

# CT felvételekkel elemzett Lindner módszerrel égetett fa minták és kúpos kaloriméteres vizsgálatok összehasonlítása

## Comparison of CT scanned Lindner tested timber samples and cone calorimeter measurements

Biró András

BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék  
tudományos segédmunkatárs

Email: [biro.andras@emk.bme.hu](mailto:biro.andras@emk.bme.hu)

ORCID: 0000-0001-8373-7291 

Oisik Das

Luleå University of Technology  
egyetemi docens


Email: [oisik.das@ltu.se](mailto:oisik.das@ltu.se)

ORCID: 0000-0002-5474-1512 

Rhoda Afriyie Mensah

Luleå University of Technology  
kutató


Email: [rhoda.afriyie.mensah@ltu.se](mailto:rhoda.afriyie.mensah@ltu.se)

ORCID: 0000-0003-4720-5380 

Lublóy Éva

BME, Építőanyagok és Magasépítés Tanszék  
egyetemi tanár

Email: [lubloy.eva@emk.bme.hu](mailto:lubloy.eva@emk.bme.hu)

ORCID: 0000-0001-9628-1318 

### Absztrakt:

A faanyagok tűzre való méretezésekor a beégési sebesség egy kritikus paraméter, ugyanakkor a vonatkozó szabványban definiált értékei nem minden esetben a biztonság javára vannak meghatározva. A beégési sebesség tényleges adott anyagra történő meghatározása a szabványos elfogadott módszerekkel (kúpos kaloriméter, nagyelemes vizsgálatok) költséges, így ezekre kerestünk kiselemes vizsgálati alternatívát. A Lindner módszer alkalmas lehet a beégési sebesség meghatározására, azonban szabványos vizsgálattal való összehasonlítása szükséges (pl. kúpos kaloriméter) a két módszer eredményeinek kapcsolatára vonatkozó összefüggés meghatározása végett. Vizsgáltuk a kúpos kaloriméteres és a Lindner módszeres beégés vizsgálatok összefüggését tömör fa mintákon, illetve rétegelt lemezekben. Vizsgálataink alapján a vizsgálatok eredményei erős korrelációt mutatnak. Korábbi kutatás során megállapítottuk, hogy a komputer tomográfias (CT) felvételek alkalmasak égetett tömörfa minták térbeli elemzésére és jelen kutatás során az égetett rétegelt lemez mintákról készített felvételek segítségével elemeztük, a CT alkalmazhatóságát égetett rétegelt lemezek esetében. Megállapítottuk, hogy a tömör fákánál alkalmazott szegmentálási algoritmus nem alkalmas további alakú szűrők nélkül a rétegelt lemezek vizsgálatára a gyártás során a belső rétegekben kialakuló hézagok és a beégett térfogat összemetsződése miatt.

Kulcsszavak: fa, kúpos kaloriméter, CT, Lindner teszt, elszénesedés

### Abstract:

When designing wood materials for fire resistance, the charring rate is a critical parameter. However, the values defined in the relevant standards are not always determined in favour of safety. Determining the actual charring rate for a specific material using standard approved methods (e.g., cone calorimeter, large-scale tests) is costly, so we sought an alternative using small-scale testing. The Lindner method may be suitable for determining the charring rate, but it needs to be compared with standardized testing (e.g., cone calorimeter) to establish correlations between the results of the two methods. We examined the relationship between the charring tests performed with the cone calorimeter and the Lindner method on solid wood samples and plywood. Based on our investigations, the results of these tests show a strong correlation. In earlier research, we established that computed tomography (CT) imaging is suitable for spatial analysis of burned solid wood samples. In this study, we analysed the applicability of CT imaging for burned plywood samples using scans of burned plywood specimens. We found that the segmentation algorithm used for solid wood is not suitable for examining plywood without additional shape filters due to the intersection of gaps formed in the internal layers during production with the burned volume.

Keywords: timber; cone calorimeter; CT; Lindner-test; charring

## 1. BEVEZETÉS

A tűzre való méretezés során fánál a keresztmetszet csökkenésével számolunk, amihez egy úgynevezett beégési sebesség paramétert veszünk figyelembe. A beégési sebességre a vonatkozó MSZ EN 1995-1-2 szabvány [1] konstans értékeket definiál, vagy szimulálhatjuk a hőterjedést a tartóban és a 300 °C-os izotermánál határoljuk le a még teherviselésben résztvevő maradó keresztmetszetet. Tanulmányokban megmutatták már [2], hogy ezek a konstans értékek és a javasolt paraméterekkel szimulált beégési sebesség sem mindig a biztonság javára van megadva.

Ezen okokból célszerűnek láttuk a beégési sebesség meghatározását akár egyedi mintákon az adott építési projektnél használatos faanyagra. A beégési sebességet két szabványos módon határozhatjuk meg. Az egyik lehetőség a nagyelemes vizsgálatok alkalmazása. Előnye, hogy tényleges tűzhatásnak tesszük ki a vizsgált mintát, komplex szerkezeti kialakítások vizsgálatára is lehetőséget nyújt, ugyanakkor nagyon költséges és alacsony a kontroll a tűzhatás felett. A másik vizsgálati mód az úgynevezett kúpos kalorimetria (ISO 5660-1 [3]). Előnye, hogy pontosabban kontrollált a próbatestet érő hőáram, lehetőség van a képződő füstgázok elemzésére, időben végig követhető a minta tömegvesztése és olcsóbb, mint a nagyelemes vizsgálatok. Hátránya, hogy tényleges tűzhatás alatti viselkedés modellezésére nem alkalmas, illetve komplex szerkezeti kialakítások nem vizsgálhatók vele [4].

Kutatásunk során alternatívát kerestünk, amellyel meghatározható a beégési sebesség. Létezik egy Magyarországon szabványosított (MSZ 9607:2020) [5] kiselemes vizsgálat, az úgynevezett Lindner-módszeres vizsgálat, ami fa és fahelyettesítő anyagok égéskésleltető égéskésleltetőszerezrel való kezelésének építéshelyszíni ellenőrzésére szolgál. Jelentősen egyszerűbb és olcsóbb vizsgálat, mint az ismertett szabványos eljárások, de közvetlenül nem határozható meg belőle beégési sebesség, így ugyanazon anyagokból származó mintacsoportokon vizsgáltuk a kúpos kaloriméteres vizsgálatok és a Lindner módszeres vizsgálatok eredményeinek kapcsolatát.

Korábbi kutatás során [6] vizsgáltuk a komputer tomográfia (CT) alkalmazásának lehetőségét beégett fa minták térfogatos elemzésének céljából, ehhez Lindner módszeres égetést követően készítettünk CT felvételeket tömör fa mintákról. Az alkalmazott képfeldolgozási módszer alkalmazhatóságának kiterjeszhetőségének lehetőségét vizsgálandó, a kúpos kaloriméteres összehasonlításhoz Lindner módszerrel égetett rétegelt lemez minták CT-s analízisét is elvégeztük.

## 2. VIZSGÁLATOK ÉS ÉRTÉKELEÉSÜK

Ezen tanulmányban ismertetjük a tömörfa és rétegelt lemez minták Lindner módszeres és kúpos kaloriméteres vizsgálatainak eredményeit, valamint a beégett rétegelt lemezek CT felvételeken történő szegmentálásának eredményeit. A kísérleti mátrix az 1. táblázatban látható. A mintákat úgy választottuk meg, hogy egyaránt legyen a tömörfa és a rétegelt lemez minták között is lombhullató és örökzöld faj, valamint testsűrűség szempontjából is legyen jelentős eltérés köztük.

Fa minta	Faj latin neve	Minták jele	Lindner teszt	Kúpos kaloriméter	CT felvétel
Borovi fenyő	Pinus Sylvestris	BF	5	3	-
Kóris	Fraxinus excelsior	K	5*	3	-
Kocsányos tölgy	Quercus robur	T	5*	3	-
Bükk rétegtlemez	Fagus sylvatica	B-R	5	3	2
Fekete nyár rétegtlemez	Populus nigra	NY-R	5	3	2
Vörösfenyő rétegtlemez	Larix decidua	VF-R	5	3	2

\*korábban elvégzett vizsgálatok [6]

1 táblázat: Kísérleti mátrix, vizsgálatok száma vizsgálat típusonként és mintacsoportonként

## 2.1 Módszertan

### 2.1.1 Lindner módszer

A Lindner módszeres beégésvizsgálat építési fák és fa termékek égéskésleltésének építéshelyszíni ellenőrzésére szolgál. A vizsgálatokat a MSZ 9607:2020 szabvány [5] szerint végeztük el. A vizsgálat során 1 gramm hexametilén-tetramint égetünk a berendezés égetőtömbjén, amire egy hőterelőként funkcionáló csonkakúp palástot helyezünk. Ezek fölé egy 80 mm átmérőjű kör alakú nyílás fölé helyezük el a vizsgált mintát, aminek geometriája 100x100x10 mm. A vizsgálatot tömegveszteség alapján értékeljük. A vizsgáló berendezés égetés közben 2. ábrán látható, a 3. ábrán beégett mintákra mutatunk példát. A rendelkezésre álló minták vastagsága az előírt 10 mm-től több esetben eltért, hogy ugyanezen anyagból készült mintákat vizsgálhassunk a kúpos kaloriméteres vizsgálat során is, ahol a túl kicsi mintavastagság esetén nem minden esetben lenne megállapítható a tömegveszteségi sebesség kvázi konstans értéke az átégés előtt.



1. ábra: Lindner módszeres beégés vizsgálat, vizsgálati elrendezés (készítették a szerzők)



2. ábra: Fa minták Lindner módszeres beégés vizsgálatot követően (készítették a szerzők)

### 2.1.2 Kúpos kalorimetria

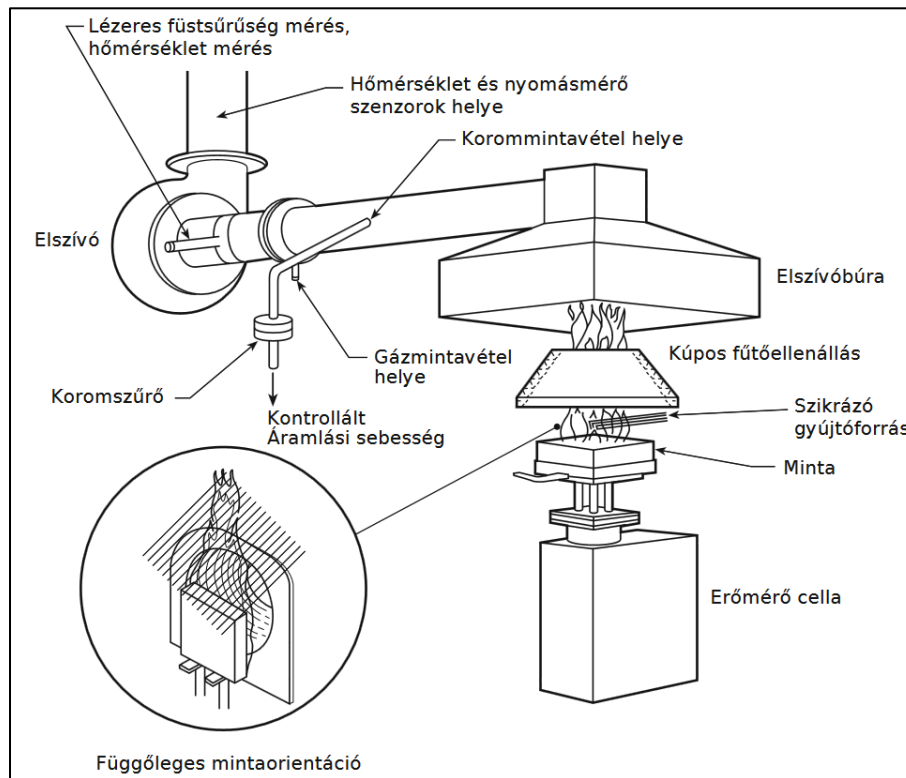
A kúpos kaloriméteres vizsgálatokról az ISO 5660-1 szabvány [3] rendelkezik. Elterjedt vizsgálati módszer, ami egyaránt alkalmas szilárd és folyadék halmazállapotú minták égésvizsgálatához. A fejlődő hőmennyiséget oxigénfogyasztás alapján lehet vele mérni. A módszer lényege, hogy az összes képződő gázt egy elszívó rendszerben vezetjük el, ahol mérhetőek egyes gázkoncentrációk, ami alapján számítható az égés során felszabaduló energia. A vizsgáló berendezés sematikus rajza a 4. ábrán látható.

A mérési módszer elméleti alapja Thornton [7] munkája, aki számos szerves folyadékra és gázra megmutatta, hogy teljes égésük során a képződő hő mennyisége közel konstans egységnyi oxigén felhasználás esetén. Később Hugget [8] arra jutott, hogy ez igaz szilárd halmazállapotú anyagokra is, ahol 1 kg égés során elhasznált oxigén átlagosan  $E=13,1$  MJ energiafelszabadulással jár. Ez a konstans érték a gyakorlatban használatos, ettől csak kevés esetben van  $\pm 5\%$  eltérés. Ezen állítások hozadéka, hogy a kalorimetriában elegendő az égés során az oxigénfogyást mérni és ebből számítható a kibocsátott hőmennyiség. Ilyen lehet például azonos összetételű polimer és monomer vizsgálata, ahol a monomer égéséből több hő szabadul fel. Ez a különbség a polimerizációhoz szükséges energia miatt áll fenn, de fontos, hogy hőbomlás során a szilárd fűtőanyagoknak csak töredéke alakul vissza monomer formába mielőtt elég [9].

A vizsgálat során többek között mérik az alábbiakat:

- az oxigén, a szén-dioxid és a szén-monoxid koncentrációját a környezetben és az elszívott gáztömegben,
- légnyomáskülönbséget a környezet és az elszívás között,
- a minta tömegét,
- több helyen hőmérsékletet (pl. minta, füst, kúpos fűtőellenállás),
- koromképződést,
- felszabaduló hőmennyiséget (HRR – heat release rate),
- teljes felszabaduló hőmennyiséget (THR – total heat release),
- tömegveszteséget (MLR – mass loss rate),
- képződő füst mennyiségét,
- fűstsűrűséget.

A vizsgálataink során a tömegvesztési sebesség (MLR – mass loss rate), illetve a felületarányos tömegvesztési sebesség (MLR/a) adatokat használtuk fel. A kúpos kaloriméteres vizsgálatok minden esetben kiszáritott mintán történtek  $35 \text{ kW/m}^2$  hőáram mellett.



3. ábra: Kúpos kaloriméter sematikus rajza (Forrás: ld. [10])

### 2.1.1 Komputer tomográfia, képfeldolgozás

A komputer tomográfia (CT) egy a humámdiagnosztikában széleskörűen alkalmazott eszköz és az elmúlt évtizedekben egyre inkább teret nyer az építőipari anyagvizsgálatoknál is. Az így készült felvételek térbeli információt adnak a vizsgált anyag sugárgyengítésére vonatkozóan. Amennyiben ezeket a sugárgyengítés értékeit a vizsgáló berendezéstől független skálára átszámítjuk (úgynevezett Hounsfield skála), akkor megfigyelhető, hogy a Hounsfield értékek lineáris összefüggést mutatnak a vizsgált anyag sűrűségével. Tehát jó közelítésben egy térbeli sűrűségterképet kapunk az anyagról. Ebből fakad, hogy minden CT-s képelemzés sűrűségbeli eltérésekre és alaki jellemzőkre épül. Sík felvételek esetén az elemi információ pixelekre vonatkozik, de CT esetén kis méretű térelemekről voxelekről beszélünk, amiknek ismert az élhossza, így a tényleges térfogat is számítható egy detektált objektumra vonatkozóan.

Az építőiparban alkalmazzák ezt a vizsgálati módszert többek között beton [11], [12], talajok [13], kőzetek [14], aszfalt [15] és fa [16], [17] mintákra egyaránt. Fa minták esetén leginkább faj azonosításra [18], fahibák detektálásával [19] fűrészüzemekben vágásoptimalizálásra és minőségellenőrzésre használják.

A CT felvételek korszerű humámdiagnosztikai eszközön készültek, amely képest akár 0.6 sec-os ciklusidőre és egyidőben 6 szeletes mérésre. Képes relatíve nagy térfogatokat is rendkívül gyorsan lemérni ún. spirál üzemmódban (pl.: 40 szeletet 2.5 sec alatt). Az alkalmazott térbeli felbontással a voxelméret  $0.2344 \times 0.2344 \times 0.6 \text{ mm}$  volt.

Az alkalmazott digitális képfeldolgozási eszközök az alábbiak:

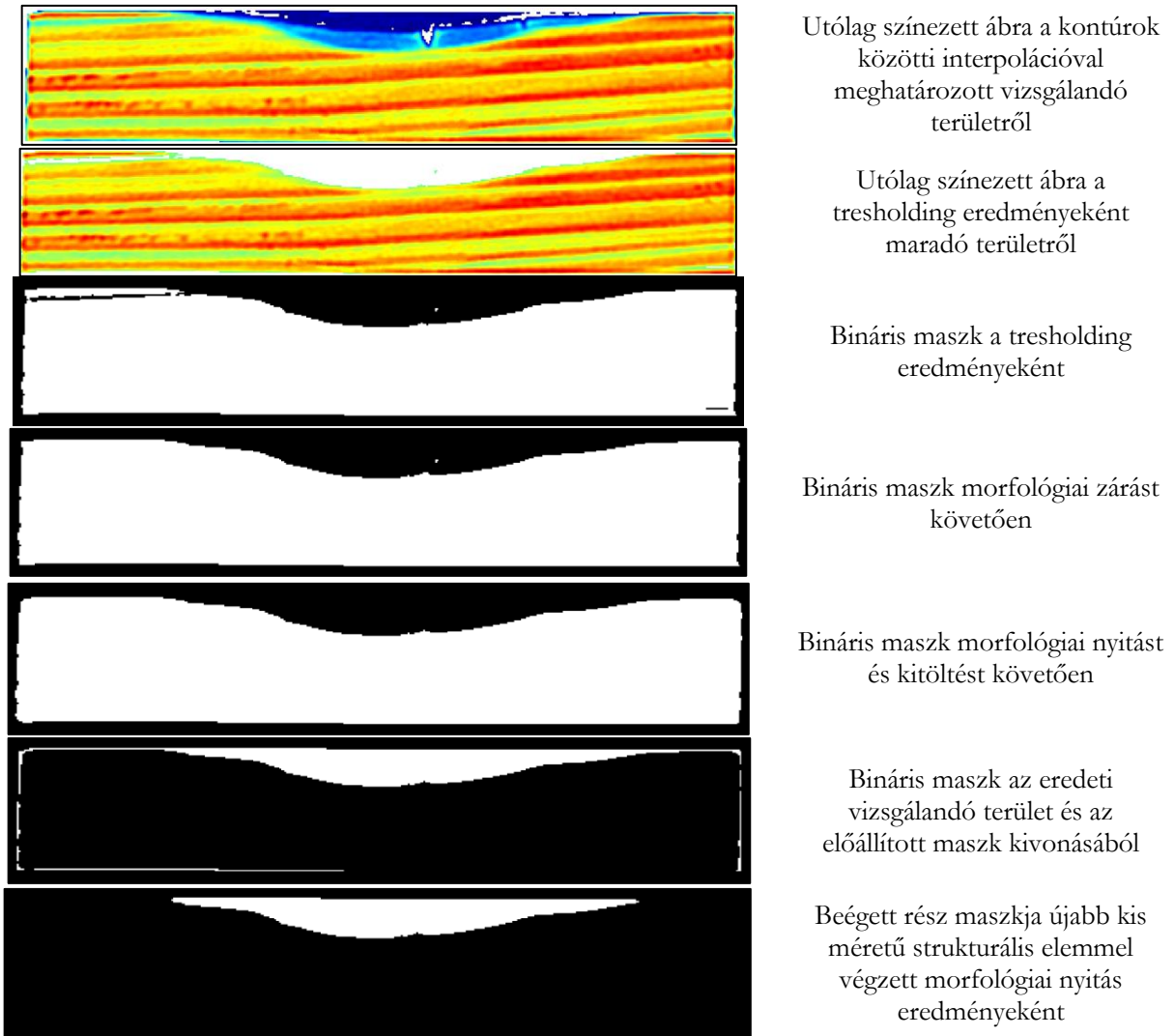
- Küszöbölés (tresholding): egy alapvető képfeldolgozási technika, amely során egy képet binárisra alakítunk egy megadott küszöbérték alapján. Az eljárás minden pixel (jelen esetben voxel) intenzitását összehasonlítja a küszöbértékkel, és az eredményül egy fekete-fehér kép jön létre (bináris maszk): a küszöbértéknél nagyobb intenzitású pixelek egy színnel (pl. fehér), az alatta lévők pedig egy másikkal (pl. fekete) jelennek meg. Ez hasznos például objektumok elkülönítésére a háttértől.
- Kitöltés: A kitöltés egy olyan morfológiai művelet, amely azonosítja és kitölti a képen található zárt kontúrral határolt, de üres területeket (lyukakat). Ez különösen akkor hasznos, ha egy bináris képen egyes objektumokon belül lévő „lyukakat” szeretnénk eltüntetni anélkül, hogy a külső formájuk megváltozna.
- Morfológiai zárás: A morfológiai zárás egy olyan művelet, amely először dilatációt (tágítást), majd eróziót (szűkítést) hajt végre egy képen, ugyanazzal a strukturális elemmel. Ezen lépések lényege, hogy az általunk definiált méretű strukturális elem (pl. megadott pixel sugarú kör) méretének és alakjának megfelelően növeli (dilatáció) vagy csökkenti (erózió) a vizsgált objektum méretét a kontúrja körül. Ez az eljárás eltünteti a kisebb sötét foltokat (zajokat) a fényes objektumok felületéről, és összekapcsolhatja az egymáshoz közeli fényes területeket. Tipikus alkalmazása a képen lévő apró lyukak eltüntetése vagy a megszakított vonalak összekapcsolása.
- Morfológiai nyitás: Erózió és dilatáció sorozata, ugyanazzal a strukturális elemmel, ebben a sorrendben alkalmazva. Az eljárás a kép kisebb világos objektumait (zajokat) távolítja el, miközben a nagyobb objektumok alakját és méretét megőrzi. Használata akkor előnyös, ha a képen lévő zaj eltávolítása a cél, például véletlenszerű fényes pontok kiszűrése.

A CT vizsgálatok esetén a korábban égetett tömör fa mintákra kidolgozott szegmentálási (képen látható vizsgálandó részek digitális elkülönítése egymástól) módszertan alkalmazhatóságát vizsgáltuk rétegelt lemez termékekre. A cél a beégett térfogat és az ép részek elválasztása egymástól további elemzés céljából, ahol a beégett térfogat az eredeti térfogathoz képest számítható és nem a kialakuló szénréteg lehatárolása. Ennek oka, hogy a kialakuló szénréteg kisebb térfogatú az eredeti fánál, hosszabb idejű beégés esetén pedig a szénréteg egy része is elég, tehát a teljes elégett térfogat meghatározására nem alkalmas. A módszertan az alábbi lépésekből áll [6]:

- 1. lépés: Egy, a minta két átellenes szélénél megadott kontúr közti interpolációval definiált vizsgált régió (ROI – region of interest) meghatározása.
- 2. lépés: Egy mintánként változó, de rögzített értékű küszöbölőt alkalmazása az ép részre vonatkozó bináris maszk készítéséhez
- 3. lépés: A bináris maszkon egy mintánként paraméterezett strukturális elemmel morfológiai zárás (objektum kontúrjának zárása).
- 4. lépés: A bináris maszkon a strukturális elem (strel object) méretének mintánkénti paraméterezésével morfológiai nyitást (zajsűrés).
- 5. lépés: Kitöltés művelet, ami a küszöbölésnél potenciálisan elhanyagolt kis sűrűségű fa részek visszaállítására szolgál.

- 6. lépés: A szegmentáció eredményképp rendelkezésre áll a további elemzéshez egy bináris maszk a teljes eredeti és az épen maradt részekre, amelyek ki kell vonni egymásból. Ennek eredménye a bináris maszk a beégett részre.
- 7. lépés: További kis méretű strukturális elemmel történő morfológiai nyitás a 6. lépés eredmény maszkján a kontúrnál kialakuló hibák kiküszöbölése végett.

A módszer lépései az 5. ábrán láthatók.



4. ábra: Digitális képfeldolgozás lépései az épen maradt rész és a megégett térfogat különválasztásához (bináris maszkok létrehozása) (Forrás: ld. [6])

## 2.2 Vizsgálatok eredményei

### 2.2.1 Rétegelt lemezek Lindner módszeres és CT vizsgálatai

A CT képfeldolgozásból származó eredményeket a táblázat tartalmazza, a Lindner módszeres beégésvizsgálatok eredményei a 3. táblázatban láthatók. A vizsgálatok mintacsoportonkénti átlag eredményeit a 3. táblázat: Rétegelt fa minták vizsgálat előtti sűrűsége, valamint az égetésből származó tömegveszteség (NY-R – rétegelt nyár, B-R – rétegelt bükk, VF-R – rétegelt vörösfenyő) (készítették a szerzők)

ban ismertetjük. A rétegelt nyárfa minták jele minden esetben NY-R, a rétegelt bükk mintáké B-R, míg a rétegelt vörösfenyő jele VF-R. Az eredmények grafikus formában az 5. és 6. ábrákon láthatók.

A Lindner módszeres beégésvizsgálatok tömegveszteség eredményei a sűrűség függvényében (5. ábra) kis szórást mutatnak fa fajonként, ami a Lindner módszer megbízhatóságára vonatkozóan pozitív eredmény, ugyanakkor a vörösfenyő esetében tapasztalható szórás már ennél a fajnál a későbbiekben nagyobb mintaszám alkalmazását indokolja. A vörösfenyő mintáknál tapasztalható nagyobb szórás oka vélhetően a faj magas gyantatartalma, ami ráadásul a préseléskor lokálisan felgyűlhet. A vizsgálatkor égett rész gyantatartalma befolyásolja a mért tömegveszteséget.

Próbatest	Teljes térfogat (voxel szám)	Ép térfogat (voxel szám)	Ép rész átlagos lineáris sugárgyengítési együtthatója - HU (-)	Égett rész térfogata, (voxel szám)	Égett térfogatrész	Égetésből származó tömegveszteség	Égett térfogatrész /tömegveszteség
NY-R1	3427865	3245856	-547.79	141313	4.17%	5.75%	72.56%
NY-R2	3467399	2938896	-532.95	298804	9.23%	5.98%	154.24%
B-R1	3870294	3543194	-217.76	179897	4.83%	4.91%	98.47%
B-R2	3738159	3284874	-214.22	236125	6.71%	4.59%	146.18%
VF-R1	3474718	3292482	-356.68	127299	3.72%	5.56%	66.92%
VF-R2	3479423	3085895	-328.53	222694	6.73%	5.86%	114.92%

2. táblázat: CT felvételek eredményei (NY-R – rétegelt nyár, B-R – rétegelt bükk, VF-R – rétegelt vörösfenyő) (készítették a szerzők)

A rétegelt fa termékek vizsgálatakor az volt a cél, hogy megállapítsuk a 2.1.1 fejezetben ismertetett beégett minta szegmentálási módszer alkalmas-e rétegelt fa termékek vizsgálatára. Ehhez vizsgáltuk a beégett szegmentált fajlagos térfogat (V/V%) és a Lindner tömegveszteség (m/m%) kapcsolatát. Ezek aránya tömör fák esetén lineáris összefüggést mutat, vagyis ott a beégett térfogat szegmentációja megfelelő volt. A 6. ábrán látható, hogy ezen jellemzők rétegelt lemezek esetén nem mutatnak erős korrelációt. Vizsgálataink szerint ennek oka az, hogy a rétegelt lemezeknél gyártás során az egyes síkjában horizontálisan egymás mellé kerülő rétegek élei nem párhuzamosak egymással, így nem illesztik őket szorosan egymás mellé. Az így kialakuló hézagok az égés során a tömegveszteséget nem befolyásolták, azonban ha ezek a hézagok összemetsződnek a beégett térfogattal, akkor a szegmentáló algoritmus nem képes ezek leválasztására a beégett térfogatról. A hézagok, mint alacsony sugárgyengítésű (gyakorlatilag levegővel telített) elemek a küszöbölés során a beégett térfogat részei maradnak, majd a viszonylagosan nagy méretük miatt a fák gyűrűtávolságához beállított méretű strukturális elemmel végzett morfológiai műveletek nem képesek ezek leválasztására.



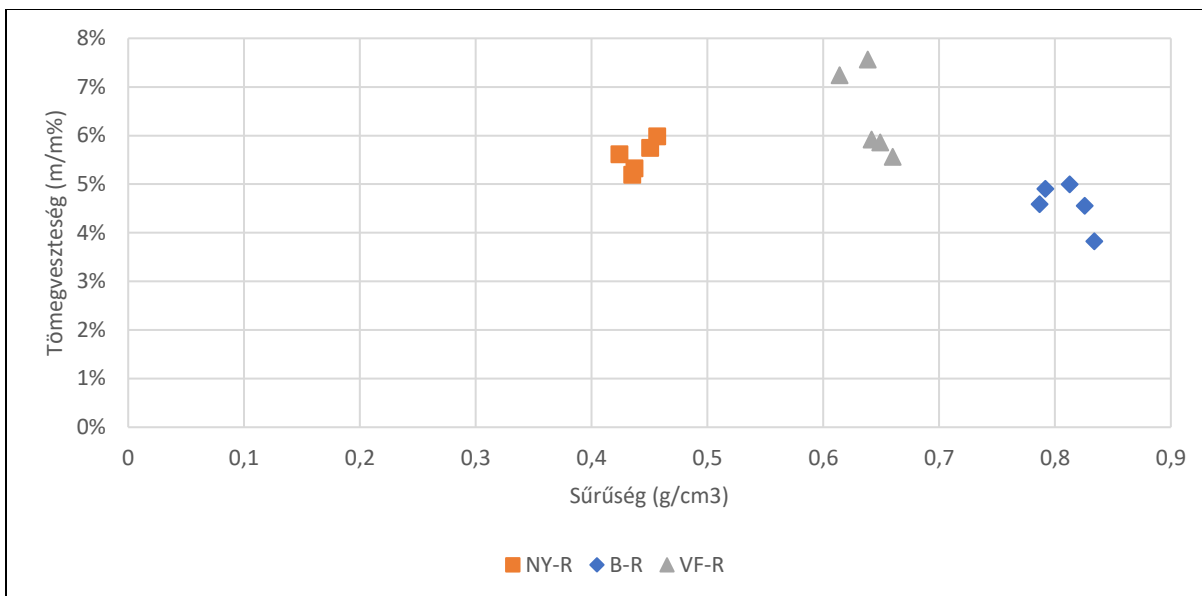
Ez az analízis során extra térfogatként jelenik meg a beégett térfogat oldalán. Ilyen összemetsződés megfigyelhető a szürkeárnyalatos meteszetten rétegelt bükkfa minta esetén a 7. ábrán, bináris maszk egy szeletén, illetve térben alulnézetből szintén a bináris maszkon nyárfa minta esetén a 8. és 9. ábrákon. A szegmentálási módszer potenciálisan alkalmas lehet a rétegelt minták vizsgálatára is, azonban további alaki szűrők alkalmazása szükséges vagy a minta égetését megelőzően is CT felvételt kell készíteni a vizsgált mintáról és a kezdeti felvétel alapján szűrhetők a mintában kezdetben meglévő hézagok. Ezek a jelenlévő hézagok a mérhető sűrűséget (3. táblázat) és az ép részekre meghatározott átlagos sugárgyengítést ( táblázat) nem befolyásolták számottevően.

Próbatest	Tömeg égetés előtt	Tömeg Lindner teszt után	Sűrűség	Tömegveszteség	Relatív tömegveszteség
	(g)	(g)	(g/cm <sup>3</sup> )	(g)	
NY-R1	53.22	50.16	0.450	3.06	5.75%
NY-R2	54.15	50.91	0.456	3.24	5.98%
NY-R3	51.63	48.88	0.437	2.75	5.33%
NY-R4	51.6	48.92	0.435	2.68	5.19%
NY-R5	50.2	47.38	0.424	2.82	5.62%
B-R1	102.1	97.09	0.792	5.01	4.91%
B-R2	102.23	97.54	0.787	4.69	4.59%
B-R3	105.13	99.88	0.813	5.25	4.99%
B-R4	106.75	101.89	0.826	4.86	4.55%
B-R5	106.14	102.08	0.834	4.06	3.83%
VF-R1	76.4	72.15	0.660	4.25	5.56%
VF-R2	75.64	71.21	0.649	4.43	5.86%
VF-R3	74.22	69.83	0.642	4.39	5.91%
VF-R4	71.24	66.08	0.614	5.16	7.24%
VF-R5	74.31	68.69	0.638	5.62	7.56%

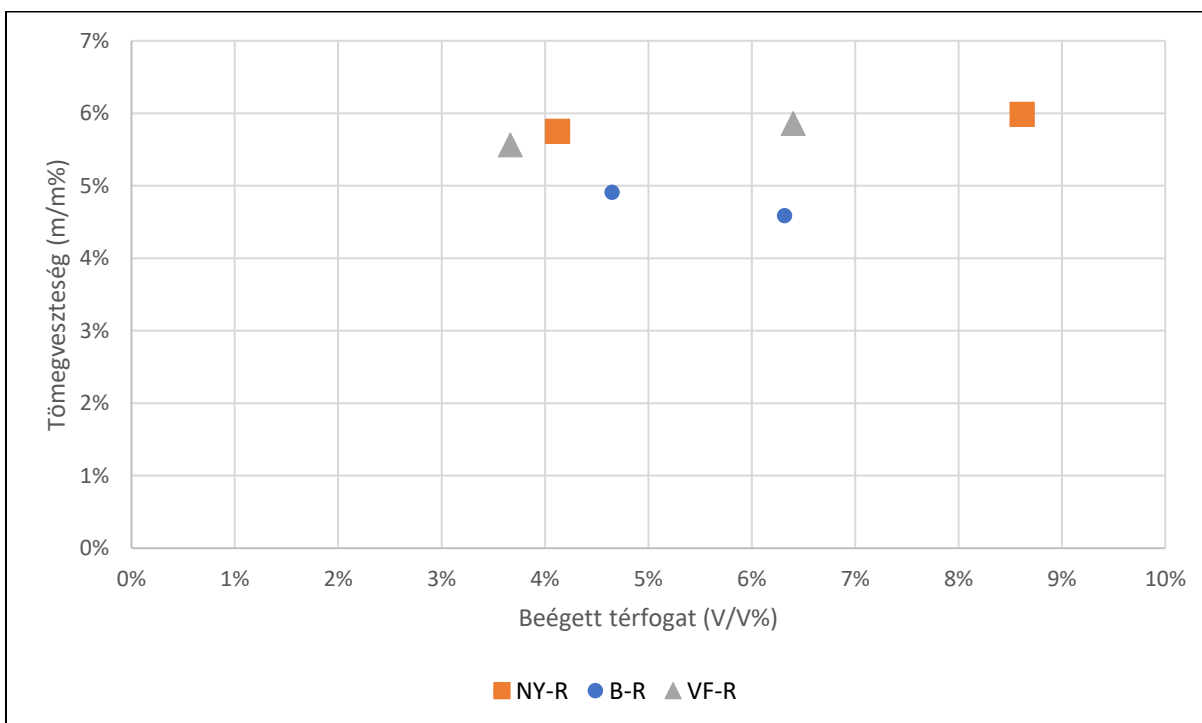
3. táblázat: Rétegelt fa minták vizsgálat előtti sűrűsége, valamint az égetésből származó tömegveszteség (NY-R – rétegelt nyár, B-R – rétegelt bükk, VF-R – rétegelt vörösfenyő) (készítették a szerzők)

Fa faj	Sűrűség (g/cm <sup>3</sup> )		Lineáris sugárgyengítési együttható, HU (-)		Tömegveszteség		Égett térfogatrész		Égett térfogatrész/ tömegveszteség	
	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás	Átlag	Szórás
NY-R	0.441	0.013	-540.37	10.49	5.57%	0.32%	6.70%	3.58%	113.40 %	57.76 %
B-R	0.810	0.021	-213.99	2.50	4.57%	0.46%	5.77%	1.33%	122.32 %	33.73 %
VF-R	0.641	0.017	-342.61	19.91	6.14%	0.91%	5.23%	2.13%	90.92%	33.95 %

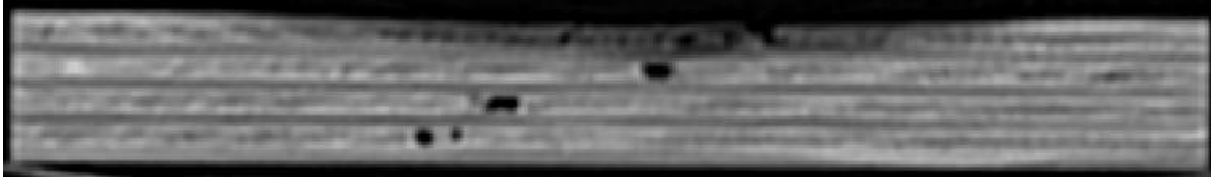
4. táblázat: Lindner teszt és CT vizsgálati eredmények átlaga és szórása fajonként (készítették a szerzők)



5. ábra: Tömegvesztés eredmények a sűrűség függvényében mintánként (NY-R – rétegelt nyár, B-R – rétegelt bükk, VF-R – rétegelt vörösfenyő) (készítették a szerzők)



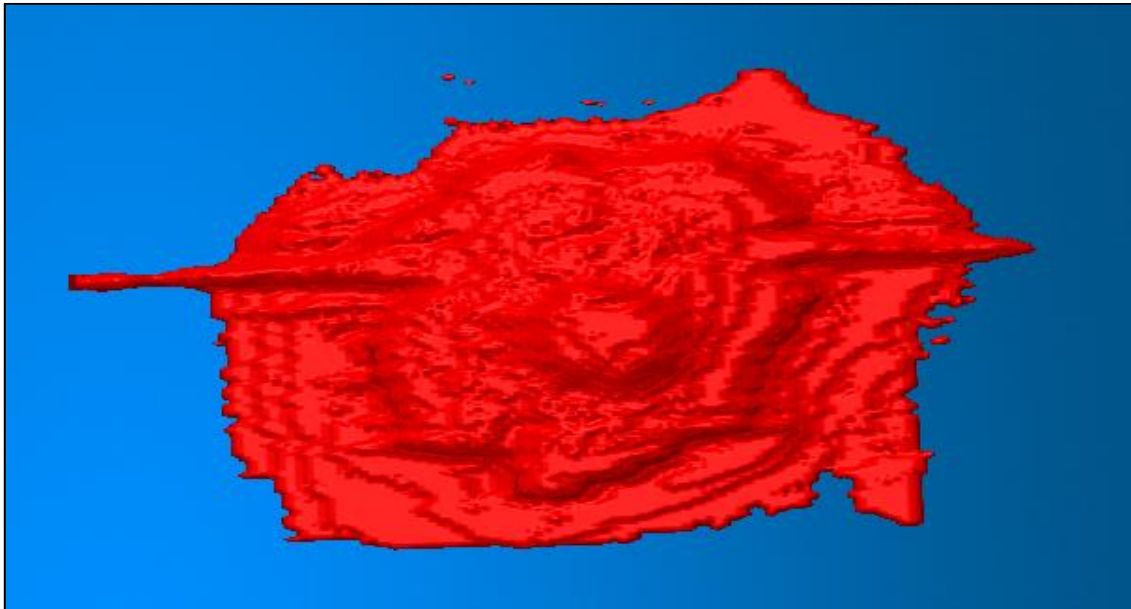
6. ábra: Tömegvesztés és égett térfogatrész eredmények mintánként (NY-R – rétegelt nyár, B-R – rétegelt bükk, VF-R – rétegelt vörösfenyő) (készítették a szerzők)



7. ábra: Beégett térfogat és gyártás során kialakuló hosszanti hézag összemetsződése rétegelt bükk minta esetén (készítették a szerzők)



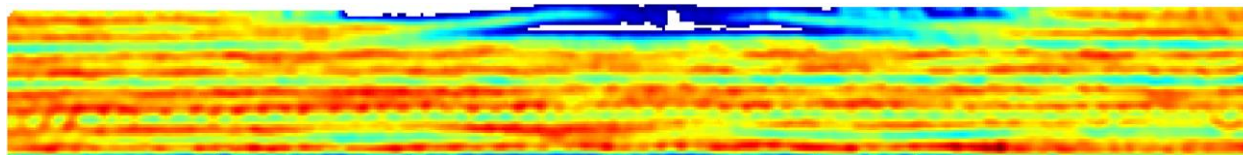
8. ábra: Egymás melletti rétegek illesztésénél található hézag rétegelt lemez mintában a beégett térfogat szegmentált bináris maszk szeletén (készítették a szerzők)



9. ábra: Egymás melletti rétegek illesztésénél található hézag rétegelt lemez mintában a beégett térben megjelenítve alunnézetből (készítették a szerzők)

Fontos jelenség a rétegelt fa termékeknél, hogy az alkalmazott ragasztó is részt vesz égésben, de akár a fánál alacsonyabb hőmérsékleten megtörténhet a hőbomlása.

Ez a szerkezeti elem átmelegedése során a külső rétegek felválásához vezet, a rétegek delaminálódnak. Ez a Lindner módszeres beégésvizsgálatnál is megfigyelhető a mintáról készített CT felvételtől származó metszeten (10. ábra).



10. ábra: Rétegtelt termék delaminálódása az égés során (színskálával utólag ellátott szürkeárnyaltos metszet) (készítették a szerzők)

### 2.2.1 Kúpos kaloriméteres vizsgálatok eredményei

A kúpos kaloriméteres vizsgálatok célja a kutatás során az volt, hogy referenciaként szolgáljon a Lindner módszeres beégésvizsgálatokhoz vagyis, hogy megállapítható legyen, hogy mutat-e korrelációt a két vizsgálat eredménye egymással. A kúpos kaloriméteres vizsgálatból származó tömegvesztési sebesség alapján már a hőáram ismeretében a beégési sebesség számítható, így amennyiben erre vonatkozóan van regressziós kapcsolat a Lindner tömegvesztéssel, úgy nagyobb mintaszámot követő regressziós vizsgálat alapján megbízhatóan meghatározható lenne beégési sebesség egy viszonylag egyszerű vizsgálat alapján.

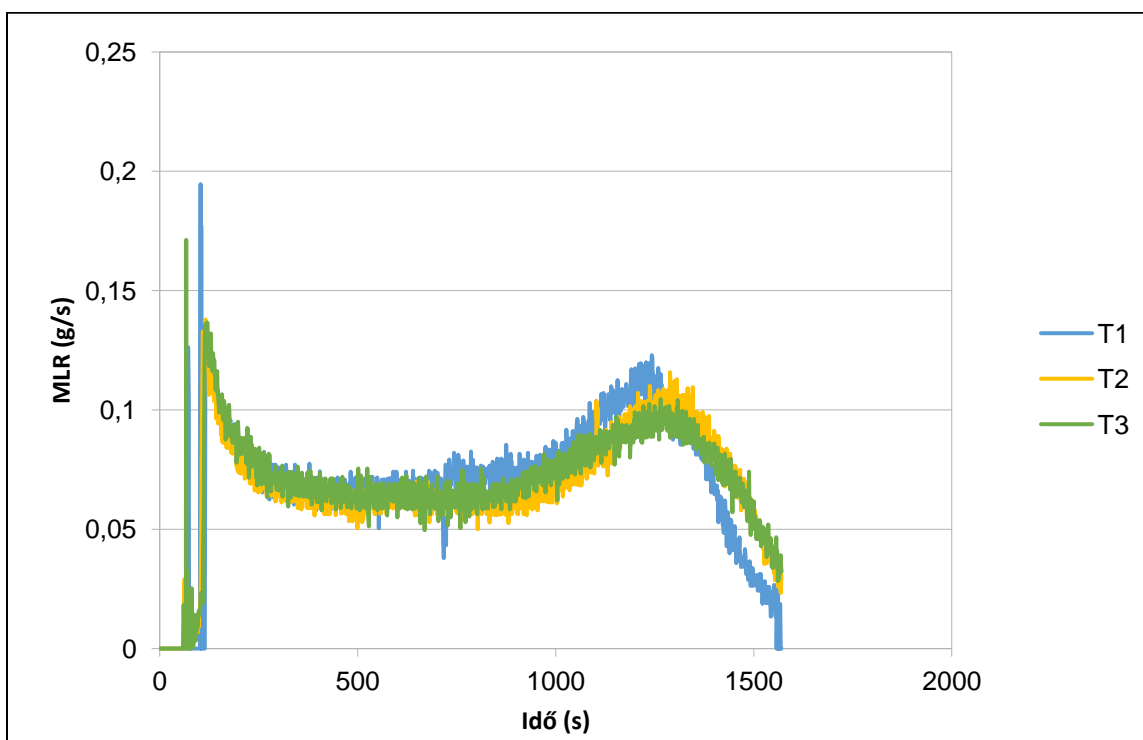
Ehhez 3 féle tömör fa mintát és 3 féle rétegtelt lemez mintát vizsgáltunk (borovi fenyő – BF, kőris – K, tölgy – T, rétegtelt nyár – NY-R, rétegtelt bükk – B-R, rétegtelt vörösfenyő – VF-R). A két módszer összehasonlítása végett itt a Lindner módszeres beégésvizsgálatból származó fajlagos tömegvesztést ( $m/m\%$ ), illetve ennek sűrűséghez viszonyított értékét ismertetjük. A kúpos kaloriméteres vizsgálatok esetén a jellemző tömegvesztési sebességet (mass loss rate – MLR ( $g/sec$ )) és ennek a minta tömegéhez viszonyított értékét adjuk meg. Ezutóbbinak az oka, hogy a minták térfogatát és a sűrűségét használtuk a tömegvesztési sebesség adatok korrekciójához azonban, ha ez a két érték szerepel a nevezőben akkor ezek szorzata a minta tömege. A vizsgálatok eredményeit az 5. táblázat tartalmazza. Az egyes adatok minden esetben mintacsoportok eredményeinek az átlagai.

Faj - termék	Átlagos fajlagos Lindner tömegvesztés ( $m/m\%$ )	Átlagos Lindner tömegvesztés ( $m/m\%$ ) / Sűrűség ( $g/cm^3$ )	Átlagos MLR ( $g/sec$ )	Átlagos MLR ( $g/sec$ ) / Tömeg (g)
BF	0.0379	0.0792	0.0589	6.997E-04
B-R	0.0457	0.0565	0.08085	8.232E-04
K	0.0312	0.0540	0.05549	5.260E-04
NY-R	0.0557	0.1264	0.06375	11.249E-04
T	0.0236	0.0320	0.06416	4.480E-04
VF-R	0.0643	0.1005	0.07443	9.500E-04

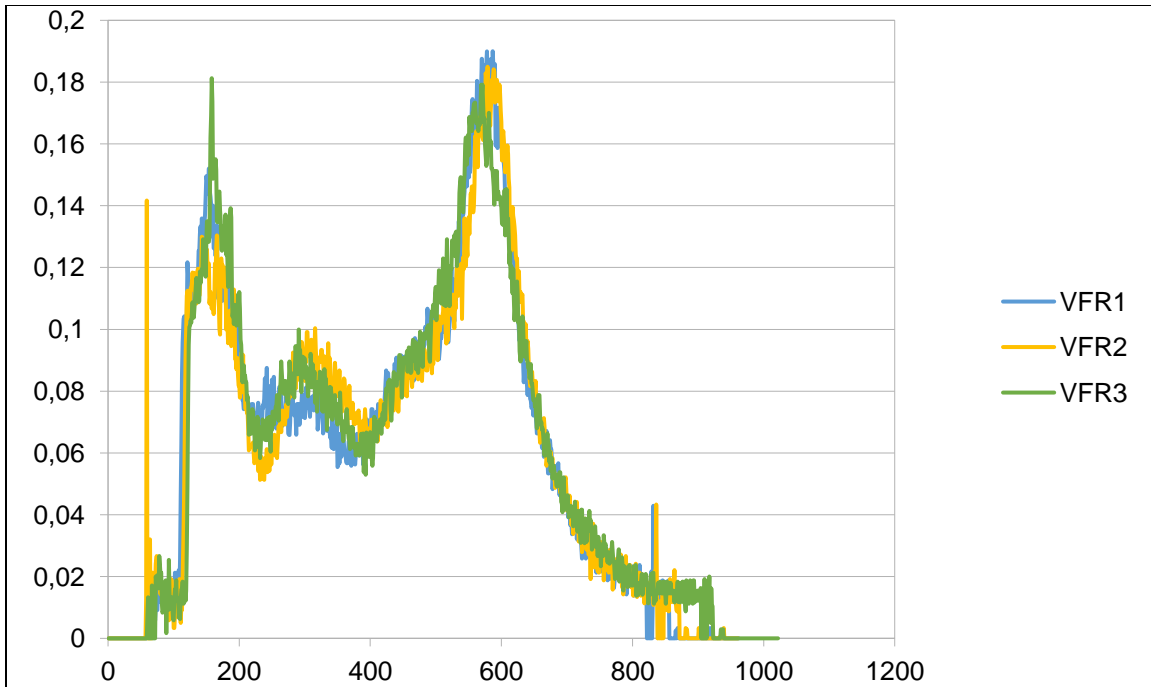
5. táblázat: Lindner módszeres beégésvizsgálatok és a kúpos kaloriméteres mérések eredményei (készítették a szerzők)

A tömegveszteségi sebességet a kúpos kaloriméteres vizsgálatoknál időben változó értékű, ami a 11. ábrán jól megfigyelhető. A kezdeti gyulladáskori csúcsot követően egy átmeneti szakasz után egy kvázi konstans értéket vesz fel (majd a minta átégésével újra felgyorsul). A számításokhoz ezt a kvázi konstans értéket határozzuk meg a vizsgálatok során és minden ismertetett adat erre az állapotra vonatkozik. A gyulladást követő tömegveszteség lassulásnak az oka a kialakuló szénréteg szigetelő hatása.

A mintacsoportonként az egyes tömegveszteségi sebesség (mass loss rate – MLR) eredmények kis szórást mutatnak, ahogy ez vizuálisan is megerősíthető tölgyfákra például a 11. ábra alapján a tölgy minták esetében vagy a 12. ábra alapján rétegelt vörösfenyő mintáknál. Jól kivehető ugyanakkor, hogy míg tölgyfák esetén a kvázi konstans állapot jól elkülöníthető, ez a rétegelt termékeknel egy periodikusan változó szakasz átlagolása alapján adható meg, mert az egyes rétegek elégése, majd a ragasztó részvétele az égésben a tömegveszteségi sebesség – idő görbe lefutásában jellemző hullámokat eredményez.

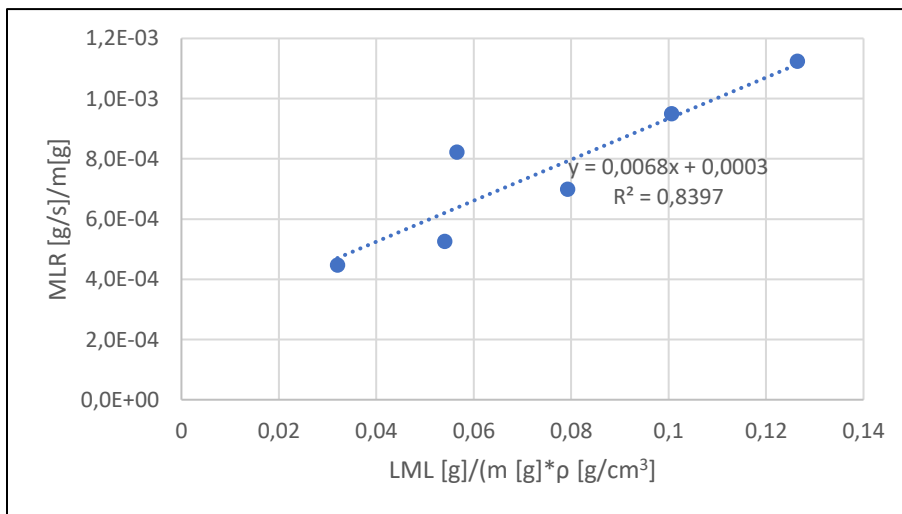


11. ábra: Tömegveszteségi sebesség – idő görbék tölgyfa minták esetén (készítették a szerzők)



12. ábra: Tömegvesztési sebesség – idő görbék rétegelt nyárfa minták esetén (készítették a szerzők)

Az 5. táblázatban megadott mintacsoport átlageredményeket (mintatömeggel korrigált tömegvesztési sebesség a kúpos kaloriméteres vizsgálatból és sűrűséggel korrigált fajlagos tömegvesztés a Lindner beégés vizsgálatból) grafikusán megjelenítve legkisebb négyzetes hiba alapján történő lineáris illesztéssel a 13. ábrán látható egyenest kapjuk. Ez alapján kijelenthető, hogy a két változó erős lineáris kapcsolatban áll egymással.



13. ábra: Mintatömeggel korrigált tömegvesztési sebesség (kúpos kaloriméteres vizsgálat) és sűrűséggel korrigált fajlagos tömegvesztés (Lindner beégés vizsgálat) kapcsolata (készítették a szerzők)

### 3. KÖVETKEZTETÉS

A faanyagok építőipari felhasználásának növekedése [20] és a tűzveszélyekkel szembeni kitettsége előrehaladott módszerek alkalmazását teszi szükségessé a tűzállósági tulajdonságok értékelésére és a tűzbiztonsági intézkedések fejlesztésére.

A CT mérés égetett fa mintákon segítheti a nagyelemes vizsgálatok értékelését. Előnye, hogy ma már számos olyan orvosi CT berendezés elérhető, ami rendelkezik szabad gépidővel akár építőipari anyagvizsgálatok céljára, de megfigyelhető nemzetközi trend az anyagvizsgáló laboratóriumok felszerelése is ilyen eszközökkel. A CT-vizsgálat részletes betekintést nyújt a tűznek kitett faanyag belső változásaiiba, beleértve a beégési mélységet, a keresztmetszeti terület csökkenését és a sűrűségprofilok változását.

A rétegelt fa termékek vizsgálatokor az volt a cél, hogy megállapítsuk, hogy a tömörfákhoz alkalmazható beégett minta szegmentálási módszer alkalmas e rétegelt fa termékek vizsgálatára. Ehhez vizsgáltuk a beégett szegmentált fajlagos térfogat ( $V/V\%$ ) és a Lindner tömegveszteség ( $m/m\%$ ) kapcsolatát. Ezek aránya tömör fák esetén lineáris összefüggést mutat, vagyis ott a beégett térfogat szegmentációja megfelelő volt. Ezen jellemzők rétegelt lemezek esetén nem mutatnak erős korrelációt. Ennek oka az, hogy a rétegelt lemezeknél gyártás során az egyes síkjaiban horizontálisan egymás mellé kerülő rétegek élei nem párhuzamosak egymással, így nem illeszlik őket szorosan egymás mellé. Az így kialakuló hézagok az égés során a tömegveszteséget nem befolyásolták, azonban ha ezek a hézagok összemetsződnek a beégett térfogattal, akkor a szegmentáló algoritmus nem képes ezek leválasztására a beégett térfogatról. A hézagok, mint alacsony sugárgyengítésű (gyakorlatilag levegővel telített) elemek a küszöbölés során a beégett térfogat részei maradnak, majd a viszonylagosan nagy méretük miatt a fák gyűrűtávolságához beállított méretű strukturális elemmel végzett morfológiai műveletek nem képesek ezek leválasztására. Ez az analízis során extra térfogatként jelenik meg a beégett térfogat oldalán.

A szegmentálási módszer potenciálisan alkalmas lehet a rétegelt minták vizsgálatára is, azonban további alaki szűrők alkalmazása szükséges vagy a minta égetését megelőzően is CT felvételt kell készíteni a vizsgált mintáról és a kezdeti felvétel alapján szűrhetők a mintában kezdetben meglévő hézagok.

A kúpos kaloriméteres vizsgálatok célja a kutatás során az volt, hogy referenciaként szolgáljon a Lindner módszeres beégésvizsgálatokhoz vagyis, hogy megállapítható legyen, hogy mutat e korrelációt a két vizsgálat eredménye egymással. A kúpos kaloriméteres vizsgálatból származó tömegveszteségi sebesség alapján már a hőáram ismeretében a beégési sebesség számítható, így amennyiben erre vonatkozóan van regressziós kapcsolat a Lindner tömegveszteséggel, úgy nagyobb mintaszámot követő regressziós vizsgálat alapján megbízhatóan meghatározható lenne beégési sebesség egy viszonylag egyszerű vizsgálat alapján, költséghatékony alternatívét jelentve a jelenlegi eljárások helyett.

A mintatömeggel korrigált tömegveszteségi sebesség a kúpos kaloriméteres vizsgálatból és sűrűséggel korrigált fajlagos tömegveszteség a Lindner beégés vizsgálatból erős lineáris regressziós kapcsolatot mutat. Nagyobb mintaszámmal történő további elemzést követően a Lindner módszer alkalmas lehet költséghatékony beégési sebesség meghatározására.

#### 4. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] MSZ EN 1995-1-2, *Eurocode 5: Faszerkezetek tervezése. 1-2 rész: Általános szabályok. Szerkezetek tervezése tűzhatásra*, 2013.
- [2] P. B. Cachim és J.-M. Franssen, „Assessment of Eurocode 5 Charring Rate Calculation Methods”, *Fire Technol*, köt. 46, sz. 1, o. 169–181, jan. 2010, <https://doi.org/10.1007/s10694-009-0092-x>.
- [3] ISO 5660-1, *Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)*. 2015.
- [4] A. Law, A. I. Bartlett, R. Hadden, és N. Butterworth, „Challenges and Opportunities for Fire Safety in Tall Timber Construction”, előadás Second International Tall Building Fire Safety Conference, Greenwich, London, 2014.
- [5] MSZ 9607, *Égéskezelhető szerrel kezelt fa és fa alapanyagú építési termékek vizsgálata. A kezelés hatékonyságának értékelése Lindner-módszer alapján*. 2020.
- [6] A. Biró és É. Lublós, „CT imaging of Lindner treated, burnt timber”, *J Therm Anal Calorim*, köt. 149, sz. 3, o. 909–920, febr. 2024, <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12747-4>.
- [7] W. Thornton, „Relation of Oxygen to the Heat to the Combustion of Organic Compounds”, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, köt. 33, 1917.
- [8] C. Hugget, „Estimation of rate of heat release by means of oxygen consumption measurements”, 1980.
- [9] M. Janssens, „Calorimetry”, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fifth edition., Springer New York LLC, 2016, o. 905–951.
- [10] V. Babrauskas, „The Cone Calorimeter”, in *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, Fifth edition., Springer New York LLC, 2016, o. 952–980.
- [11] R. C. Stein, M. Petkovski, D. L. Engelberg, F. Leonard, és P. J. Withers, „Characterizing the effects of elevated temperature on the air void pore structure of advanced gas-cooled reactor pressure vessel concrete using x-ray computed tomography”, *EPJ Web of Conferences*, köt. 56, o. 04003, 2013, <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135604003>.
- [12] D. C. González, Á. Mena, J. Mínguez, és M. A. Vicente, „Influence of air-entraining agent and freeze-thaw action on pore structure in high-strength concrete by using CT-Scan technology”, *Cold Regions Science and Technology*, köt. 192, o. 103397, dec. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2021.103397>.
- [13] B. Song, D. Nakamura, T. Kawaguchi, S. Kawajiri, és D. Rui, „Quantifying the shear behavior of fine-grained soil with herbaceous plant roots under freeze-thaw conditions using X-ray CT scan”, *Soil and Tillage Research*, köt. 246, o. 106326, febr. 2025, <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106326>.
- [14] X. Sun, X. Li, B. Zheng, J. He, és T. Mao, „Study on the progressive fracturing in soil and rock mixture under uniaxial compression conditions by CT scanning”, *Engineering Geology*, köt. 279, o. 105884, dec. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105884>.
- [15] É. Lublós, D. Ambrus, és T. Földes, „Hézagtartalom mérése aszfalt próbatesteken CT-vel”, *Magyar építőipar*, köt. 64, sz. 4, o. 161–164, 2014.
- [16] F. Longuetaud és mtsai., „Automatic knot detection and measurements from X-ray CT images of wood: A review and validation of an improved algorithm on softwood samples”, *Computers and Electronics in Agriculture*, köt. 85, o. 77–89, júl. 2012, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.03.013>.
- [17] P. Jacquín, F. Mothe, F. Longuetaud, A. Billard, B. Kerfriden, és J. M. Leban, „CarDen: A software for fast measurement of wood density on increment cores by CT scanning”, *Computers and Electronics in Agriculture*, köt. 156, o. 606–617, jan. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.008>.



- [18] K. Kobayashi, S. W. Hwang, T. Okochi, W. H. Lee, és J. Sugiyama, „Non-destructive method for wood identification using conventional X-ray computed tomography data”, *Journal of Cultural Heritage*, köt. 38, o. 88–93, júl. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.02.001>.
- [19] A. Krähenbühl, B. Kerautret, I. Debled-Rennesson, F. Mothe, és F. Longuetaud, „Knot segmentation in 3D CT images of wet wood”, *Pattern Recognition*, köt. 47, sz. 12, o. 3852–3869, dec. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2014.05.015>.
- [20] A. Gupta és S. Mutreja, „Mass Timber Construction Market Size, Share, Competitive Landscape and Trend Analysis Report by Construction Type, By Material, By Application : Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2022-2031”, AlliedMarketResearch. [Online]. Elérhető: <https://www.alliedmarketresearch.com/mass-timber-construction-market-A16621> (2024.03.21.)