

A fűrészáru szilárdsági osztályozásának nemzetközi gyakorlata és hazai kutatási eredményei

International practice and Hungarian research regarding structural lumber grading

Bejó László^a, Sismándy-Kiss Ferenc^b, Divós Ferenc^c

^a egyetemi tanár, Soproni Egyetem, Faipari és Műszaki Intézet, bejo.laszlo@uni-sopron.hu

^b folyamatmérnök, IKEA Industry Sopron, skferenc@gmail.com

^c ügyvezető, Fakopp Enterprise Bt., divos@fakopp.com

Kulcsszavak

EUROCODE 5,
fűrészáru,
faszerkezet,
szilárdsági osztályozás,
szilárdságbecslés,
dinamikus rugalmassági
modulusz

Keywords

EUROCODE 5,
lumber,
wooden structures,
strength grading,
strength prediction,
dynamic MOE

Absztrakt

A faanyag alacsony sűrűségének és viszonylag magas szilárdságának köszönhetően kitűnő szerkezeti anyag, azonban természetes változékonyságának köszönhetően sokszor megbízhatatlannak tartják. Szilárdsági osztályozással biztosíthatók a mérnöki alapelveken történő szerkezettervezéshez szükséges tervezési értékek. A cikk bemutatja a fa szilárdsági osztályozásának jelenlegi európai rendszerét, a szilárdsági osztályokat, a vizuális szilárdsági osztályozás módját és a gépi szilárdsági osztályozás lehetőségeit. Ezután ismertetésre kerülnek a Soproni Egyetemen történt, hazai fejlesztésű szilárdsági osztályozó berendezés ki- és továbbfejlesztése érdekében végzett vizsgálatok. A cikk bemutatja a kifejlesztett PLG berendezést, az annak minősítése érdekében végzett vizsgálatokat és azok eredményét. Bemutatásra kerülnek a minősítő algoritmus továbbfejlesztése érdekében végzett vizsgálatok, melyek során különböző becselő paramétereket értékeltünk, kiválasztva a szilárdságbecslés javítása szempontjából optimális kombinációkat. Végül bemutatásra kerül a PLG+ berendezés, a korábbi osztályozóberendezés továbbfejlesztett változata.

Abstract

Due to its low density and relatively high strength, wood is an excellent structural material, but designers often consider it unreliable due to its high degree of natural variability. Strength classification can ensure the design values needed for creating engineered structures. The article describes the current system of lumber strength grading in Europe, visual strength grading parameters, and the various principles of instrumental strength grading. After that, research done at the University of Sopron is described, directed towards creating and improving a Hungarian lumber grading instrument. The PLG (Portable Lumber Grader) equipment is introduced, along with the test results on various size lumber that will be used for the accreditation of the machine. The article also shows the research done in order to improve the testing algorithm by using a number of further prediction parameters, and choosing the optimal combinations for strength prediction. Finally, the new and improved PLG+ instrument is introduced that is better suited for testing in an industrial setting.

1. Bevezetés

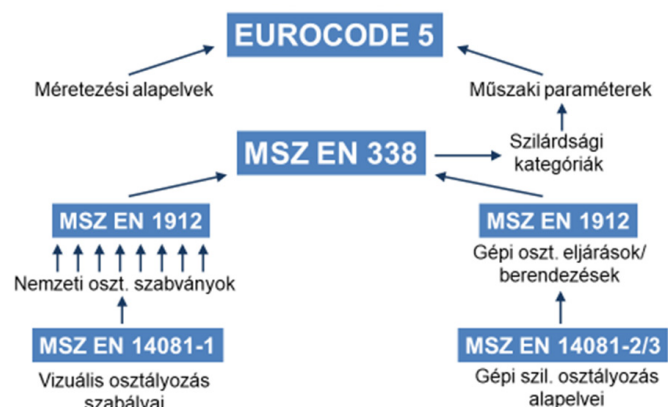
A faanyag a teherviselő szerkezeti anyagok között speciális szerepet tölt be. Egyfelől, kitűnő specifikus szilárdsági tulajdonságainak (a szilárdság sűrűséghez viszonyított értékének) köszönhetően nagyszerűen alkalmazható nagy méretű/fesztávú szerkezetek gyártásakor (alacsony önsúlyú teherviselő szerkezetek); nem véletlen, hogy több ilyen területen (pl. tetőszerkezetek gyártása) a mai napig közkedvelt alapanyag. Másfelől, a fa, mint természetes alapanyag, műszaki paraméterei nagy szórást mutatnak, így – nem teljesen indokolatlan módon – a statikus tervezők sokszor megbízhatatlannak tartják, és, a fa előnyei ellenére szívesebben dolgoznak a jól bevált és kiszámítható viselkedésű szilikát alapú, illetve fém építőanyagokkal [1, 2].

A faanyag mechanikai tulajdonságait számos tényező befolyásolja. A sűrűséget – melynek jelentős hatása van a szilárdságra – számos tényező befolyásolja, köztük elsősorban a fafaj, de szerepet játszanak pl. a fa növekedése során a termőhelyi viszonyok és klimatikus körülmények is. A fa makroszerkezeti sajátosságainak nagyon nagy szerepe van; fontos pl. a göcsök (ághelyek) jelenléte, a rostirány, az évgűrűszerkezet – ezek mindegyike jelentősen befolyásolja a faanyag teherbíró képességét. Még a fa szubmikroszkópikus szerkezete is fontos; különösképpen a sejtfal belső szerkezete, és azon belül is különösen az ún. mikrofibrilla szög (az elemi rostok lefutása a sejtfal hossz tengelyéhez viszonyítva). Végül, de nem utolsó sorban, a mechanikai tulajdonságokat jelentősen befolyásolja a fa károsodása, amelyet okozhatnak biotikus károsítók (gomba- és rovarfertőzés), de mechanikai behatások,

vagy akár technológiai okok is (pl. a vágásirány, vagy a fa száradása, aminek a során repedések alakulhatnak ki.)

A fenti okok miatt a faanyag szilárdságának (illetve a tervezéshez szükséges határfeszültségi értékeknek) a meghatározása nem egyszerű feladat. Erre nézve a világ, illetve Európa egyes országaiban eltérő gyakorlat alakult ki, amelynek során a fűrészárut általában különböző vizuális jegyek, vagy szilárdságbecslő paraméterek alapján szilárdsági osztályokba sorolják. A különböző országok eltérő gyakorlata azonban nem segíti elő az építőanyagok nemzetközi kereskedelmét. Emiatt az Európai Unióban olyan egységes szabványrendszert dolgoztak ki, amely keretet biztosít a faszerkezetek méretezésére, miközben nem írja felül az egyes országok nemzeti osztályozási módszereit (1. ábra) [3-7].

A faszerkezetek méretezésének szabályait az



1. ábra: A fűrészáru szilárdsági osztályozásának rendszere az MSZ EN szabványok alapján [3-7]

EUROCODE 5 szabvány [8] tartalmazza. A méretezéshez az egyes szilárdsági kategóriákhoz tartozó méretezési feszültség értékeket kell használni; ezeket az MSZ EN 338:2016 [3] szabvány adja meg. A faanyagokat a szabvány két fafajcsoportra osztja, és ezeken belül állapít meg szilárdsági kategóriákat: fenyő és nyár esetén 11 (C14, C16, C18, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45, C50), lombos anyagra pedig 6 (D30, D35, D40, D50, D60, D70) kategóriát, ahol a betűjelölés utáni szám a hajlítási határfeszültség értékével egyenlő.

A szilárdsági kategóriák megállapításához (azaz a szilárdsági osztályba soroláshoz) kétféle módszert használhatunk, melyeknek általános szabályait az MSZ EN 14081-es [5-7] szabványsorozat tartalmazza. A vizuális szilárdsági osztályozás általános szabályait az MSZ EN 14081-1 [5] rögzíti. A szabvány előírja, hogy a vizuális osztályozás során vizsgálni kell a faanyag göcsöségét, az évgyűrűszerkezetet, a rostlefutást, az esetleges tompaélúséget, a repedések jelenlétét, az alaki hibákat, a biológiai és mechanikai károsodásokat, az ún. reakciófa (a szelvény miatt megváltozott, eltérő tulajdonságú faszövet) jelenlétét, és bármilyen egyéb, a teherbírást potenciálisan befolyásoló tényezőt.

Az MSZ EN 14081-1 [5] szabvány nem határoz meg konkrét kritériumokat a fenti vizuális jellemzőkre vonatkozóan. Ezeket az egyes országok nemzeti osztályozási szabványai tartalmazzák. Minden ország gyakorlata eltérő, nem csak az osztályozási előírások, de a megállapított szilárdsági kategóriák tekintetében is, amelyek nem azonosak az MSZ EN 338-ban [3] előírt C illetve D osztályokkal. A nemzeti és nemzetközi osztályozási gyakorlat között a kapcsolatot az MSZ EN 1912-es [4] szabvány teremti meg. Ez a szabvány tartalmazza a megfeleltetéseket a nemzeti szabványban alkalmazott szilárdsági kategóriák és a nemzetközi szilárdsági osztályok között; pl. a német DIN 4074 szabvány [9] szerinti S13-as fenyő faanyag egyben megfelel a C24-es osztálynak, vagy a brit BS 4978 szabvány [10] GS kategóriája, amely fafajtól függően a C14-es vagy C16-os szilárdsági osztályba sorolható.

A vizuális megoldás mellett a másik lehetőség a gépi szilárdsági osztályozás, melynek általános leírását az MSZ EN 14081-2 [6] illetve 14081-3 [7] szabványok tartalmazzák. Ezek alapja valamilyen roncsolásmentesen mérhető szilárdságbecslő paraméter. Különböző kutatók és cégek többféle alapelven, vagy akár azok kombinációján alapuló eljárásokat dolgoztak ki, amelyek képesek a fűrészáru szilárdságának közvetlen becslésére, illetve – az EU országaiban – a szilárdsági kategória meghatározására. Ezeket az alapelveket és eljárásokat a következő fejezetben ismertetjük részletesen.

A gépi szilárdsági osztályozásnak több előnye is van a vizuális osztályozással szemben. E módszerek lényegesen gyorsabban és megbízhatóbban tudják meghatározni a szilárdsági kategóriát, mint a vizuális osztályozás, az üzemeltetésük pedig jelentősen olcsóbb mivel nincs, vagy csak nagyon alacsony munkaerő igényük van, és emellett magasabb szilárdsági osztályokba sorolást is lehetővé tesznek (a vizuális osztályozással elérhető legmagasabb

szilárdsági kategória egy kivétellel a C30). Hátrányuk elsősorban a jelentős beruházási költség. Ez főként annak köszönhető, hogy a kifejlesztésük során költséges vizsgálatokkal kell igazolni a megbízhatóságukat, mely jelentős számú fűrészáru szilárdságvizsgálatát (törésteszt) kívánja meg. Emellett egyes berendezések rendszeres kalibrációra is szorulnak, ami további költségtényező.

Magyarország a szerkezeti faanyag gyártása és alkalmazása tekintetében sajnos sok tekintetben le van maradva Európa többi országától. Az EU-s csatlakozást és szabványharmonizációt megelőzően Magyarországon is létezett fűrészáru osztályozási szabvány (MSZ 10144 [11]), ezt azonban nagyon ritkán alkalmazták. Eredeti formájában nem felelt meg az MSZ EN 14081:1 [5] szabvány követelményeinek sem, és nem volt elegendő érdeklődés a szabvány módosítására és harmonizálására az MSZ EN 1912-n [4] keresztül. Emiatt jelenleg nincs hazai nemzeti osztályozási szabvány. Az a kevés számú cég, amely Magyarországon fűrészáru szilárdsági osztályozással foglalkozik, a német nemzeti szabványt (DIN 4074 [9]) használja. Emellett sajnálatos az is, hogy a hazai statikus tervezők sok esetben csak egyetlen szilárdsági kategóriát (C24) ismernek, ami korlátozza a hazánkban termelhető és értékesíthető szerkezeti fűrészáru mennyiségét. Gépi szilárdsági osztályozást Magyarországon egyáltalán nem használnak.

A faanyag roncsolásmentes szilárdságbecslésével Magyarországon már a '90-es évek eleje óta foglalkoznak [12]. Ezeknek a vizsgálatoknak az eredménye lett a 2000-es években kifejlesztett PLG (Portable Lumber Grader) fűrészáru osztályozó berendezés [13]. A cikkben bemutatott kutatás célja ennek a berendezésnek a minősítése és további fejlesztése volt. A konkrét célkitűzések az alábbiak voltak:

- A meglévő osztályozó berendezés MSZ EN 14081 [5-7] szerinti minősítéséhez szükséges vizsgálatok elvégzése;
- A meglévő rendszer algoritmusának fejlesztése további becslő paraméterek bevonásával;
- Továbbfejlesztett osztályozó berendezés tervezése és megalkotása.

2. Műszeres fűrészáru osztályozási eljárások

A gépi fűrészáru osztályozás gyakorlata különböző szilárdságbecslő paraméterek roncsolásmentes vizsgálatán alapszik. Mint korábban említettük, számos tényező befolyásolja a faanyag szilárdságát. Ezek egy része – pl. a rostlefutás, bizonyos károsodások stb. – közvetlenül érzékelhető, más részük pedig a szilárdság mellett más, roncsolásmentesen értékelhető paramétereket is hasonlóan befolyásol (pl. rugalmassági modulusz), így ezek jó összefüggést mutatnak a szilárdsággal. Az alábbiakban bemutatjuk ezeket a paramétereket és a mérési alapelveket.

2.1 Az átlagos sűrűség mérése

A fűrészáru sűrűsége és szilárdsága közötti kapcsolat régóta jól ismert [1, 14]. Mikroszerkezeti szinten a fák

javarészt hosszúkas, csőszerű sejtekből épülnek fel. A sejtfa sűrűsége (1560 kg/m^3) fajfától és egyéb tulajdonságoktól független, állandó érték, a sejtüreg élő állapotban vízzel telített, az elhalt fában pedig általában üres. Ebből logikusan következik, hogy a nagyobb testsűrűség azt jelenti, hogy az adott anyagban nagyobb a sejtfa aránya, azaz a porózus anyag keresztmetszetében több anyag áll rendelkezésre a mechanikai terhelés felvételére.

Természetesen a fenti magyarázat általánosítás. Számos olyan egyéb tényező van, szubmikroszkópikus, mikroszkópikus, és makroszkópikus szinten egyaránt, ami szintén befolyásolja a szilárdságot, sok esetben jelentős mértékben. A sejtfa sűrűségén kívül annak szubmikroszkópikus szerkezete (és azon belül is elsősorban a korábban már említett mikrofibrilla szög), mikroszkópikus szinten pedig pl. a különböző típusú sejtek jelenléte és aránya (melyeknek csak egy része szolgálja a faanyag szilárdítását, míg a többi a víz és tápanyagok hossz- és keresztirányú szállítását, vagy azok tárolását végzi) is befolyásolja a szilárdságot, miközben nem feltétlenül befolyásolja jelentősen a sűrűséget.

A fentiekén túl átlagos sűrűség és a szilárdság összefüggését bizonyos makroszkópikus jellemzők is nagyon jelentősen rontják. Ezek közül is legfontosabb a göcsök jelenléte. A göcsök a fa növekedése során annak anyagába folyamatosan beágyazódó faszövet-részek. Jellegzetességük, hogy a rostirányuk jelentősen (jellemzően $60-90^\circ$ -kal) eltér a fűrészáru hossz tengelyétől, és emellett sok esetben viszonylag lazán kapcsolódik a normál szöveti részekhez. Emiatt a hosszirányú mechanikai igénybevételekkel (különösen húzással) szemben elhanyagolható ellenállást mutat, tehát a szilárdságot jelentősen csökkenti. Ugyanakkor a göcsök szövete jellemzően nagy sűrűségű, azaz a fűrészáru átlagos szilárdságát ezzel párhuzamosan növeli.

A téglatest alakú fűrészáru átlagos sűrűsége nagyon egyszerűen mérhető; mindössze a fizikai méretek és a tömeg ismeretére van szükség. A fenti okoknál fogva azonban a sűrűség, mint szilárdságbecslő paraméter csak igen korlátozott pontossággal alkalmas a szilárdság becslésére ($r^2 \approx 0,50 \dots 0,60$ [12]). Ennek ellenére a sűrűséget az egyszerű mérhetőség és egyéb okok miatt is előszeretettel alkalmazzák a szilárdság becslésekor, azért is, mert más eljárásokkal kombinálva nagyban pontosíthatja az eredményeit.

2.2 Szilárdságbecslés a fűrészáru lehajlásának mérésével

A sűrűség mellett az egyik legmegbízhatóbb szilárdságbecslő paraméter a faanyag rugalmassági modulusza (MOE). A MOE-t a faanyag fizikai, szubmikroszkópikus, mikro- és makroszerkezeti sajátosságai hasonlóan befolyásolják, mint a szilárdságot. Ezért a rugalmassági modulusz és a szilárdság között jellemzően igen jó összefüggés mutatkozik ($r^2 \approx 0,75$ [12]).

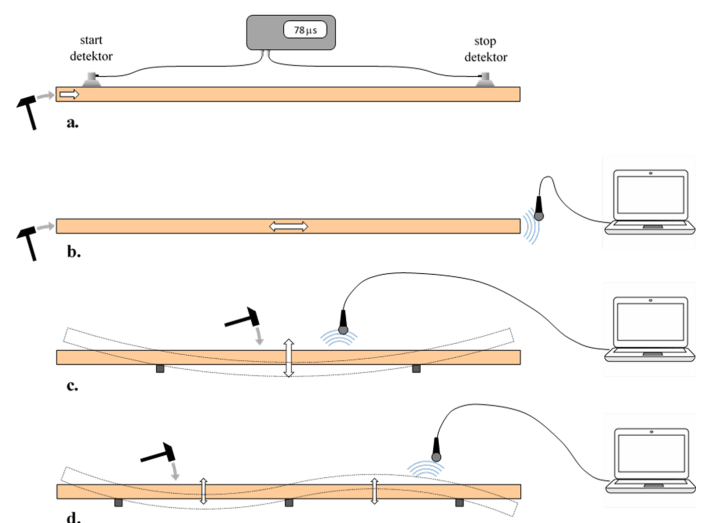
A MOE mérésére többféle lehetőség is kínálkozik. A hagyományos megoldás a faanyag fizikai deformációja. Mivel a faszervezetekben a mértékadó terhelés jellemzően

a hajlítás, így a legcélszerűbb a hajlító rugalmassági modulusz mérése. A gyakorlatban ezt gyártósori sebesség mellett, terhelt görgők közötti átengedéssel szokták megvalósítani. Több gyártó is kínál ilyen alapelveken működő osztályozó berendezéseket, különböző mérési elrendezések alkalmazásával (3, 4 és 5 pontos hajlítás, kétirányú hajlítás stb.)

A hajlításra alapuló berendezéseknek is megvannak azonban a limitációi. A fűrészáru méretétől függően nem minden esetben lehet megfelelő deformációt létrehozni (különösen élükre hajlítani nehéz a pallókat, pedig a gyakorlatban ez a gyakoribb igénybevétel). Emellett az ismételt jelentős igénybevétel miatt a berendezések hajlamosak a mechanikai meghibásodásra, illetve az erőmérő cellák rendszeres (és általában elég költséges) kalibrációt igényelnek [15, 16]. Emiatt a közvetlen hajlításos rugalmassági modulusz mérést ma már ritkábban alkalmazzák, a szerepét egyre inkább a vibrációs vizsgálatok veszik át.

Az MOE és a szilárdság közötti kapcsolat jó, de természetesen nem tökéletes. Bár a két paramétert a fizikai és szerkezeti sajátosságok hasonlóan befolyásolják, de a szilárdság szempontjából különösen meghatározó a faanyag jelentős inhomogenitása – a hirtelen sűrűségi és szerkezetbeli változások, amelyek feszültséggyűjtő helyként funkcionálnak és gyorsíthatják a tönkremenetelt.

(Fontos tudni, hogy a fa ún. viszkoelasztikus anyag. Ez azt jelenti, hogy az igénybevétel hatására létrejövő deformáció nagy része elasztikus, azaz a rugalmassági határon belül az igénybevétellel arányos, és azonnal megjelenő deformáció. A deformációnak viszont van egy viszkózus komponense is, amely lassabban megy végbe. Ennek megfelelően különbséget teszünk az ún. dinamikus és statikus rugalmassági modulusz között. A faanyag gyors hajlításával, és a vibrációs eljárásokkal is a dinamikus MOE mérhető, amely a viszkózus deformáció hiánya miatt



2. ábra: A fűrészáru rezgésein alapuló rugalmassági modulusz meghatározási eljárások:
a) közvetlen hangsebesség mérés;
b) longitudinális sajátrezgés mérés;
c) és d) hajlítási sajátrezgés mérés, 1. ill. 2. módus

kb. 10%-kal magasabb, mint a statikus MOE. Az eltérés a mérési eljárástól is függ. Szilárdságbecslés tekintetében ez általában nem jelent gondot, mivel az összefüggések megállapításakor mindig az adott módon mért rugalmassági moduluszra állítunk fel becslő modelleket.)

2.3 Szilárdságbecslés vibrációs eljárásokkal

A rugalmassági modulusz mérésére a közvetlen hajlítás mellett más, a faanyag rezgéseire alapuló eljárások is használhatók. Ezek kivitelezése sok esetben egyszerűbb és olcsóbb, mint a fizikai hajlítás, és kiküszöbölik az utóbbi hátrányait is (nincs szükség nagy terhelésekre, gyakori kalibrációra, és nem áll fenn a mechanikai meghibásodás veszélye.) Többféle vibrációs eljárás is létezik (2. ábra); mindezeknek megvannak a maga előnyei és limitációi [17].

A rugalmassági moduluszt legegyszerűbben közvetlen hangsebesség méréssel határozhatjuk meg. Ennek során az anyagban egy fizikai lökéshullámot indítunk el, és mérjük annak terjedési idejét két, ismert távolságú pont között, amiből kiszámíthatjuk a hang átlagos terjedési sebességét. A terjedési sebességből a rugalmassági modulusz hosszú, karcsú prizmatikus rudak (pl. fűrészáru) esetén az alábbi, nagyon egyszerű képlettel számítható:

$$E_{\text{long}} = \rho v^2, \quad (1)$$

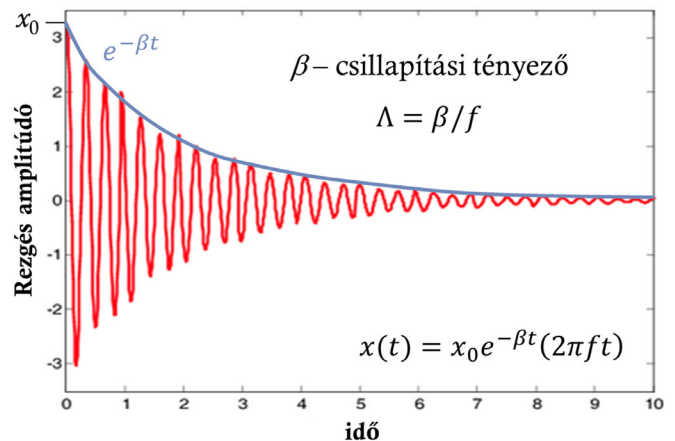
ahol ρ a faanyag sűrűsége, és v a hang terjedési sebessége.

A mérés kivitelezéséhez általában a fához rögzített gyorsulásérzékelőket használunk, a lökéshullámot pedig valamilyen fizikai behatással (pl. kalapácsütés) hozzuk létre. Mivel a lökéshullám terjedése során az anyag ismételtlen összenyomódik majd széthúzódik, a méréssel a húzó- és nyomórugalmassági modulusz egyfajta sajátos átlagát tudjuk meghatározni. A módszer hátránya, hogy viszonylag lassú és nehezen gépesíthető, ezért fűrészáru gyártás közbeni minősítésére ritkán használják (viszont például furnérok – a farönkök hámozásával előállított, 2-4 mm vastagságú, vékony falemezek – vizsgálatokor ezt a módszert alkalmazzák, furneralapú szerkezeti termékek gyártásakor, ld. Brashaw [18]).

A hangsebesség meghatározására célszerűbb módszer a longitudinális sajátrezgési frekvencia mérése. A fűrészáruban terjedő hanghullám annak végei között oda-vissza pattanva rezgésbe hozza azt, és ennek a rezgésnek a frekvenciájából a hangsebesség egyszerűen meghatározható:

$$v = 2 f L, \quad (2)$$

ahol f a longitudinális sajátrezgési frekvencia, és L a fűrészáru hossza. A sajátrezgési frekvencia meghatározásához a rezgéseket általában mikrofonnal érzékeljük, amiből a frekvenciát gyors FFT analízissel határozzuk meg. A mérés során a lökéshullám mellett más forrásból származó rezgések (pl. felületi hullámok, nyíróhullámok, a belső szerkezetből adódó többszörös visszaverődések) is jelentkeznek. Ideális esetben a nyomó-húzó lökéshullámból származó frekvencia adja a legerősebb jelet, de érdemes előre kijelölni, hogy mely tartományban várható ennek a frekvenciának a jelentkezése.



3. ábra: Csillapítási tényező (β) és logaritmusos dekrementum (Λ)

A hangsebességmérésen és longitudinális rezgéseken alapuló eljárás hátránya, hogy a faanyag keresztmetszétének csak egy részére kiterjedő, a szilárdságot jelentős mértékben befolyásoló jellegzetességek (pl. akár jelentős méretű göcsök) nem befolyásolják jelentősen a terjedési sebességet, mivel a hanghullám „elkerüli” a korlátozott kiterjedésű anomáliát (pontosabban szólva: a hullámfront csak minimális mértékű torzulást szenved). Így a számított MOE értékek és a hajlítószilárdság közötti összefüggés kevésbé szoros, különösen göcsös anyag esetében. Ezért a módszert érdemes kiegészíteni valamilyen további szilárdságbecslő eljárással, amely a göcsök és egyéb, helyi jellegzetességek kimutatására is alkalmas.

Míg ezek a korlátozott kiterjedésű anomáliák a rezgés frekvenciáját kevésbé befolyásolják, a rezgés energiájának egy jelentős részét el tudják nyelni. Ennek megfelelően a rezgés csillapódása alkalmasabb lehet az ilyen problémák kimutatására. Ilyenkor a csillapódó rezgés csillapítási tényezőjét, vagy az ún. logaritmusos dekrementumot (3. ábra) használjuk becslő paraméterként. A csillapodást sokan igyekeztek vizsgálni és bevonni a becslő paraméterek közé, azonban az energia elnyelésére számos egyéb tényező is hatással van, így ennek a megoldásnak is megvannak a korlátai.

További lehetőség a hajlítási sajátrezgési frekvencia (és csillapodás) mérése. Ilyenkor az anyagot két (vagy több) rugalmas támaszra helyezük, és a támaszközben, a hossz tengelyre merőlegesen rezgésbe hozzuk azt. A rezgési frekvencia alapján a hajlító rugalmassági modulusz meghatározható. A számításhoz leggyakrabban a rezgést leíró differenciálegyenlet másodfokú közelítéséből származó Euler egyenletet használjuk:

$$E_{\text{trans}} = \left(\frac{2f_n}{\gamma_n \pi} \right)^2 \frac{mL^3}{I}, \quad (3)$$

ahol:

- n – a rezgés módusa (két alátámasztás esetén 1, három alátámasztásnál 2, stb.),
- f_n – az n . módusban mért sajátrezgési frekvencia,
- γ_n – a módustól függő tényező ($\gamma_1 = 2,267$; $\gamma_2 = 6,249$),
- m – a fűrészáru tömege,
- I – a keresztmetszet másodrendű nyomatéka.

A (3) képlet hátránya, hogy a nyírásból származó alakváltozást nem veszi figyelembe, így a mért érték kissé pontatlan, de a különbség karcsú rudaknál (magasság:támaszköz $\leq 1:20$) elég csekély. A Timoshenko-féle, negyedfokú közelítés pontosabb eredményt ad, és a nyírórugalmassági modulus meghatározására is lehetőséget ad, de nincs zárt formájú megoldása (ehelyett numerikus eljárással számítható), és két különböző módban mért sajátrezgési frekvenciát igényel [19].

A mérés kivitelezése a longitudinális sajátrezgés méréséhez hasonló, azonban az eredményül kapott hajlítórugalmassági modulus jobban korrelál a hajlítószilárdsággal. A fűrészáru karcsúságának köszönhetően az Euler egyenlet általában jól használható, azonban, ha élére állítva mérjük a fűrészárut, már nem biztos, hogy megfelelő eredményt kapunk. A csillapodás értékelése itt is tovább finomíthatja az eredményeket.

2.4 Szilárdságbecslés optikai és lézeres letapogatással

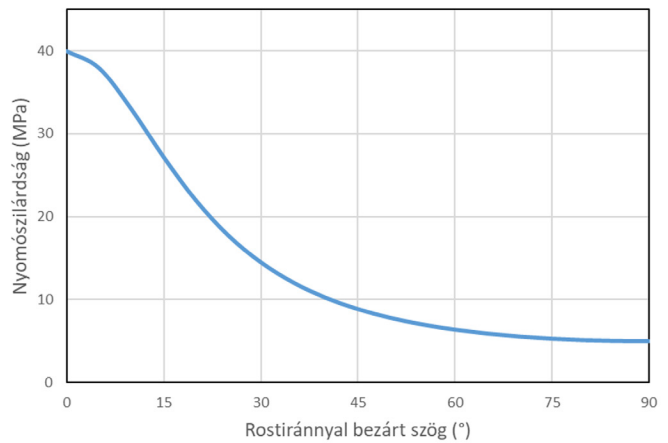
A fűrészáru lapfelületének, oldalfelületének, és a végeknek (az ún. bütüfelületnek) optikai letapogatásával gyakorlatilag ugyanolyan információt nyerhetünk, mint a vizuális értékeléskor. Ilyenkor a számítógépet „meg kell tanítani” az egyes fahibák és jellegzetességek felismerésére, és a szabályszerűségekre, ami alapján értékelheti, szilárdsági osztályba sorolhatja a fűrészárut. Ez utóbbi alapulhat valamelyik nemzeti osztályozási szabvány előírásain, vagy a berendezés fejlesztőjének a saját mérésein is.

A módszer alkalmazását a múltban nehezítették az informatikai rendszerek korlátai. Emiatt az osztályozás sokáig csak szűrkeskálás felvételeken alapult, ami nem mindig segítette a jellegzetességek pontos azonosítását, és elsősorban az egyszerűbb szerkezetű, fenyő faanyagon volt használható. A mai rendszerek sokkal kifinomultabbak, és a mesterséges intelligencia is sokat segített ezek fejlesztésében.

Az optikai módszerek pontosságát korlátozza, hogy a felületről csak kétdimenziós képet kapunk. Egyes jellegzetességek – pl. a repedések, tompaélűség stb. – felismeréséhez hozzájárul, ha a felület profiljáról is rendelkezünk információval. Erre biztosít lehetőséget a lézeres profil mérés, ahol egy, a felületre ferdén vetített (látható vagy infravörös) lézercsík parallaxikus eltolódásából számíthatjuk a felület kiemelkedéseit vagy besüllyedéseit. A két módszert gyakran alkalmazzák együttesen.

2.5 Lézeres rostirány térképezés

A faanyag szövete rostirányban a legerősebb; az ettől az iránytól való eltérés hatására a szilárdság meredeken csökken. Ezért a faanyag rostiránya erősen befolyásolja a szilárdságot (4. ábra). A rostirány jellemzően egy fűrészárun belül sem állandó; befolyásolják a különböző makroszerkezeti

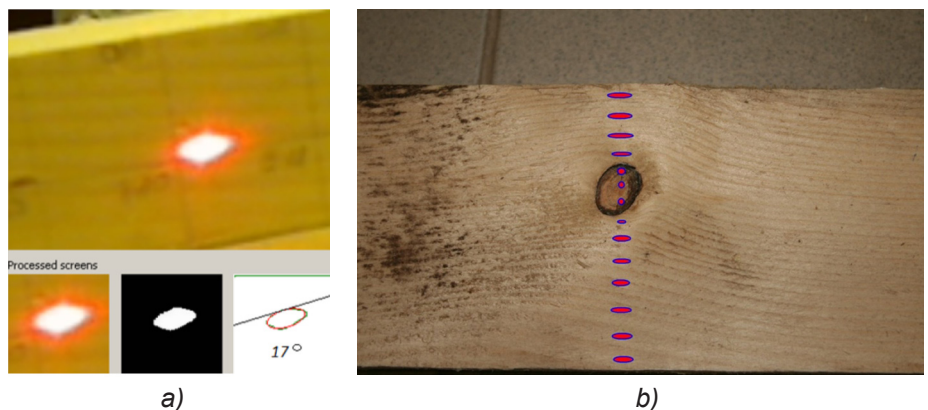


4. ábra: A faanyag nyomószilárdságának változása a rostirány függvényében (Hankinson [20] alapján)

sajátosságok. Különösen a göcsöknél és azok környezetében tapasztalható ún. zavarodott rostúság, a rostirány eltérése a longitudinálisról.

A rostirányt sok esetben nem egyszerű vizuálisan/optikailag értékelni, és az anyag sűrűségére sincsen hatással. A rostirány mérését az ún. tracheida effektus kihasználásával tudjuk elvégezni. Ennek lényege, hogy a faanyag felületére vetített kör alakú lézer pontot a fa rostszerkezete eltorzítja, így egy többé-kevésbé elliptikus folt jelenik meg (5a. ábra). Az ellipszis hosszú tengelyének iránya megegyezik a rostirány felületi vetületével, a hosszú és rövid tengely arányából pedig az ún. bukási szögre, azaz a rostoknak a felszínnel bezárt szögére következtethetünk (bővebben ld. [21]).

A gyakorlatban a módszert úgy alkalmazhatjuk, hogy a fűrészáru áthaladásakor annak teljes szélességében lézer foltokat vetítünk (5b. ábra), majd az áthaladás során folyamatosan beolvassuk, és digitálisan kiértékeljük a foltok alakját. Így megrajzolhatjuk a fűrészáru teljes rostirány-térképét, amelyen látható a rostirány eltérése a hossz tengelytől. A módszer különösen jól alkalmazható a fenyő fűrészáru szilárdságát nagymértékben befolyásoló göcsök kimutatására. A göcsök közelében a fa rostszerkezete zavarodott, magának a göcsnek a felülete pedig a meredek bukási szögekből érzékelhető.



5. ábra: a) A faanyag rostirányának vizsgálata a felületre vetített lézer folt torzulása alapján; b) a fűrészáru felületének szkennelése ([22, 23], a szerzők engedélyével)

2.6 A fűrészáru sűrűségprofiljának meghatározása

Míg, amint láttuk, a fűrészáru átlagos sűrűségéből a sok egyéb befolyásoló tényező miatt viszonylag kis pontossággal tudunk következtetni a fűrészáru szilárdságára, a sűrűség fűrészárun belüli eloszlása fontos információt jelent a szilárdsági osztályozás szempontjából. Az átlagosnál alacsonyabb sűrűségű részek a faanyagban belüli üregek (rovarrágás, repedések stb.) jelenlétére utalnak, míg a nagy sűrűségű göcsök jelenlétére a sűrűség hirtelen megnövekedése utal egy adott területen.

A sűrűségeloszlás meghatározása – csakúgy, mint más anyagok, vagy akár az orvosi alkalmazások esetében – az elektromágneses sugarak visszaverődése vagy elnyelése alapján történhet. Elméletileg erre a célra alkalmas lehet az alacsonyabb frekvenciájú mikrohullámú vagy infravörös sugárzás is, azonban ez, a nagyobb hullámhossznak köszönhetően viszonylag gyenge felbontást eredményez. A gyakorlatban ezért az alacsony hullámhosszú röntgen vagy – ritkábban – gamma sugárzást alkalmazzuk.

A fűrészáru sűrűségeloszlásának vizsgálatához használt nagy teljesítményű ipari röntgen berendezések jellemzően az átsugárzott energia jelerősségét mérik. A fűrészárut áthaladása közben teljes szélességében folyamatosan szkennelik, és megalkotják annak sűrűségértéképét. A röntgenfelvételek segítségével mm-es, vagy annál jobb felbontású sűrűségértéképet készíthetünk. Az eljárás önmagában ritkán alkalmazott a fűrészáru szilárdsági osztályozásához, mivel bizonyos jellemzőkről – pl. rostirány, mikrofibrilla szög stb. – nem ad információt, azonban nagyon jól kombinálható más eljárásokkal, a minél pontosabb szilárdságbecslés érdekében. (Megj.: a röntgensugárzáson alapuló tomográfia – CT – még jobb eredményeket szolgáltat, azonban a szilárdsági osztályozásra magas költsége miatt nem alkalmazzák. Létezik viszont a rönkök optimális felfűrészelését segítő nagyméretű ipari CT berendezés, melyekkel a nagy kapacitású óriás fűrészüzemekben olyan mértékű minőségjavulás érhető el, aminek köszönhetően a beruházási költség néhány év után megtérülhet).

2.7 Kombinált eljárások

A gyakorlatban az összes felsorolt mérési alapelvnek megvannak az előnyei és a korlátai. Emiatt önmagában egyik eljárással sem lehet a fűrészáru szilárdságát elég pontosan becsülni. Az eljárásokat szinte minden esetben kombinálni szokták egymással.

A leggyakoribb kombináció valamelyik rugalmassági modulusz mérési eljárás és az átlagos sűrűségmérés kombinálása. Ez gyakorlatilag elkerülhetetlen, hiszen a rugalmassági modulusz számításához a vibrációs eljárásokban mindig szükség van a fűrészáru sűrűségére vagy tömegére. Mivel az MSZ EN 338-as [3] szabványban a sűrűség és a rugalmassági modulusz karakterisztikus értéként szerepel, ez alapján a fűrészáru besorolása egyszerűen megoldható.

További eljárások beépítésével tovább pontosítható a becslés pontossága, elsősorban a göcsök méretére és

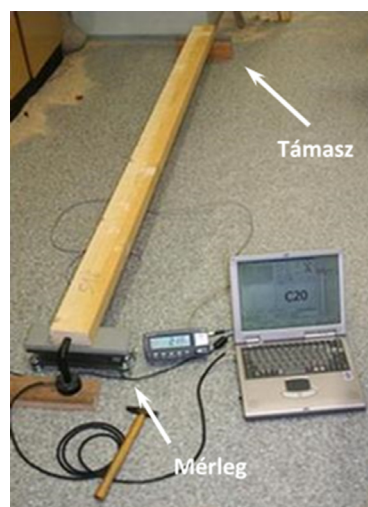
elhelyezkedésére vonatkozó információknak köszönhetően. Az eljárásoknak sokféle kombinációját használják. Ezek közül is kiemelkedik a Microtec cég Goldeneye rendszere, melynek legfejlettebb verziója akár hatféle eljárásból származó információk (longitudinális sajátrezgési frekvenciamérés, infravörös nedvességmérés, optikai és lézeres letapogatás, lézeres rostiránymérés és röntgen sűrűségmérés) kombinációjával nagyon pontos információt szolgáltat a fűrészáruról és annak szilárdságáról.

3. Anyagok és módszerek

A cikkben bemutatott kutatás egy nagy lélegzetvételű projektet ismertet, melynek során számos vizsgálat folyt, és rengeteg eredmény született. A cikk ezeknek a tömör és kivonatolt összefoglalója. A kutatás két nagy fejezetből állt, amit az alábbiakban ismertetünk:

3.1 A PLG fűrészáru osztályozó berendezés minősítéséhez szükséges vizsgálatok elvégzése

A kísérletek során 436 db 5x10 cm keresztmetszetű 2 m hosszúságú légszáraz ($16\pm 2\%$), különböző szilárdsági osztályba tartozó lucfenyő (*Picea abies*), erdei fenyő (*Pinus sylvestris*) és vörösfenyő (*Larix decidua*) próbatesteken végeztünk kísérleteket. A fűrészáru osztályozására a korábbiakban kifejlesztésre került PLG hordozható fűrészáru osztályozó berendezést használtuk (6. ábra). A berendezés működése a longitudinális sajátrezgencia mérésén alapul. A mért E_{long} értéket a berendezés korrigálja a statikus és dinamikus rugalmassági modulusz közötti különbségnek megfelelően, kiegészítve egy nedvességtartalom korrekcióval, valamint a göcsösség figyelembevételére egy további korrekciós paraméterrel. A korrekciós tényezők megállapítása korábbi magyarországi, illetve Japánban történt mérések alapján történt [24]. A berendezés a sűrűséget a fűrészáru méretei, és a tömeg mérése alapján határozza meg (a tömeget a berendezés a fűrészáru egyik végén elhelyezett támasznál méri, aminek a kétszerese adja a teljes tömeget, egyenletes



6. ábra: A PLG (Portable Lumber Grader) osztályozó berendezés

sűrűségeloszlást feltételezve). A rugalmassági modulusz számítása ezután a mért longitudinális sajátfrekvenciából az (1) és (2) egyenletek alapján történik, és a berendezés ezt korrigálja az alábbiak szerint:

$$E_{PLG} = \left[E_{long} \left(1 + \frac{u - 12\%}{50\%} \right) \right] 0,87 + 0,6 - 6,2 CKDR, \quad (4)$$

ahol:

- u – a fűrészáru nedvességtartalma (ellenállásos nedvességmérővel mérve);
- CKDR – koncentrált göcsátmérő arány (meghatározást ld. később, az (5) képletnél).

Az MSZ EN 338 [3] szerinti szilárdsági osztályba sorolás a fenti módon mért sűrűség és nedvességtartalom értékek alapján történt, a szabványban az egyes osztályokhoz megadott karakterisztikus sűrűség és rugalmassági modulusz értékek alapján. A besorolás alapja, hogy a fűrészárúnak mind a sűrűség, mind a szilárdság alapján teljesítenie kell az adott szilárdsági kategória előírásait.

3.2 További becsülő paraméterek vizsgálata fűrészáru osztályozó berendezés algoritmusának fejlesztéséhez

A vizsgált fűrészáruk osztályozását követően, a törésteszt elvégzése előtt, a vizsgált anyagok egy részén (243 próbatesten) további vizsgálatokat végeztünk. Ennek célja volt, hogy a PLG-s vizsgálati eredményeket további szilárdságbecslő paraméterekkel egészítsük ki, amelyekkel a szilárdságbecslés pontossága javítható. A mérések során a következő paraméterek felvételére került sor:

- **Göcssterület arány** (Knot Area Ratio, KAR). Ezt a paramétert gyakran alkalmazzák az európai vizuális szilárdsági osztályozási gyakorlatban, és a régi magyar osztályozási szabvány (MSZ 10144:1986 [11]) is ezt használta. A mérés azon alapul, hogy a göcsös részen a faanyagot képzeletben elvágjuk, és vizsgáljuk, hogy a keresztmetszetből mekkora arányt foglalnak el az átvágott göcsök. Mivel a fenyő anyag növekedése során az ágak általában azonos magasságban, ún. ágörvek formájában jelentkeznek, ezért a fenyő anyagban több göcsöt tartalmazó göcszónák jelennek meg (a 15 cm-es szakaszon belül található göcsöket úgy kell tekinteni, mintha egy keresztmetszetben lennének). A teljes keresztmetszetre értett

KAR-on túl külön kell vizsgálni a göcssterület-arányt a keresztmetszet alsó és felső 25 %-ában (azaz a hajlítás során kritikus, húzott és nyomott övben), és kiszámítani az ún. szegély göcssterület arányt (margin Knot Area Ratio, mKAR, 7a. ábra.)

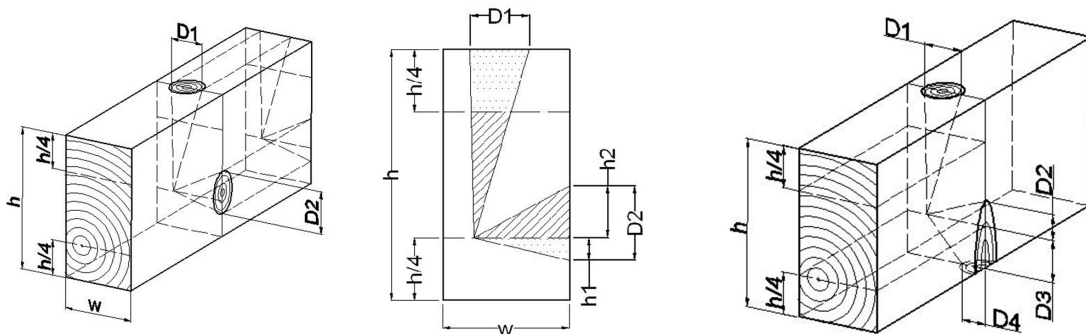
A KAR és az mKAR meghatározása nagy rutint és a faanyag növekedési sajátosságainak alapos ismeretét feltételezi. A kutatás során a minél pontosabb eredmények érdekében a göcsök méretét és elhelyezkedését minden esetben pontosan megmértük, és a keresztmetszetet ez alapján rekonstruáltuk, hogy a paraméterek pontosan számíthatók legyenek.

- **Koncentrált göcsátmérő arány** (Concentrated Knot Diameter Ratio, CKDR). Európában ritkábban alkalmazott paraméter, azonban pl. a japán osztályozási gyakorlatban ezt használják, könnyebb és egyértelműbb mérhetősége miatt. Ebben az esetben a felszínen látható (elliptikus göcsök esetében a fűrészáru hossz tengelyére merőlegesen mért) göcsátmérők összegét osztjuk a fűrészáru kerületével (ld. 7b. ábra):

$$CKDR = \frac{\sum D_i}{2(h+w)}. \quad (5)$$

A szegély göcssterület arányhoz hasonlóan itt is külön meghatároztuk a szegély göcsátmérő arányt (mCKDR), ahol csak a fűrészáru alsó és felső negyedében látható göcsöket (átlagó göcsök esetén csak az átmérőnek a külső hányadát) vettük figyelembe.

- **Átlagos évgűrű szélesség** ($a_{\text{átl}}$)
- **Maximális évgűrű szélesség** (a_{max})
- **Sűrűség** (ρ) – tömeg és térfogat alapján
- **Statikus rugalmassági modulusz** (E_{stat}) az EN 408-as [25] szabvány szerint
- **Dinamikus rugalmassági modulusz** (E_{long1}) – longitudinális rezgéssel 1. módusban
- **Dinamikus rugalmassági modulusz** (E_{long2}) – longitudinális rezgéssel 2. módusban
- **Dinamikus rugalmassági modulusz** (E_{dyn1}) – hajlító rezgéssel 1. módusban, élére állított pozícióban
- **Dinamikus rugalmassági modulusz** (E_{dyn2}) – hajlító rezgéssel 2. módusban, élére állított pozícióban
- **Csillapítás** ($\Lambda \times 1000$) – mivel a logaritmikus dekrementum faanyag esetében alacsony érték, itt a tényező ezerszeresét használtuk. A csillapítást az E_{dyn1} mérés során értékeltük.



7. ábra: A KAR/mKAR és a CKDR/mCKDR meghatározásának alapelve

(h – a próbatest magassági mérete; D_i – az egyes göcsök részleges vagy teljes átmérője, az ábrának megfelelően.)

A dinamikus tulajdonságok mérése során megfelelő, rugalmas támaszokat helyeztünk a próbatest alá (hajlító rezgések esetén a rezgési csomópontokba.) A rezgést kis fémkalapáccsal gerjesztettük, és mikrofon segítségével továbbítottuk a számítógépbe. A rezgéseket a számítógépre telepített FFT analízis program segítségével értékeltük, és a rugalmassági modulusz értékeket az így kapott frekvenciák alapján számítottuk az (1) és (3) képletek segítségével.

3.3 A hajlítoszilárdság és statikus rugalmassági modulusz mérése

A roncsolásmentes fűrészáru osztályozást és a további becslő paraméterek mérését követően került sor a próbatestek törésvizsgálatára. A törésteszteket 4 pontos hajlítási sémával végeztük, az MSZ EN 408:2010 [25] szabvány előírásainak megfelelően, a próbatestüket élükre állítva. A próbatestek méretétől függően a mérést kétféle anyagvizsgáló berendezésen végeztük. A kisebb, max. 2 m hosszúságú próbatestek méréséhez mechanikus meghajtású, FPZ 100/1 típusú anyagvizsgáló berendezést használtunk, 100 kN-os kapacitású erőmérő cellával határig mérő berendezés. A lehajlást nagy pontosságú, ME 46 típusú videoextensométerrel mértük.

A nagyobb próbatestek mérése a Soproni Egyetem faszervezetvizsgáló (TST) laboratóriumában, található MTS típusú anyagvizsgáló géppel történt. A berendezés hidraulikus meghajtású 200 bar-os üzemi nyomáson működő, 2 db 250 kN-ig terhelhető nyomófejrel rendelkezik. Az alakváltozás mérését e mérések során egy VA/100-as induktív elmozdulásmérővel mértük.

A töréstesztekre a roncsolásmentes vizsgálatokat követően néhány percen belül sor került, hogy az esetleges nedvességtartalom-változás hatásait minél inkább kiküszöböljük.

4. Eredmények és értékelés

4.1 A PLG fűrészáru osztályozó berendezés minősítése

A fűrészáru osztályozó berendezés minősítéséhez az MSZ EN 14081 [5-7] szabvány szerint 900 db próbatestre van szükség. Az itt bemutatott vizsgálatok ennek a mennyiségnek csupán szűk 50%-át jelentik.

A szabványnak való megfelelés tanúsításához a mérési eredményekből el kell készíteni az ún. Méret mátrixot és a Globális költség mátrixot (1. illetve 2. táblázat). A mátrixok az osztályozó berendezés által meghatározott szilárdsági osztályt (Mért osztály) hasonlítják össze a törésvizsgálattal meghatározott szilárdsági osztályokkal (Optimális osztály).

A Méret mátrix (1. táblázat) főátlójában azok a próbatestek találhatóak, ahol az osztályozó berendezéssel ugyanazt a szilárdsági osztályt

határoztuk meg, mint a törésvizsgálattal. A főátló fölötti területen az ún. alulosztályozott próbatestek száma látható; ezeket az osztályozó berendezés az optimálisnál alacsonyabb osztályba sorolta, azaz a biztonság irányába tévedett. A méretezési szempontjából különösen kritikusak a főátló alatti, ún. felülosztályozott próbatestek – itt az osztályozó berendezés a valóságosnál magasabb szilárdsági osztályba sorolta a próbatesteket. A szabvány szigorú előírást tartalmaz, amely korlátozza a felülosztályozott próbatestek mennyiségét.

A Globális költség mátrixot (2. táblázat) a Méret mátrix alapján állítjuk elő, úgy hogy a próbatestek számát egy, a szabványban megadott súlyozó tényezővel szorozzuk. A súlyozó tényező annál nagyobb, minél nagyobb a felülosztályozás mértéke. Az adott szilárdsági osztályban akkor minősíthetünk, ha a Globális költség mátrix felülosztályozott tartományában (főátló alatti terület) egy érték sem éri el a 0,2-es határértéket. Ez a 0,2-es érték szintén a szabványban meghatározott állandó. A mi rendszerünk esetében ehhez az értékhez a legközelebb eső érték 0,16 (C35/C40), amely megfelel a szabvány előírásainak, így a műszer az előzetes eredmények alapján alkalmas bármelyik szilárdsági osztályban való mérésre.

1. táblázat: A vizsgált 432 próbatest alapján létrehozott Méret mátrix (R = reject, osztályon aluli)

Optimális osztály	Mért osztály													
	C50	C45	C40	C35	C30	C27	C24	C22	C20	C18	C16	C14	R	
C50														
C45			1											
C40			1	5	4		1							
C35			1	1	4	3	1							
C30				2	7	7	2	4	2					
C27					1	4	2	6	0	2	2			
C24					1	3	6	10	2	1	1	1		
C22						1	3	19	9	6	10	5		
C20								7	7	7	9	3		
C18									2	4	2	23	11	4
C16						1		1	1	1	12	20	45	
C14											4	12	52	
R*												1	66	

2. táblázat: Az MSZ EN 14088 szabvány szerint elkészített Globális költségmátrix

Optimális osztály	Mért osztály														
	C50	C45	C40	C35	C30	C27	C24	C22	C20	C18	C16	C14	R		
C50	0,00														
C45		0,00	0,08												
C40			0,00	0,16	0,12		0,06								
C35				0,16	0,06	0,07	0,04								
C30					0,14	0,00	0,05	0,04	0,05	0,06					
C27						0,02	0,00	0,02	0,06	0,00	0,09	0,04			
C24							0,05	0,00	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03		
C22								0,04	0,06	0,00	0,06	0,11	0,13	0,12	
C20										0,05	0,00	0,07	0,09	0,06	
C18										0,03	0,06	0,00	0,15	0,18	0,00
C16											0,03	0,02	0,00	0,17	-0,06
C14												0,03	0,00	-0,08	
R*													0,02	0,00	

A felülosztályozás mellett érdemes szót ejteni az alulosztályozásról is. Míg az alulosztályozás nem jelent biztonsági kockázatot, gazdaságossági szempontból hátrányos, hiszen így nem használjuk ki megfelelően a fűrészáru teherbírási kapacitását. Mint az 1. és 2. táblázatból látható, a berendezés hajlamos a fűrészárut inkább alul-, semmint felülosztályozni. Mivel a faszerkezetek állékonysága kritikus, ezért ez voltaképpen így helyes, hiszen inkább legyen a szerkezet nagymértékben túlméretezett, semmint kismértékben alulméretezett és veszélyes. Ugyanakkor kívánatos az alulosztályozás mértékét csökkenteni, ami a minél pontosabb osztályozási eljárás alkalmazásával biztosítható. Ezt a célt szolgálja a kutatás második része, ahol a szilárdságbecslést további becselőparaméterek bevonásával igyekeztük pontosítani.

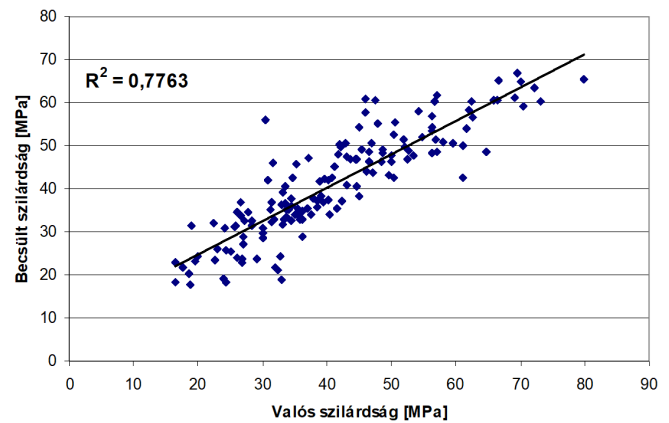
4.2 Az osztályozás pontosságának javítása további becselő paraméterekkel

A becselő paraméterek meghatározása és a törővizsgálat után korreláció vizsgálatot végeztünk egyenként az összes vizsgált becselő paraméter és a hajlítószilárdság között. Az eredményeket a 3. táblázat mutatja. A táblázatból jól látható, hogy számos paraméter – köztük is elsősorban a különböző módon mért rugalmassági modulusz értékek – viszonylag jó korrelációt mutat a hajlítószilárdsággal. A legjobb eredményt ezek közül a dinamikus hajlítórugalmassági modulusz adta. Ez nem meglepő, hiszen a hajlítórezgések során létrejövő feszültségeket és deformációkat (és ezen keresztül a rezgési paramétereket) ugyanazok a tényezők befolyásolják, mint a statikus hajlítás esetén.

A becslés pontosságának javításához olyan optimális becselőparaméter-kombinációt érdemes létrehozni és használni, ami a lehető legjobb javulást eredményezi a lehető legegyszerűbb módon, azaz minél kevesebb extra mérés és hozzáadott költség nélkül. A becslés legjobban úgy javítható, ha olyan paramétereket kombinálunk, amelyek külön-külön jól korrelálnak a hajlítószilárdsággal, viszont egymással nincsenek szoros összefüggésben.

3. táblázat: Korrelációk az egyes közelítő paraméterek és a hajlítószilárdság között

Paraméterek	Korrelációs koefficiens (R)
Göcsterület arány (KAR)	0,57
Szegély göcsterület arány (mKAR)	0,59
Koncentrált göcsátmérő arány (CKDR)	0,51
Koncentrált szegély göcsátmérő arány (mCKDR)	0,54
Átlagos évgyűrű szélesség (a_{at})	0,50
Maximális évgyűrű szélesség (a_{max})	0,48
Csillapítás (logaritmusos dekrementum, $\Lambda \times 1000$)	0,72
Sűrűség (ρ)	0,50
Statikus rugalmassági modulusz (E_{stat})	0,84
PLG-vel mért rugalmassági modulusz (E_{stat})	0,82
Rugalmassági modulusz, longitudinális rezgéssel, 1. módus (E_{long1})	0,79
Rugalmassági modulusz, longitudinális rezgéssel, 2. módus (E_{long2})	0,78
Rugalmassági modulusz, hajlító rezgéssel, 1. módus (E_{dyn1})	0,83
Rugalmassági modulusz, hajlító rezgéssel, 2. módus (E_{dyn2})	0,78



8. ábra: A mért és a többparaméteres becselő modell segítségével számított szilárdsági értékek közötti összefüggés

PI. az egyes rugalmassági modulusz értékek egymással nagyon szoros kapcsolatban vannak ($r^2 = 0,9 \dots 0,99$). Bár egyenként kitűnő becselő paraméterek, a kombinációjuk nem javítja jelentősen a becslés pontosságát.

A legjobb paraméterek kiválasztása érdekében elkészítettük a becselő paraméterek teljes mátrixát (ezt terjedelmi korlátok miatt itt nem adjuk közre, bővebben ld. Sismándy-Kiss [23]). A mátrix alapján kiderült, hogy a dinamikus hajlítórugalmassági modulusz mellett a becslést legjobban a szegély göcsterület arány és a csillapítás paraméterek bevonásával lehet javítani. Mivel a logaritmusos dekrementum a hajlítási sajátrezgés mérése során könnyen kiszámítható, így ez nem jelent extra mérést. A mKAR megállapítása vizuálisan, esetleg optikai letapogatással, rostírány méréssel, vagy a sűrűség térképezésével történhet – ennek során a teljes göcsterületarány (KAR) is könnyen számítható, így a végső becselő modellben érdemes e négy paramétert szerepeltetni. A többparaméteres lineáris modell illesztését STATISTICA® programmal végeztük, ennek eredménye a következő:

$$\sigma_h = 34,37 + 2,78 E_{\text{dyn1}} - 0,55 \Lambda - 10,06 \text{mKAR} - 23,19 \text{KAR} \quad (6)$$

ahol σ_h jelöli a fűrészáru 4 pontos terheléssel mért hajlítószilárdságát. Az ilyen módon előállított becselő paraméter és a hajlítószilárdság közötti kapcsolatot a 8. ábra mutatja. A korrelációs koefficiens 0,88, ami szignifikáns javulást jelent a PLG berendezéssel végzett becsléshez képest. A becslés hibája 8 MPa-ról 6,65 MPa-ra csökkent. Ennek megfelelően e becselőparaméterek kombinációjának alkalmazásával a fűrészáru osztályozó berendezés tovább fejleszthető, és mind az alul-, mind a felülosztályozási hiba jelentősen csökkenthető.

4.3 A fűrészáru osztályozó berendezés továbbfejlesztése

A gyakorlati tapasztalatok alapján a PLG osztályozóberendezés továbbfejlesztésére kétféle lehetőség kínálkozik. Egyrészt, a többparaméteres regresszióvizsgálat alapján lehetőség van a szilárdság pontosabb becslésére, a (6) összefüggésnek megfelelően. Ehhez fejleszteni kell a mérések értékelését végző programot (ami viszonylag egyszerű feladat), és újból el kell végezni a minősítéshez



9. ábra: A PLG+ ipari környezetben használható fűrészáru osztályozó berendezés

szükséges vizsgálatokat, ami jelentős munka befektetését és költségeket jelent. Emiatt a becslési eljárás fejlesztésére egyelőre nem kínálkozik lehetőség.

Az ipari körülmények között végzett mérések rávilágítottak a PLG berendezés néhány gyakorlati gyengeségére is. Ez alapján a műszer gyakorlati szempontok figyelembevételével fejleszthető, az alábbi módon:

- A gyakorlatban a deszkák és pallók hosszmerete nem egyforma, akár több cm-t is ingadozhat. Ez a sokszor akár 4-5 méteres anyag vizsgálatokor hosszadalmas méricskélést és adatbevitelt jelent, ami nagyban lelassítja a mérést.
- A gyakorlati próbák során kiderült, hogy az anyagok mozgatása és a mérés előkészítése során a támaszok könnyen elmozdulhatnak. Ha a fűrészáru alátámasztása nem szimmetrikus, az a tömeg mérése, és ennek következtében a sűrűség meghatározása során jelentős hibához vezethet.
- Az üzemi körülmények (szálló por, rezgések stb.) között végzett mérések során a szokványos informatikai eszközök (laptop) megsérülhetnek, viszonylag hamar tönkremehetnek.

A berendezést a fenti pontoknak megfelelően fejlesztettük tovább. Így készült el a PLG+ berendezés, kimondottan ipari körülmények között végzett méréshez optimalizálva (9. ábra). A berendezés egy mérleg helyett mindkét alátámasztásnál méri a fűrészáru tömegét robusztus ipari mérlegekkel. A hosszmerést lézeres távolságmérő segíti, mely bluetooth kapcsolattal csatlakozik a számítógéphez. A mért adatok kiértékelését sérülékeny laptop helyett egy megfelelő por- és rezgésvédelemmel rendelkező ipari tablet végzi, amelyet egy megfelelő állványzatra szerelt házba ágyaztunk be. Így a mérés ipari körülmények között is megbízhatóan végezhető, a meghibásodás veszélye nélkül.

Az új berendezés már sokkal alkalmasabb az ipari körülmények között végzendő mérésekhez, azonban természetesen számos továbbfejlesztési lehetőség is kínálkozik. Egyrészt, a becslés pontossága javítható az előző fejezetben említett módszerek és becslő paraméterek alkalmazásával. Másrészt, gyakorlati szempontból a módszer gyengesége a CKDR és KAR paraméterek hosszadalmas vizuális meghatározása; ezek automatizálásával a mérés gyorsítható, automatizálható. Ilyen módon elkészíthető

lehet a berendezés gyártósorra telepíthető változata is.

5. Összefoglalás és következtetések

Cikkünkben bemutattuk a fűrészáru osztályozásának Európában használt rendszerét, beleértve a szilárdsági osztályokat, és a vizuális és gépi szilárdsági osztályozási megoldásokat. Az utóbbi megoldások alapelveit részleteiben is ismertettük. Ezután bemutatásra kerültek saját kutatásaink, melyek részben egy már meglévő osztályozó berendezés minősítéséhez szükséges vizsgálatokra, részben az osztályozási módszer továbbfejlesztésére, becslési pontosságának javítására fókuszáltak. A kutatás eredményeiből az alábbi következtetések vonhatók le:

- Az előzetes vizsgálati eredmények alapján a PLG osztályozó berendezés megfelel az MSZ EN 14081-es szabvány [5-7] előírásainak, és várhatóan alkalmas a fenyő fűrészáru osztályozására a C40-es osztálytól lefelé minden szilárdsági kategóriában. A felülosztályozás mértéke a szabvány által megengedett határon belül marad.
- A berendezés sok esetben jelentősen alulosztályozza a fűrészárut, ami biztonsági szempontból előnyös, azonban a gazdaságosság szempontjából hátrányt jelent. Kívánatos a becslés pontosságának javítása, amivel az alulosztályozás mértéke csökkenthető.
- A 13 további becslő paraméter bevonásával végzett kísérletek alapján az osztályozás pontossága jelentősen javítható további paraméterek segítségével. A legjobb becslést a hajlítórezgésekkel mért rugalmassági modulusz, a csillapítás (logaritmikus dekrementum) és a göcsterületarány paraméterek kombinálásával értük el; ezekkel a becslés hibája jelentősen csökkenthető.

A gyakorlati tapasztalatok alapján továbbfejlesztett PLG+ berendezés célszerűen alkalmazható ipari körülmények között. A rendszer további fejlesztésére az új becslőparaméter-kombináció, illetve a göcsösségre vonatkozó paraméterek automatikus meghatározása nyújtja a legjobb lehetőséget.

Köszönetnyilvánítás

A publikáció a TKP2021-NKTA-43 számú projekt keretében, az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Molnár S., Varga F.-né, Fehér S., Németh R. 2000. A faanyag műszaki tulajdonságai. In.: Molnár S. (szerk.) Faipari Kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány, Sopron, 59-82. old.
- [2] Szalai J. 2001. Faszervezetek méretezését és gyártását befolyásoló sajátosságok. In: Wittmann Gy. szerk. Mérnöki Faszervezetek. II. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. Bp. 143-262. old.
- [3] MSZ EN 338:2016 Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 44 old.

- [4] MSZ EN 1912:2012 Szerkezeti fa. Szilárdsági osztályok. A vizuális szilárdsági osztályok és a fajok kapcsolata. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 18 old.
- [5] MSZ EN 14081-1:2016. Faszervezetek. Szilárdság szerint osztályozott, téglalap keresztmetszetű szerkezeti fa. 1. rész: Általános követelmények. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 44. old.
- [6] MSZ EN 14081-2:2019. Faszervezetek. Szilárdság szerint osztályozott, téglalap keresztmetszetű szerkezeti fa. 2. rész: Gépi osztályozás; a típusvizsgálat kiegészítő követelményei. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 39. old.
- [7] MSZ EN 14081-3:2012+A1:2019. Faszervezetek. Szilárdság szerint osztályozott, téglalap keresztmetszetű szerkezeti fa. 3. rész: Gépi osztályozás; az üzemi gyártásellenőrzés kiegészítő követelményei. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 15. old.
- [8] MSZ EN 1995-1-1:2004/A2:2015. Eurocode 5: Faszervezetek tervezése. 1-1. rész: Általános szabályok. Közös és az épületekre vonatkozó szabályok. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 11. old.
- [9] DIN 4074-1:2012-06 Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 1: Nadelschnittholz. Beuth Verlag, Berlin, p. 15.
- [10] BS 4978:2007+A2:2017 Visual strength grading of softwood. Specification. The British Standards Institution, p. 14.
- [11] MSZ 10144:1986 Teherhordó faszervezetek anyagai. Magyar Szabványügyi Testület, Bp., p. 14.
- [12] Divos F., Daniel I., Hodasz E., Jarasi J. 1994. Experimental Investigation of Thirteen Strength Predictor Parameters of Coniferous Wood. Proc. 1st European Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Sopron, 1994. Szeptember 21-23. pp. 341-349.
- [13] Divos, F. 2002. Portable Lumber Grader. Proc. 13th International Symposium on Non-destructive Testing of Wood. Berkeley, California, USA. 2002. augusztus 19-21. USDA FPL Proc. no. 7246, 335. old.
- [14] Panshin, A. J. és de Zeeuw, C. 1980. Textbook of Wood Technology: Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4th ed. McGraw-Hill Series in Forest Resources. New York, McGraw-Hill Book Co., pp. 722.
- [15] Wittmann Gy. 2001. Szerkezeti faanyagok szilárdsági kategorizálása. In: Wittmann Gy. szerk. Mérnöki Faszervezetek. I. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó. Bp. 38-53. old.
- [16] Galligan, W., J. Kerns, B.K. Brashaw. 2015. Machine Grading of Lumber. In. R.J. Ross szerk. Nondestructive Evaluation of Wood. 2nd ed. USDA FPL GTR 238, 87-102. old.
- [17] Ross, R.J., 2015. Static Bending, Transverse Vibration, and Longitudinal Stress Wave Nondestructive Evaluation Methods. In. R.J. Ross szerk. Nondestructive Evaluation of Wood. 2nd ed. USDA FPL GTR 238, 5-20. old.
- [18] Brashaw., B.K. 2015. Ultrasonic testing of veneers. In. R.J. Ross szerk. Nondestructive Evaluation of Wood. 2nd ed. USDA FPL GTR 238, 109-113. old.
- [19] Weaver W., Jr, S.P. Timoshenko, D.H. Young. 1990. Vibration Problems in Engineering. 5th ed. John Wiley & Sons, ISBN: 0471632287. 624 old.
- [20] Hankinson, R. L. 1921. Investigation of Crushing Strength of Spruce at Varying Angles of Grain. Air Service Information Circular No. 259, U.S. Air Service, 1921.
- [21] Olsson, A., J. Oscarsson. 2014. Three dimensional fibre orientation models for wood based on laser scanning utilizing the tracheid effect. In: Proc. 2014 World Conf. on Timber Eng. (WCTE), Quebec City, Canada, August 10-14, 2014.
- [22] Szalai L. és Pödör Z. 2015. Laser based optical nondestructive method for evaluation of the pine timber strength. Proc. 19th International Nondestructive Testing of Wood Symposium. Rio de Janeiro, Brazília USDA FPL-GTR 239. 205-211. old.
- [23] Sismándy-Kiss F. 2012. Fűrészáru szilárdsága és fizikai tulajdonságainak kapcsolata. PhD. Disszertáció, NyME Cziráki József Faanyagtudományok és Technológiák Doktori Iskola. 103. old.
- [24] Divos F. és T. Tanaka. 1997. Lumber Strength Estimation by Multiple Regression. Holzforschung 51:467-471.
- [25] MSZ EN 408:2010+A1:2012. Faszervezetek. Szerkezeti fa és rétegelt-ragasztott fa. Egyes fizikai és mechanikai tulajdonságok meghatározása. Magyar Szabványügyi Testület, Bp. 39 old.



ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA ÚJRA NYOMTATOTT VÁLTOZATBAN

16 év után újra kézbe vehetik

az olvasók

az Anyagvizsgálók Lapját!

A lap újjászerveződött csapatának köszönhetően az első nyomtatott verzió **2022-től** elérhető.

A **nyomtatott kiadvány negyedévente** – teljesen megegyező tartalommal, mint az online letölthető számok – **előfizetéses formában** jelenik meg.

Amennyiben igényt tartana rá, kérem jelezze a MAROVISZ felé az alábbi email címen:

marovisz@marovisz.hu

