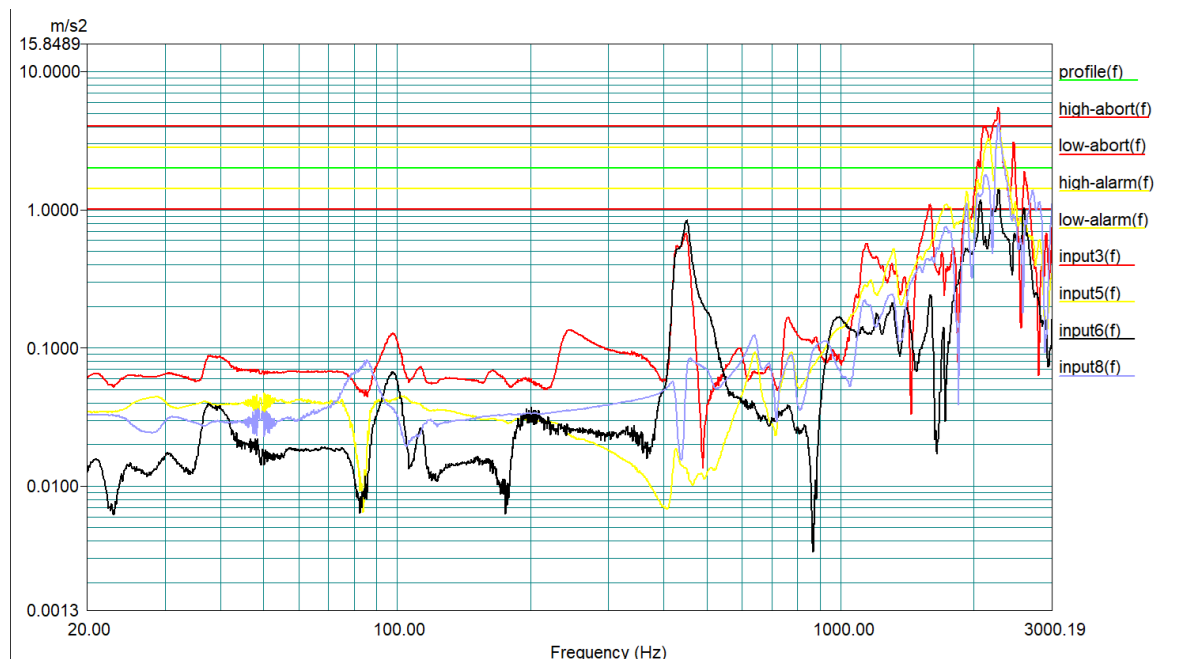
A 28. ábrán látható az alsó piros színű spektrum a vezérlő jel. A piros színű határok alulról a -6dB-t, felülről a +6dB-t jelölik. A kettő sárga határ a -3dB és +3dB-t jelölik. A zöld szín a profilt mutatja. A rózsaszín, lila és narancssárga színek a szenzorok gyorsulási értékeit mutatják.

Mint azt korábban is említettem a vezérlőjel (piros) 1100 Hz-nél való kitérése az armatúra rezonanciájára utal, nem pedig a megfogóra, azonban 2264 Hz-nél a vezérlőjel csökkenéséből arra lehet következtetni, hogy ott van a sajátfrekvencia.

Megállapítható, hogy a 2264 Hz körül rezonancia jelentkezett, itt a 4-s csatornának (input4(f)) volt a legnagyobb gyorsulási értéke, ami 129,16 m/s², a 15-s (input15(f)) csatorna gyorsulása 57,4 m/s² és a 7-s (input7(f)) csatornáé pedig 7,67 m/s² volt.

A korábbi szimuláció alapján a második sajátfrekvencia 2749 Hz környékén van, a teszt eredményéből is észlelhető egy kis rezonancia, ami pontosan 2733,7 Hz-nél van. Itt a legmagasabb csúcs a négyes csatornának volt, gyorsulási értéke: 23,27 m/s².

Keresztirányok:



29. ábra: Szinuszos rázás keresztirányai (2. melléklet)

A felszerelt 2 db háromirányú gyorsulásérzékelő y és z irányban történő elmozdulását mutatja a 29. ábra, másnéven ezek a keresztirányok. Megfigyelhető itt is, hogy a gyorsulásértékek itt is együttesen 2264 Hz körül kiugranak. Mivel főirányban és keresztirányban is 2264 Hz-nél megnő mindegyik szenzor gyorsulásértéke, így arra tudunk következtetni, hogy ennél a frekvenciánál rezonancia lép fel, ez a megfogó sajátfrekvenciája.

3.4. Eredmények összevetése

Eredmények összesítése:

Ansys kalkulált eredmény: ~2269 Hz

Véletlenszerű (random) vibrációs teszt: ~2255 Hz

Pásztázó szinuszos teszt: ~2264 Hz

Összességében megállapítható, hogy a három eredmény közel van egymáshoz, tehát a megfogó sajátfrekvenciája 2260 Hz körül található. Ezzel sikeresen elérte a dolgozatom a célját, ami a megfogó sajátfrekvenciájának megkeresése volt.

Irodalomjegyzék

- [1] „www.mogi.bme.hu,” BME MOGI, [Online]. Available: [2024.10.01.]
<https://mogi.bme.hu/TAMOP/vegeselem_modszerek/index.html>
- [2] „www.steelnumber.com,” steelnumber, [Online]. Available: [2024.10.01.]
<https://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1022>
- [3] „manuals.dianafea.com,” Dianafea, [Online]. Available: [2024.10.02.]
<<https://manuals.dianafea.com/d100/PrePost/node650.html>>
- [4] „www.mechhead.com,” Mechhead, [Online]. Available: [2024.10.15.]
<<https://www.mechhead.com/mesh-quality-checking-ansys-workbench/>>
- [5] „https://community.sw.siemens.com,” Siemens, [Online]. Available: [2024.10.09.]
<<https://community.sw.siemens.com/s/article/Natural-Frequency-and-Resonance>>
- [6] Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S: Shaker Control User Guide. Brüel & Kjær, 2009. p. 505-550.

Ábrajegyzék

1. ábra B_ECO_23029 megfogó, termékkel felszerelve (saját kép).....	2
2. ábra Anyag jellemzői (saját kép)	4
3. ábra Importált fájl generálása (saját kép).....	5
4. ábra Alkatrész közötti kapcsolat (saját kép)	7
5. ábra Lineáris, másodfokú és harmadfokú vonal elem [1].....	8
6. ábra 2D-s háromszög és négyszög elem [1]	8
7. ábra 3D-s elemek [1].....	9
8. ábra Lineáris, másodfokú és harmadfokú tetraéder elem [3]	9
9. ábra Alkatrész hálózása (saját kép).....	10
10. ábra Ortogonális vizsgálat alapjai [4]	11
11. ábra Ortogonális vizsgálat (saját kép).....	11
12. ábra Egyenlő oldalú és magas ferdeségű elemek [4].....	12
13. ábra Az elemhálózat ferdeségének értékei (saját kép).....	12
14. ábra A legtöbb és legkevesebb elemre vonatkozó ferdeség elhelyezkedései.....	13
15. ábra A modell peremfeltétele (saját kép).....	16
16. ábra Első sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció (saját kép).....	17
17. ábra Második sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció (saját kép).....	18
18. ábra Harmadik és negyedik sajátfrekvenciához tartozó teljes deformáció (saját kép).....	19
19. ábra Vektornyilakkal szemléltetett, első teljes deformáció (saját kép)	20
20. ábra Csúszóasztalra felszerelt megfogó (saját kép)	22
21. ábra Legnagyobb deformáció (saját kép).....	22
22. ábra Felhelyezett gyorsulás érzékelők 1/2 (saját kép)	23
23. ábra Felhelyezett gyorsulás érzékelők 2/2 (saját kép)	23
24. ábra Random profil (saját kép)	24
25. ábra Szinuszos profil (saját kép).....	25

26. ábra Random rázás főirányai (1. melléklet)	26
27. ábra Random rázás keresztirányai (1. melléklet)	27
28. ábra Szinuszos rázás főirányai (2. melléklet)	28
29. ábra Szinuszos rázás keresztirányai (2. melléklet)	29

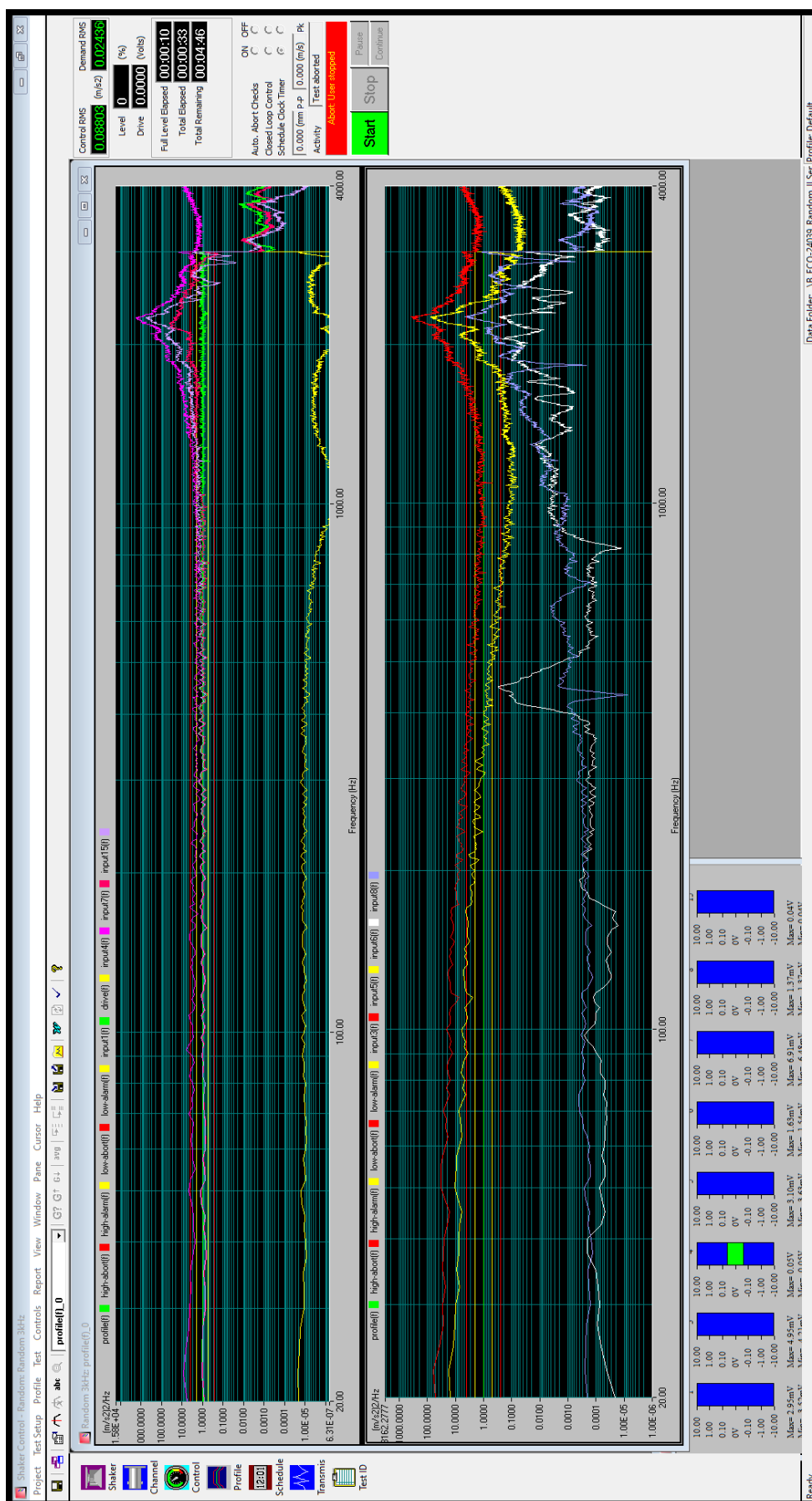
Táblázatjegyzék

1. táblázat Az EN-AW-1200 anyag összetétele [2]	4
---	---

Mellékletek jegyzéke

1. B_ECO_24039_Random_II_QR
2. B_ECO_24039_Sine_I_QR

1. melléklet:



2. melléklet:

