

Könnyűszerkezetes fafödém dinamikai vizsgálata

I. rész: a vizsgálat alapelveinek bemutatása az európai előírások szerint

Szabó Márk, Fodor Tamás[❖]

A cikkben a fafödémek dinamikus igénybevételekre történő méretezésének, illetve ellenőrzésének alapelvei kerülnek bemutatásra az Eurocode 5 európai szabvány előírásainak megfelelően. Vizsgálódásunk az emberi kényelemérzet által meghatározott rezgésekre, lengésekre, illetve az általuk okozott használhatósági határ-állapotokra terjed ki. A jelenségek elméleti háttérrel foglalkozunk, megemlíjtük a szerkezet viselkedésével szemben támasztott követelményeket és olyan gyakorlatias megoldásokra is kitérünk, melyek segítségével egy könnyűszerkezetes fagerendás födém dinamikai szempontból kedvezőbb viselkedésűnek számíthat.

Kulcsszavak: Fagerendás födém, Dinamikai vizsgálat, Eurocode 5, Sajátfrekvencia, Általános lemezelmélet, Csillapítás

Dynamic assessment of a light-frame wooden ceiling

Part 1: the principles of the investigation according to the European regulations

The principles of stress design and verification of wooden ceilings for dynamic loading according to the guidelines of Eurocode 5 are introduced. The investigation includes the vibrations and oscillations with respect to human comfort levels, and the usability limit states caused by them. The theoretical background and the requirements for structural behaviour are described, as well as such practical solutions that may render a light-frame wooden-joist ceiling structure more favourable in terms of its dynamic behaviour.

Keywords: Wooden-joist ceiling, Dynamic testing, Eurocode 5, Resonant frequency, General plate theory, Damping

Bevezetés

Hazánk Európai Unió csatlakozása együtt jár a közösség által kidolgozott és használatban lévő szabványrendszer, az úgynevezett Eurocode itthoni bevezetésével és alkalmazásával. A korábbi Magyar Szabványok idővel aktualitásukat veszítik, és az új egységes méretezési eljárások és előírások lesznek kötelező érvényűek a tartószerkezetek és így a faszerkezetek esetében is. Az új faszerkezetekre vonatkozó Eurocode 5 szabvány (továbbiakban EC 5) új követelményeket is támaszt többek között a szerkezetek rezgéstani viselkedésével és az esetleges, illetve rendkívüli dinamikus igénybevételeknek történő ellenállóságával szemben. Jelen cikksorozat ezen újszerű méretezési eljárások közül az emberi kényelemérzet által meghatározott rezgésekkel szembeni követelmények bemutatásával foglalkozik a fagerendás födémek esetében.

A bemutatásra kerülő rezgésekkel kapcsolatos vizsgálatok használhatósági határállapotokra történő méretezést, illetve ellenőrzést jelentenek. A vizsgálatok során a legfőbb dinamikus igénybevételek között jelentkező az emberi járás, valamint a forgó gépek működése által okozott rezgések. Az **EC 5 1-1** a dinamikus igénybevételeket egy egységimpulzussal és statikusan ható koncentrált erővel modellezi, melyek számszerű értékei a tényleges dinamikai hatásokban mint hasznos terhek szerepelnek.

A részletezésre kerülő számítási módszerek figyelembe veszik a fagerendás födémek merevségi tulajdonságait és mechanikai modelljét, melyben az igénybevételt egy függőleges irányú statikusan ható koncentrált erő okozza. A fafödémek dinamikai viselkedésének leírására az általános lemezelmélet szolgál alapul, különös tekintettel a csuklós alátámasztású egyemezős födémekre, ahol a

[❖] Szabó Márk, doktorandusz, Fa- és Papíripari Technológiák Intézete
Dr. Fodor Tamás, CSc, egyetemi docens, NyME Műszaki Mechanika és Tartószerkezetek Intézet

sajátfrekvencia, a sajátalak, a modális tömeg és a modális csillapítás mint a viselkedés szempontjából különösen fontos paraméterek kerülnek bevezetésre.

A méretezés az impulzusebesség-reakció korlátozásának elve alapján történik. Az egyes feltételezések bizonyos korlátok közé szorítják a részletezett méretezési eljárás alkalmazhatóságát, és rámutatnak arra, hogy a különböző feltételek miként befolyásolják az eredmények alakulását. Nyilvánvalóvá válik, hogy az egész szerkezet tulajdonságai és statikai rendszere együttesen befolyáolja a rezgések továbbterjedését.

Épületek általános használhatósági követelményei

Egy építmény addig tekinthető használhatóra alkalmasnak, míg a tervezett rendelkezését megfelelően ellátja. Az épületek méretezése során a tervezőnek figyelembe kell vennie a használhatósággal szemben támasztott követelményeket, melyek az épület statikai rendszerére vagy teherhordó elemeire vonatkoznak. A szerkezeti használhatóság követelményeit általában az egész épületre vagy egy épületrészre határozzuk meg. A leggyakoribb használhatósági követelmények a következő szempontokból határozhatók meg:

- a épületszerkezet kellemes és kényelmes viselkedése az épület használói számára,
- az épület használhatóságának biztosítása beleértve a berendezéseket is, és
- az épület elfogadható megjelenése.

A különböző feltételeket az EC 5 egyértelműen meghatározza. A használhatósági követelmények egy része alapvetően különbözik a teherbírasi képesség követelményeitől. A teherbírasi határállapotok átlépése irreverzibilis, míg az egyes elért használhatósági határállapotok, mint pl. a fafödémek esetében a túlzott lengések vagy lehajlások során kialakuló kellemetlen érzet megszüntethető és a szerkezet használhatósága helyreállítható. Mindkét esetben a határállapot elérését a padlózat egyenes és sík állapotától való eltérése okozza. A használhatósági határállapotban az eltérések együttes összege is mértékadó, melyek egy része a külső terhelésből, míg másik része a klimatikus

hatásokból tevődik össze. Kritikus esetekben a gerendázat megemelésével lehetőség nyílik a teljes lehajlás értékének egy elfogadható szintre történő korlátozására. A megemelések nem befolyásolják a hajlított tartó rezgéstani viselkedését.

A méretezések egyszerűsítésére az EC 5 1-1 (MSZ EN MSZ EN 1995-1-1:2005) megadja a lehajlások és lengések határértékeit, melyek betartása esetén a használhatósági határállapotok követelményei kielégítőnek tekinthetők. A következőkben a rezgésekkel szemben támasztott követelmények kerülnek tárgyalásra.

Rezgésekre vonatkozó használhatósági követelmények

A használhatóságot korlátozó rezgéseket, különböző igénybevételek okozhatják. Az EC 5 1-1 szerint különösen azokat a rezgéseket kell elkerülni, melyek az épület használójánál kellemetlen érzetet váltanak ki. Ennek megfelelően a megengedhető rezgések mértékét az emberei érzetek határozzák meg. A faszervezetes lakóépületekben a rezgések fellépésének két legfontosabb oka az emberi tevékenység és a gépek üzemeltetése. Az emberi tevékenységek során lengéseket kiváltó okok lehetnek például a járás vagy a futás. A fenti kiváltó okoknak az alábbi legfontosabb következményeit különböztetjük meg:

- a lépések által keltett rezgések során kialakuló kellemetlen érzet, és
- a gépek keltette rezgések által létrejövő kellemetlen érzet.

Az emberek rezgésekre adott reakciója szubjektív és sok különböző paraméter befolyásolja. A probléma átfogó tárgyalásával Griffin (1990) foglalkozott, míg az ISO 2631-2:2003 alatt egy összefoglalás található. A következő összefüggések a legtöbb esetben helytállóan bizonyulnak:

Az ember rezgésekkel szembeni érzékenysége

- 8 Hz-nél kisebb frekvenciákon függ a rezgés gyorsulásától,
- 8 Hz-nél nagyobb frekvenciákon függ a rezgés sebességtől,

- logaritmusos karaktert mutat, a hangerősség szubjektív érzékeléséhez hasonlóan,
- növekszik a rezgés időtartamával,
- csökken a közelséggel és a rezgés okának tudatosulásával és
- csökken a növekvő fizikai tevékenységgel.

A fenti összefüggésekből két méretezési cél határozható meg: Egyrészt a rezgések mértékét a rezgés forrásának közelében korlátozni kell, ami a fagerendás födém megfelelő méretezésével érhető el a következőkben részletezésre kerülő eljárások szerint. Másrészt pedig egy alkalmas statikai rendszer kialakításával meg kell akadályozni a rezgések áttérjedését a szomszédos épületrészekre. A tervezés során többek között figyelembe kell venni azt is, hogy a vázszerkezetes kialakítás lehetővé teszi a rezgések továbbterjedését a szomszédos szintekre és ezért a rezgésre érzékeny szerkezetek kevésbé alkalmasak ilyen követelmények kielégítésére. Hasonló megfontolásból a szomszédos szobák között átmenő födémek is kerülendők és a válaszfalakat egymás fölé rendezve, az alapig folytatólagosan kell kiépíteni. Igen kedvezőtlen helyzet állhat fenn akkor, ha az épület valamelyik emeletén két födém között úgy helyeznek el közfalat, hogy az, az alsó födém alatt nincs megtámasztva. Ez esetben a közfal kapcsolatot képez a két egymás fölött fekvő födém között és így a felső födém dinamikus igénybevétele során az alsó szint födémje is nagyon hasonló lengéseket fog végezni. A kialakult rezgések ugyan elfogadhatóak lehetnek azon az emeleten, ahol a rezgés forrása található, de mégis gyakran kellemetlen érzetet okoznak más szinteken is, ahol a rezgés forrása már nem ismert.

Emberi tevékenységek által keltett rezgések

A fagerendás födémek EC 5 szerinti méretezése a rezgések tekintetében a mindennapos emberi tevékenységet, mint a járás során fellépő dinamikus hatást veszi figyelembe. Egyes nagyobb dinamikai igénybevételeket előidéző tevékenységeket, mint pl. a táncolást, külön kell figyelembe venni, és ezekhez más méretezési eljárások

szükségesek (Allen 1990). Az EC 5 1-1 lakóházak födémjei esetén részletes dinamikai vizsgálatot ír elő, ha az alaprezgésszám legfeljebb 8 Hz ($f_l \leq 8$ Hz).

Az alábbiakban bemutatásra kerül az EC 5 1-1 szerinti méretezési eljárás, mely azokra a lakóházfödémekre érvényes, ahol az f_l alaprezgésszám nagyobb, mint 8 Hz. Egy mind a négy pereme mentén csuklósan alátámasztott derékszögű négyszög alapú födém sajátfrekvenciája az [1] közelítő egyenlettel határozható meg:

$$f_n = f_0 \sqrt{1 + n^4 \left(\frac{l}{b}\right)^4 \frac{(EI)_b}{(EI)_l}} \quad [1]$$

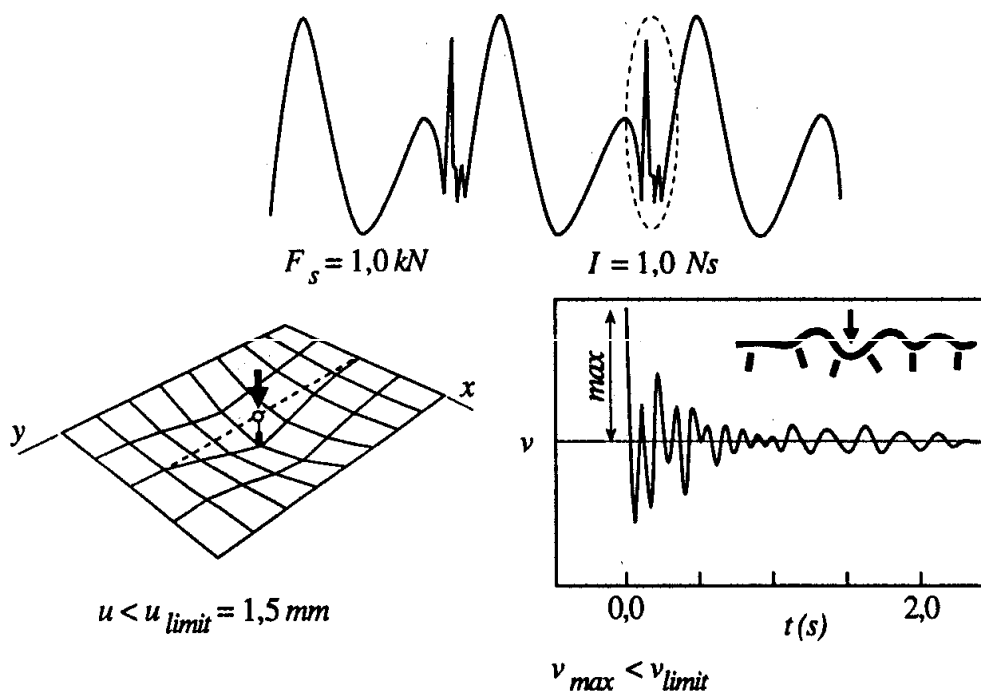
Az f legkisebb sajátfrekvenciát, mely megfelelő közelítéssel f_0 , az EC 5 1-1 adja meg:

$$f = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad [2]$$

- n – a sajátalakok száma
- m – a felületegységre jutó tömeg kg/m²
- l – a födémgerenda fesztávolsága m
- b – a födém szélessége m és
- $(EI)_l$ – az egyenértékű lapmerektség Nm²/m az EC 5 1-1 (4.4. 1.(3)) figyelembevételével, ahol az l index a nagyobbik hajlítómerektséget jelöli a gerenda hossz tengelyére merőleges keresztmetszetben, míg b a hajlítómerektség a gerenda tengelyének irányába eső keresztmetszetben. (A mennyiségek 1 méter hossza vonatkoznak)

A járásból adódó dinamikus terhelést Ohlsson, (1982) és az EC 5 1-1 szerint kísérletekkel lehet megállapítani. A lakóépületekben a gyorsan lecsengő rövididejű hatás dominál. A terhelés két különböző összetevőből áll:

- alacsony frekvenciájú összetevőkből (0 – 8 Hz), amiket a lépésfrekvenciák és a nekik megfelelő harmonikus rezgések okoznak, továbbá
- magas frekvencia összetevőkből (8 – 40 Hz), melyek elsősorban a cipősarok padlónak ütközéséből adódnak



1. ábra - Egy földem tipikus terhelés-idő lefutása a járás során (fent) és a méretezések határértékei (lent).
(Informationsdienst Holz – Holzbauwerke - STEP 1)

A földemek sajátfrekvenciája általában nagyobb, mint 8 Hz, így az alacsony frekvencia összetevők kvázi-statiszusz rezgéseket okoznak, melyek amplitúdója főként a földem merevségétől függ és alig függ annak tömegétől.

Az alacsony frekvencia összetevők hatásának modellezésére a kísérletek alapján egy függőleges irányú 1 kN nagyságú statiszusz koncentrált erő szolgál. A terhelésből adódó lehajlást az EC 5 1-1 ill. [3] képlet 1,5 mm-re korlátozza. Az így meghatározott lehajlás számításánál a földem kéttengelyű teherhordását is figyelembe kell venni.

$$\frac{u}{F} \leq 1,5 \text{ mm/kN} \quad [3]$$

A lépésterhelés magas frekvenciájú részéből adódó behatásokat egy 1 Ns nagyságú egységimpulzussal vesszük figyelembe. Az ebből adódó v_{vel} rezgési sebesség egy tartószerkezeti sajátosság.

Ha a földemet szabadon mozgó, M tömegű merev testnek tekintjük, akkor az egységimpulzus által 1 m/s -ra gyorsulna. Egy tényleges földem esetén, melynek

meghatározott merevség- és tömegeloszlása van, a kezdeti legnagyobb sebesség az alábbiak szerint adódik:

$$v_{vel,max} = \sum \frac{\Phi_n^2}{m_n} \quad [4]$$

Az összegzésnél valamennyi lehetséges rezgési formát figyelembe kell venni. Φ_n az n -edik sajátalak, melynek amplitúdó maximuma éppen egy és m_n az n -edik sajátalak számára generalizált tömeg (ld. Müller 1978).

A [4] egyenlet még nem alkalmas a gyakorlati felhasználásra és emiatt a következőkben az egyszerűsítésére kerül sor. Első lépésben a figyelembe veendő sajátalakok számát a 40 Hz alatti sajátfrekvenciákra korlátozzuk, mivel a kísérletek kimutatták, hogy a 40 Hz feletti sajátfrekvenciák már nem befolyásolják jelentősen a kezdeti $v_{vel,max}$ sebességmaximumot (Ohlsson, 1982). A második egyszerűsítés a tömeget érinti, amit a $v_{vel,max}$ számításánál veszünk figyelembe. A legtöbb faföldem vizsgálata során a biztonság javára a szerkezet önsúlyán kívül egy kisebb tömeget is feltételeznek a számításokban.

Habár ez a feltételezés nem minden esetben áll fenn, mégis a sajátfrekvenciát, a sajátalakot és a generalizált tömeget egyedül a födém tömegével számítjuk, miközben a $v_{vel,max}$ sebesség számításánál minden generalizált m_n tömeget 50 kg körülire növelünk. Ezzel a tömegnöveléssel vesszük figyelembe azokat a személlyel együtt rezgő testrészeket, melyekre a rezgések szintén kihatnak.

Ohlsson (1988) szerint a [4] egyenlet a gyakorlatban legtöbbször előforduló, derékszögű négyszög alapú és a négy oldalukon csuklósan alátámasztott fagerendás födémek esetében egyszerűsíthető. Egy b szélességű és l fesztávolságú födém, valamint egyenletesen elosztott m tömeg esetén az **EC 5 1-1** a következő közelítő egyenletet adja meg:

$$v_{vel,max} = \frac{4(0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot b \cdot l + 200} \quad [5]$$

Az [5] egyenletben n_{40} a sajátalakok száma a 40 Hz-nél alacsonyabb frekvenciákon, és m , b , és l a födém méretei. A járulékos 50 kg-os generalizált tömeget a 4/200 hányados tartalmazza. n_{40} értékét az **EC 5 1-1** szerinti következő közelítő egyenlettel határozhatjuk meg:

$$n_{40} = \left(\left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)l}{(EI)b} \right)^{0,25} \quad [6]$$

A fenti közelítések és egyszerűsítések elvégzésével az egységimpulzus által okozott legmagasabb rezgési sebesség könnyen számítható. A rövid idejű rezgések kedvező hatását egy a csillapítástól függő határérték veszi figyelembe. Ebben az összefüggésben a legfontosabb csillapítási jellemző σ_0 a csillapítás mértéke, ami a rezgési amplitúdók csökkenését nem a periódusok, hanem az idő függvényében adja meg. A csillapítás mértéke az alábbi:

$$\sigma_0 = f\zeta \quad [7]$$

Ez esetben az f frekvenciának az f_1 alapfrekvencia használható, míg a csillapítási tényező közönséges fagerendás födémek esetén az **EC 5 1-1** alapján 0,01-nek vehető fel. A fagerendás födémek csillapítása nagy szórást mutat 0,015 és 0,02 közötti középértékkel (Chui 1988, Ohlsson 1982). Ha 0,01-nél nagyobb értéket használnak a rezgésekkel kapcsolatban, akkor ki kell mutatni, hogy ez az érték a födém élettartama során is fenn fog állni. Ohlsson (1982) szerint a $v_{vel,max}$ határértéke a következő:

$$v_{vel,max} \leq 100^{(f_1\zeta-1)} \quad [8]$$

Gépek által okozott rezgések

A gépek által okozott rezgéseket is korlátozni kell az **EC 5 1-1** szerint. Az emberi érzékenységet a tartós, gépek által okozott rezgésekkel szemben Griffin (1990) vizsgálta. Az **EC 5 1-1** megemlíti, hogy az **ISO 2631-2:2003** megadja ezeket a határértékeket egy bizonyos szorzótényező alkalmazásával. A tartós kényszerrezgések számítását a tartós és változó terhek várható legkedvezőtlenebb kombinációjának figyelembevételével kell végezni. Ebből adódik a figyelembe veendő tömegek nagy választéka. Mivel a fa építőelemek sajátfrekvenciája gyakran sűrűn egymás mellett helyezkedik el, így az a frekvenciatartomány, amivel számolni kell, általában nagyon széles. A gépek számára az esetek túlnyomó többségében a rezgés csillapítók, vagy a különálló alap tekinthető a legjobb megoldásnak.

A rezgések hatásának rövid összefoglalása

A tartószerkezetek használhatóságát szubjektív érzetek, valamint a szerkezet költségektől függő minősége és viselkedése befolyásolja. Ennélfogva az itt megadott határértékek az emberek által okozott rezgésekre vonatkozóan minimális követelményeknek tekintendők. A leírtak alapján egy épület méretezésénél a későbbi használatnak a kívánt színvonalat és a rendeltetést is egyértelműen meg kell határozni.

Irodalomjegyzék

1. Allen, D.E. 1990. ***Floor vibration from aerobics***. Journal of Civil Engineering 17(5):771-779
2. Blaß, H. J., R. Görlacher, G. Steck 1995. ***Informationsdienst Holz - Holzbauwerke - Steep 1 - Bemessung und Baustoffe nach Eurocode 5***. Fachverlag Holz der Arbeitsgemeinschaft Holz e. V., Düsseldorf.
3. Chui, Y.H. 1988. ***Evaluation of vibrational performance of light-weight wooden floors***. In: Proc. 1988 Int. Conf. on Timber Engineering. Forest Products Research Society, Madison, Wisconsin, USA. Vol. 1, 707-715. old.
4. Griffin, M.J. 1990. ***Handbook for human vibration***. Academic Press, London, Great Britain.
5. ISO 2631-2:2003. ***Evaluation of human exposure to whole-body vibration: Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1-80 Hz)***, International Organisation for Standardisation, Geneva, 11 old.
6. Müller, F.P. 1978. ***Baudynamik. Beton-Kalender 1978***. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin/München Dusseldorf, Deutschland.
7. MSZ EN 1995-1-1:2005. ***Eurocode 5: Faszerkezetek tervezése. 1-1. rész: Általános szabályok. Közös és az épületekre vonatkozó szabályok***. MSZT Budapest, 124 old.
8. Ohlsson, S. 1982. ***Floor vibration and human discomfort***. Doctoral thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden.
9. Ohlsson, S. 1988. ***Springiness and human-induced floor vibration***. Document D12, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Schweden.