



- Deformationszustand von Staben mit rechteckigem Querschnitt. Ingenierholzbau in Forschung und Praxis. Karlsruhe, Bruderverlag 61-65
- Hiroshi Y, Yuya S (2006) Measurement of the shear modulus of wood by the square-plate twist method. *Holzforschung* (60):543-548
- Horváth M, Divós F (2006) Faanyag rugalmas állandóinak dinamikus meghatározása, összehasonlítása. *Faipar* 54(4):3-7
- Janowiak J, Pellerin R (1991) Shear moduli determination using torsional stiffness measurements. *Wood and Fiber Science* 24(4):392-400
- Kellner I (2003) A faanyag anatómiai fősíkokhoz tartozó nyíró-rugalmassági moduluszainak kísérleti meghatározása. TDK dolgozat, NymE, FMK,MMTI, 26 old.
- Kovács Zs (1984) Faanyagok és forgácslapok nyíró-rugalmassági modulusainak meghatározása csavaróvizsgálattal. *Erdészeti és Faipari Tudományos Közlemények* 1-2:155-161
- Sliker A, Yu Y (1993) Elastic constants for hardwoods measured from plate and tension tests. *Wood and Fiber Science* 25(1):8-22
- Szalai J (1994) A faanyag és faalapú anyagok anizotróp rugalmasság- és szilárdságtana. Sopron, Magánkiadás, Hillebrand Nyomda Kft. 398 old.
- Yoshihara H, Kubojima Y, Nagaoka K, Ohta M (1998) Measurement of the shear modulus of wood by static bending tests. *J Wood Sci* 44:15-20
- Yoshihara H, Kubojima Y (2002) Measurement of the shear modulus of wood by asymmetric four-bending tests. *J Wood Sci* 48:14-19
- Zhang W, Sliker A (1991) Measuring shear moduli in wood with small tension and compression samples. *Wood and Fiber Science* 23(1):58-68

Faanyagú tartószerkezet laboratóriumi diagnosztikai vizsgálata II.

LŐRINCZ György¹

¹ Széchenyi István Egyetem, Műszaki Tudományi Kar, Szerkezetépítési Tanszék

Kivonat

A laboratóriumban felállított faanyagú tartószerkezet fokozatos elbontásával négyféle tartót alakítottam ki. Ezek mindegyikében, a felső részben kétfás gerenda három pontjában mértem a lehajlásokat változó nagyságú középen elhelyezett koncentrált erőre, valamint az impulzusgerjesztés után magára hagyott tartó rezgésyorsulás válaszjeleit. Ezen utóbbiakat mindegyik tartón feldolgoztam, de a dinamikai tulajdonságokat csak a kéttámaszú tartón határoztam meg számítással is.

A tartó tulajdonságainak változtatásával módosultak a szerkezetek, és mindegyik változtatás után megmértem a rezgésyorsulásokat. Ezen mérésekből következtetéseket vontam le, amelyek a szerkezeti változások dinamikai tulajdonságokat módosító hatásokra vonatkoznak.

Kulcsszavak: kétfás tartó, elcsúszás, dinamikai tulajdonságok, fatartók sajátfrekvenciája.

Diagnostic test of a timber construction in laboratory part 2

Abstract

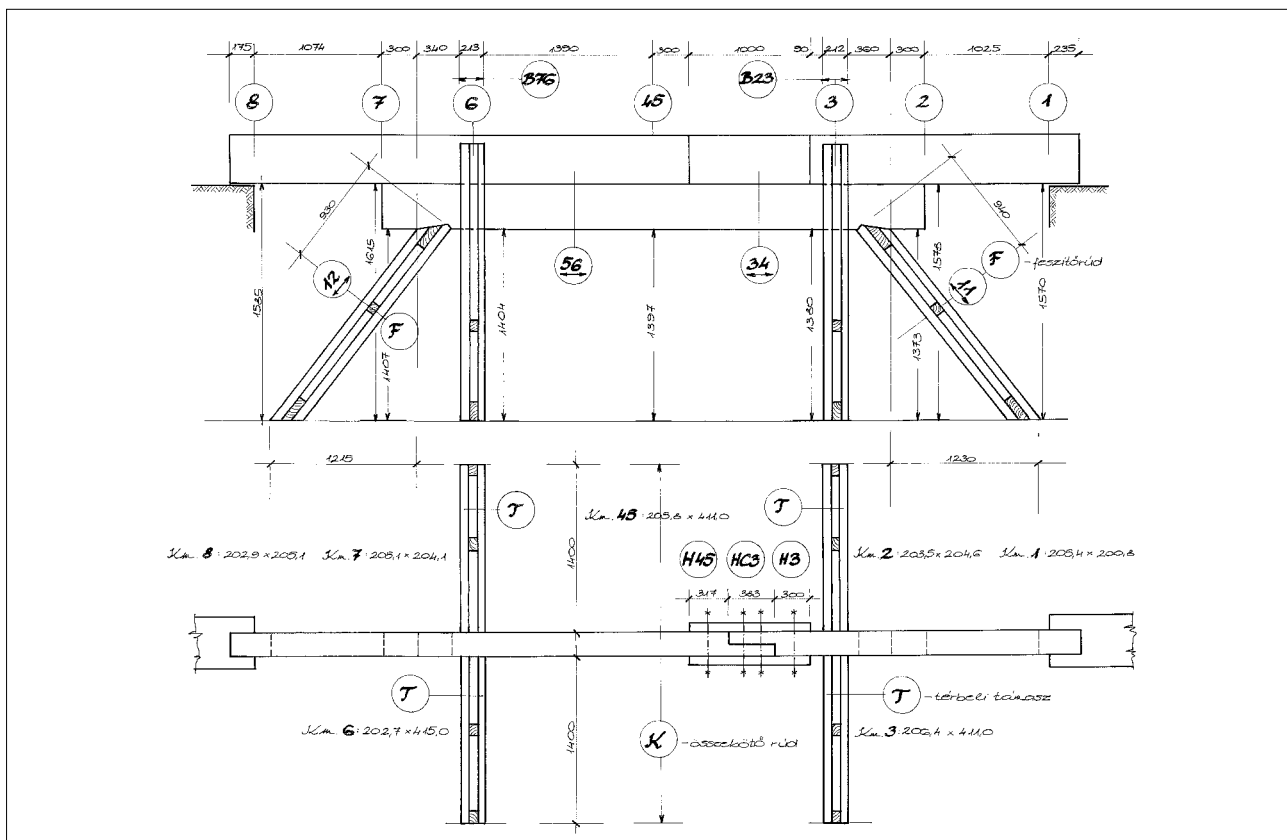
As outlined in Part I of the article series, the purpose of the experiment itself and the data processing of the measurement results was to compare the calculated results with the measured values, as well as to create predictions with respect to the character of the alteration upon the changes in the dynamic features (i.e. eigenfrequency, damping, mode, vibration shape) resulting from the modified state of the girder. In this article, there are some results concerning the changes of the girders' dynamic behaviour, and about the measured and calculated properties.

Key words: timber girder, displacement, dynamical features, eigenfrequency of timber constructions.

Bevezetés

A cikksorozat első része (Lőrincz 2009) cikk egy laboratóriumban felállított faanyagú tartót ismerteti, amelynek a szerkezeti tulajdonságait befolyásoló jellemzői változtathatók. Nevezetesen: a kétfás gerenda keresztmetszeteinek egymáson való elcsúszása és a felső fa toldásával kialakult rugalmas csukló rugóállandója (1. ábra). A faszervezet fokozatos lebontásával négy tartó alakul ki (2. ábra), amelyek mindegyikének fő része egy kéttámaszú, részben kétfás gerenda. A térben kitámasztott kettős feszítőtűvön,

a síkbeli kettős és a síkbeli egyszeres feszítőtűvön csak méréseket, a kéttámaszú gerendán méréseket és számításokat végeztünk. Ezen utóbbi tartóra alkalmazott megoldás egyenlete, a statikai váz jellegzetességei olvashatók a cikk első részében. A tárgyalt közelítések elfogadásával kialakított statikai vázon, számítási modellen a linearitás elfogadásával határoztuk meg méréssel és számítással is a dinamikai jellemzőket, amelyek összevetésével tanulmányozzuk a szerkezeti változások dinamikai jellemzőkre gyakorolt hatását és a változások mértékét.



1. ábra A megépített fatartó szerkezete az egyes érzékelők jeleivel.

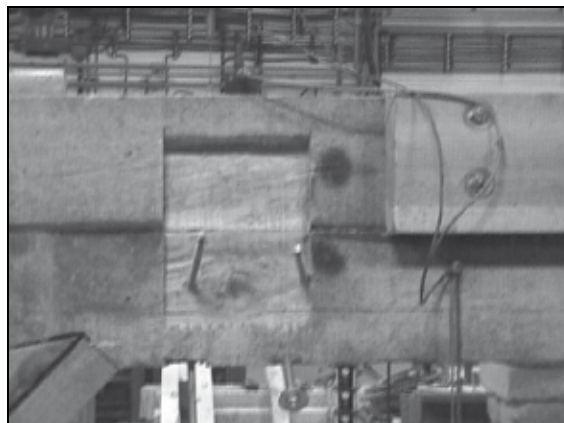
Figure 1 Framework of the assembled wood construction with the sensors



① j. tartó: térben is kitámasztott kettős feszítőmű



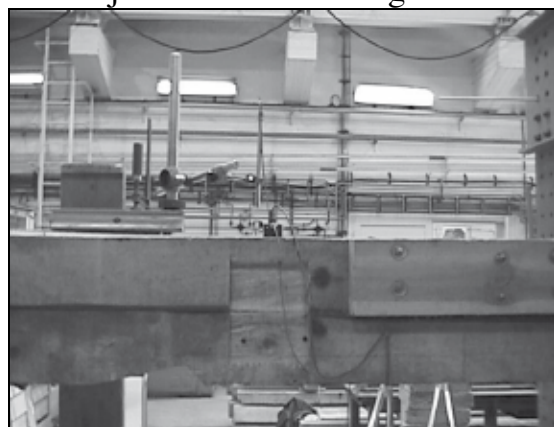
② j. tartó: kettős feszítőmű



③ j. tartó: egyszeres feszítőmű



④ j. tartó: kéttámaszú gerenda



2. ábra A faszervezet fokozatos elbontásával kialakított laboratóriumi tartók

Figure 2 Laboratory beams developed by disassembling the wooden framework

A kéttámaszú tartó felvett modellje

A sok változás figyelembe vétele – a hajlítási merevséget változtattuk folytonosan is és szakaszosan is; az összetett tartóknál mért értékeken alapuló nem állandó elcsúszási modulust vettünk figyelembe, de ez gátolta a differenciálegyenlet megoldását; megpróbáltuk az elcsúszott keresztmetszetek inerciáját az elcsúszások nagyságától függővé tenni és függvényyszerűen megfogalmazni – ez ellehetetlenítette a megoldást, és arra döbentett rá, hogy alapvetően nem a terhelés és a lehajlás közötti kapcsolat lineáris/nemlineáris jellege határozza meg a megoldást, hanem az, hogy minek érdekében vizsgálódom, mennyire érzékeny a szükségszerűen közelítéseken alapuló számításom a modell hibáira? Mert nem az a kérdés, hogy mennyire pontatlan a modell, hanem az, hogy mennyire kell pontosnak lennie? Van-e gyakorlati haszna a kis változások nyomán követésnek? Az építőiparban alkalmazott mechanikához

elégleges a lineáris modell. A valóságot jobban megközelítő számítási eredményeknek olyan következménye lehet pl., hogy a gerenda számított keresztmetszete valamelyest csökken, vagy nem használjuk ki a keresztmetszetet határfeszültségre. Vagy a számított lehajlás valamivel kisebb lesz, illetve a szerkesztési szabályokban előírt minimális méreteknél elég lenne kisebb, mert a gyártott/előírt minimum az adott esetben szilárdságtanilag túlzás, stb. Azaz a pontosabb számításnak sok értelme nincs, mert sok egyéb érték (teher, rugalmasság, az épített geometria pontatlansága, stb.) pontatlansága valószínűleg nagyobb, mint a nyert pontosság.

Az alkalmazott lineáris modellnek az alábbi tulajdonságai határozhatók meg:

- a szerkezet rugalmasan viselkedik, azaz érvényes Hook törvénye. Az elcsúszások arányosak a csúsztatóerővel, arányossági tényező a K elcsú-

- szási modulus, azaz az egységnyi relatív elcsúszáshoz szükséges csúsztatóerő;
- a felső gerenda toldása miatt kialakított rugalmas csuklóban keletkező elfordulások nyomatékával arányosak, arányossági tényező a k rugóállandó, azaz az egységnyi elfordulást előidéző nyomaték. A csukló jellemzői ismeretlenek, és a csavarokban lévő tengelyirányú erő változásával módosulnak. Hatását legegyszerűbb az M nyomatékugrással figyelembe venni;
 - a rugalmas viselkedés legalább annyit jelent, hogy tartószerkezet lehajlásainak matematikai leírása a rugalmasságtan segítségével gyakorlatban elfogadható eredményeket ad;
 - a K elcsúszási modulus és a k rugóállandók nagysága nem függ a külső terheléstől;
 - az E rugalmassági és a K elcsúszási modulus a tartó tengelye mentén állandó. Ugyancsak szakaszonként (egyfás-kétfás) állandó a keresztmetszet is, valamint a tartó kialakítása (elvileg) szimmetrikus, a terhelés egy darab koncentrált függőleges erő a középső keresztmetszetben;
 - a nyíróerőből keletkező alakváltozási munka nagysága elhanyagolható, de az elérhető nagyobb pontosság érdekében azt is figyelembe vesszük.

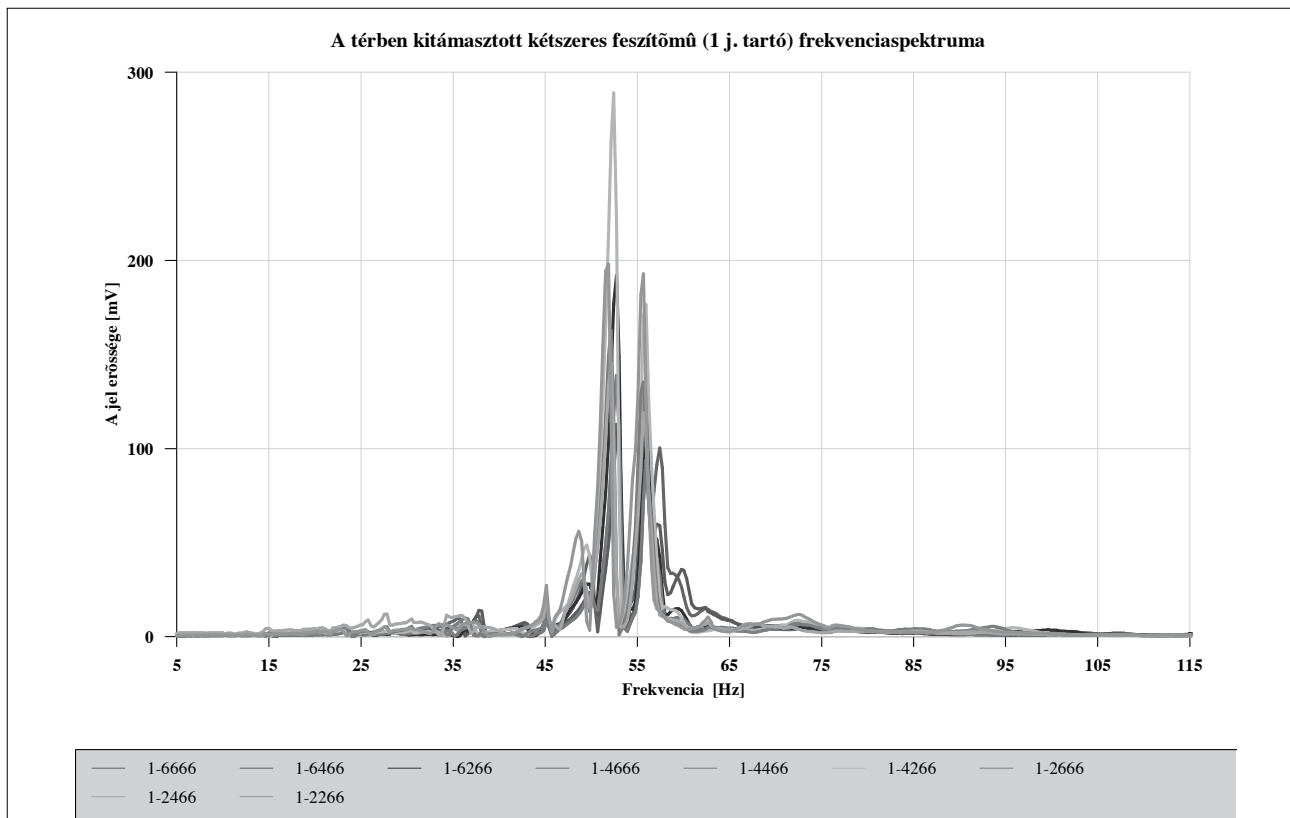
A felsorolt feltételezések megfelelnek az általános gyakorlatnak, a szabványok engedményeinek. Azonban a tervezés/ellenőrzés során alkalmazott modellnek nincs olyan kontrollja, amelynek során mért és számított értékeket egyeztetünk, mint esetünkben a lehajlásokat. (Hiszen így lehetséges ismeretlen értékek meghatározása.) Arra kell törekednünk, hogy az ismert nemlinearitásokat minél jobban figyelembe vegyük.

A hajlékonysági/merevségi mátrixokat a mért értékekre fektetett görbék, az arányosítással meghatározott M nyomaték és a rugalmas csukló elfordulását nem figyelő lineáris modell számításai alapján határoztuk meg, de az elvileg szimmetrikus elemeket átlagértékek helyettesítik.

Dinamikus vizsgálatok

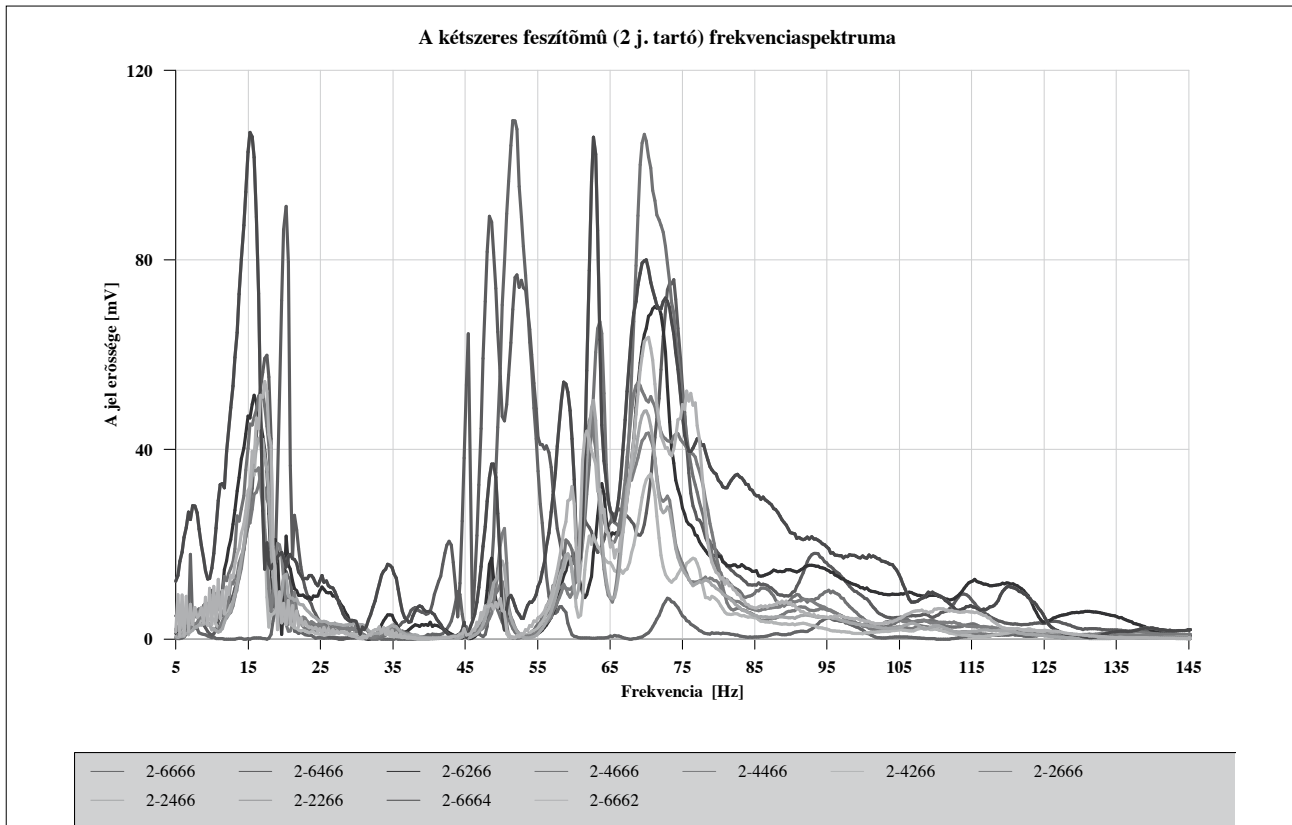
Mérés

A mért rezgés gyorsulásokból a mérési válaszjelek feldolgozására készített catman® program segítségével mindegyik megmért tartó mindegyik állapotában meghatároztuk a frekvencia-spektrumokat (3., 4., 5. és 6. ábra), és a felrajzolt spektrumok segítségével kiválasztottuk azokból a sajátfrekvenciákat (1. táblázat).



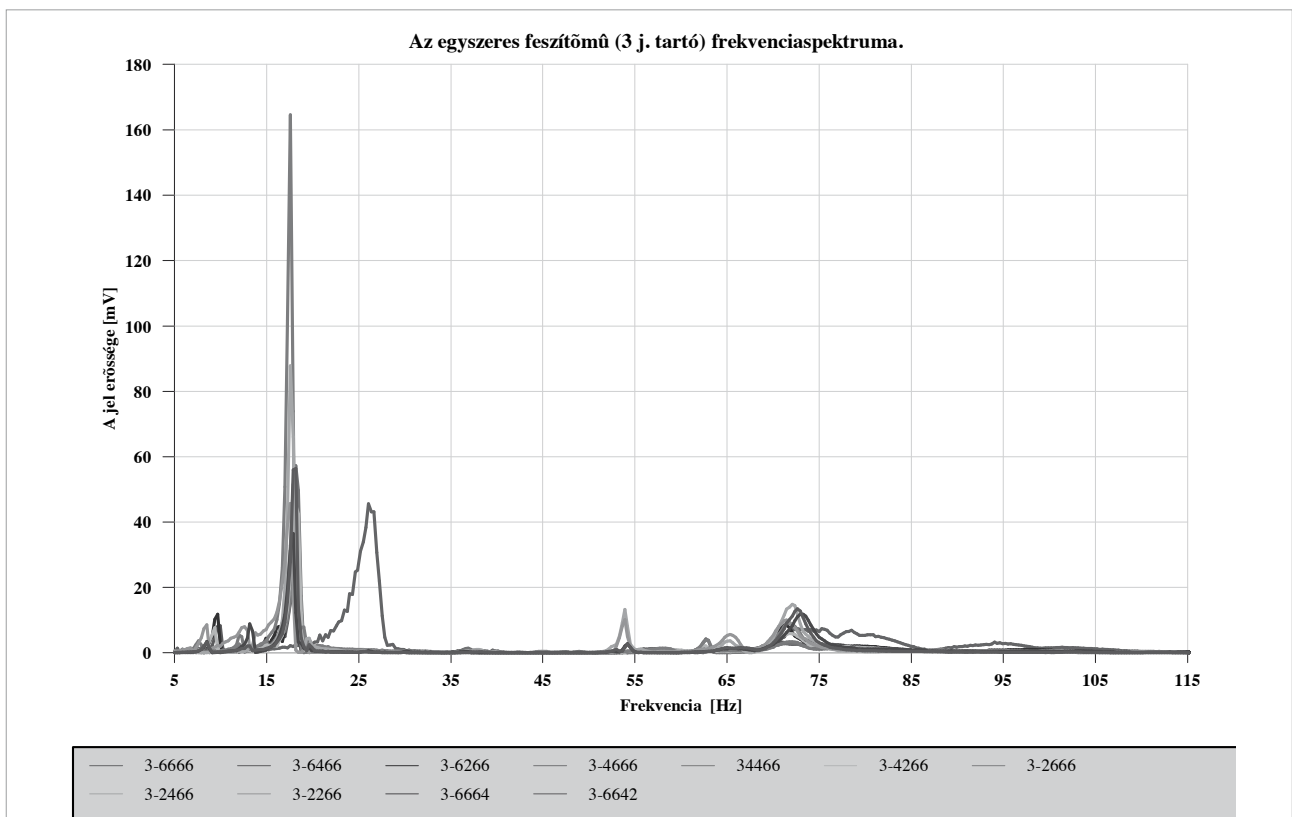
3. ábra A térben is kitémasztott kettős feszítőmű frekvenciaspektruma

Figure 3 Frequency spectrum of the timber grider supported 3-dimensionally



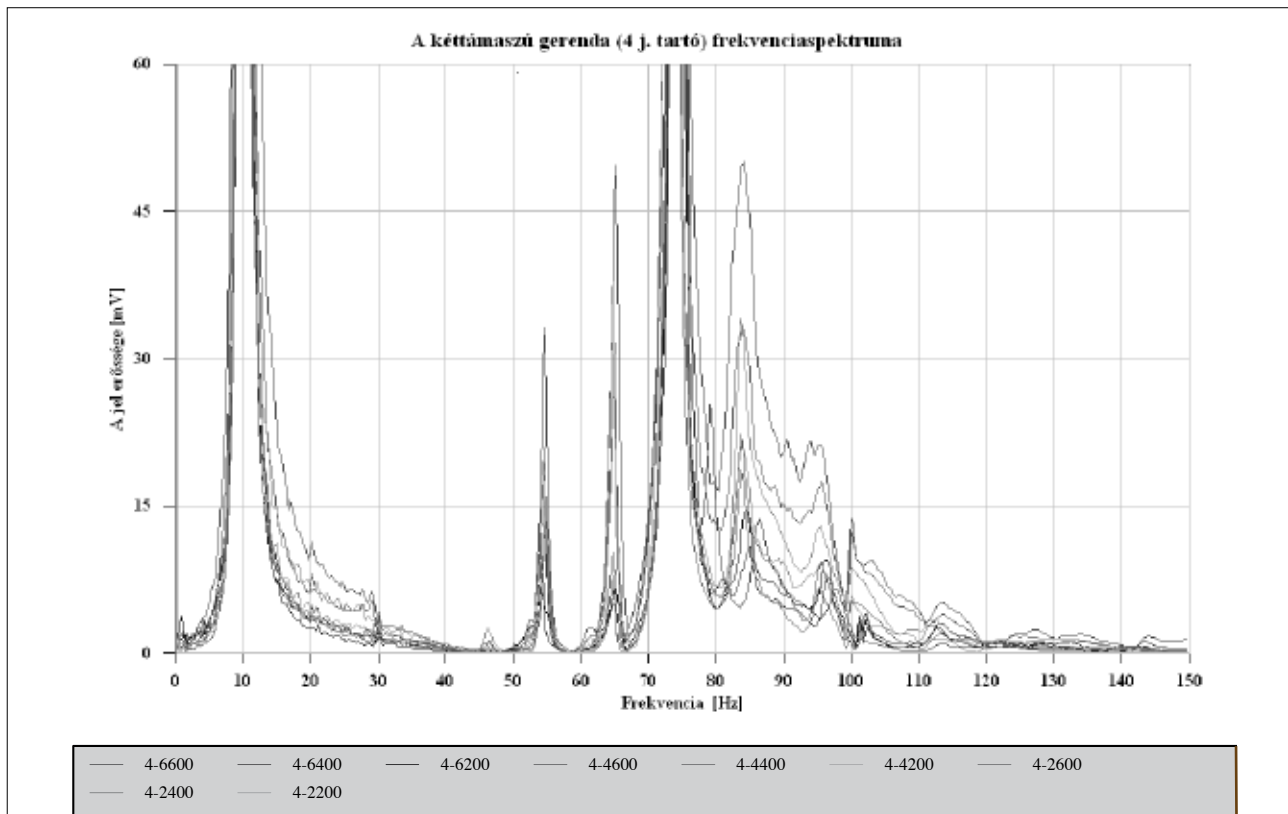
4. ábra A kétszeres feszítőmű frekvenciaspektruma

Figure 4 Frequency spectrum of the double girder



5. ábra Az egyszeres feszítőmű frekvenciaspektruma

Figure 5 Frequency spectrum of the single girder



6. ábra A kéttámaszú gerenda frekvenciaspektruma

Figure 6 Frequency spectrum of the simply supported beam

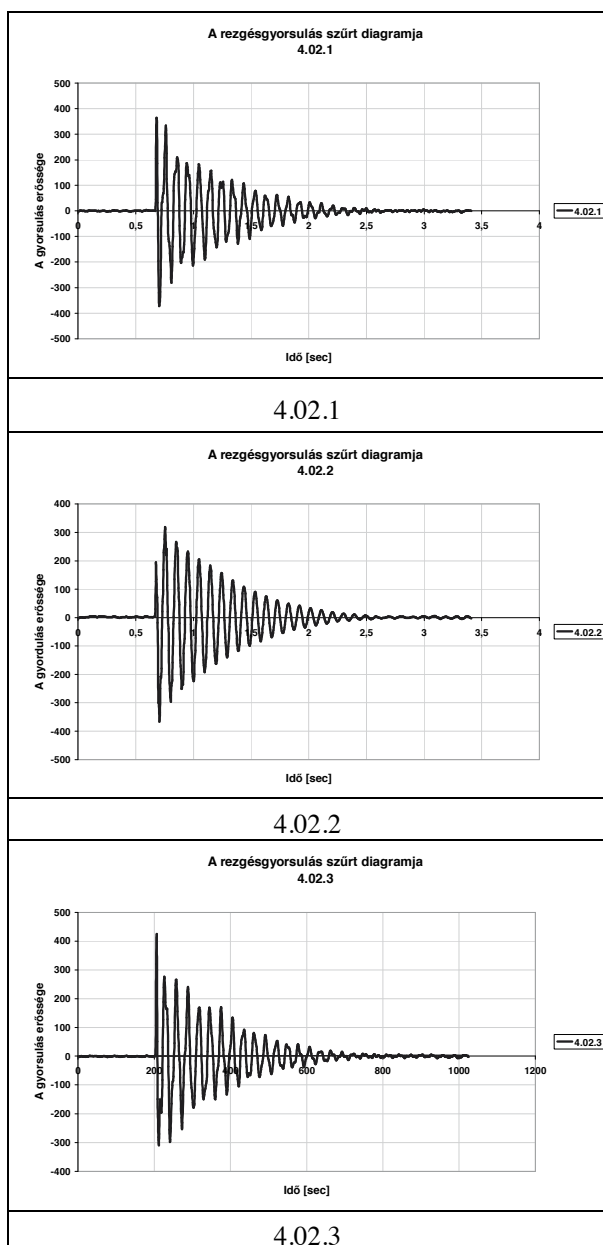
1. táblázat Az egyes tartók sajátfrekvenciái

Table 1 The own frequency of the individual beams

1-6666 j. tartó	1-6466 j. tartó	1-6266 j. tartó	1-4666 j. tartó	1-4466 j. tartó	1-4266 j. tartó	1-2666 j. tartó	1-2466 j. tartó	1-2266 j. tartó
45,1179	45,1179	45,1179	45,1179	45,1179	45,1179	45,1179	45,1179	45,1179
52,7348	53,0274	52,7348	52,7348	52,7348	52,441	52,1484	52,1484	51,8557
55,6646	55,9573	55,9573	55,9573	55,9573	55,953	55,666	55,666	55,6646
2-6666 j. tartó	2-6466 j. tartó	2-6266 j. tartó	2-4666 j. tartó	2-4466 j. tartó	2-4266 j. tartó	2-2666 j. tartó	2-2466 j. tartó	2-2266 j. tartó
18,1646	18,1646	19,0427	16,9929	16,6992	16,6992	16,1138	16,4065	15,5274
52,4411	51,8557	50,3903	48,6321	50,0976	49,8049	50,3903	50,0976	50,9766
66,2104	66,2104	71,7774	69,7266	68,5549	70,6057	70,0193	70,0193	69,4339
3-6660 j. tartó	3-6460 j. tartó	3-6260 j. tartó	3-4660 j. tartó	3-4460 j. tartó	3-4260 j. tartó	3-2660 j. tartó	3-2460 j. tartó	3-2260 j. tartó
19,62891	18,16406	17,87109	18,16406	17,87109	18,16406	19,04297	19,62891	19,04297
57,42188	62,40234		62,69531	62,69531	62,40234	62,69531	65,33203	52,44141
75,29297	70,89844	71,19141	71,77734	72,07031	71,77734	71,77734	72,07031	65,03906
4-6600 j. tartó	4-6400 j. tartó	4-6200 j. tartó	4-4600 j. tartó	4-4400 j. tartó	4-4200 j. tartó	4-2600 j. tartó	4-2400 j. tartó	4-2200 j. tartó
10,25391	10,25391	10,25391	9,960938	9,960938	9,960938	9,960938	9,960938	9,960938
20,21484	20,21484	18,45703	20,21484	20,21484	23,73047	25,48828	19,33594	20,80078
29,88281	30,17578	29,88281	29,00391	29,29688	31,34766		29,58984	
54,49219	54,19922	53,90625	54,49219	54,49219	54,49219	54,78516	54,78516	54,78516
65,62500	65,03906	65,03906	65,03906	65,03906	65,03906	64,74609	64,74609	64,74609
74,70703	74,41406	74,41406	74,12109	74,12109	73,82813	73,82813	73,82813	73,53516
86,42578	84,96094	84,37500	84,08203	84,08203	83,78906	83,78906	83,78906	83,78906

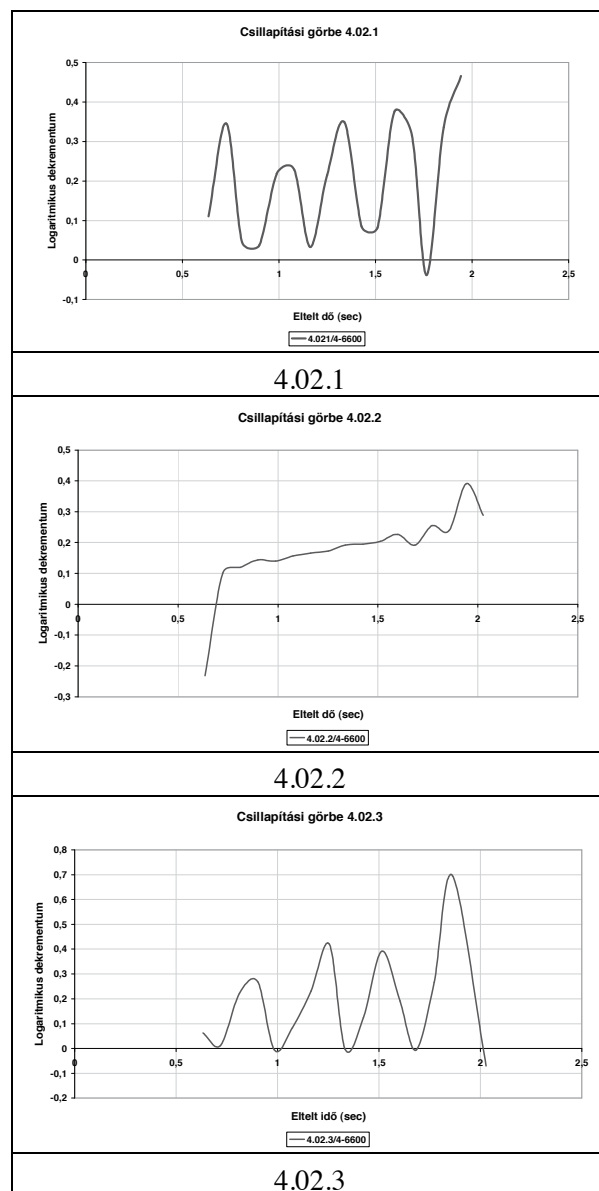
Számítás a mért jelekből

A rezgéseket leíró egyenletben az elmozdulások változását egy negatív kitevőjű exponenciális függvény határozza meg, azaz a kitérések az idő múlásával csökkennek. Az adott rezgésszámhoz tartozó T_0 periódusidő állandó, így az egymást követő kitérések hányadosa is konstans. Ezen hányadosokat nevezzük a csillapított rezgés dekrementumának, ennek természetes alapú logaritmusát pedig logaritmikus dekrementumnak (ϑ). Ez jellemző a csillapítás nagyságára. (7. és 8. ábra)



7. ábra A 20 dB-es aluláteresztő Csebüsev-szűrőn átengedett mért rezgés gyorsulási jel 4–6600 j. tartó.

Figure 7 Vibration signal of the 4-6600 beam measured with a 20dB Chebyshev low-pass filter



8. ábra A 4–6600 j. tartó logaritmus dekrementumának változása.

Figure 8 Alteration of the logarithmic decrement of the 4-6600 beam

A tartó csillapítása kicsi, és a dinamikai számítás során csillapítás nélküli szerkezetet vettünk figyelembe. A csillapítás változása jellemző a tartó viselkedésére, ezért néhány jel csillapításvizsgálatát elvégeztük a mért gyorsulás-idő függvényekből az alábbi lépésekben:

- leválasztottuk a mért időjelek DC szintjét;
- a jelek 20 Hz feletti komponenseit másodfokú aluláteresztő Csebüsev szűrővel szűrtük;
- tízmérési adat hosszúságú ablakkal végigszkennelve az időjelet megkerestük a csúcserkéket;
- a csúcserkékből kiszámítottuk a logaritmus dekrementum értékeket az eltelt idő függvényében;

- hasonlóan a korábban alkalmazott eljáráshoz, tíz mérési adat hosszúságú ablakot végiggördítve az időjelen megkerestük az amplitúdó minimumokat (völgyértékeket);
- a minimum értékekből is kiszámítottuk a logaritmikus dekrementumokat;
- a minimum és maximum értékekből számított logaritmikus dekrementum függvényt átlagoltuk. A logaritmikus dekrementum időfüggvény, amely jellemzi a szerkezet dinamikus viselkedését.

Dinamikai mennyiségek számítása

A kéttámaszú gerenda adott körülmények között pontosan meghatározott statikai vázán kiszámítottuk a \underline{H} hajlékonysági mátrixokat és ezekből a \underline{K} merevségi mátrixokat a vizsgált tartó kilenc állapotában. Az \underline{M} tömegmátrix ismeretében az elhanyagolható csillapításúnak vett tartó dinamikai jellemzői meghatározhatók. Kiszámítottuk a sajátfrekvenciákat (az első hármat, mivel három tömegpontot vettünk fel, Lőrincz 2009), a tömegre normált sajátalakokat és egy állapot rezgési elmozdulásait (mivel a túl sok feltételezés miatt a csillapított rezgés görbéje nem informatív, ezért nem minden állapotra). – A \underline{H} hajlékonysági mátrix elemei:

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} = \underline{\underline{H}}^*$$

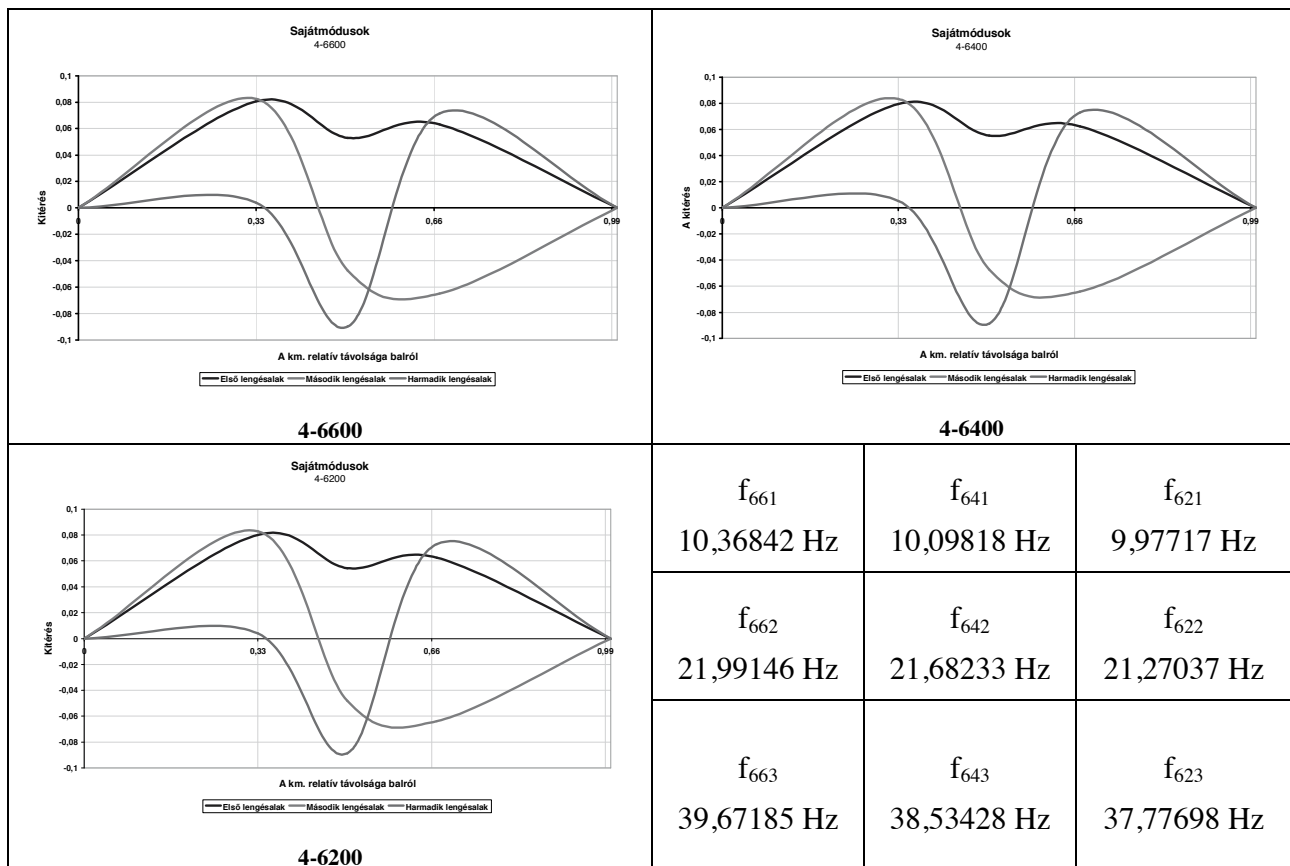
$$e_{ij} = e_{ji} \\ i = 6, 45, 3 \\ j = 6, 45, 3$$

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} e_{6,6} & e_{6,45} & e_{6,3} \\ e_{45,6} & e_{45,45} & e_{45,3} \\ e_{3,6} & e_{3,45} & e_{3,3} \end{bmatrix} = \underline{\underline{H}}^*$$

Az $e_{6,45}$ az $e_{45,45}$ és az $e_{3,45}$ lehajlások nagyított értékei mért értékek. A szimmetria miatt $e_{3,6} = e_{6,3}$, így $e_{45,6} = e_{6,45}$, és az $e_{45,3} = e_{3,45}$. Ezeket számítanunk kellett, azaz

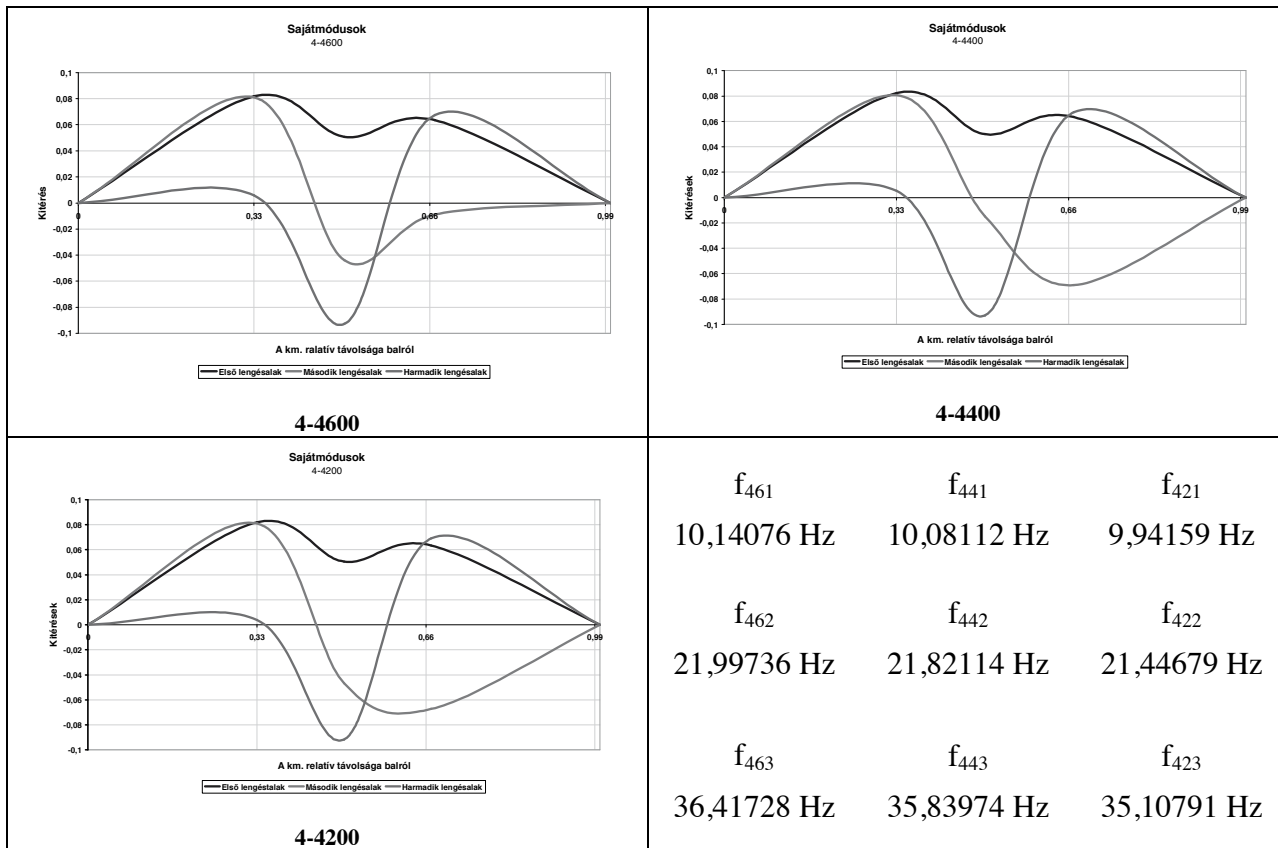
- a ⑥ j. pontban ható egység erő hatására a ⑥, ④ ⑤, ③ pontok lehajlását ($e_{6,6}$, $e_{45,6}$ és $e_{3,6}$), valamint
- a ③ j. pontban ható egység erő hatására a ⑥, ④ ⑤, ③ pontok lehajlását ($e_{6,3}$, $e_{45,3}$ és $e_{3,3}$).

A tömegre normált sajátalakokat a 9., 10. és 11. ábra tartalmazza. A sajátalakok ordinátái az 1. táblázatban olvashatók. A rezgés mért jeltől meghatározott kilengéseit és a számított rezgésalakot a 12. és 13. ábrán láthatjuk.



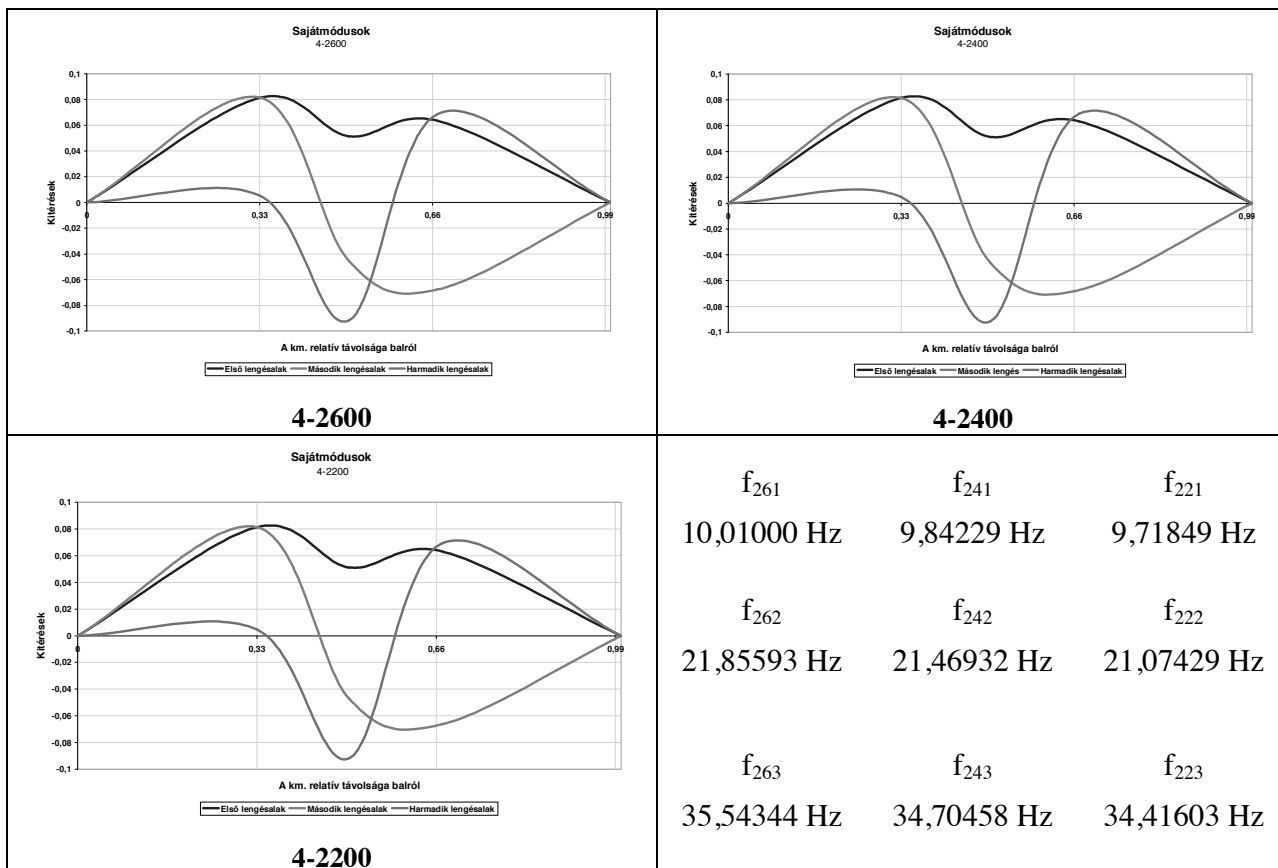
9. ábra A 4-6... j. gerenda sajátmódusai. (A kitérések nagysága mm-ben van megadva.)

Figure 9 Vibration modes of the 4-6...j. beam (deflection in mm)



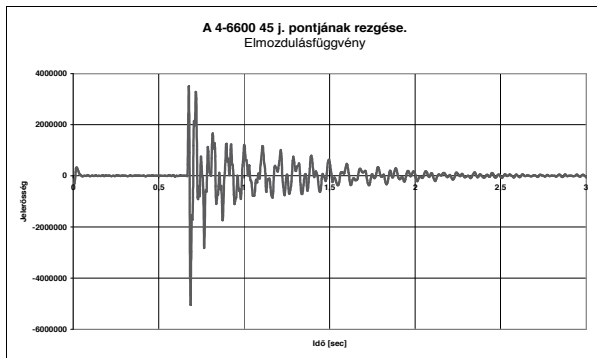
10. ábra A 4-4...j. gerenda sajátmódusai. (A kitérés nagysága mm-ben van megadva.)

Figure 10 Vibration modes of the 4-4... beam (deflection in mm)



11. ábra A 4-2...j. gerenda sajátmódusai. (A kitérés nagyságát mm-ben adtam meg.)

Figure 11 Vibration modes of the 4-2... beam (deflection in mm)



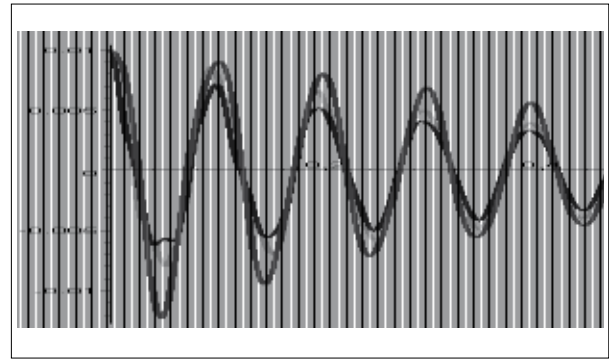
12. ábra A mért rezgés gyorsulásv. -ből meghatározott elmozdulásfüggvény a 4-6600 j. tartón. (Aluláteresztő Csebüsev – szűrővel mért jelek.)

Figure 12 Shift function for the 4-6600 beam determined from the measured vibration acceleration function (signals measured with a Chebyshev low-pass filter)

Következtetések

Az egyes értékek változásából, a mért és a számított jellemzők összehasonlításából a dinamikai vizsgálatokból alábbi következtetések vonhatók le:

1. A sajátfrekvenciák 1% körüli változása mérésnél a csillapítás módosulása (több repedés kialakulása, a nedvességtartalom változása, a kötések lazulása, stb.) és számításnál a csillapítás figyelembe nem vétele miatt is lehetséges, így a változás ezen mértéke következtetések levonására alkalmatlan.
2. Az első sajátfrekvencia változatlanlansága nem jelenti azt, hogy a dinamikai jellemzőket (pl. a felharmónikusokat) az idő múlása nem befolyásolja. Dinamikai megfigyelés esetén legalább három ÷ hat sajátfrekvenciát detektálni kell.
3. A frekvenciák 3% körüli változása (elsősorban csökkenése) utalhat szerkezeti módosulásra, de ezt szerkezetenként verifikálni kell.
4. A sajátfrekvenciák változásának mértéke függ a szerkezet jellegétől, térbeli viselkedésétől, a megtámasztások irányától, ill. ezen paraméterek esetleges megváltozásától. A tömeg mindenkor elrendezésétől. A szerkezet tömege és a hordott tömeg arányától.
5. A válaszjelekből készíthető csillapítási görbe utal a szerkezet linearitására. Ha a mérésekből számított csillapítás, vagy annak jellege állandó, akkor a szerkezet gyakorlatilag lineáris.
6. Lehetnek olyan kisebb, nem a hajlítási merevség csökkenésével együtt járó tartószerkezeti változások (elfordulás, függőleges síkú tartószerkezet vízszintes elmozdulása, alátámasztó lábak elferdülése, stb.), amelyek a sajátfrekvenciák növekedését eredményezik, ezáltal a tartónak az



13. ábra A 4-6600 3, 45, 6 j. pontjainak számított csillapított rezgéseképei. A csillapítás állandó. (A kezdeti elmozdulás 0,01 mm.)

Figure 13 Attenuated vibration at measurement points 3, 45, and 6 of the 4-6600 beam. The attenuation is constant, the initial displacement is 0.01 mm.

idő múlásával járó merevségcsökkenését esetleg kompenzálják, ill. marad az emelkedő érték.

7. A dinamikai jellemzők változását vizsgálva el kell döntenünk, hogy két különböző időpontban végzett mérés összehasonlítható-e? Azaz a sajátfrekvenciák esetleges változásának/változatlanlanságának nem valamilyen szerkezettől független oka van-e?
8. Mivel a faszervezetek aránylag könnyű és pl. anyagukban (a tömegben is), kapcsolataik mozgásában változó szerkezetek, dinamikai vizsgálatuk kevesebb eredményt ígér, mint a beton- vagy acélszerkezeteké. Faszervezeti hibák detektálására a dinamikai vizsgálat nem igazán alkalmas.
9. A mért dinamikai válaszjelekből meg kell határozni a szerkezet csillapítását/logaritmusos dekrementumát attól függetlenül, hogy a gyakorlat esetleg a csillapítást elhanyagolja.
10. Minden egyes statikus terhelésből – a nemlineáris viselkedés miatt – maradó alakváltozások keletkeznek. A dinamikai méréseket minden egyes terhelés után el kell végezni, hogy a változásokat mind a terhelés jellegéhez, mind annak nagyságához hozzá tudjuk rendelni.
11. A két- vagy többfás tartók nemcsak a terhelés okozta igénybevételekre, de a terhelés jellegére is reagálnak. Így célszerű többfajta terhelésre (pl. egy, kettő, három koncentrált erő) is elvégezni a vizsgálatokat.

Irodalomjegyzék

Lőrincz Gy (2009) Faanyagú tartószerkezet laboratóriumi diagnosztikai vizsgálata I. Faipar 56 (2):10-20