



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Hidak és Szerkezetek Tanszéke

Németh Balázs

Építőmérnök hallgató (BSc.)

MEMS gyorsulásmérő szenzorok alkalmazásának lehetőségei szerkezetek dinamikai vizsgálatában

Tudományos Diákköri Konferencia

2013. november 12.

Konzulens:

Dr. Jakab Gábor adjunktus

I. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen TDK dolgozat megszületésének folyamatában többen is részt vettek. Ezúton szeretném megragadni az alkalmat arra, hogy köszönetemet és tiszteletemet fejezzem ki mindenkinek, akik tudásukat és idejüket nem sajnálva hozzájárultak e mű megszületéséhez. Hálával tartozom:

Dr. Jakab Gábor adjunktusnak, hogy a Hidak és Szerkezetek Tanszékéről elvállalta a témavezetői feladatot, ennek megfelelően a helyes irányba terelgetett és az elmúlt hónapok alatt a konzultációk során rengeteg energiát és a legjobb tudását adta a TDK dolgozatomhoz, óriási segítséget jelentett nekem a numerikus programok megírásában és a laboratóriumi munka kivitelezésében is,

Égető Csaba tanársegédnek, az Általános és Felsőgeodéziai Tanszékről, hogy lehetővé tette számomra az interferométer alkalmazását, illetve a mérések során való közreműködése és szakértelme nagyban hozzájárult az eredményes munkámhoz.

II. TARTALOMJEGYZÉK

I.	Köszönetnyilvánítás.....	2
II.	Tartalomjegyzék	3
III.	Ábra- és táblázatjegyzék	4
IV.	Absztrakt	6
V.	A Hong Kong Polytechnic University-n végzett munka	8
1.	Bevezetés	9
2.	A vizsgált szerkezet	10
3.	Mérőeszközök	12
3.1.	HBM gyorsulásmérő szenzor.....	12
3.2.	BOSCH gyorsulásmérő szenzor.....	14
3.3.	Renishaw interferométer.....	17
3.4.	Jelfeldolgozás.....	19
4.	Számítási modellek	22
4.1.	Analitikus modell	22
4.2.	Numerikus modellek	24
4.3.	ANSYS numerikus modell	26
4.4.	MATLAB numerikus modell.....	28
4.5.	Eredmények összehasonlítása	30
5.	Mérés	32
5.1.	Numerikus modellek verifikálása HBM gyorsulásmérő szenzorral	32
5.2.	MEMS gyorsulásmérő szenzor verifikálása Numerikus modellekkel	37
5.3.	HBM és MEMS gyorsulásmérő szenzorok párhuzamos alkalmazása	40
5.4.	Interferométer és MEMS gyorsulásmérő szenzorok párhuzamos alkalmazása.....	41
5.5.	BOSCH gyorsulásmérő szenzor eredmények	43
6.	Összefoglalás.....	44
7.	Irodalomjegyzék	46
8.	Függelék.....	48
8.1.	Végeselemes felosztás	48
8.2.	Szenzorok elhelyezése	49
8.3.	Szenzorok elhelyezése párhuzamos alkalmazás esetén.....	50

III. ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. ábra: Acélkonzol.....	10
2. ábra: Konzol geometria	10
3. ábra: Longitudinális rezgő rendszer [1]	12
4. ábra: HBM szenzor kialakítása [1]	13
5. ábra: HBM szenzor kapcsolási rajza [1]	13
6. ábra: HBM szenzor kalibrálása [1]	13
7. ábra: 9 szabadságfokú Sparkfun szenzor [14]	14
8. ábra: 3 tengelyű BMA 180-as gyorsulásmérő [15]	14
9. ábra: Okostelefon műszerlap [16]	14
10. ábra: MEMS gyorsulásmérő működési elve [17]	15
11. ábra: MEMS gyorsulásmérő műszerek [17].....	15
12. ábra: Áramkörü komponensek [18].....	16
13. ábra: MEMS szenzor [19]	16
14. ábra: MEMS technológia #1 [20].....	16
15. ábra: MEMS technológia #2 [20].....	16
16. ábra: Renishaw XL-80, lézer [5]	17
17. ábra: Renishaw XL-80, lencse [5]	17
18. ábra: Renishaw XL-80, lencserögzítés [5]	17
19. ábra: Interferometria [21]	18
20. ábra: Interferométer [22].....	18
21. ábra: Hosszú mintavételezés, idő tartomány	20
22. ábra: Rövid mintavételezés, idő tartomány	20
23. ábra: Hosszú mintavételezés.....	20
24. ábra: Rövid mintavételezés.....	20
25. ábra: Rezgő rendszerek.....	22
26. ábra: BEAM188 elem [24]	24
27. ábra: Helyettesítő merevség	24
28. ábra: Gerenda végeselemes felosztása, szabad konzol	26
29. ábra: Rezgésalakok, üres konzol.....	26
30. ábra: Gerenda végeselemes felosztása, egy extra tömeg	27
31. ábra: Rezgésalakok, egy extra tömeg.....	27
32. ábra: Gerenda végeselemes felosztása, kettő extra tömeg	27
33. ábra: Rezgésalakok, kettő extra tömeg.....	27
34. ábra: Gerenda végeselemes felosztása, üres konzol	28
35. ábra: Rezgésalakok, üres konzol.....	28
36. ábra: Gerenda végeselemes felosztása, egy extra tömeg	29
37. ábra: Rezgésalakok, egy extra tömeg.....	29
38. ábra: Gerenda végeselemes felosztása, kettő extra tömeg	29
39. ábra: Rezgésalakok, kettő extra tömeg.....	29
40. ábra: Rezgésalakok, üres konzol.....	30
41. ábra: Rezgésalakok, egy extra tömeg.....	31
42. ábra: Rezgésalak, kettő extra tömeg	31
43. ábra: Idő tartomány, HBM szenzor	33
44. ábra: Idő tartomány, MEMS szenzor	33

45. ábra: Frekvencia tartomány, HBM szenzor	33
46. ábra: Frekvencia tartomány, MEMS szenzor	33
47. ábra: HBM szenzor, üres gerenda	34
48. ábra: HBM szenzor, egy extra tömeg	34
49. ábra: HBM szenzor, kettő extra tömeg	34
50. ábra: MEMS szenzor, üres konzol	37
51. ábra: MEMS szenzor, egy extra tömeg	37
52. ábra: MEMS szenzor, kettő extra tömeg	37
53. ábra: Csomópont, konzol	38
54. ábra: Rezgésalak	39
55. ábra: Csomópont lokalizálása #1	39
56. ábra: Csomópont lokalizálása #2	39
57. ábra: Csomópont lokalizálása #3	39
58. ábra: MEMS szenzor, egy extra tömeg	40
59. ábra: MEMS szenzor, kettő extra tömeg	40
60. ábra: Interferométer és MEMS szenzor	41
61. ábra: Átlagos elmozdulás keresés #1	42
62. ábra: Átlagos elmozdulás keresés #2	42
1. táblázat: Konzol geometriája, merevsége, tömege	11
2. táblázat: Teher geometriája, merevsége, extra tömeg	11
3. táblázat: Szenzorok, rögzítések, lencsék tömegei	21
4. táblázat: Számítási adatok, üres gerenda	22
5. táblázat: Számítási adatok, egy extra teher	23
6. táblázat: Számítási adatok, kettő extra teher	23
7. táblázat: Frekvencia, analitikus medell	23
8. táblázat: Helyettesítő merevség	24
9. táblázat: Frekvencia, ANSYS modell	26
10. táblázat: Frekvencia, MATLAB modell	28
11. táblázat: Analitikus és numerikus modell összehasonlítása	30
12. táblázat: Frekvencia, üres konzol	30
13. táblázat: Frekvencia, egy extra tömeg	31
14. táblázat: Frekvencia, kettő extra tömeg	31
15. táblázat: Frekvencia, 2D elemekkel	32
16. táblázat: Frekvencia, 3D elemekkel	33
17. táblázat: Frekvencia, egy extra teher, pontszerű teher	34
18. táblázat: Frekvencia, egy extra teher, külpontos teher	34
19. táblázat: Frekvencia, HBM szenzor, üres konzol	35
20. táblázat: Frekvencia, HBM szenzor, egy extra tömeg	35
21. táblázat: Frekvencia, HBM szenzor, kettő extra tömeg	35
22. táblázat: Frekvencia, MEMS szenzor, üres konzol	37
23. táblázat: Frekvencia, MEMS szenzor, egy extra tömeg	38
24. táblázat: Frekvencia, MEMS szenzor, kettő extra tömeg	38
25. táblázat: Frekvencia, HBM és MEMS gyorsulásmérő, üres konzol	40
26. táblázat: Frekvencia, HBM és MEMS szenzor, egy extra tömeg	40
27. táblázat: Frekvencia, Interferométer és MEMS szenzor, kettő extra tömeg	41
28. táblázat: Szerkezeti csillapítás	42
29. táblázat: MEMS szenzor eredmények	43

IV. ABSZTRAKT

MEMS gyorsulásmérő szenzorok alkalmazásának lehetőségei szerkezetek dinamikai vizsgálatában

Napjainkban egyre fontosabbá válik a nagyméretű és kulcsfontosságú építőmérnöki szerkezetek, elsősorban infrastruktúra létesítmények folyamatos, monitoring jellegű vizsgálata és ellenőrzése. E feladat gyakran sok elemből álló, kiterjedt szenzor és mérőrendszerek alkalmazását igényli. TDK dolgozatom célja a nagy mennyiségben elérhető, olcsó szenzorok felhasználhatóságának vizsgálata.

A bemutatott munka egy 2012-ben elkezdett nyári szakmai gyakorlat folytatása. A Hong Kong Polytechnic University-n végzett kutatásom során egy acél konzol dinamikai vizsgálatát végeztem el numerikus számítás és gyorsulásmérő műszerek segítségével.

Jelen dolgozatban két gyorsulásmérő szenzort hasonlítok össze azzal a céllal, hogy a jobb minőségű, kevésbé zajos, érzékenyebb és ezért drágább szenzort referenciaként felhasználva egy olcsó eszköz alkalmazhatóságának határait megállapítsam. Az eredmények alapján eldönthető, hogy adott vizsgálati célokhoz mely műszerek használhatóak gazdaságosan.

A vizsgálatokat egy, az idealizált dinamikai rendszereket, pl. több szabadságfokú rezgő rendszert megközelítő elrendezések vizsgálatát lehetővé tevő, függőleges konzollal és kétféle gyorsulásmérő szenzorral végeztem a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Szerkezetvizsgáló Laboratóriumában. Az összeállított rezgő rendszert egy analitikus és kétféle numerikus modellel modelleztem.

A modellek helyességét a méréssel verifikáltam. A különböző számítások eredményeinek pontosságát összehasonlítottam egymással és a különböző frekvenciákra hangolt konzolon végzett mérések értékeivel. A mérések és a számítások közötti eltérés nagysága 3% volt. A kétféle szenzor által rögzített idősorok összevetése után, a rezgés spektruma került analízisre. Ezt követően a műszert a rezgő rendszer csomópontjaiban elhelyezve a mért és számított rezgésalakot is meghatároztam.

A kevésbé érzékeny gyorsulásmérő korlátait egy vele párhuzamosan működő, nagy pontosságú szenzor használatával összemértem, hogy az adott mérési körülmények között a szenzor alkalmazhatóságának lehetőségeire javaslatot tegyek. A rezgés amplitúdójának méréséhez egy interferométert használtam, amit az Általános és Felsőgeodéziai Tanszék biztosított a számomra.

Evaluation of MEMS accelerometers for use in dynamic measurements

Nowadays the uninterrupted, persistent monitoring and verification of the large and significant constructions of civil engineering, highly at infrastructural facilities, are become more and more essential. For this problem, the usage of many components of sensors and extensive measurement systems are required. The purpose of my research is to study the applications of cheap sensors which are available in large quantities.

This project is a continuation of a summer technical training which was started in 2012. During my research at the Hong Kong Polytechnic University, the analysis of the dynamic characteristics of a cantilever steel beam was carried out with numerical calculations and accelerometers.

In my work, I compare two types of accelerometers, as reference I use high quality, less noisy, more sensitive therefore more expensive ones, in order to find out the boundary conditions of the cheap one. According to the results, it is easy to take into consideration which types of sensors are appropriate in an economical use.

The tests were performed on a vertical cantilever steel beam, which was suitable to idealize different arrangements of dynamic vibrations, such as multi degree of freedom system, with two types of accelerometers, in the Structural Laboratory of the Department of the Structural Engineering at BME. One analytical and two numerical models were created to modeling the vibrations of the dynamic system.

The propriety of the models was testified by the measurements. The accuracy of the results of the different calculations was compared to each other and to the values of the measurements of the cantilever steel beam, whose frequencies were variable. The difference between the tests and the calculations was 3%. First, the time domains of the vibrations were recorded by the two different accelerometers, after that the frequency domains of them were analyzed. Following that the sensor was took into the nodes of the vibration system to compare the values of the calculations and the tests to determine the mode shapes.

The boundary conditions of the less sensitive sensor were compared to the high precision sensor, which was working simultaneously on the same beam, to make recommendations to the way of its evaluation. To measure the mode shape of the vibration system, an interferometer was applied by the Department of Geodesy and Surveying.

V. A HONG KONG POLYTECHNIC UNIVERSITY-N VÉGZETT MUNKA

The Hong Kong Polytechnic University-n végzett kutatás célja egy rezgő rendszer dinamikai tulajdonságainak változásának vizsgálata volt, külső hatás által okozott sérülés esetén.

Egy sérülésmentes acél konzolnak a sajátfrekvenciáit és rezgésalakjait vizsgáltam. Ezeket referenciaként felhasználva a rezgés tulajdonságait ismét meghatároztam egy mesterségesen kialakított, sérült gerendán is. A cél az volt, hogy a rendszer dinamikai paramétereinek változásainak felhasználásával a sérülések létezését, helyét és mértékét lokalizáljam. A rezgő rendszer dinamikai tulajdonságainak és sérülésének modellezése végelelemes MATLAB és ANSYS program segítségével történt.

A számítási eredményeket gyorsulásmérő műszerek segítségével verifikáltam. A mérés egy vízszintesen elhelyezett konzolon, nyolc szenzor egyenletes kiosztásával történt. Egy elektromos kézi kalapács segítségével rövid idejű, vízszintes gerjesztéseket szimuláltam, annak érdekében, hogy a gerenda rezgésbe kerüljön. Az átlagos eltérés a végelelemes modellek között **1,5%**, míg a mérési eredmények és a numerikus számítások között **3,5%** volt.

Különböző mintavételezési frekvenciák segítségével a rezgő rendszer első sajátfrekvenciáját és rezgésalakját állapítottam meg és hasonlítottam össze a sérülésmentes és sérült szerkezeten. A vizsgálat eredményeként minden esetben a sajátfrekvenciák csökkenését tapasztaltam, amely átlagosan **3%** volt.

A sérülések helyére és mértékére a rezgésalakjából lehet következtetni. A vizsgált esetekben a rezgésalakok változását lehetett megfigyelni a konzol károsodott helyein. A pontos lokalizálásuk érdekében több szenzorra és további mérésekre lett volna szükség.

A külső zaj és zavaró tényezők hatását kizártam az állandó mérési körülményekkel, a mérés hosszú idejű mintavételezésével és az ismétlések biztosításával, így a sajátfrekvencia és a rezgésalak változásaiból a szerkezet károsodására lehetett egyértelműen következtetni.

Valós építmények esetén a szerkezetek dinamikai tulajdonságainak változásának vizsgálata önmagában nem elégséges, mert a környezeti hatások megváltozásával, például légnyomás, hőmérséklet, szél, esetleg közeli építkezések, a rezgő rendszer paraméterei is változhatnak, ezért torz képet kaphatunk a probléma igazi okáról. Így javasolt további mérések, módszerek párhuzamos alkalmazása.

1. BEVEZETÉS

Magyarországon egyre jobban kezd elterjedni a nagyméretű infrastruktúra jellegű építmények, elsősorban hidak, nagy mennyiségű, kiterjedt szenzor rendszerrel történő folyamatos monitoring jellegű megfigyelése, ellenőrzése. Ennek köszönhetően az informatika, elektronika jelenléte az építőiparban egyre fontosabb szerepet tölt be. Sok esetben e mérési apparátus felállításához drága, kifinomult műszerek szükségesek. Vajon indokolt-e ezen eszközök használata vagy adott esetben ezek felválthatóak lennének kevésbé érzékeny, de jóval olcsóbb, költséghatékonyabb készülékekre?

TDK dolgozatom során erre a kérdésre keresem a választ. Munkám célja, hogy a rendelkezésemre álló különböző szenzorok összehasonlításával javaslatot tegyek egy MEMS típusú gyorsulásmérő alkalmazhatóságának lehetőségeire. A mérésekhez szükséges feltételeket a BME Hidak és Szerkezetek Tanszéke Szerkezetvizsgáló Laboratóriuma biztosítja számomra.

Először egy analitikus és két fajta numerikus módszer segítségével, tetszőleges szabadságfokú, ideálisnak tekinthető dinamikai rendszerek modellezését lehetővé tévő, függőleges acél konzol felhasználásával, egy rezgő rendszer sajátfrekvenciáit és rezgésalakjait határozom meg, majd azokat egymással összehasonlítom. Ennek vizsgálatához **saját fejlesztésű MATLAB és ANSYS programokat** használok.

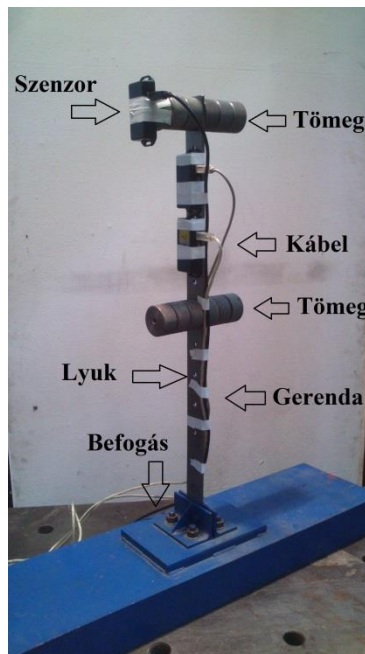
Ezt követően a számítási eredmények verifikálása történik nagy pontosságú, érzékeny műszer segítségével. Az ellenőrzött numerikus modellek felhasználásával a MEMS gyorsulásmérő által szolgáltatott adatok kiértékelése és összehasonlítása következik.

A további vizsgálatok során különböző gyorsulásmérők párhuzamos alkalmazásával a MEMS szenzor érzékenységeinek határait vizsgálom. Erre a célra egy hagyományos, mechanikai elven működő HBM szenzor és interferométer áll rendelkezésemre, amit az Általános és Felsőgeodéziai Tanszék biztosít a számomra. Kérdéses még, hogy mekkora az a minimális átlagos elmozdulás, amelynél még a MEMS szenzor elfogadható eredményeket ad, továbbá a rezgő rendszer csillapítása és egy csomópontjának lokalizálása.

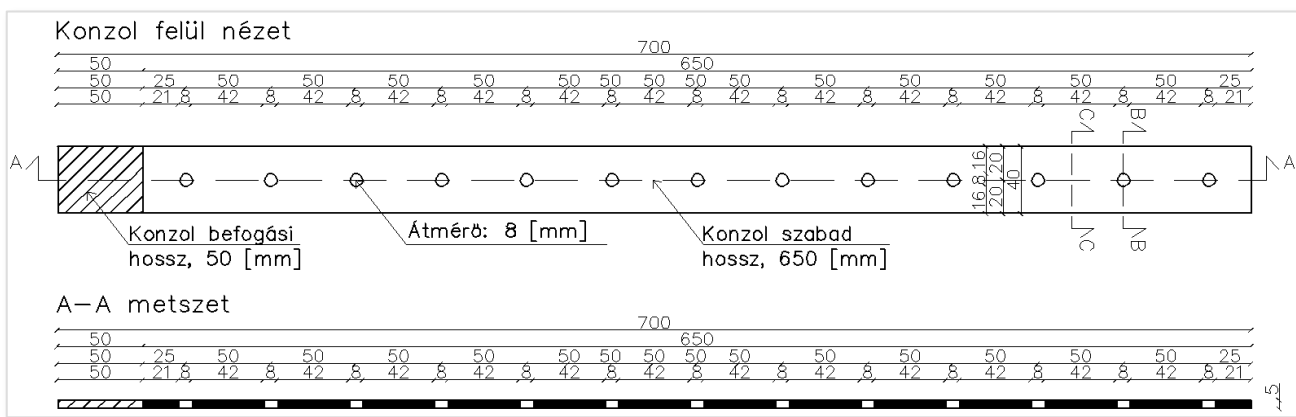
Modell vizsgálataim és méréseim során kiemelt figyelmet fordítok arra, hogy a lehető legpontosabban és körültekintően vegyem figyelembe a szerkezet viselkedését befolyásoló tényezőket, többek között: tömeg, geometria, szenzorok elhelyezkedése, külső tényezők, háttér zaj, szél.

2. A VIZSGÁLT SZERKEZET

A MEMS gyorsulásmérők alkalmazhatóságának határainak vizsgálata, az idealizált dinamikai rendszerek közelítő modellezését lehetővé tevő, függőleges acél konzolon történt. Az alkalmazott gerendát az **1. ábra** és a **2. ábra** szemlélteti.



1. ÁBRA: ACÉLKONZOL



2. ÁBRA: KONZOL GEOMETRIA

Az üres konzolt, egy és két helyen elhelyezett tömeg elrendezését vizsgáltam. Ezek a megoszló tömegek egy szabadságfokú és két szabadságfokú idealizált rendszerek modelljei.

A 700 mm hosszú, 50 mm-es befogási hosszal rendelkező acél gerendán 13 darab, 8 mm átmérőjű, mesterségesen elhelyezett lyukak segítségével a dinamikai rendszer szabadságfoka egyszerűen beállítható. A konzol tömege 1057 g, egy pár tömegé 689 g, amelyből három pár került felhasználásra egy szabadságfok növelésének esetén. A számítások során a kábelek, rögzítések tömegeit is figyelembe vettem a pontos eredmények meghatározásának érdekében. Az **1. táblázat** és a **2. táblázat** részletesen összefoglalja a konzol és a teher geometriai, merevségi és tömeg adatait.

Geometria, merevség, tömeg, rúd	
Acél konzol [g]:	1057
Lemez szélesség [mm]:	40
Lemez vastagság [mm]:	5
Lemez hossz [mm]:	700
Befogási hossz [mm]:	50
Szabad hossz [mm]:	650
Lyukak tengely távolsága, x irány [mm]:	50
Lyuk tengely perem távolsága, y irány [mm]:	20
Lyukak oldal távolsága, x irány [mm]:	42
Lyuk perem távolsága, y irány [mm]:	16
Lyuk átmérő [mm]:	8
Lyuk darabszám [db]:	13
Lyuk felület [mm ²]:	50,27
Lyuk térfogat [mm ³]:	251,33
Rugalmassági modulus [N / mm ²]:	210000
Sűrűség [kg / m ³]:	7850
Inercia a gyenge tengelyre [mm ⁴]:	417

1. TÁBLÁZAT: KONZOL GEOMETRIÁJA, MEREVSÉGE, TÖMEGE

Geometria, merevség, tömeg, extra tömeg	
Extra tömeg, 1 elempár [g]:	689
Sugár [mm]:	23,30
Magasság [mm]:	25,00
Alapterület [mm ²]:	1698,47
Térfogat [mm ³]:	42461,77
Végelem hossz [mm]:	13,00
Sűrűség [kg/m ³]:	7850
Inercia [mm ⁴]:	8531,68

2. TÁBLÁZAT: TEHER GEOMETRIÁJA, MEREVSÉGE, EXTRA TÖMEG

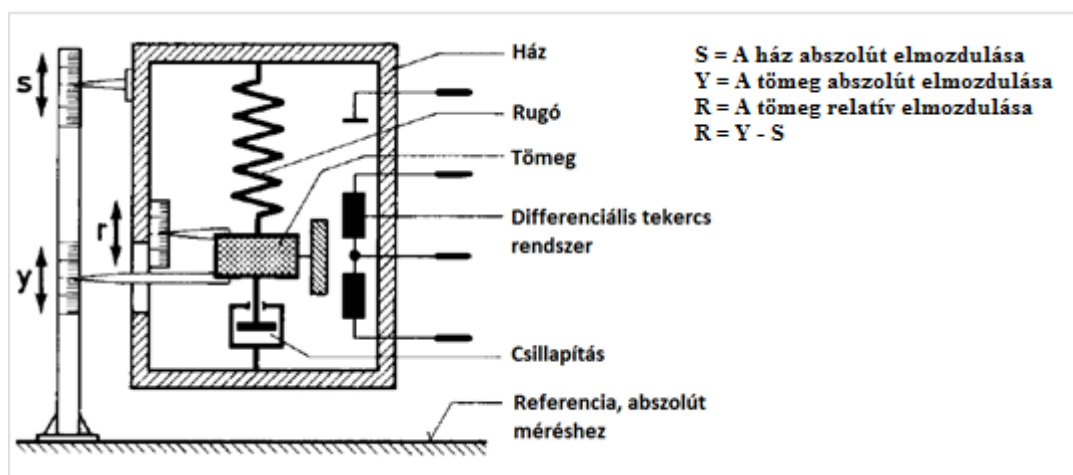
3. MÉRŐESZKÖZÖK

3.1. HBM GYORSULÁSMÉRŐ SENZOR

A végesseleemes MATLAB és ANSYS modell verifikálása Hottinger Baldwin Messtechnik B12/200 (HBM B12/200) gyorsulásmérővel történt.

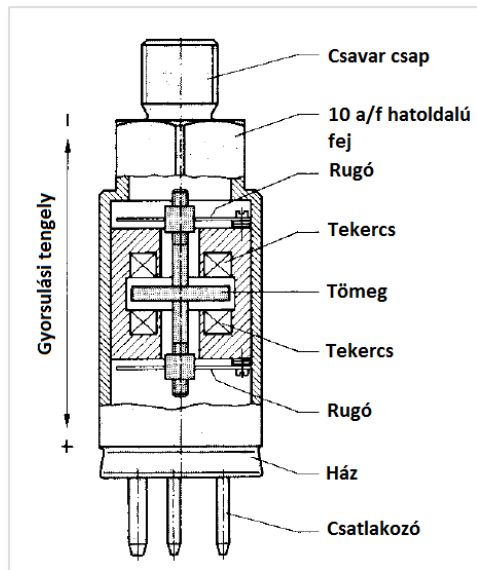
Kicsi és könnyű szerkezetű, így tökéletesen alkalmas precíz mérések elvégzésére és állandó, kis változású gyorsulások kimutatására. A névleges maximális gyorsulás, amit ki lehet vele mutatni 200 m/s^2 , megfelelő jelerősítő esetén. A műszer analóg mérést tesz lehetővé, amely egyből digitalizálásra kerül. (1)

A gyorsulásmérő működési elve egy mechanikusan, két irányban rezgő rendszer elvén működő, két végén egy-egy rugóra erősített, acél dobozban elhelyezett tömeg mozgásán alapszik, amely egy folyadékkal csillapított közegben van. A szenzor házából kiálló csavarmenet segítségével kell felrögzíteni a mérendő szerkezethez, majd a gyorsulásmérő háza a rugók segítségével továbbítja a rezgést a központi tömeghez. A belső tömeg és a külső ház között kialakuló relatív elmozdulás arányos a globális gyorsulással. A belső tömeg mozgása a tekercsek között a gyorsulással arányos elektromos jelet indukál. A szenzor kialakítását a **3. ábra** szemlélteti. (1)

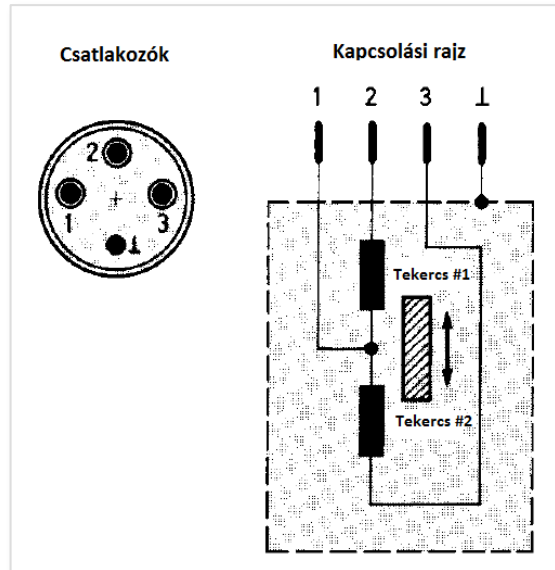


3. ÁBRA: LONGITUDINÁLIS REZGŐ RENDSZER (1)

A szenzor mérési iránya a hossz tengelyével párhuzamos, tömegközéppontja a ház közepén található. A műszer kialakítását a **4. ábra**, kapcsolási rajzát az **5. ábra** mutatja.

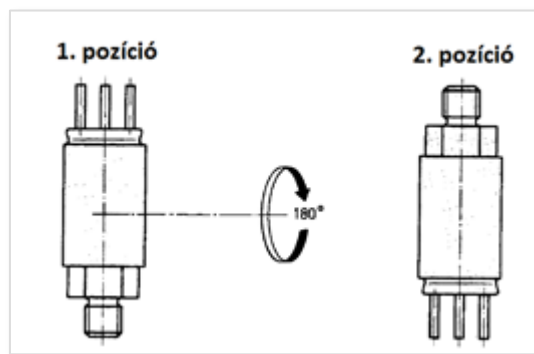


4. ÁBRA: HBM SZENZOR KIALAKÍTÁSA (1)



5. ÁBRA: HBM SZENZOR KAPCSOLÁSI RAJZA (1)

A szenzor kalibrálása a teljes mérőrendszer összeszerelése után történik. A gyorsulásmérő hossz tengely körüli 180° -os forgatásával ez egyszerűen elvégezhető. Az első pozícióban a tömeg meghatározott helyen van, a műszer enyhe tengelyferdesége ezt nem befolyásolja. Az 1. és 2. pozícióban az erősítő beállítása után, átlagosan $19,62 \text{ m/s}^2$ értékre, a műszer kalibrálása megtörténik. Ezt szemlélteti a **6. ábra.** (1)

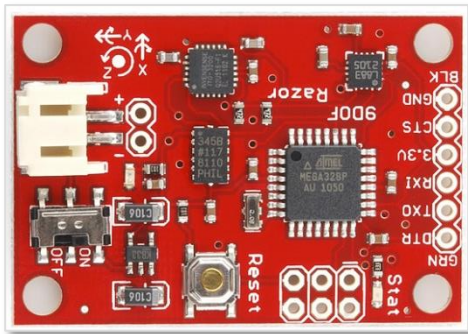


6. ÁBRA: HBM SZENZOR KALIBRÁLÁSA (1)

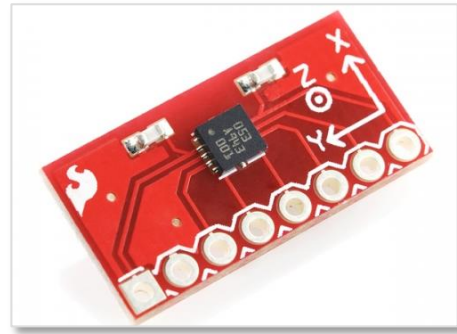
A műszer alkalmazásakor a pontos mérés érdekében különböző zavaró tényezők kiküszöbölésére kell ügyelni. Ilyen például az alkalmazott kábelek hossza. Ugyanis 100 m-nél hosszabb kábel alkalmazásakor a szenzor érzékenysége változhat. Kerülni kell továbbá a mágneses terek okozta zavarást is, mivel a mérés az induktivitás elvén alapszik, így interferencia léphet fel. 2 mT erősségű elektromágneses térben 10%-os eltérés tapasztalható, ezért ennek hatását célszerű figyelembe venni. Párhuzamos földeléssel és a magas frekvenciák ellenőrzésével azonban ez a hatás is kiküszöbölhető. (1)

3.2. BOSCH GYORSULÁSMÉRŐ SENZOR

Jelen dolgozat fő vizsgálati tárgyát a MEMS, mikro-elektromechanikai rendszerek (Micro-electromechanical systems) jelentik. 3 tengelyű BOSCH BMA 180-as digitális gyorsulásmérőt alkalmaztam, amelynek zajszintje jóval magasabb, mint a 3.1.-es fejezetben bemutatott HBM gyorsulásmérőnek. A 7. ábra és a 8. ábra egy-egy Sparkfun szenzort mutat be.



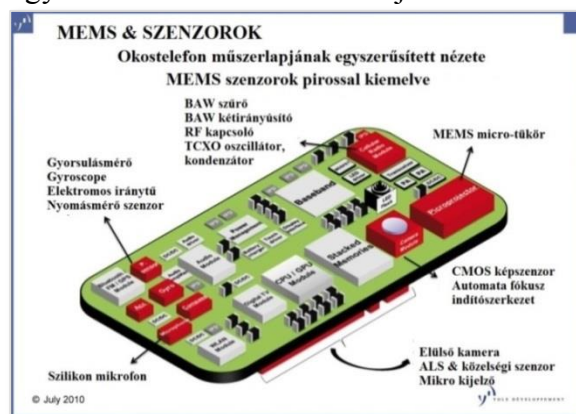
7. ÁBRA: 9 SZABADSÁGFOKÚ SPARKFUN SENZOR (14)



8. ÁBRA: 3 TENGELYŰ BMA 180-AS GYORSULÁSMÉRŐ (15)

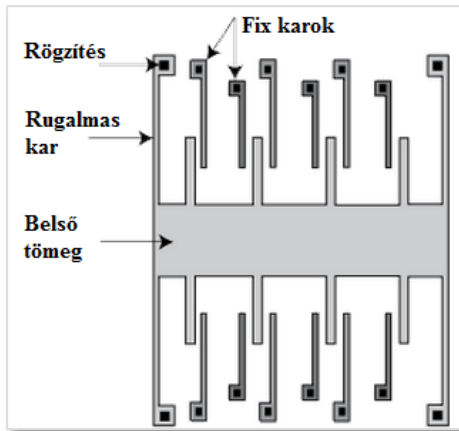
Gyorsulás, vibráció, ütődés, dőlés, elfordulás az öt fő mozgásérzékelési fajta mindegyike, leszámítva az elfordulást, végeredményben gyorsulásra is visszavezethető, amelyek között a fő különbséget a hatás ideje adja. Ezen mozgásfajták vizsgálatára ideális lehetőséget nyújtanak a MEMS típusú szenzorok.

A mikroelektronikai rendszerek kisméretű eszközök, amelyek mérete a 20 mikrométer és az 1 milliméter közé esik. A szenzorok kialakítása elektronikai, mechanikai elemek, szelepek integrációját jelenti egy közös szilícium felületen, amely mikro gyártási technológiával készül. Alkalmazásuk széles körben elterjedt az autógyártásban, orvosi mechanikai eszközök, robotok, intelligens gépek készítésében, sőt a mai világban, az állandóan kezünkben lévő mobiltelefonokban is ez a technológia található. A 9. ábra egy telefon műszerlapjának egyszerűsített vázlatát ábrázolja.

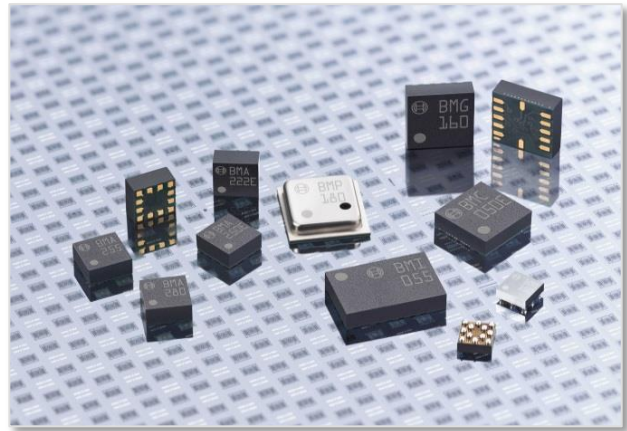


9. ÁBRA: OKOSTELEFON MŰSZERLAP (16)

A MEMS gyorsulásmérő működési elve a kapacitív érzékelés elvén működik. A fix és rugalmas karok, elektródák segítségével a belső, központi tömeg mozgása során indukált áram keletkezik, amely arányos a gyorsulással. Ezt mutatja a **10. ábra**.



10. ÁBRA: MEMS GYORSULÁSMÉRŐ MŰKÖDÉSI ELVE [17]



11. ÁBRA: MEMS GYORSULÁSMÉRŐ MŰSZEREK [17]

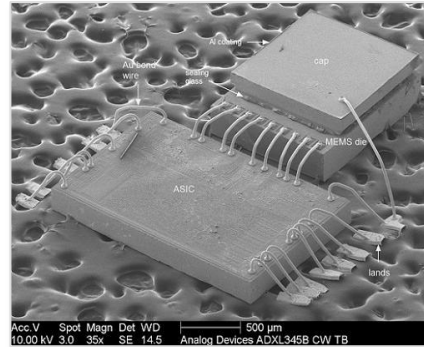
A legújabb fejlesztések lehetővé tették, hogy akár az alacsony, akár a magas gyorsulási tartományokban a korábbiakhoz képest sokkal kifinomultabb MEMS gyorsulásmérőket gyártsanak, **11. ábra**, ezzel jelentősen kiterjesztve a potenciális alkalmazhatósági köreiket.

A MEMS-ek több okból kifolyólag is hasznosak és megbízhatóak. Egyrészt nincsenek összeszerelési lépései a mechanikai elemeknek, így a mikroelektronika szempontjából egyszerű a gyártása, tervezési folyamat hasonlít a klasszikus mikroelektronika terveihez, mivel nem bonyolult, főként mechanikai elemek, rugók, karok vannak benne. Ezen túl a nyersanyagok is megbízhatóak és könnyen elérhetőek, ilyen például a szilícium, kvarc, és polimerek. A leggyakrabban használt anyag a szilícium. (2)

A mikroelektronikai eszközök segítségével nagyméretű rendszerek vezérelhetőek kis erővel. A méretcsökkentés révén minőségi előnyök és új működési elvek realizálhatóak. Tetszőleges funkciók társíthatóak, mint például érzékelés, számítás, beavatkozás, vezérlés és kommunikáció. A szenzor két részből tevődik össze, a chipből és a tokból, amelyek közösen valósítja meg az adott funkciót. A MEMS eszköz előállítási költsége: a chip 0,1-50%, a tokozás akár 50-99%. A **12. ábra** áramköri komponenseket, a **13. ábra** egy MEMS szenzort mutat be. (3)

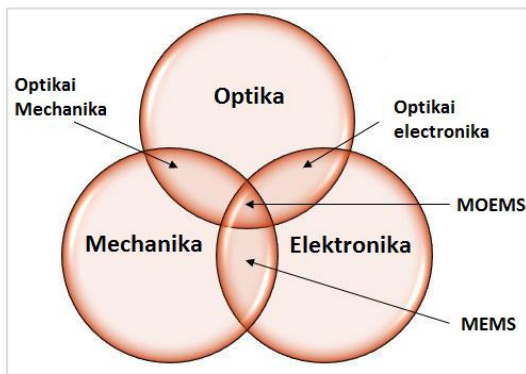


12. ÁBRA: ÁRAMKÖRI KOMPONENSEK (18)



13. ÁBRA: MEMS SZENZOR (19)

A MEMS rendszerek általában egy központi egységet tartalmaznak, egy mikroprocesszort, és ehhez kapcsolódó eszközöket, amelyek általában mikro érzékelők és mikro beavatkozók. A MEMS rendszerek technológiáját a 14. ábra és 15. ábra szemlélteti. (4)



14. ÁBRA: MEMS TECHNOLÓGIA #1 (20)



15. ÁBRA: MEMS TECHNOLÓGIA #2 (20)

Az alkalmazott MEMS gyorsulásmérő mintavételezési frekvenciája 100 [Hz], amely nem változtatható. A Whittaker - Kotelnikov - Shannon - féle mintavételezési tétel értelmében így csak az 50 [Hz]-nél alacsonyabb frekvenciák mérhetőek ki kellő pontossággal. A vizsgált konzol esetében ez legfeljebb az első két sajátfrekvenciát jelenti. Mivel a szenzor háromirányú gyorsulásmérésre alkalmas, amelyek közül z irányban, vagyis a műszer síkjára merőlegesen, kevésbé érzékeny, ezért ebben a pozícióban rögzítettem, hogy a mértékadó eset vizsgálható legyen.

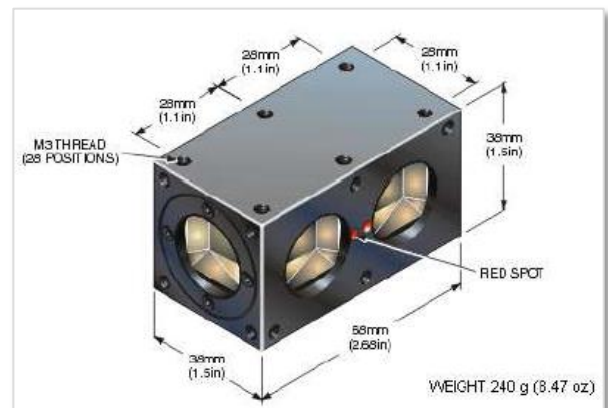
A BOSCH BMA 180-as szenzor (MEMS) és a számítógép kommunikációjának megvalósulásához egy **saját fejlesztésű MATLAB programot** írtam. Ez a program érzékeli az összes számítógépre csatlakoztatott soros portot, majd sorban megnyitja azokat. Elindítja az adatforgalmat a számítógép és a gyorsulásmérő között egy karakter küldésével, majd beolvassa az érkező jeleket. Valós idejű adatrögzítés történik, késleltetés és puffer alkalmazása nélkül. A beérkező adatokat átkonvertálja úgy, hogy a háromirányú gyorsulások olvashatóak legyenek, majd az eredményeket kirajzolja és exportálja egy excel fájlba.

3.3. RENISHAW INTERFEROMÉTER

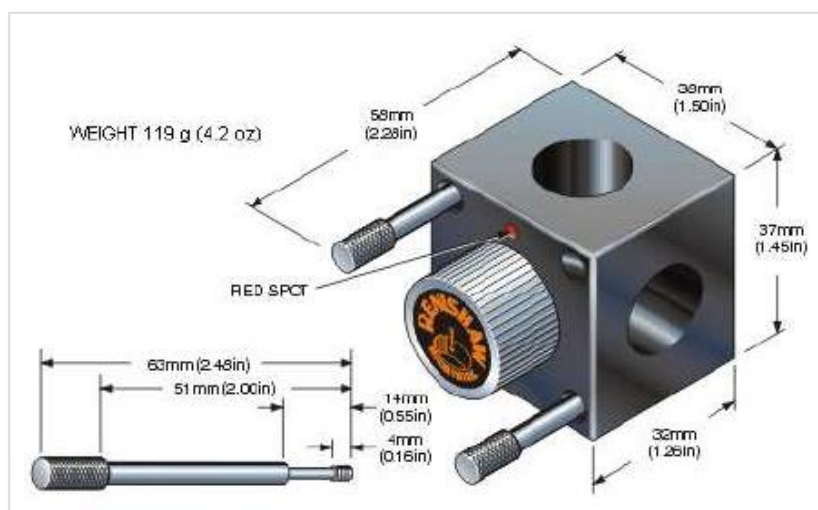
Egy Renishaw XL-80 típusú lézer interferométer segítségével a vizsgált rezgő rendszer elmozdulásait és gyorsulásait határoztam meg. Rendkívül pontos, érzékeny és stabil mérést tesz lehetővé. Normál mérési körülmények között, vagyis 0-40°C és 650-1150 mbar között, $\pm 0,005$ ezred eltérés tapasztalható a mérések eredményei között. Maximálisan 50 kHz-ig állítható a mintavételezési frekvenciája és 80 m-es hatótávolságig alkalmazható. Egyszerű a használata, USB csatlakozón keresztül közvetlenül a számítógéphez csatlakoztatható. A HBM szenzorhoz képest sokkal precízebb mérési eredményeket szolgáltat, az elmozdulások közvetlenül kinyerhetőek a műszerből, így alkalmazása javasolt. A **16. ábra** a lézert, a **17. ábra** a lencsét és a **18. ábra** a lencse rögzítését mutatja. (5)



16. ÁBRA: RENISHAW XL-80, LÉZER (5)

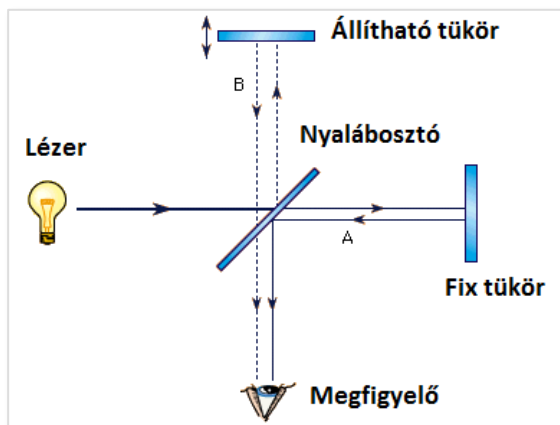


17. ÁBRA: RENISHAW XL-80, LENCSE (5)

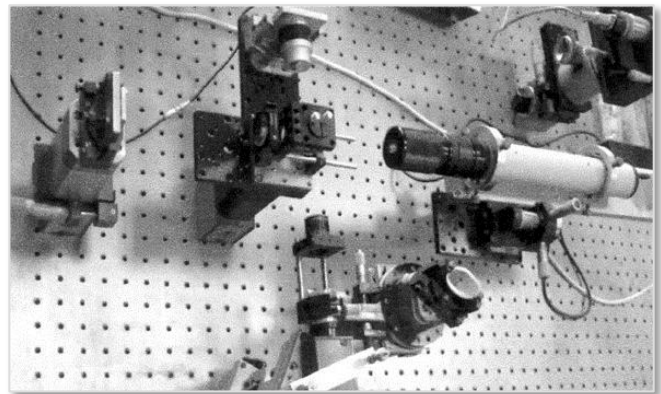


18. ÁBRA: RENISHAW XL-80, LENCSE RÖGZÍTÉS (5)

Az alkalmazott műszer működési elvének alapja a Michelson-féle interferométer. Egy lézerforrást felhasználva a fénynyaláb egy féligáteresztő tükrről halad át. Ennek hatására a fény 50%-a akadálytalanul áthalad a tükrről, míg a másik 50%-a visszaverődik. A fényforrásból érkező fény így két részre oszlik szét. Az egyik része egy forgatható, mozgatható tükörre, a másik egy állótükörre érkezik. Mindkét esetben a félig áteresztő tükörre verődnek vissza, így az állótükörről érkező rész fele, és a mozgatható tükörről érkező fény fele szintén a megfigyelőre verődik vissza. Ezt a folyamatot szemlélteti a **19. ábra**, míg a **20. ábra** egy lehetséges műszer elrendezést mutat.



19. ÁBRA: INTERFEROMETRIA (21)



20. ÁBRA: INTERFEROMÉTER (22)

A visszaérkező nyalábok találkoznak egymással és mivel különböző hosszúságú utakat tettek meg, ezért különböző fázisban találkoznak az azonos hullámhosszú fénysugarak. Ezáltal interferencia lép fel és a készülék elé elhelyezett ernyőn interferencia csíkok jelennek meg. Mivel a nyalábok ugyanabból a fényforrásból származnak, így fázisuk erősen korrelált, kezdetben ezek azonosak. (6)

A félig áteresztő tükörről visszaverődő és egyesülő fénysugarakat egy detektorra vezetve pontosan mérhető az úthossz különbségből származó fáziskülönbség nagysága. Ez a változás az interferencia képben eltérést okoz, ezért detektálható és nagyon pontosan mérhető.

Mivel a nyalábok többször is átmennek a sugárosztón, ahogy a **19. ábra** is mutatja, fontos hogy, az alkalmazott fényforrás erősen koherens és monokromatikus legyen. Lézer esetében ez nem okoz problémát, de más fényforrások esetében azonban hibaforrás lehet.

3.4. JELFELDOLGOZÁS

Minden mérés esetében az adatok kiértékelése utólagos jelfeldolgozással történt **sajátfejlesztésű MATLAB programban**. A pontos és összehasonlítható eredmények érdekében a mérések feltételeit, paramétereit, beállításait előre meghatároztam. Az alkalmazott szenzor elhelyezése megtekinthető a *Függelék, szenzorok elhelyezése* c. fejezetben, míg a szenzorok párhuzamos alkalmazása a *Függelék, szenzorok párhuzamos alkalmazása* c. fejezetben. HBM esetén négy darab, MEMS szenzor esetén három darab gyorsulásmérőt erősítettem fel a konzolra úgy, hogy azok lehetőleg ne a rezgés csomópontjaiba kerüljenek. A csomópontok pontos helyeinek meghatározásához a MATLAB programomat használtam.

A HBM szenzor esetén az adatokat a Catman Easy program segítségével rögzítettem. Első lépésként a program csatornáihoz hozzárendeltem a gyorsulásmérő szenzorokat, majd megfelelően kalibráltam őket, két irányban, tengely körül 180°-os forgatással. "Zero Balance" funkció használatával a mérés kezdeti értékét nullára állítottam. A mintavételezési frekvencia beállítása után a kívánt hosszúságú adatsort rögzítettem, majd azt egy txt fájlba exportáltam.

Interferométer alkalmazása esetén az adatok rögzítése a LaserXL program segítségével történt. A fix és mozgó lencsék elhelyezése után, a tripod lézertartó felállítása következett, majd a lézer kalibrálása. Ezt követően a megfelelő mintavételezési frekvencia beállításával a mérés elkezdődhetett. A műszernek köszönhetően az elmozdulási és gyorsulási értékeket közvetlenül megkaptam, majd szintén ezeket egy txt fájlba exportáltam.

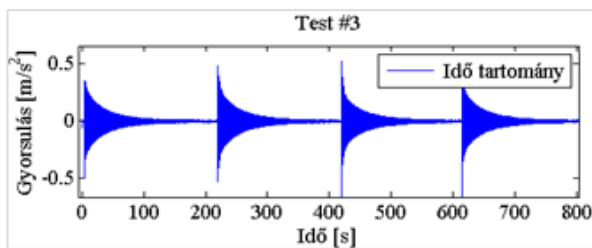
A mintavételezési frekvencia megválasztása a Whittaker - Kotelnikov - Shannon - féle mintavételezési tétel figyelembe vételével történt. A mintavételezési tétel azt mondja ki, hogy egy jel megfelelően visszaállítható a mintáiból, ha az eredeti jel a spektrumának az ω legmagasabb frekvenciakomponensénél legalább kétszer akkora frekvencián van mintavételezve. Ezt az alsó mintavételezési határt Nyquist frekvenciának hívjuk. Egyszerű gyakorlati értelmezésben a tétel azt jelenti, hogy a mintavételezési intervallumot legalább olyan méretűre, vagy kisebbnek kell választani, mint a jelben lévő legkisebb számunkra érdekes részlet fele. A jelben előforduló legmagasabb frekvencia határozza meg a mintavételezési intervallumot. (7)

Az idősorok, gyorsulási értékek rögzítésre kerültek, majd a minta jelén detrend függvényt (MATLAB) használtam, hogy az esetleges konstans, lineáris adatelcsúszást

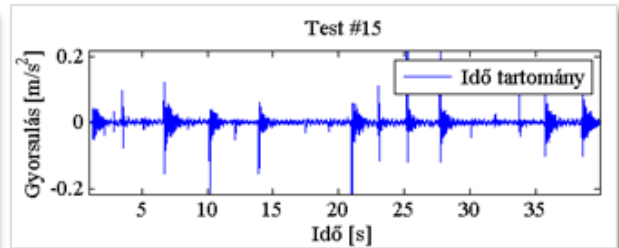
megszüntessem. Digitális alul áteresztő szűrő segítségével a magas frekvenciák, 50-ed rendű, Blackman, FIR (Finite Impulse Response) alul áteresztő szűrő segítségével kiszűrésre kerültek. A szűrő karakterisztikája 6 dB-es simítást alkalmaz a vágási frekvenciánál. (8)

Fourier analízis segítségével a frekvencia tartományt meghatároztam. A transzformáció során Gyors Fourier Transzformációt alkalmaztam (Fast Fourier Transform, FFT), ennek érdekében az idősort levágtam a kettő azon legnagyobb hatványával, amely a legközelebb esik az adatsor hosszához, így a kiértékelés ideje a 10-edére csökkent. (9)

Az első, alacsonyabb frekvenciák meghatározásának érdekében hosszabb, míg magasabb frekvenciák esetén rövidebb adatsorokat rögzítettem. A gerjesztés módja is különböző volt. Az első frekvencia meghatározásánál egyetlen, koncentrált, oldal irányú lökést kapott a gerenda a tetejénél. Magasabb frekvenciák esetében több, apróbb gerjesztést szenvedett el a konzol a befogási keresztmetszetenél. Ezt a két fajta típusú mintavételezést a **21. ábra** és a **22. ábra** szemlélteti.

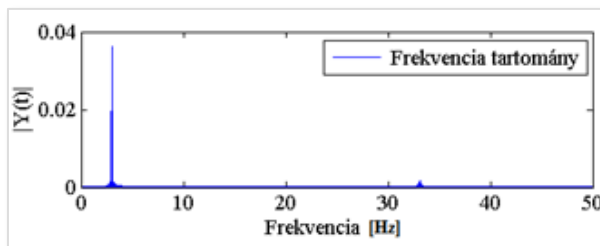


21. ÁBRA: HOSSZÚ MINTAVÉTELEZÉS, IDŐ TARTOMÁNY

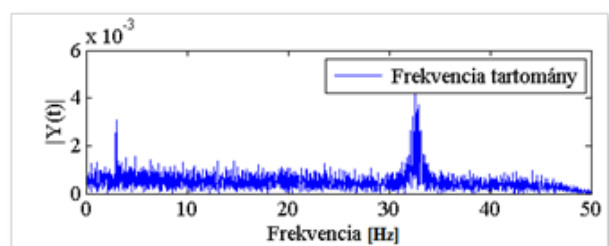


22. ÁBRA: RÖVID MINTAVÉTELEZÉS, IDŐ TARTOMÁNY

Megfigyelhetjük, hogy az első esetben sokkal tisztább, zavaró hatásoktól mentes jelet, míg a másodikonál egy kevésbé tiszta, állandó háttérzajt is kapunk. A hosszabb adatsornak köszönhetően az eredmények kiértékelése is pontosabb, mivel az idő tartományból a frekvencia tartományba való transzformálás során, a vízszintes tengely, frekvencia [Hz], felbontása is finomabb lesz. Ezt szemlélteti a **23. ábra** és a **24. ábra**.



23. ÁBRA: HOSSZÚ MINTAVÉTELEZÉS



24. ÁBRA: RÖVID MINTAVÉTELEZÉS

A **3. táblázat** egy összefoglalást mutat a szenzorok, rögzítések, lencsék tömegeiről.

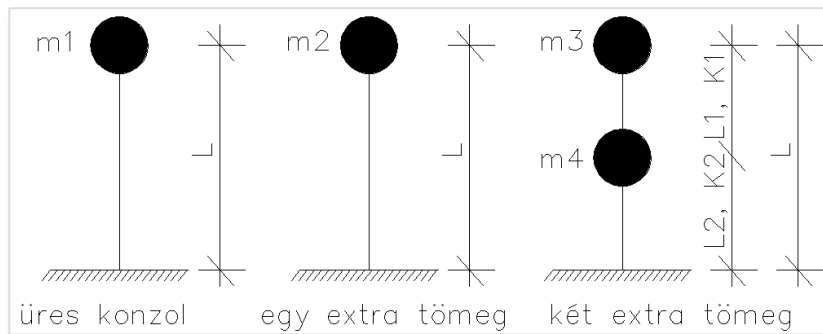
Szenzorok, rögzítések, lencsék tömegei	
HBM gyorsulásmérő [g]:	20
HBM gyorsulásmérő, rögzítés [g]:	20
HBM gyorsulásmérő, kábel [g]:	15
MEMS gyorsulásmérő [g]:	45
MEMS gyorsulásmérő, kábel [g]:	15
Interferométer, lencse #1 [g]	240
Interferométer, lencse #2 [g]	119
Interferométer, lencse rögzítése [g]	61,3

**3. TÁBLÁZAT: SENZOROK, RÖGZÍTÉSEK, LENCSÉK
TÖMEGEI**

4. SZÁMÍTÁSI MODELLEK

4.1. ANALITIKUS MODELL

Az analitikus módszer célja, hogy a numerikus eredményeket verifikáljam. Elhanyagolásokkal élve, közelítően ideálisnak tekintett modellek használatával modellezem a rezgő rendszereket. Az extra tömeg külpontosságát egyik esetben sem vettem figyelembe. Ezzel a módszerrel az első sajátfrekvenciát üres konzol, egy és két helyen elhelyezett tömegű rendszer esetén meghatároztam. Ennek az elrendezését mutatja a **25. ábra**.



25. ÁBRA: REZGŐ RENDSZEREK

Az üres konzol esetén, a teljes rendszer tömege, acél konzol, gyorsulásmérők, kábelek, rögzítések, a gerenda felső pontján lett elhelyezve, ezzel modellezve az ideálisnak tekintett egy szabadságfokú rezgő rendszert. Az alkalmazott teljes tömeg: 1277 g. A gerenda hossza 675 mm, figyelembe véve a befogási hossz felét is. A gerenda merevségét a rugalmassági modulus, 210 000 N/mm², és a geometria alapján vettem figyelembe. Az alkalmazott zárt képletekkel az első sajátfrekvencia 7,6653 Hz. A számítási adatokat a **4. táblázat** tartalmazza.

Számítási adatok							
Analitikus modell, üres gerenda							
Acélkonzol tömeg [g]	Szenzor, tömeg [g]	Kábel, tömeg [g]	Rögzítés, tömeg [g]	Teljes tömeg (m) [g]	Gerenda hossz [mm]	Merevség (k) [N/m]	Frekvencia [Hz]
1057	4*20	4*15	4*20	1277	675	2835	7,665

4. TÁBLÁZAT: SZÁMÍTÁSI ADATOK, ÜRES GERENDA

Az egy helyen elhelyezett tömeg esetén a gerenda tömegét elhanyagoltam, hogy jobban közelítsem az ideálisnak tekintett modellt. Ez a közelítés megtehető, mert a teher tömege több mint kétszerese a konzol tömegének, azonban ez még mindig messze van az ideálisnak tekintett modellől, ahol a konzol súlytalan. Extra tömeg, gyorsulásmérők, kábelek,

rögzítések tömegeit a gerenda tetejére koncentráltam. Az első sajátfrekvencia 3,0433 Hz. A számítási adatokat az **5. táblázat** tartalmazza.

Számítási adatok							
Analitikus modell, egy extra teher							
Extra tömeg [g]	Szenzor, tömeg [g]	Kábel, tömeg [g]	Rögzítés, tömeg [g]	Teljes tömeg (m) [g]	Gerenda hossz [mm]	Merevség (k) [N/m]	Frekvencia [Hz]
2077	4*20	4*15	4*20	2297	675	839,87	3,043

5. TÁBLÁZAT: SZÁMÍTÁSI ADATOK, EGY EXTRA TEHER

A számítás során felhasznált képletek, ahol k a gerenda merevsége ω_0 a körfrekvencia: (10)

$$k = \frac{3 \cdot EI}{l_{\text{ger}}^3} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

A két helyen elhelyezett extra tömeg esetén is a konzol tömegét elhanyagoltam. Ez megtehető, mert a teher össztömege több mint négyszerese a gerendáénak, azonban ez még mindig távol van az ideálisnak tekintett modellől, ahol a konzol súlytalan. Az extra tömeg, gyorsulásmérők, kábelek, rögzítések tömegeit a gerenda tetejére koncentráltam, míg a második extra tömeg a konzol aljától 350 mm-re került elhelyezésre. Az első sajátfrekvencia 2,8817 Hz, a második 19,029 Hz. A számítási adatokat az **6. táblázat** tartalmazza.

Számítási adatok										
Analitikus modell										
Extra teher tömeg [g]	Szenzor, tömeg [g]	Kábel, tömeg [g]	Rögzítés, tömeg [g]	Teljes tömeg (m) [g]	Gerenda hossz, L1 [mm]	Gerenda hossz, L2 [mm]	Merevség (k), k1 [N/m]	Merevség (k), k2 [N/m]	1. Frek. [Hz]	2. Frek. [Hz]
2077	4*20	4*15	4*20	2297	325	350	4162	2985,8	2,882	19,029

6. TÁBLÁZAT: SZÁMÍTÁSI ADATOK, KETTŐ EXTRA TEHER

A számítás során felhasznált képletek, ahol K a gerenda merevségi, M a tömeg mátrixa, ω_0 a körfrekvencia:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.2970 & 0 \\ 0 & 2.077 \end{pmatrix} \quad K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4162 & -0.9960 \\ -0.9960 & 2.9858 \end{pmatrix} \cdot 10^4 \quad \left| K - (\omega_0)^2 \cdot M \right| = 0$$

Az eredményeket a **7. táblázat** összesítve ábrázolja:

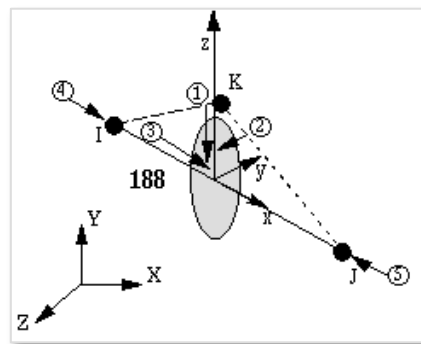
Frekvencia [Hz]				
Analitikus modell				
Frekvencia száma	Üres konzol [Hz]	1 szabadságfokú rendszer [Hz]	2 szabadságfokú rendszer, 1. frek. [Hz]	2 szabadságfokú rendszer, 2. frek. [Hz]
1	7,665	3,043	2,882	19,029

7. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, ANALITIKUS MEDELL

4.2. NUMERIKUS MODELLEK

A MATLAB és ANSYS numerikus modellek számítása a konzol végeleemes felosztásával történt. A precíz eredmények érdekében a pontos geometriát, rúd, teher, kábelek, szenzorok, rögzítések tömegeit, teher külpontosságát is figyelembe vettem. A numerikus számítások célja, hogy a mérési eredményeket verifikáljam.

Mindkét modell lineárisan rugalmas, izotróp anyagmodellen, Timoshenko gerenda elméleten alapul. Két csomópontú, csomópontonként három-három szabadságfokkal rendelkező, azaz a rúd elem tengelyirányú, tengelyre merőleges irányú, és a csomópontok elfordulását lehetővé tevő gerenda elemek felhasználásával történt. ANSYS-ban ez a BEAM188-as elem használatát jelenti. A gerenda elem szabadságfokait a **26. ábra** szemlélteti.

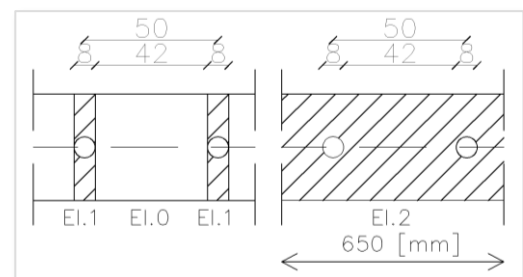


26. ÁBRA: BEAM188 ELEM (24)

A numerikus modellekben a konzol változó merevségének hatását is számításba vettem, egy helyettesítő merevséggel, lemezsávok és lyuksávok felosztásával. Ezt az **27. ábra** szemlélteti és értékeit a **8. táblázat** mutatja be.

Helyettesítő inerciák a gyenge tengelyre	
Lyukak sávjában, I.1 [mm ⁴]:	333,33
Lemez sávban, I.0 [mm ⁴]:	416,67
Teljes hossz, I.2 [mm ⁴]:	410,00

8. TÁBLÁZAT: HELYETTESÍTŐ MEREVSÉG



27. ÁBRA: HELYETTESÍTŐ MEREVSÉG

ANSYS esetén a lyukak sávjában és az extra tömeg utolsó elemeinél külön keresztmetszetet definiáltam, hogy tetszőleges tömegű kiegészítő teher is elhelyezhető legyen, majd a végeleemes hálót legeneráltam.

A sajátfejlesztésű MATLAB programban, az üres 96, az egy helyen elhelyezett tömeg 108, a két helyen elhelyezett tömeg esetén 120 elemre osztottam fel a konzolt, ahol a befogási szakasz felét is figyelembe vettem. A végeleemes felosztás megtekinthető a *Függelék c. fejezet Végeleemes felosztás* részben. Két csomópontú, csomópontonként három-három szabadságfokkal rendelkező, 5, 7, 8 és teher esetén 13 mm-es hosszúságú gerenda elemek felhasználásával alakítottam ki a modellt. A programot úgy konstruáltam, hogy tetszőleges csomóponthoz, tetszőleges tömegű extra tömeg is elhelyezhető legyen. Jelen feladatban ezek a 93-as és 51-es csomópontokhoz kerültek. (11)

A konzol geometriáját és topológiáját, csomópontok kapcsolatait, egy-egy mátrixba szerveztem, így gyorsan és egyszerűen módosíthatóak. A program kirajzolja a gerenda geometriai alakját, így a rajz alapján az könnyen ellenőrizhető. A számítás során alkalmazott elem merevségi (K), tömeg (M) és forgatási (r) mátrixokat, ahol beta a lokális és globális koordináta rendszer közötti forgatási szög, a következő mátrixok szemléltetik: (12)

$$K = \begin{pmatrix} AE & 0 & 0 & \frac{-AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \frac{-AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{-6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{pmatrix} \quad r = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -13L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{pmatrix} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot L}{420}$$

Az elemmátrixok létrehozása után a teljes rendszer merevségi és tömeg mátrixának a kompilálása történt. Peremfeltételként a gerenda kezdő eleménél befogás van, azaz a globális merevségi és tömeg mátrix esetében a megfelelő elemeket kinulláztam. (12)

4.3. ANSYS NUMERIKUS MODELL

Az elkészült ANSYS modellek az üres, az egy és a két helyen hozzáadott tömeg esetén, a konzol sajátfrekvenciájának és rezgésalakjának számítására is alkalmasak. Az alkalmazott végeelemes modell, helyettesítő merevség, gerenda elem megtekinthető a 4.2.-es *Numerikus Modellek* c. fejezetben. A sajátérték számítás során kapott eredményeket a **9. táblázat** mutatja be.

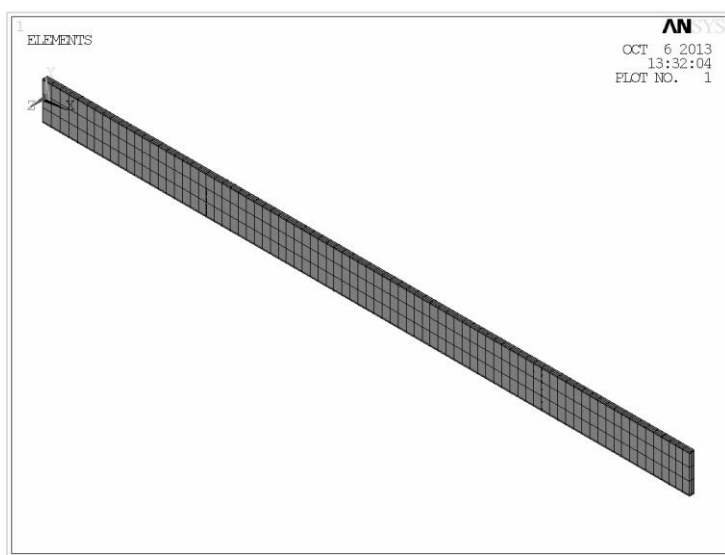
Frekvencia [Hz]	
üres konzol, extra tömeg nincs, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél	
Frekvencia száma	ANSYS [Hz]
1	7,80
2	50,94
3	148,24
4	284,50

Frekvencia [Hz]	
extra tömeg 93-as elemnél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél	
Frekvencia száma	ANSYS [Hz]
1	3,11
2	33,76
3	84,94
4	176,44

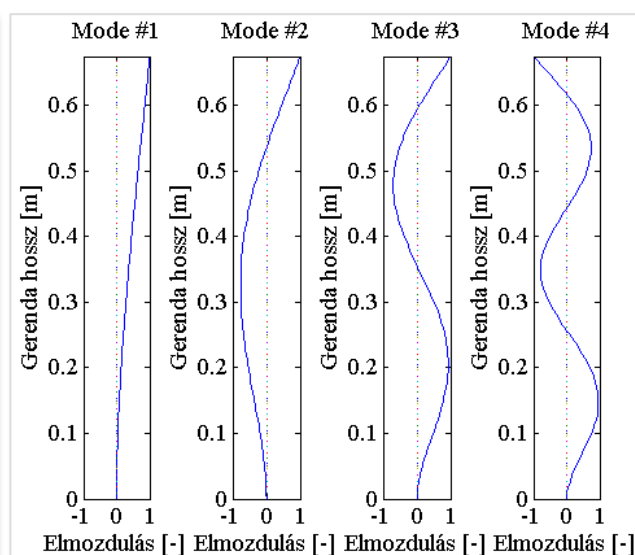
Frekvencia [Hz]	
extra tömeg 93-as és 51-es elemeknél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél	
Frekvencia száma	ANSYS [Hz]
1	2,94
2	18,45
3	64,10
4	105,86

9. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, ANSYS MODELL

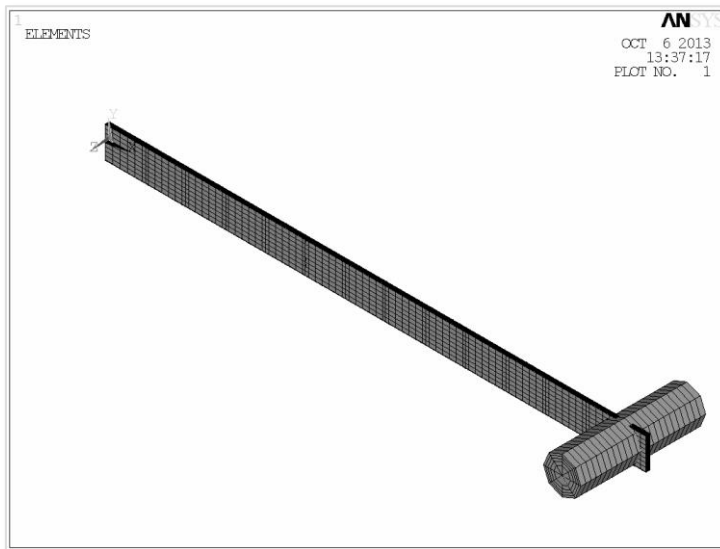
A **28. ábra**, **30. ábra** és a **32. ábra** a program által kirajzolt geometriát és a **29. ábra**, **31. ábra** és a **33. ábra** az abszolút legnagyobb értékre normált rezgésalakokat ábrázolják.



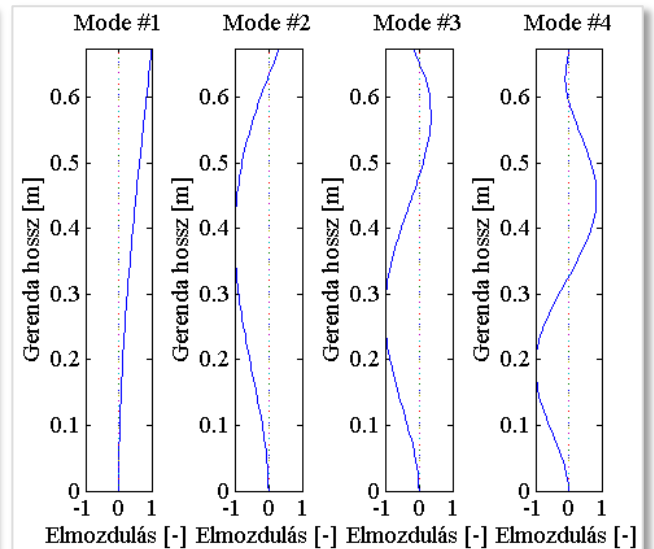
28. ÁBRA: GERENDA VÉGESELEMES FELOSZTÁSA, SZABAD KONZOL



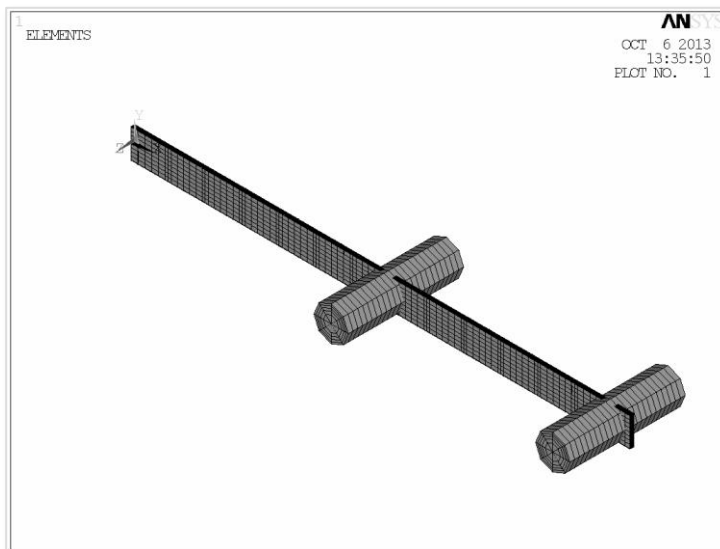
29. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, ÜRES KONZOL



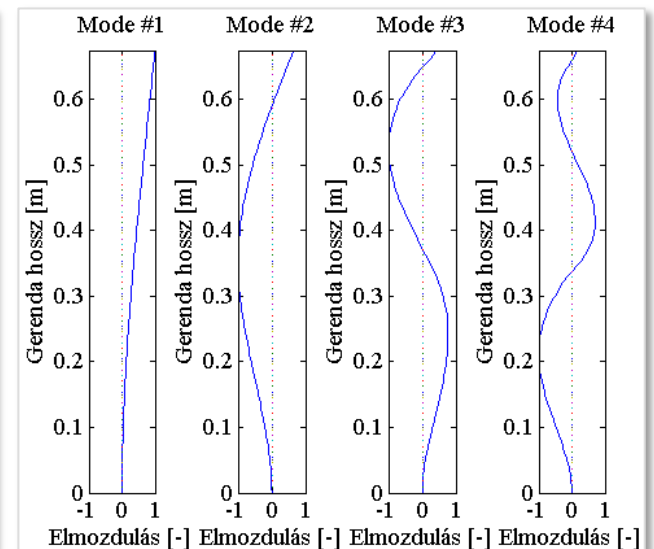
30. ÁBRA: GERENDA VÉGESELEMES FELOSZTÁSA, EGY EXTRA TÖMEG



31. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, EGY EXTRA TÖMEG



32. ÁBRA: GERENDA VÉGESELEMES FELOSZTÁSA, KETTŐ EXTRA TÖMEG



33. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, KETTŐ EXTRA TÖMEG

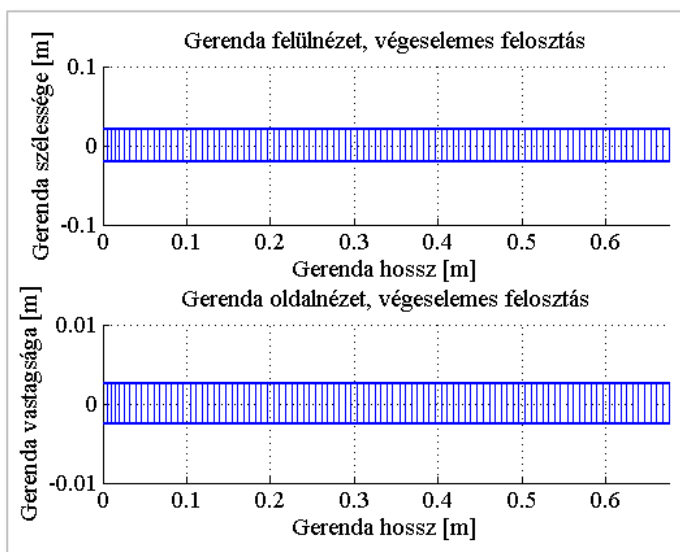
4.4. MATLAB NUMERIKUS MODELL

A gerenda modellezése egy **sajátfejlesztésű végelelemes MATLAB programmal** történt, amely az üres, az egy és a két helyen hozzáadott tömeg esetén, a konzol sajátfrekvenciájának és rezgésalakjának számítására alkalmas, mert az ANSYS modell számítási elvéhez hasonló módon van megírva. Az alkalmazott végelelemes modell, helyettesítő merevség, gerenda elem megtekinthető a 4.2-es *Numerikus Modellek* c. fejezetben. A sajátérték számítás során kapott eredményeket a **10. táblázat** mutatja be.

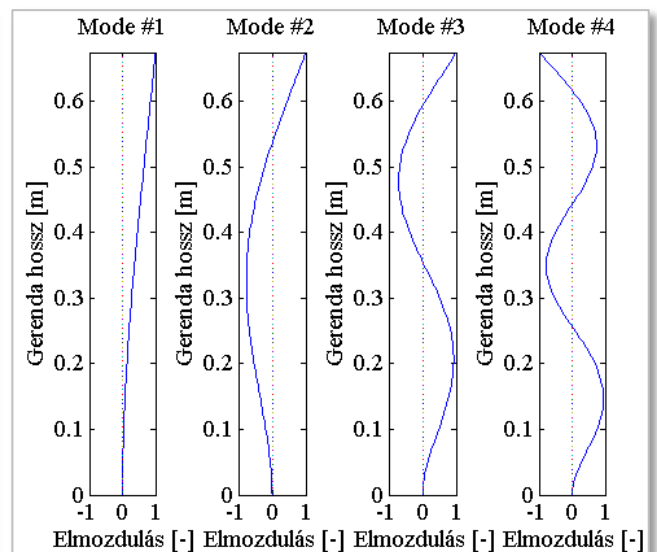
Frekvencia [Hz]		Frekvencia [Hz]		Frekvencia [Hz]	
üres konzol, extra tömeg nincs, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél		extra tömeg 93-as elemnél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél		extra tömeg 93-as és 51-es elemeknél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél	
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	Frekvencia száma	MATLAB [Hz]
1	7,71	1	3,06	1	2,90
2	50,33	2	33,35	2	18,33
3	146,25	3	84,57	3	65,63
4	280,78	4	171,11	4	108,34

10. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, MATLAB MODELL

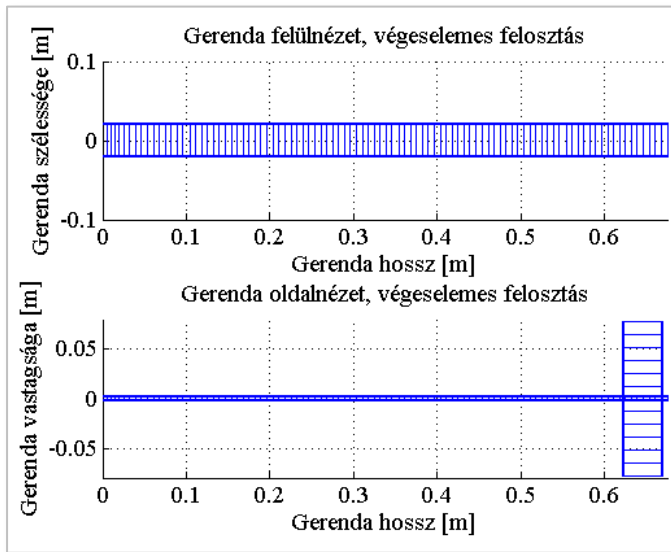
A 35. ábra, 36. ábra és 38. ábra a program által kirajzolt geometriát és a 34. ábra, 37. ábra és a 39. ábra az abszolút legnagyobb értékre normált rezgésalakokat ábrázolják.



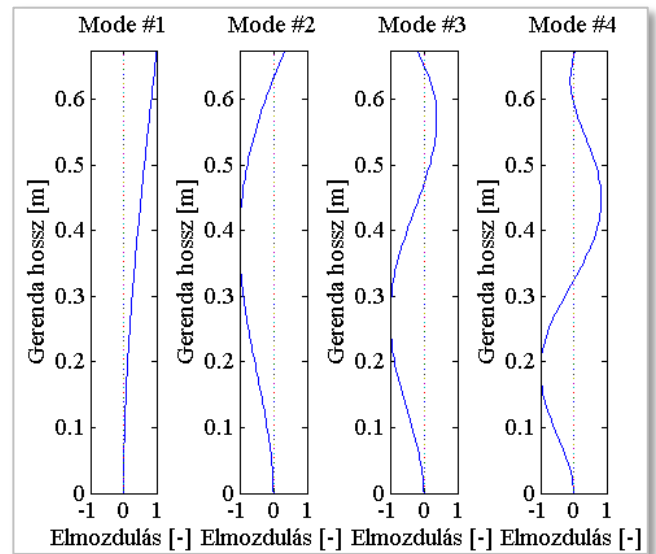
35. ÁBRA: GERENDA VÉGESELEMES FELOSZTÁSA, ÜRES KONZOL



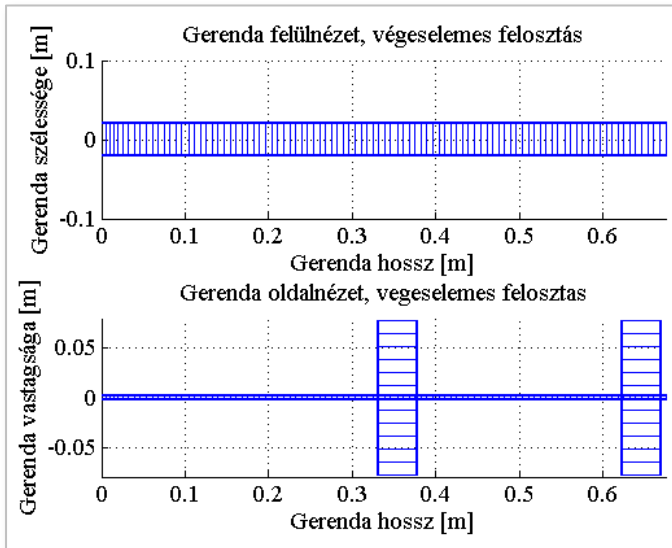
34. ÁBRA: REZGÉSAKOK, ÜRES KONZOL



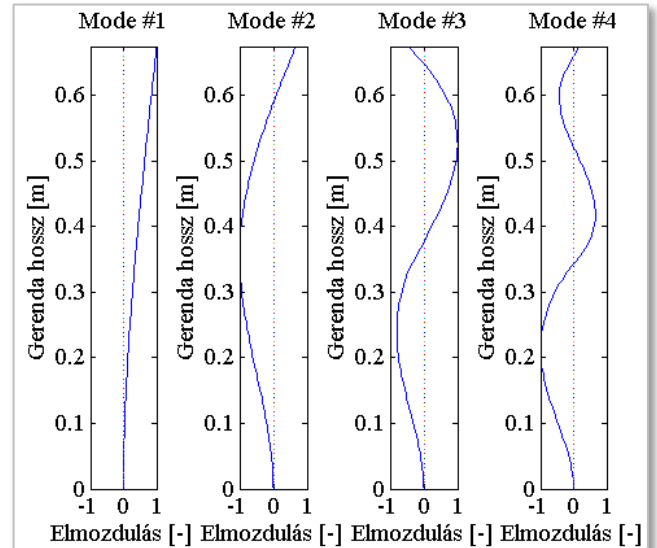
36. ÁBRA: GERENDA VÉGESELEMES FELOSZTÁSA, EGY EXTRA TÖMEG



37. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, EGY EXTRA TÖMEG



38. ÁBRA: GERENDA VÉGESELEMES FELOSZTÁSA, KETTŐ EXTRA TÖMEG



39. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, KETTŐ EXTRA TÖMEG

4.5. EREDMÉNYEK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA

Az eredmények összehasonlításával a különböző típusú modelleket leellenőrzöm. Az analitikus és numerikus számítás eredményeit a **11. táblázat** mutatja be. A táblázat alapján jól látható, hogy az átlagos eltérés a modellek között 4,10 % alatt van, ami alapján ki lehet jelteni, hogy az alkalmazott feltételezések, közelítések és elhanyagolások nagymértékben nem befolyásolták az analitikus módszert.

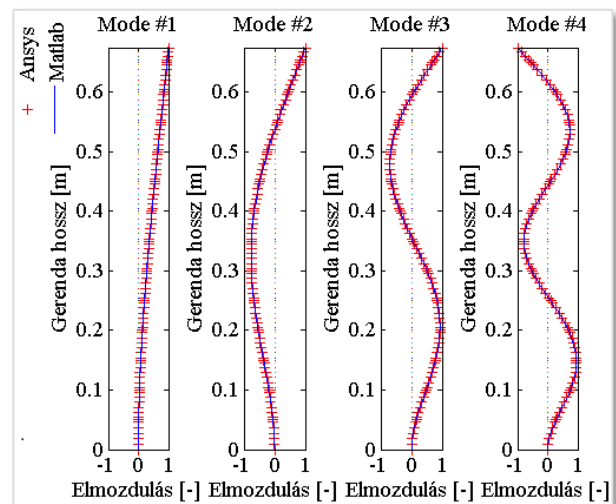
Frekvencia [Hz]				
Analitikus és numerikus modell összehasonlítás				
Lengésalak	Számítás típusa	Üres konzol [Hz]	1 extra teher [Hz]	2 extra teher [Hz]
1	Analitikus	7,665	3,043	2,882
1	MATLAB	7,710	3,064	2,897
1	ANSYS	7,796	3,111	2,943
2	Analitikus	-	-	19,082
2	MATLAB	-	-	18,330
2	ANSYS	-	-	18,450
Eltérés az analitikus és numerikus számítás között [%]				
Frekvencia száma	Számítás típusa	Analitikus	Analitikus	Analitikus
1	MATLAB	0,58	0,68	0,54
1	ANSYS	1,71	2,21	2,13
2	MATLAB	-	-	4,10
2	ANSYS	-	-	3,43

11. TÁBLÁZAT: ANALITIKUS ÉS NUMERIKUS MODELL ÖSSZEHAISONLÍTÁSA

A **12. táblázat**, **13. táblázat** és a **14. táblázat** a numerikus eredmények összehasonlítását, míg a **40. ábra**, **41. ábra** és a **42. ábra** pirossal az ANSYS, kékkel a MATLAB eredményeit mutatja.

Frekvencia [Hz]			
üres konzol, extra tömeg nincs, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél			
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]
1	7,71	7,80	1,12
2	50,33	50,94	1,23
3	146,25	148,24	1,36
4	280,78	284,50	1,33
Átlag:			1,26

12. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, ÜRES KONZOL



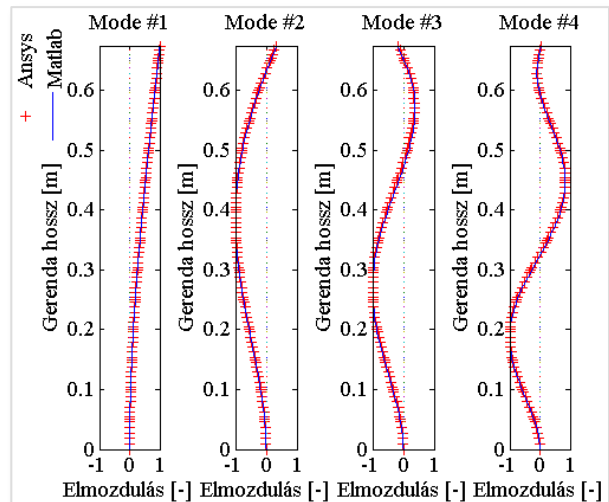
40. ÁBRA: REZGÉSÁLAKOK, ÜRES KONZOL

Frekvencia [Hz] HBM szenzor			
extra tömeg 93-as elemnél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél			
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]
1	3,06	3,11	1,52
2	33,35	33,76	1,25
3	84,57	84,94	0,44
4	171,11	176,44	3,12
Átlag:			1,58

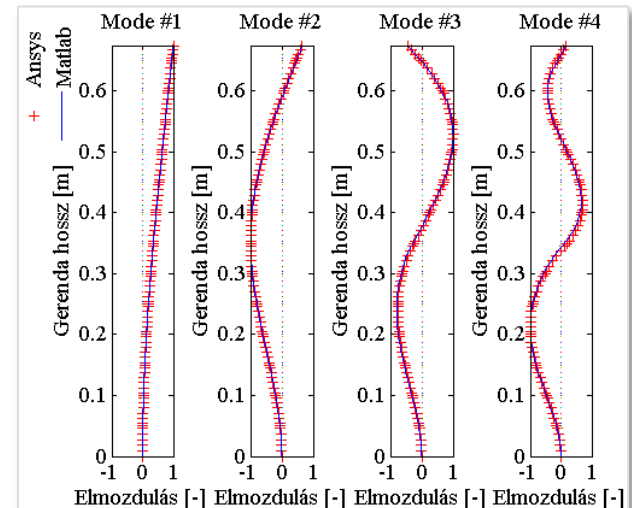
13. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, EGY EXTRA TÖMEG

Frekvencia [Hz] HBM szenzor			
extra tömeg 93-as és 51-es elemeknél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél			
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]
1	2,89	2,94	1,57
2	18,33	18,45	0,66
3	65,63	64,10	2,32
4	108,34	105,86	2,29
Átlag:			1,71

14. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, KETTŐ EXTRA TÖMEG



41. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, EGY EXTRA TÖMEG



42. ÁBRA: REZGÉSALAKOK, KETTŐ EXTRA TÖMEG

A numerikus végeselemes modellek összehasonlítása után látható, hogy az eredmények jól közelítik egymást mind a sajátfrekvenciában, mind a rezgésalakban, ahol az ANSYS modell rendre nagyobb eredményeket ad. Ennek oka a modellezés különbségében lehet. A MATLAB modell esetén a kábelek, szenzorok tömege koncentrált, míg ANSYS modell esetén ezek megoszló teherként jelennek meg. Az ANSYS programban a végeselemes felosztás sokkal finomabb, a lyukak sávjában sűrítéseket helyeztem el a hálón. Megállapítható, hogy a saját fejlesztésű MATLAB és ANSYS program közel azonos eredményt szolgáltat, az átlagos eltérés közöttük 1,5%.

5. MÉRÉS

5.1. NUMERIKUS MODELLEK VERIFIKÁLÁSA HBM GYORSULÁSMÉRŐ SZENZORRAL

A numerikus számítások eredményeit az analitikus modellel és a méréssel verifikáltam. Nagy pontosságú, érzékeny HBM gyorsulásmérők segítségével az első négy sajátfrekvenciát meghatároztam.

Első lépésként az alkalmazott MATLAB és ANSYS programokban csomópontonként 2-2 elmozdulási szabadságfokot definiáltam, síkbeli elemeket használva. A következő merevségi (K) és tömeg (M) mátrixok ezt szemléltetik:

$$K = \begin{pmatrix} 12 & 6L & -12 & 6L \\ 6L & 4L^2 & -6L & 2L^2 \\ -12 & -6L & 12 & -6L \\ 6L & 2L^2 & -6L & 4L^2 \end{pmatrix} \cdot \frac{EI}{L^3} \quad M = \begin{pmatrix} 156 & 22L & 54 & -13L \\ 22L & 4L^2 & 13L & -3L^2 \\ 54 & 13L & 156 & -22L \\ -13L & -3L^2 & -22L & 4L^2 \end{pmatrix} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot L}{420}$$

Ezt követően az analitikus, numerikus és a mérési eredményeket összehasonlítottam. Az analitikus modell és a mérés közel azonos eredményt adott, az eltérés 0,98 %, míg ANSYS és MATLAB esetében ez 3,59 % és 3,37 % volt. Az eredményeket a **15. táblázat** mutatja.

Frekvencia [Hz], HBM szenzor							
Üres konzol, extra tömeg nincs, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél							
Frekvencia száma	Analitikus [Hz]	ANSYS [Hz]	MATLAB [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (Analitikus - ANSYS) [%]	Eltérés (Analitikus - MATLAB) [%]	Eltérés (Analitikus - Mérés) [%]
1	7,665	7,94	7,923	7,736	3,5877	3,3659	0,9785

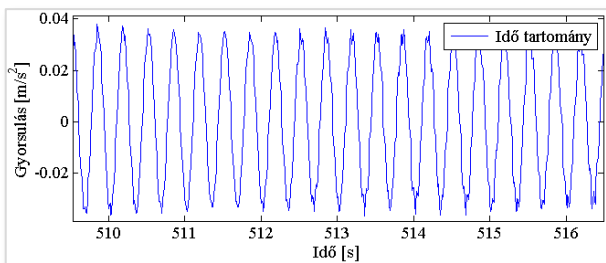
15. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, 2D ELEMekkel

Második lépésként a numerikus modellek pontosítása történt, csomópontonként 3-3 szabadságfok alkalmazásával, folyamatos topológia frissítéssel és a program optimalizálásával. Ekkor az eltérés az analitikus és numerikus modellek között 0,59 % és 1,76 % volt. A **16. táblázat** ezt szemlélteti.

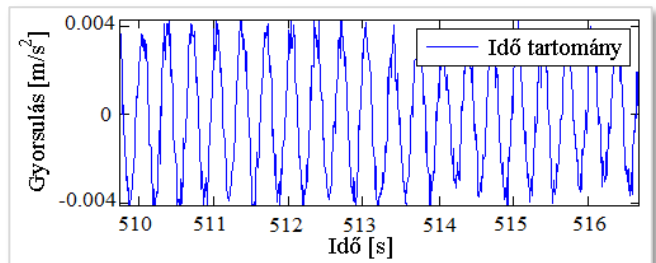
Frekvencia [Hz], HBM szenzor							
Üres konzol, extra tömeg nincs, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél							
Frekvencia száma	Analitikus [Hz]	ANSYS [Hz]	MATLAB [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (Analitikus - ANSYS) [%]	Eltérés (Analitikus - MATLAB) [%]	Eltérés (Analitikus - Mérés) [%]
1	7,665	7,71	7,8	7,74	0,5871	1,7613	0,9785

16. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, 3D ELEMekkel

A mérés során rögzített adatok esetén figyelembe vettem a 3.2. *Jelfeldolgozás* c. fejezetben leírtakat. A mintavételezési frekvenciát és mérési hosszat körültekintően megválasztottam. A 43. ábra a HBM szenzor, a 44. ábra a MEMS szenzor által mért adatokat mutatja. Megfigyelhető, hogy a MEMS szenzor által mért jel jóval zajosabb.

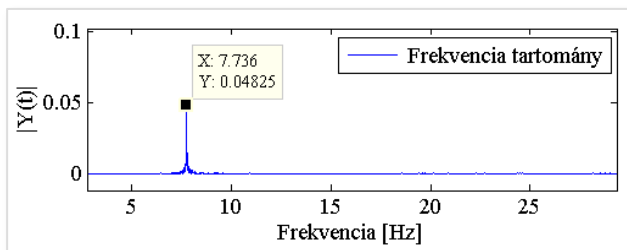


43. ÁBRA: IDŐ TARTOMÁNY, HBM SZENZOR

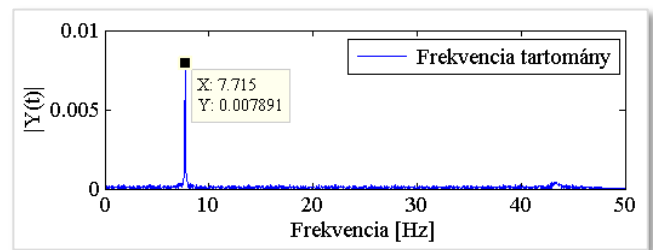


44. ÁBRA: IDŐ TARTOMÁNY, MEMS SZENZOR

Az adatok utólagos feldolgozása MATLAB programban történt, detrend és alul áteresztő szűrő használatával. Gyors Fourier Transzformáció segítségével az időtartományt frekvencia tartománnyá alakítottam. Ezt mutatja a 45. ábra és a 46. ábra.



45. ÁBRA: FREKVENCIA TARTOMÁNY, HBM SZENZOR



46. ÁBRA: FREKVENCIA TARTOMÁNY, MEMS SZENZOR

Harmadik lépésként az egy helyen elhelyezett tömeg modell frekvenciáját határoztam meg. A hozzáadott tömeget pontszerűen, koncentráltan helyeztem el a gerenda adott csomópontjában, külpontosságát nem vettem figyelembe. A kapott eredményeket a 17. táblázat mutatja be. Az eltérés az analitikus modell és numerikus modellek között, ANSYS esetében 4,50 %, MATLAB esetében 4,11 % volt.

Frekvencia [Hz], HBM szenzor							
extra tömeg 93-as elemnél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél							
Frekvencia száma	Analitikus [Hz]	ANSYS [Hz]	MATLAB [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (Analitikus - ANSYS) [%]	Eltérés (Analitikus - MATLAB) [%]	Eltérés (Analitikus - Mérés) [%]
1	3,043	3,18	3,168	3,005	4,5021	4,1078	1,2488

17. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, EGY EXTRA TÖMEG, PONTSZERŰ TEHER

Negyedik lépésként a numerikus modellek esetén használt extra tömeg külpontosságát is figyelembe vettem, gerenda elemek felhasználásával. Forgatási mátrix használatával a lokális koordináta rendszerből a globálisba történő elforgatással az elemek a helyükre kerültek. Ebben az esetben az analitikus és numerikus modellek közötti különbség, ANSYS-nál 0,56%, MATLAB-nál 2,22 % volt. Ezt szemlélteti a **18. táblázat**.

Frekvencia [Hz], HBM szenzor							
extra tömeg 93-as elemnél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél							
Frekvencia száma	Analitikus [Hz]	ANSYS [Hz]	MATLAB [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (Analitikus - ANSYS) [%]	Eltérés (Analitikus - MATLAB) [%]	Eltérés (Analitikus - Mérés) [%]
1	3,043	3,06	3,1107	3,005	0,5587	2,2248	1,2488

18. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, EGY EXTRA TÖMEG, KÜLPONTOS TEHER

A **16. táblázat** és a **18. táblázat** eredményei alapján jól látszik, hogy az analitikus, numerikus modellek és a mérések jól közelítik egymást. Az eltérés nagyságát a megfelelő modellek megválasztásával minimalizáltam.

Ötödik lépésként a magasabb frekvenciákat kiszámítottam és megmértem. A mérések elrendezéseit a **47. ábra**, **48. ábra** és a **49. ábra** mutatja



47. ÁBRA: HBM SZENZOR, ÜRES GERENDA



48. ÁBRA: HBM SZENZOR, EGY EXTRA TÖMEG



49. ÁBRA: HBM SZENZOR, KETTŐ EXTRA TÖMEG

A 19. táblázat, 20. táblázat és a 21. táblázat a számítások és mérések közötti eltéréseket szemléltetik magasabb frekvenciák esetén.

Frekvencia [Hz], HBM szenzor					
üres konzol, extra tömeg nincs, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél					
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Mérés) [%]
1	7,71	7,80	7,74	1,12	0,34
2	50,33	50,94	49,60	1,23	1,44
3	146,25	148,24	141,20	1,36	3,45
4	280,78	284,50	267,30	1,33	4,80
átlag:				1,26	2,51

19. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, HBM SZENZOR, ÜRES KONZOL

Frekvencia [Hz] HBM szenzor					
extra tömeg 93-as elemnél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél					
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Mérés) [%]
1	3,06	3,1107	3,005	1,52	1,93
2	33,35	33,76	31,42	1,25	5,77
3	84,57	84,94	76,79	0,44	9,20
4	171,11	176,44	162,70	3,12	4,91
átlag:				1,58	5,45

20. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, HBM SZENZOR, EGY EXTRA TÖMEG

Frekvencia [Hz] HBM szenzor					
extra tömeg 93-as és 51-es elemeknél, 4 db szenzor a 93,79,65,51-es elemeknél					
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Mérés) [%]
1	2,8974	2,9430	2,862	1,57	1,22
2	18,33	18,45	18,91	0,66	3,16
3	65,63	64,10	57,76	2,32	11,99
4	108,34	105,86	96,10	2,29	11,30
átlag:				1,71	6,92

21. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, HBM SZENZOR, KETTŐ EXTRA TÖMEG

A 19. táblázat, 20. táblázat és a 21. táblázat alapján látható, hogy a magasabb frekvenciák esetén is jó közelítést adnak a végeselemes numerikus modellek. Az átlagos eltérés az eredmények között 3,25%. Mind a három esetben több mérést rögzítettem, hogy

megfelelő mennyiségű adatot tudjak kiértékelni. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a numerikus számítások és az analitikus modell, mérés összhangban van, az első két alak jó egyezést mutat, magasabb rezgésalakoknál ez a hiba nő. Ennek lehetséges oka, hogy a modell merevsége túl nagy, vagy a tömegek (pl. kábelek) nincsenek elegendő pontossággal figyelembe véve.

5.2. MEMS GYORSULÁSMÉRŐ SENZOR VERIFIKÁLÁSA NUMERIKUS MODELLEKKEL

Jelen dolgozat célja a MEMS szenzorok alkalmazhatóságának vizsgálata. A korábbi számítások és mérések alapján az alkalmazott végeselemes modellek kellően pontosak ahhoz, hogy segítségükkel a MEMS gyorsulásmérők érzékenységét meg lehessen állapítani. Az eredmények között az átlagos eltérés 1,6% volt.

A kísérlet elrendezését az **50. ábra**, **52. ábra** és az **51. ábra** mutatja be.



50. ÁBRA: MEMS SENZOR, ÜRES KONZOL



52. ÁBRA: MEMS SENZOR, EGY EXTRA TÖMEG



51. ÁBRA: MEMS SENZOR, KETTŐ EXTRA TÖMEG

Az eredményeket a **22. táblázat**, **23. táblázat** és a **24. táblázat** mutatja be:

Frekvencia [Hz], MEMS szenzor					
üres konzol, extra tömeg nincs, 3 db szenzor a 93,79,65-es elemeknél					
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Mérés) [%]
1	7,69	7,77	7,72	1,05	0,30

22. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, MEMS SENZOR, ÜRES KONZOL

Frekvencia [Hz] MEMS szenzor					
extra tömeg 93-as elemnél, 3 db szenzor a 93,79,65-es elemeknél					
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Mérés) [%]
1	3,06	3,1067	2,995	1,44	2,20
2	34,25	34,63	32,86	1,12	4,05
			átlag:	1,28	3,12

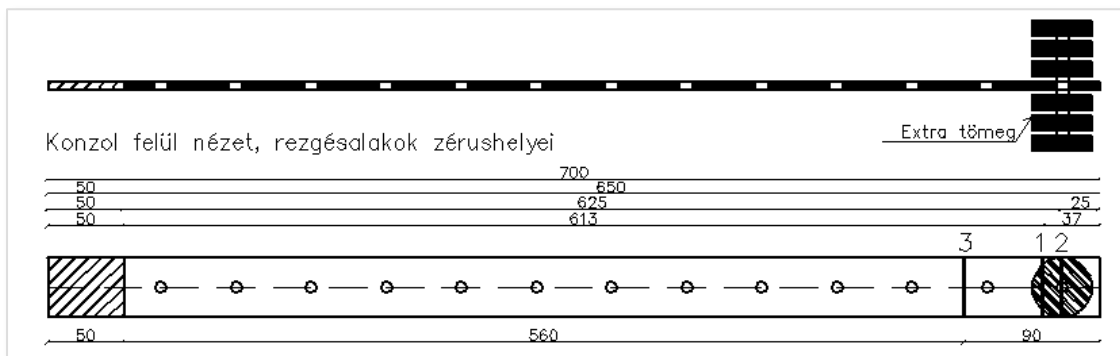
23. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, MEMS SZENZOR, EGY EXTRA TÖMEG

Frekvencia [Hz] MEMS szenzor					
extra tömeg 93-as és 51-es elemeknél, 3 db szenzor a 93,79,65-ös elemeknél					
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Mérés) [%]
1	2,90	2,9493	2,856	1,81	1,41
2	18,47	18,67	19,12	1,10	3,52
			átlag:	1,46	2,46

24. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, MEMS SZENZOR, KETTŐ EXTRA TÖMEG

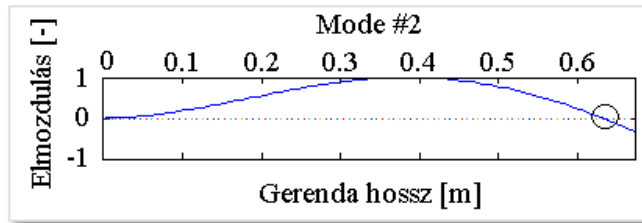
A szenzor vizsgálata során kérdéses volt továbbá, hogy mekkora a ténylegesen kimutatható maximális frekvencia értéke. A 93, 79, 65-ös csomópontokban a gyorsulásmérőket, az 58-as csomópontban pedig a HBM szenzor rögzítését helyeztem el, amely 20 g volt. Ezzel a teher elrendezéssel lehetséges volt a 48,9 [Hz] megmérése. Az elméleti, maximálisan kimutatható frekvencia 50 Hz, ennek pontos magyarázata megtekinthető a *Mérőeszközök, Jelfeldolgozás* c. fejezetben.

A rezgő rendszerben kialakuló csomópont kimutatása is célom volt a MEMS gyorsulásmérővel. Ennek érdekében a szenzort, a numerikus számítások eredményei alapján, az egy helyen elhelyezett tömeg esetén, a második frekvenciához tartozó csomópontban helyeztem el. Ez a pont a konzol befogási keresztmetszetétől 613 mm-re található, 1-es pozícióval jelölve. Ezt az **53. ábra** mutatja.



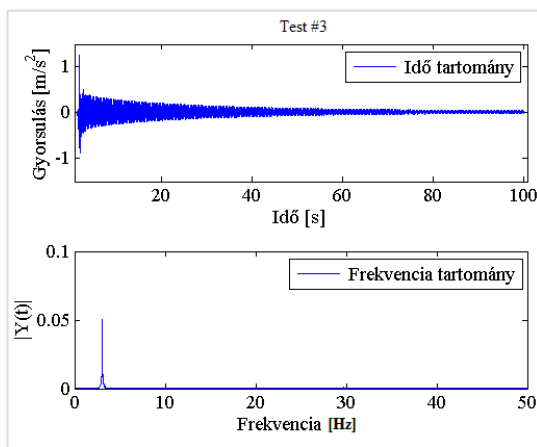
53. ÁBRA: CSOMÓPONT, KONZOL

A csomópontokhoz tartozó rezgésalakot az **54. ábra** mutatja. A műszer pontos elhelyezésének érdekében, külön oda kellett figyelni a gyorsulásmérőben lévő szenzor helyzetére, hogy azt pontosan a kívánt hely fölé lehessen helyezni.

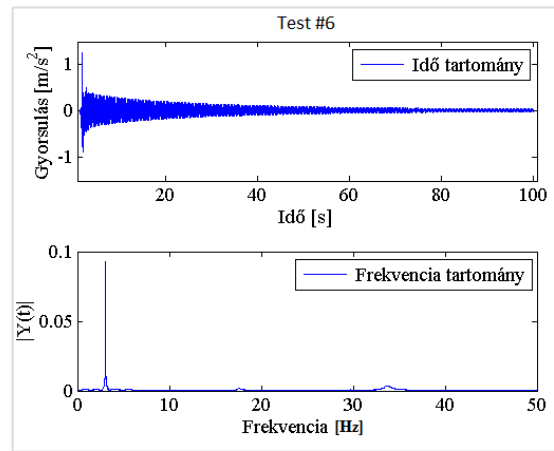


54. ÁBRA:
REZGÉSALAK

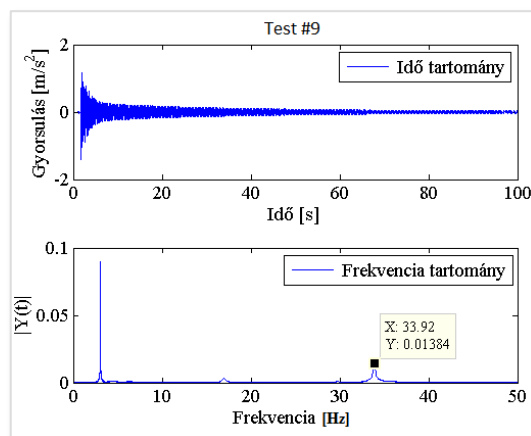
A konzol végét vízszintesen kitérítve, majd a befogási keresztmetszetnél finoman gerjesztve, 100 másodpercnyi hosszúságú adathosszt rögzítettem. Amikor a műszer a számított csomópontban volt, 1-es pozíció **53. ábra**, az első sajátfrekvencia tisztán mérhető volt, **55. ábra**, míg a második nem. A gyorsulásmérőt elmozdítva a helyéről, az elhelyezett teher középpontjába, 2-es pozíció **53. ábra**, ami a konzol végétől 25 mm-re található, a második frekvenciánál egy lapos csúcs jelent meg, **56. ábra**. Közvetlenül a teher alá rögzítve a műszert, 3-as pozíció **53. ábra**, melynek a szenzora a befogási keresztmetszettől 560 mm-re volt, a második frekvencia is tisztán mérhető volt, **57. ábra**.



55. ÁBRA: CSOMÓPONT LOKALIZÁLÁSA #1



56. ÁBRA: CSOMÓPONT LOKALIZÁLÁSA #2



57. ÁBRA: CSOMÓPONT LOKALIZÁLÁSA #3

5.3.HBM ÉS MEMS GYORSULÁSMÉRŐ SZENZOROK PÁRHUZAMOS ALKALMAZÁSA

Annak érdekében, hogy pontos képet kapjak a MEMS szenzor pontosságát illetően párhuzamosan alkalmaztam a nagy pontosságú HBM gyorsulásmérővel. Ebben az esetben csak az egy és két helyen hozzáadott teher esetén lehetett vizsgálni a konzolt a rögzítések okozta problémák miatt. A két műszer eredményei közötti átlagos eltérés 0,14%, ez 0,0035 Hz-et jelent. 15 perc hosszúságú mérések rögzítésével, a frekvencia tartomány felbontása 0,0007 Hz volt, ami a két műszer közötti átlagos eltérés 20%-a. Az eredményeket a 25. táblázat és a 26. táblázat, a mérések elrendezését az 59. ábra és az 58. ábra mutatja be:

Frekvencia [Hz] HBM és MEMS szenzor								
extra tömeg 93-as elemnél, 2 db szenzor a 93-as elemnél								
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés HBM [Hz]	Mérés MEMS [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - HBM) [%]	Eltérés (MATLAB - MEMS) [%]	Eltérés (HBM - MEMS) [%]
1	3,11	3,0846	2,998	2,997	0,82	3,61	3,64	0,03

25. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, HBM ÉS MEMS GYORSULÁSMÉRŐ, ÜRES KONZOL

Frekvencia [Hz] HBM és MEMS szenzor								
extra tömeg 93, 51-es elemnél, 2 db szenzor a 93-as elemnél								
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés HBM [Hz]	Mérés MEMS [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - HBM) [%]	Eltérés (MATLAB - MEMS) [%]	Eltérés (HBM - MEMS) [%]
1	2,94	2,9718	2,852	2,859	1,20	2,88	2,65	0,25

26. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, HBM ÉS MEMS SZENZOR, EGY EXTRA TÖMEG



59. ÁBRA: MEMS SZENZOR, EGY EXTRA TÖMEG



58. ÁBRA: MEMS SZENZOR, KETTŐ EXTRA TÖMEG

5.4. INTERFEROMÉTER ÉS MEMS GYORSULÁSMÉRŐ SENZOROK PÁRHUZAMOS ALKALMAZÁSA

A MEMS szenzor által mért gyorsulási értékeket és elmozdulásokat, a két szabadságfokú rezgő rendszert közelítő elrendezésnél, nagy precizitású interferométer segítségével is összehasonlítottam. A frekvenciák eltérése 0,88% volt. Ezen mérési eredményeket a **27. táblázat** mutatja be.

A kísérleti elrendezést az **60. ábra** szemlélteti.

Frekvencia [Hz] interferométer és MEMS szenzor								
extra tömeg 93, 51-es elemnél, 2 db szenzor a 93-as elemnél								
Frekvencia száma	MATLAB [Hz]	ANSYS [Hz]	Mérés Interfero - méter [Hz]	Mérés MEMS [Hz]	Eltérés (MATLAB - ANSYS) [%]	Eltérés (MATLAB - Interfero - méter) [%]	Eltérés (MATLAB - MEMS) [%]	Eltérés (Interfero - méter - MEMS) [%]
1	2,76	2,75	2,73	2,71	0,20	0,91	1,78	0,88

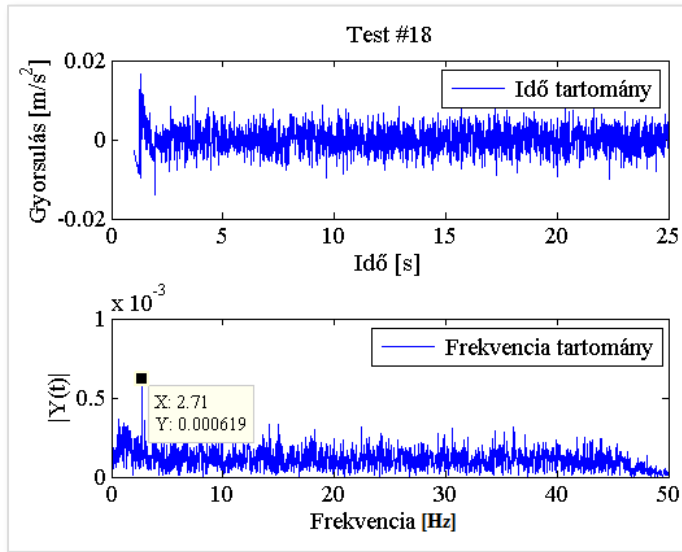
27. TÁBLÁZAT: FREKVENCIA, INTERFEROMÉTER ÉS MEMS SENZOR, KETTŐ EXTRA TÖMEG



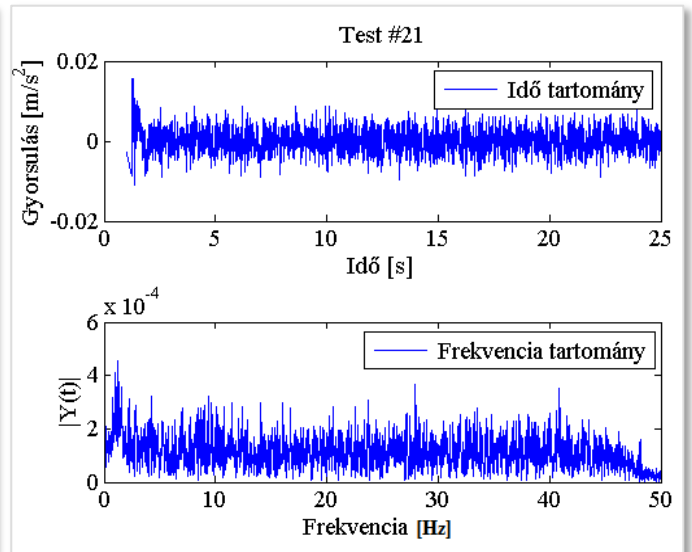
60. ÁBRA: INTERFEROMÉTER ÉS
MEMS SENZOR

A gyorsulási értékek összehasonlítása után kérdéses volt még, hogy mekkora az átlagos elmozdulás, amely mellett még a rezgés kimutatható MEMS szenzor esetén. Ezen probléma megvizsgálásának érdekében a két műszert párhuzamosan alkalmaztam. 20 másodpercnyi idő intervallumok rögzítésével folyamatosan mérésre kerültek az elmozdulások

az interferométerrel és a gyorsulási értékek a MEMS szenzorral. A rezgés megszűnése után az adatokat kiértékeltem, majd a párhuzamos méréseket összehasonlítottam. Az eredmények szerint 0,01415 [mm]-es átlagos elmozdulások alatt a MEMS gyorsulásmérő által rögzített értékek nem adták vissza a keresett frekvenciát, csak a háttér és mérési zajt. Ezt a mérést szemlélteti az **61. ábra** és **62. ábra**. Ez a minimális elmozdulás frekvenciafüggő, jelen esetben a 2,71 [Hz]-hez tartozik. Az átlagos minimális gyorsulás, ahol még ez az érték visszakapható 0 és 0.01 m/s² között van.



61. ÁBRA: ÁTLAGOS ELMOZDULÁS KERESÉS #1



62. ÁBRA: ÁTLAGOS ELMOZDULÁS KERESÉS #2

A rezgő rendszer csillapítását is meghatároztam. Az interferométer által szolgáltatott elmozdulási adatok kiértékelésére egy MATLAB programot írtam, ami kilistázza az elmozdulások maximumait, majd tetszőleges művelet végezhető velük. Ennek segítségével a rezgés amplitúdójának helyét, $x(t)$, és periódus idejét (T) többször leolvastam, majd az értékeket átlagoltam. A szerkezeti csillapítás mértéke 1,01%. A számítás során felhasznált adatokat a **28. táblázat** mutatja be:

Szerkezeti csillapítás						
Felhasznált adatok						
$x(t)$	$x(t+T)$	Logaritmusos dekrementum (θ) [-]	Merevség (k) [N/m]	Teljes tömeg (m) [kg]	Ekvivalens külső csillapítás (c_{ekv}) [Ns/m]	Szerkezeti csillapítás (α) [%]
5,54	5,904	-0,06363	2835	1,5373	1,3371	1,0127

28. TÁBLÁZAT: SZERKEZETI CSILLAPÍTÁS

A számítás során felhasznált képletek:

$$\theta = \ln\left(\frac{x(t)}{x(t+T_0)}\right) \quad c_{ekv} = \frac{\theta}{\pi} \cdot \sqrt{k \cdot m} \quad \gamma = \frac{\theta}{\pi} = \frac{\alpha}{50}$$

5.5. BOSCH GYORSULÁSMÉRŐ SENZOR EREDMÉNYEK

A mérések összefoglalását a **29. táblázat** mutatja be. A táblázat értékei alapján látható, hogy a BOSCH BMA 180-as gyorsulásmérő szenzor értékei nagyon közel vannak a MATLAB, HBM és interferométer eredményeihez. Szignifikáns különbség nem tapasztalható közöttük. Kijelenthető, hogy a gyorsulásmérő által szolgáltatott adatok kellően pontosak és megbízhatóak ahhoz, hogy a műszer építőmérnöki szerkezeteken alkalmazható legyen.

BOSCH BMA 180-as szenzor, eredmények összefoglalása		
	MEMS szenzor	Párhuzamos alkalmazás
Üres konzol	MATLAB - MEMS szenzor [%]	HBM - MEMS szenzor [%]
Átlagos eltérés	0,30	0,03
Egy extra teher	MATLAB - MEMS szenzor [%]	HBM - MEMS szenzor [%]
Átlagos eltérés	3,12	0,25
Kettő extra teher	MATLAB - MEMS szenzor [%]	Interferométer - MEMS szenzor [%]
Átlagos eltérés	2,46	0,88

Átlagos eltérés, MATLAB - MEMS szenzor [%]	1,96
Maximálisan mérhető frekvencia [Hz]:	48,9
Minimálisan mérhető elmozdulás (2,71 [Hz] esetén) [mm]:	0,01415

29. TÁBLÁZAT: MEMS SENZOR EREDMÉNYEK

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A MEMS szenzor érzékenységeinek vizsgálata analitikus, két numerikus és különböző típusú gyorsulásmérők, elmozdulás mérő felhasználásával történt.

A probléma vizsgálatának érdekében első lépésként az **analitikus modell** készült el. Ideálisnak tekinthető, egyszerű dinamikai rendszereket vizsgálva az első és második sajátfrekvenciát meghatároztam. Az átlagos eltérés az analitikus és numerikus eredmények között **1,3%**. Az eredmények alapján az analitikus modell által alkalmazott megközelítés elfogadható.

Második lépésként az analitikus modell segítségével a **numerikus közelítő számítás** során kapott eredményeket ellenőriztem. Két, egymástól független, végeselemes modellt használtam. A korábbi számítások során alkalmazott elhanyagolások helyett itt már pontosabb tömeg és geometria felvétel történt. Merevségi, tömeg és forgató mátrixok meghatározása után a MATLAB és ANSYS programok segítségével a rezgő rendszerek sajátfrekvenciáit és modális alakjait meghatároztam, majd összehasonlítottam. Az átlagos eltérés a modellek között **1,5%**. Megállapítható, hogy a két független numerikus számítás közel azonos eredményt ad.

Harmadik lépésként a numerikus számítások verifikálása következett a **HBM gyorsulásmérő** segítségével. Különböző tömegelrendezések, kábelek, rögzítések figyelembe vételével, a MATLAB és ANSYS programok által számolt értékeket összehasonlítottam a méréssel. A mintavételezési frekvencia és a gerjesztési mód körültekintő megválasztásával a magasabb frekvenciákat is kimutattam. A mérések kiértékelése digitális szűrők és utólagos adatfeldolgozással történt. Az állandó háttér zaj csökkentésének és a frekvencia tartomány érzékeny felosztásának érdekében hosszú mintavételezési időt választottam. Az eredmények alapján a numerikus modellek összhangban vannak a méréssel, a közöttük lévő átlagos eltérés **3,25%**.

Negyedik lépésként a **MEMS gyorsulásmérő** műszerek ellenőrzése történt a numerikus számítások felhasználásával. A korábban igazolt végeselemes modellek alkalmasak arra, hogy nagy pontossággal el lehessen dönteni a mérés értékei alapján, hogy a vizsgált szenzor kellően pontos adatokat szolgáltat-e. Az eredmények összehasonlítása után megállapítható, hogy a gyorsulásmérő adatai jól közelítik a számítás értékeit, az átlagos

eltérés **1,96%**. A maximálisan kimutatható frekvencia **48,9 Hz** volt. Mérés során a rezgő rendszer egy csomópontját is lokalizáltam.

Ötödik lépésként a MEMS és HBM szenzor párhuzamos alkalmazása történt, melynek során az átlagos eltérés a frekvenciákban **0,14%**, míg interferométer használatakor **0,88%** volt. Az átlagos minimális elmozdulás, amikor még a rezgés kimutatható, **0,01415 mm** volt 2,71 [Hz] esetén. A vizsgált rendszer szerkezeti csillapítása **1,01%**.

Az eredmények figyelembe vételével kijelenthető, hogy a műszer kellően pontos, precíz eredményeket tud szolgáltatni, annak érdekében, hogy kulcsfontosságú infrastruktúra létesítményeken telepíthető és kipróbálható legyen.

A szenzorok összehasonlítása során minden esetben olyan, viszonylag nagy mozgásokat produkáló rendszereket vizsgáltam, amelyeknél a mérési zaj nem jelentett problémát a kiértékelés során. Valós szerkezetek esetében biztosan ehhez hasonló állapotot teremt egy földrengés, vagy egy esetleges rezonancia.

Olyan jellegű vizsgálatoknál, ahol egy erősen gerjesztett, lágyabb szerkezet alacsonyabb periódusidejű lengéseit kell kimutatni (pl. egy közúti vagy vasúti acél gerendahídon), a MEMS szenzorok valószínűleg jó teljesítményt nyújtanak. Ezzel szemben vasbeton hidakon kétséges az alkalmazhatóságuk. Ebben az esetben nagyobb tömeggel rendelkező, kedvezőbb jel – zaj arányú MEMS szenzorok, 4-5-szörös mintavételezési frekvencia javasolt.

A most bemutatott munka folytatásaként a méréseket valós szerkezeteken, azok üzemi állapotában fogok méréseket végezni.

7. IRODALOMJEGYZÉK

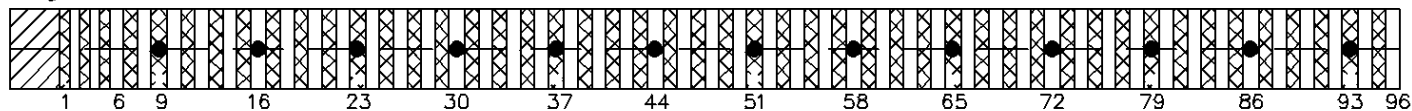
1. **Baldwin, Messtechnik Hottinger.** Acceleration Transducer B12.
2. **Nyers, Szabina.** *Mozgáselemzés MEMS alapú gyorsulásmérő adatai alapján.* Budapest : ismeretlen szerző, 2011.
3. **Pap, Andrea.** *Mikro - elektro - mechanikai szerkezetek - MEMS szenzorok és beavatkozók .* Budapest : ismeretlen szerző, 2012.
4. **University, Loughborough.** *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems).* Anglia, Loughborough : PRIME faraday Partnership, 2002.
5. **Renishaw, Apply Innovation.** *XL-80 laser system, Portable laser measurement and calibration.*
6. **Cserti, József.** *Optika és relativitás elmélet, interferencia, interferométerek és vékony rétegek.* Budapest : ismeretlen szerző, 2007.
7. **Balogh, László, és mtsai., és mtsai.** *Digitális jelfeldolgozás.* Budapest : Műegyetemi Kiadó, 2008.
8. **A. Losada, Ricardo.** *Practical FIR Filter Design in MATLAB.* hely nélk. : The MathWorks, Inc., 2003.
9. **Csörgő, Béla és Pongrácz, Gábor.** *Fourier transzformáció, képfeldolgozás haladóknak.* Szeged : ismeretlen szerző, 2012.
10. **Chopra, Anil K. .** *Dynamics of Structures Theory and Applications to Earthquake Engineering.* Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, 1995.
11. **Dr. Fehmi, Cirak.** *Finite Element Formulation for Beams.* United Kingdom : ismeretlen szerző, 2001.
12. **Hyochoong, Bang és Young W., Kwon.** *The Finite Element Method using Matlab.* United States of America : CRC Press LLC, 1997.
13. **Chessa, Jack.** *Programing the Finite Element Method with Matlab.* Lafayette, USA : ismeretlen szerző, 2002.
14. **www.sparkfun.com/products/10736.**
15. **www.sparkfun.com/products/retired/9723.**
16. **www.prlog.org/10792126-mems-sensors-for-smartphones-report.html.**
17. **www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6299&locale=en.**

18. www.nanogloss.com/mems/commercial-mems-products/#axzz2iow12u5l.
19. www.memsblog.wordpress.com/2009/09/28/chipworks/.
20. www.engineersgarage.com/articles/mems-technology.
21. www.kspark.kaist.ac.kr/Twin%20Paradox/Relativity%20Facts.htm.
22. www.wanda.fiu.edu/teaching/courses/Modern_lab_manual/michelson.html.
23. www.essie.ufl.edu.
24. www.mostreal.sk/html/elem_55/chapter4/ES4-188.htm.

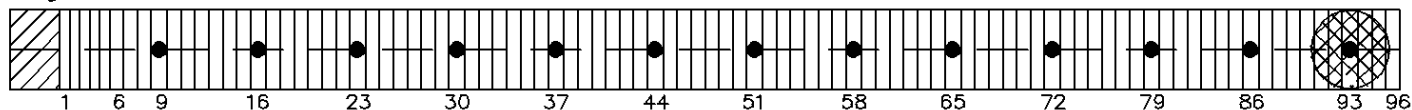
8. FÜGGELÉK

8.1. VÉGESELEMES FELOSZTÁS

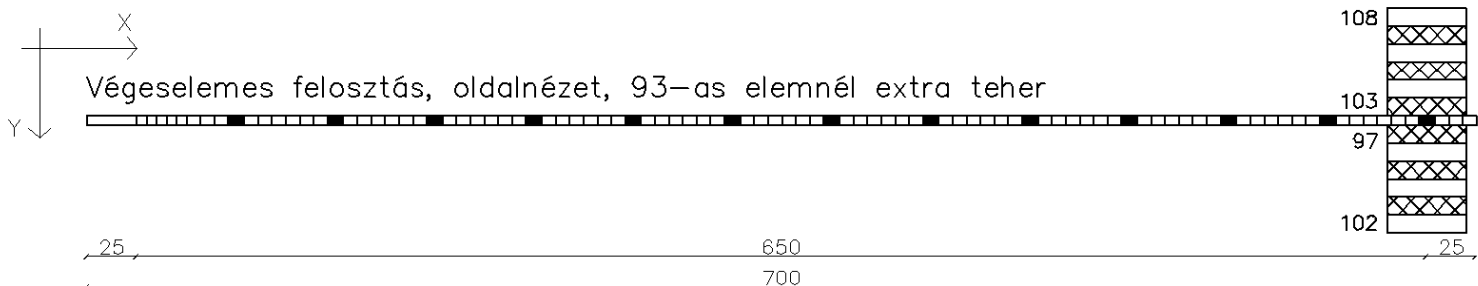
Végeselemes felosztás, felülnézet, extra teher nincs



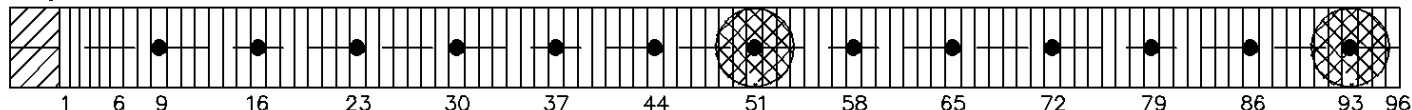
Végeselemes felosztás, felülnézet, 93-as elemnél extra teher



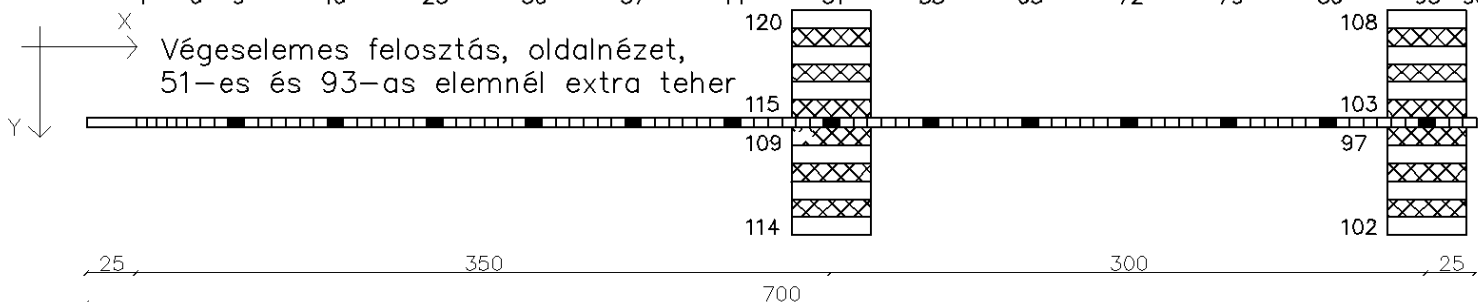
Végeselemes felosztás, oldalnézet, 93-as elemnél extra teher



Végeselemes felosztás, felülnézet, 51-es és 93-as elemnél extra teher

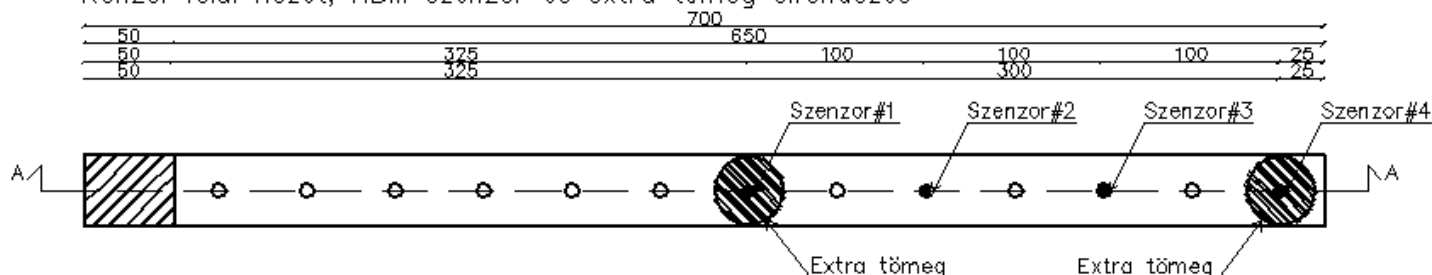


Végeselemes felosztás, oldalnézet, 51-es és 93-as elemnél extra teher

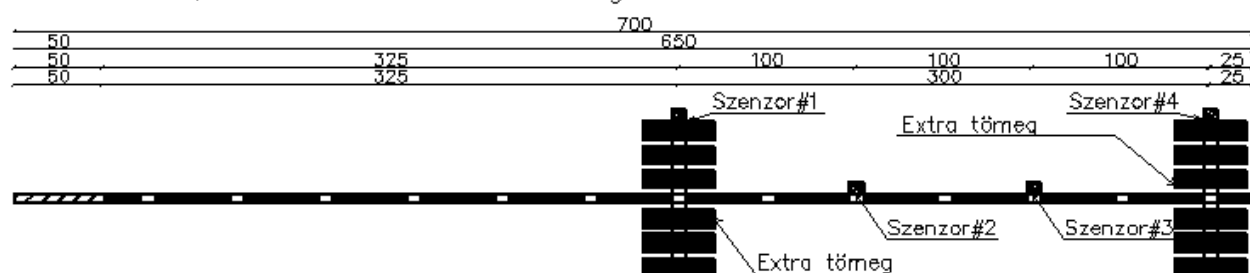


8.2. SENZOROK ELHELYEZÉSE

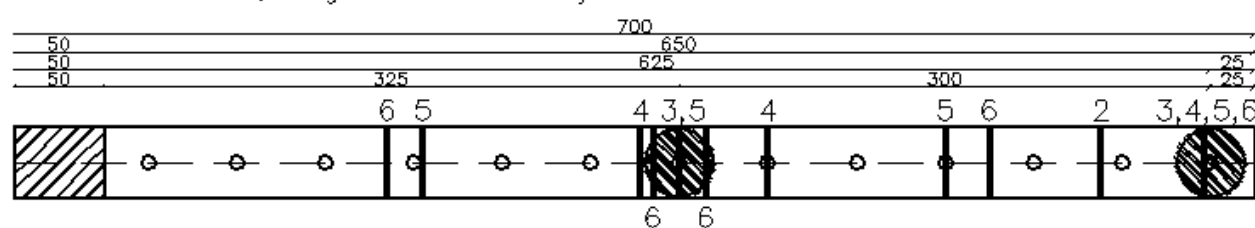
Konzol felül nézet, HBM szenzor és extra tömeg elrendezés



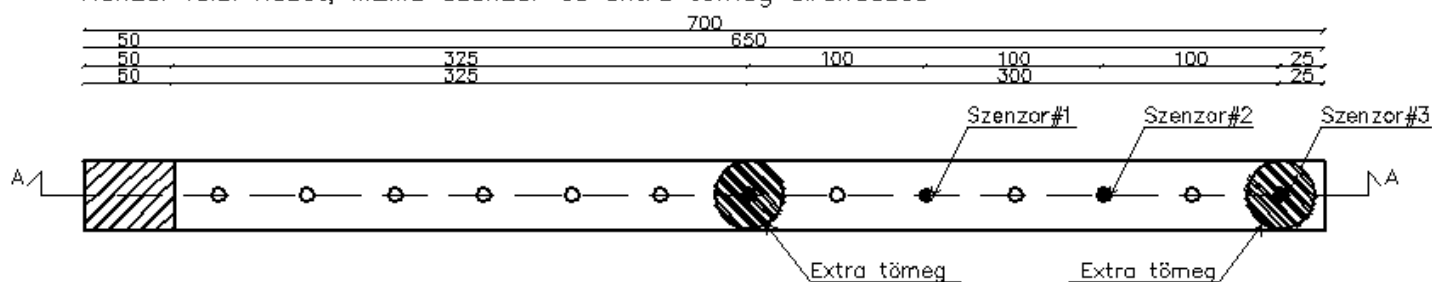
A-A metszet, HBM szenzor és extra tömeg elrendezés



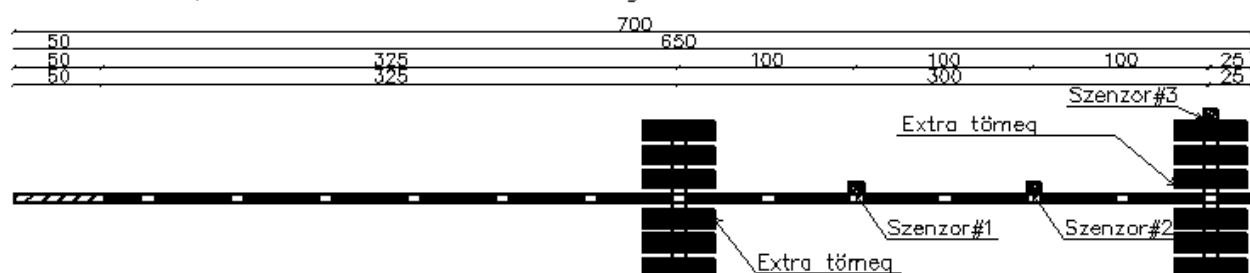
Konzol felül nézet, rezgésalakok zérushelyei HBM szenzor esetén



Konzol felül nézet, MEMS szenzor és extra tömeg elrendezés

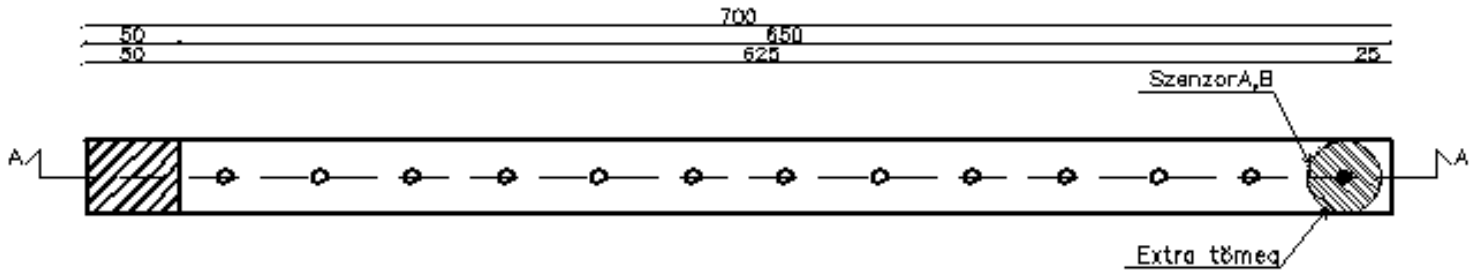


A-A metszet, MEMS szenzor és extra tömeg elrendezés



8.3. SENZOROK ELHELYEZÉSE PÁRHUZAMOS ALKALMAZÁS ESETÉN

Konzol felülről nézve, szenzor és extra tömeg elrendezése



A-A metszet, szenzor és extra tömeg elrendezése

