Gradus Vol 13, No 2 (2026)
ISSN 2064-8014
Article no. 2026.2.ENG.008

AZ ELŐVÁKUUM MÓDOSÍTÁSÁNAK HATÁSA BÜKK ÉS CSERTÖLGY FAANYAGOK VÉDŐSZERFELVÉTELÉRE BETHELL-ELJÁRÁS ESETÉN

THE EFFECT OF PRE-VACUUM MODIFICATION ON THE PRESERVATIVE UPTAKE OF BEECH AND TURKEY OAK WOOD IN THE CASE OF THE BETHELL PROCESS

Buga-Kovács Luca [1], Horváth Norbert [2]*

[1] Alaptudományi Intézet, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Soproni Egyetem, Magyarország, https://orcid.org/0009-0001-4491-0773
[2] Alaptudományi Intézet, Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar, Soproni Egyetem, Magyarország, https://orcid.org/0009-0006-4332-0612

https://doi.org/10.47833/2026.2.ENG.008

Kulcsszavak:
Bethell-eljárás,
telítés,
védőszerfelvétel,
bükk (Fagus sylvatica),
csertölgy (Quercus cerris)

Keywords:
Bethell-process,
impregnation,
preservative uptake,
beech (Fagus sylvatica),
turkey oak (Quercus cerris)

Cikktörténet:
Beérkezett 2025. augusztus 29.
Átdolgozva 2026. szeptember 20
Elfogadva 2026. szeptember 25

Összefoglalás

Kutatásunk célja az volt, hogy összehasonlítsuk a közönséges bükk (Fagus sylvatica) és a csertölgy (Quercus cerris) faanyagának védőszerfelvételi tulajdonságait Bethell-eljárással való kezelések hatására. Az alkalmazott négy menetrendet az elővákuum időtartamában változtattuk és Reinprecht [16] nyomán határoztuk meg. A bükköt és a nemestölgyeket gyakran alkalmazzák vasúti talpfa anyagokként. A csertölgy fáját ritkábban alkalmazza az ipar, viszont szárazságtűrő fafajként a klímaváltozás hatása és nagyobb mennyiségi részaránya miatt felhasználása előtérbe kerülhet [9]. A vákuum-túlnyomásos telítési eljárások elvégzéséhez az EN 14734 [14] szabványban meghatározott 5%-os réz-szulfát desztillált vizes oldatot alkalmaztuk. A telítések értékelése az említett szabványban meghatározott indikátor oldat alkalmazásával és tömegmérési módszerrel történt.

Abstract

The aim of our research was to compare the preservative uptake properties of common beech (Fagus sylvatica) and turkey oak (Quercus cerris) wood after treatments with the Bethell process. The four schedules used varied in the duration of the pre-vacuum and were determined following Reinprecht [16]. Beech and oak are often used as railway sleeper materials. Turkey oak wood is less frequently used by industry, but as a drought-tolerant wood species [9] its use may come to the fore due to the impact of climate change and its common appearance. For the vacuum-overpressure impregnation procedures, a 5% distilled aqueous solution of copper sulphate specified in the EN 14734 [14] standard was used. The saturations were evaluated using the indicator solution specified in the aforementioned standard and by the mass measurement method.

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: kovacs.luca@phd.uni-sopron.hu

Bevezetés

A faanyagok tartósságának javítását célzó faanyagvédőszeres eljárások közül a nyomás alatti impregnálási metódusok a legfontosabb, legsikeresebb ipari módszerek [17]. A modifikáció, így a védőszeres telítés célja a faanyag tulajdonságainak javítása, például a farontó organizmusok (baktériumok, gombák, rovarok, termeszek, tengeri fúrókagylók) okozta biológiai károsodással szembeni alacsony természetes ellenállóképesség növelése [15] [3]. Ezek a megelőző vegyi védelmet adó autokláv eljárások lehetőséget jelentenek nagyobb keresztmetszetű faanyagok, például vasúti talpfák, kerítésoszlopok, szőlőkarók, távközlési- és elektromos elosztó oszlopok, hídgerendák, bányatámfák megőrző kezelésére [1][16]. A vákuum-nyomásos telítési eljárások során alkalmazott vákuum (légritkítás) célját és feladatát a technológiai sorban elfoglalt helye szabja meg. Elővákuum alkalmazásának célja a faanyag sejtüregeiből a levegő nagy részének eltávolítása a telítőszer behatolásának elősegítésére a telítés során. Utó- vagy közbeeső vákuum során a választékba juttatott kezelőanyag egy részét visszaszívják, melynek hatására kiegyenlítődik a nyomás a faanyag sejtüregeiben, és a csökkenő védőszerveszteség által gazdaságosabbá válik a telítés [6]. Az elővákuum szintje és stabilitása meghatározó a fa oldatfelvétele szempontjából. A nyomásszint és az idő jelentősen befolyásolja a behatolási mélységet. Az utóvákuum viszont csak a felület száradását befolyásolja [11].

A vizsgálatok tárgyát képező Bethell-eljárás (másként: vákuum-nyomásos eljárás, teljes cellás impregnálás, Bréant-eljárás) az elővákuumos eljárások közé tartozik [6][16], mely során a faanyagot faanyagvédő szerrel impregnálják zárt impregnáló rendszerekben negatív és pozitív nyomással. Ennek az eljárásnak az az elve, hogy a fában lévő összes üreget ki kell tölteni a védőszerrel. Ez az úgynevezett teljes cellás impregnálás pl. a fenyők fájának legelterjedtebb impregnálási módja a kültéri felhasználás esetén. Az impregnálási folyamat során a faanyagot először elővákuum segítségével légtelenítik. A henger légtelenítése után a faanyagvédőszerrel való elárasztás következik, és legalább 8 bar-os nyomás épül fel, hogy a fakonzerválószerek mélyen a korábban kiürített faanyag üregeibe hatolhassanak. Az áztatást addig kell folytatni, amíg a faanyag már nem szívja magába a faanyagvédőszert. Ezután a hengert légköri nyomásra engedik. Vízben oldódó konzerváló szerek esetén rövid végső vákuummal lehet eltávolítani a felesleges védőszert és száraz felületet elérni. A bevitel mennyisége az egyes fázisok szintjével és időtartamával szabályozható. A kezelés fázisainak paraméterei a különböző szakirodalmak szerint az elővákuum esetén 200-840 mbar és 15-60 perc, nyomás esetében 8-15 bar és 1-6 óra, valamint utóvákuumnál 200-840 mbar és 10-60 perc között alakul [11] [16] [17]. A Bethell-eljárást védősókeverékek vizes oldatával és olajjal való telítéshez használják [1].

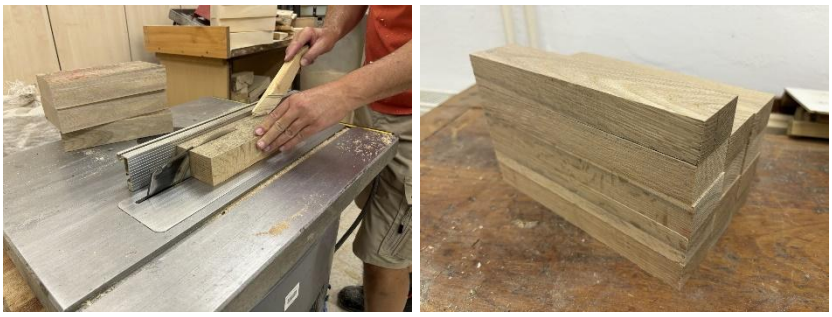
Ugyan az iparban légszáraz faanyagok impregnálását végzik [16], néhány európai lombos fafaj, köztük a bükk esetében végeztek kísérleteket nedves faanyag telítésére vonatkozóan [4]. A frissen vágott, még hibátlan, repedésmentes faanyagokat kezelték réz-alapú védőszerrel. A vizsgálat célja az impregnáló oldat szárítás miatti repedéseken keresztüli preferenciális kiszorulásából eredő inhomogén kezelés elkerülése volt. Az eljárás különösen alkalmasnak bizonyult az európai nem tartós keményfa, például a bükk kezelésére [4]. A szakirodalom a tölgyeket két csoportba, vörös és fehér tölgyek közé sorolja [5] [10]. A cser a vörös tölgyek csoportjába tartozik, melynek megfelelően vöröses színű, nagyobb sűrűségű, és vastagabb sejtfalúak a kései pászta sejtjei, mint a fehér tölgyek csoportjába sorolt nemes tölgyeknek [5]. A sűrűség jelentős szerepet játszhat a fémtartalmú faanyagvédőszerek, így a réz-szulfát eloszlásában faanyag sejtfalain belül [2]. Az eltérések magyarázhatják a csertölgy faanyag nemestölgyektől eltérő viselkedését, különösen a szárítás és a feldolgozás során [5].

A két vizsgált fafaj tartóssági besorolása az MSZ EN 113 szabvány [12] nyomán a tölgyek esetén ellenálló, a bükk esetében nem ellenálló. Ugyanakkor a csertölgy tartóssága a nemestölgyekétől elmarad [10]. A csertölgy felhasználása előtérbe kerülhet szárazságtűrő képessége miatt a következő években, jelentőségét növeli, hogy hazánkban egyike a legjelentősebb területarányú fafajoknak [9] [10]. A különböző faanyagok kezelhetősége befolyással bír a természetes tartósságuk javítását célzó faanyagvédőszerek alkalmazására. A faanyagok besorolását az MSZ EN 350 szabvány [13] tartalmazza kezelhetőségük szempontjából. A szabvány [13] szerint a bükk geszt az 1. (könnyen teléthető) impregnálhatósági osztályba, a tölgyek gesztje pedig a nehezen impregnálható, 4. osztályba tartozik. A faanyagok szijácsa fafajtól függetlenül

általában az 1. osztályba sorolható. Az említett szabvány [13] és a vonatkozó szakirodalmak [2] [5] alapján feltételeztük, hogy a két fafaj közül a cser esetében tapasztalunk kisebb mértékű tömegfelvételt és telítődést, valamint, hogy a két fafaj esetében a hosszabb időtartamú elővákuumok fognak nagyobb mértékű telítődést és tömegfelvételt eredményezni.

Anyagok és eljárások

A vizsgálatokhoz felhasznált faanyagok szélezetlen bükk- és csertölgypallók voltak. A pallók vastagsága ~55 mm volt. A vizsgálati anyagokat aszerint választottuk ki, hogy a telítési menetrendek összehasonlíthatósága miatt a próbatestek egymás után kerülhessenek kivágásra. A faanyagokat szalagfűrészgépen daraboltuk, majd az anyagokat egyengető gyalun megmunkáltuk, és körfűrészgépen alakítottuk ki a próbatestek végleges méretét. A próbatestek keresztmetszetét 30×50 mm-ben határoztuk meg, amely egy gyakorta alkalmazott tetőcserépléc keresztmetszet. A próbatestek hosszát az EN 14734 szabványt [14] figyelembe véve 240 mm-ben határoztuk meg. A faanyagokat normál klímán (20 ℃ hőmérséklet, 65% relatív páratartalom) kondicionáltuk a vizsgálatok elvégzéséig.



1. ábra. Cser telítési próbatestek végleges méretének kialakítása (bal) és telítési próbatestek (jobb)

A faanyagok telítése a Soproni Egyetem Faipari Mérnöki és Kreatívipari Karához tartozó vákuum-túlnyomásos telítőhengerben történt. A Bethell telítési eljárásokhoz használt berendezés elrendezése vízszintes, tartálya rozsdamentes kazánlemezből készült. Az arányos tartály egyik edényfeneke hegesztéssel, a másik karimás kötéssel kapcsolódik a nyomástartó edény köpenyéhez. A karimás kötés 12 darab hatlapfejű csavarral kivitelezhető. A henger üveggyapot hőszigetelése kívülről alumínium lemezzel burkolt. A telítőhenger köpenyén több különböző átmérőkkel rendelkező csőcsonk található, melyek által a túlnyomást biztosító kompresszor, a vákuumszivattyú és a nyomásmérő műszerek csatlakoztatása megoldható. A tartályban végbemenő folyamatok vezérelhetők a berendezés használata során kapcsolótáblával, amely egy PLC közbeiktatásával mágneskapcsolókkal kapcsolja a vákuumszivattyút [7]. A hengerben uralkodó nyomás, illetve vákuum mérése és szabályozása a henger tetején találhatók mérőórákkal, valamint csapokkal kivitelezhető.



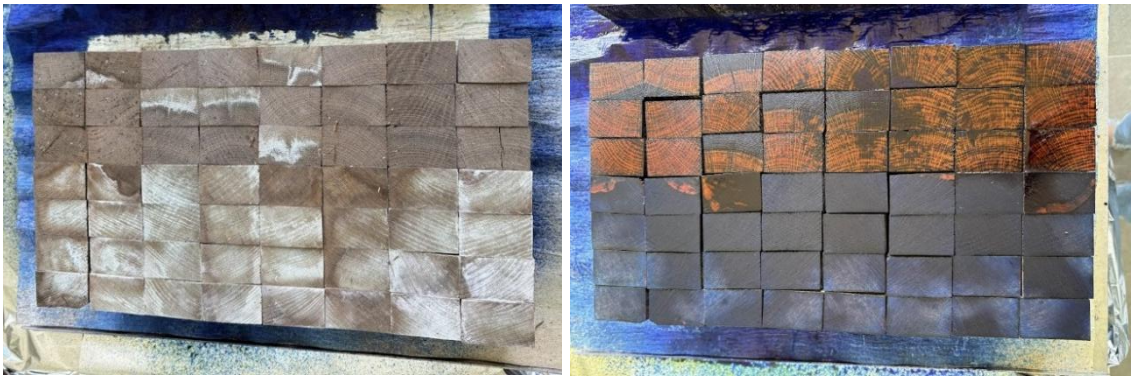
2. ábra. Hézagolt próbatestek (bal) és lesúlyozott próbatestek telítés előtt (jobb)

A Bethell-telítési menetrendek elvégzéséhez kezelésenként 3 db cser és 4 db bükk 30×50×240 mm nagyságú próbatestet használtunk. Telítőszerként az EN 14734 szabványban [14] meghatározott 5%-os réz-szulfát desztillált vizes oldatot alkalmaztuk. A telítőhengerben elhelyezett edényekbe tettük a próbatesteket hézagolással (*2. ábra, bal*), majd lesúlyoztuk őket. Ezután a kezelőedényeket felöntöttük a réz-szulfát oldattal, hogy az bőven ellepje a próbatesteket (*2. ábra, jobb*). A gép bezárása és a vákuumszivattyú bemelegedése után indítottuk el az aktuális telítési eljárást. A négy alkalmazott menetrend paramétereit a következő táblázatban foglaltuk össze.

1. Táblázat. Az alkalmazott telítési eljárások paraméterei

Eljárás	***1. menetrend***	***2. menetrend***	***3. menetrend***	***4. menetrend***
Elővákuum	200 mbar / 15 perc	200 mbar / 30 perc	200 mbar / 45 perc	200 mbar / 60 perc
Telítőszernyomás	8 bar / 60 perc	8 bar / 60 perc	8 bar / 60 perc	8 bar / 60 perc
Utóvákuum	200 mbar / 30 perc	200 mbar / 30 perc	200 mbar / 30 perc	200 mbar / 30 perc

A telítés után az EN 14734 szabványban [14] meghatározott indikátor oldatot alkalmaztunk. Az indikátor króm-azurol S és nátrium-acetát desztillált vizes oldata, amely a védőszerbeszívódás (penetráció) vizuális értékelésére alkalmas. A réz-szulfát oldattal telített, leszárított próbatestek (*3. ábra, bal*) feltárt keresztmetszeteire permetezve színváltozás történik: a kezelt részek élénk kékre színeződnek el (*3. ábra, jobb*). A reagenssel kezelt keresztmetszeteket a próbatestek bütüitől 10-10 cm-ben határoztuk meg az EN 14734 [14] szabvány alapján. A reagenses kezelés elvégzése után a kezelt keresztmetszeteken meghatároztuk a legkisebb védőszerbeszívódási mélységeket és a telített keresztmetszet részarányát a teljes keresztmetszethez viszonyítva.



3. ábra. Telítési próbatestek indikátor oldattal történő kezelés előtt (bal) és után (jobb)

Módszerek

A normál klímához tartozó védőszerfelvétel meghatározásához a minták kiindulási tömegét klimatizálást követően, a réz-szulfát oldattal való telítést megelőzően digitális mérlegen mértük, két tizedes pontossággal. Közvetlenül a Bethell eljárásokat követően mértük a lecsepegtetett próbatestek tömegeit. A telítés előtt és után mért tömegek különbségéből számítva a felvett réz-szulfát oldat tömege [6]:

$$\Delta m = m_u - m_e \tag{1}$$

ahol: Δm = a klimatizált próbatest által felvett védőszer tömege grammban
m_u = a klimatizált próbatest telítés utáni tömege grammban
m_e = a klimatizált próbatest telítés előtti tömege grammban.

A felvett réz-szulfát oldat töménységének ismeretében – amely az EN 14734 [14] szerinti oldat esetén 5% –, számítható a felvett réz-szulfát tömege:

$$m_{CuSO_4} = \Delta m \cdot 0{,}05. \tag{2}$$

ahol: Δm = a klimatizált próbatest által felvett védőszer tömege grammban
m_{CuSO4} = a felvett réz-szulfát tömege grammban.

A minták vizuális értékelése két módszerrel történt az EN 14734 [14] szabványban meghatározott indikátor oldattal történő kezelés után.

Az EN 14734 [14] szabvány meghatározza a minimális védőszerbeszívódási mélységet, melyet Nikon SMZ 800 típusú mikroszkóppal mértünk. Minden keresztmetszeten több mérést végeztünk azokat végigpásztázva, és a mért legkisebb értéket vettük figyelembe.

A telített területarány meghatározására az indikátorral kezelt minták keresztmetszeteiről digitális fotókat készítettünk megfelelő fényviszonyok mellett (*4. ábra, bal*). Az így kapott képeken a faanyag keresztmetszetét számítógépes képfeldolgozással választottuk el a háttértől (Python 3.11, OpenCV és NumPy könyvtárak felhasználásával) és kizártuk az elemzésből (*4. ábra, középső*). A képeket színcsatorna-elemzésnek vetettük alá, amely során a kék színreakcióval jelzett, impregnáló oldattal telített területeket elkülönítettük a kezeletlen (barna árnyalatú) faanyagtól (*4. ábra, jobb*).



4. ábra. A telített területarány-meghatározás lépései csertölgy próbatest esetén

Az eredményeket minden mintára százalékos formában adtuk meg, a feldolgozott képeket és a számítási adatokat dokumentáltuk. A telített keresztmetszet aránya a kék színű (telített) pixelek számának és a teljes keresztmetszet pixeleinek arányaként kifejezve:

$$T_t = \frac{P_t}{P_{ö}} \cdot 100. \qquad (3)$$

ahol: T_t= a teljes keresztmetszeten a telített területarány, %-ban
P_t = a keresztmetszeten a telített pixelek száma
$P_{ö}$ = a pixelek száma a minta teljes keresztmetszetén.

Eredmények és értékelés

A kezelések során az elővákuum mértékét időben változtattuk. Feltételeztük, hogy a hosszabb időtartamú elővákuum nagyobb tömegfelvételt fog eredményezni mindkét fafaj esetén. További hipotézisünk szerint a két fafaj anatómiai tulajdonságait figyelembe véve mindegyik menetrendnél a bükk mutat magasabb értékeket.

A négy menetrend mindegyike előfeltételezésünknek megfelelően a nehezebben kezelhető [13] csertölgy próbatesteknél bizonyult kevésbé eredményesnek. Míg az 1. menetrend esetén a csertölgy minták által felvett oldat tömegére adódó átlagérték 63,99 g és a réz-szulfát számított átlagtömege 3,20 g volt, addig a bükk minták átlagosan 189,84 g oldatot, ebből 9,49 g réz-szulfátot vettek fel. A 2. menetrenddel kezelt csertölgy minták 76,37 g oldatot, ebből 3,82 g réz-szulfátot vettek fel átlagosan, a bükk próbatestek pedig 199,39 g réz-szulfát oldatot, és ebből 9,97 g réz-szulfátot vettek fel. A 3. menetrend során a csertölgy minták által felvett oldat tömegére 71,64 g és a réz-szulfát számított tömegére 3,58 g átlagérték adódott, addig a bükk minták átlagosan 210,93 g oldatot, ebből 10,55 g réz-szulfátot vettek fel. A 4. menetrenddel kezelt csertölgy minták 51,37 g oldatot, ebből 2,57 g réz-szulfátot vettek fel átlagosan, a bükk próbatestek pedig 203,07 g réz-szulfát oldatot, és ebből 10,19 g réz-szulfátot vettek fel. A négy menetrend esetén a két fafaj védőszerfelvétele nem mutat szignifikáns különbségeket, valamint nem korrelál az elővákuum időtartamával.

Ez az eredmény arra utal, hogy a 15 perces elővákuum időtartam már elegendő volt a sejtüregekben lévő szabad levegő jelentős részének eltávolításához, így a vákuumidő további növelése (30, 45 és 60 percre) már nem biztosított lényegi plusz hajtóerőt a védőszer behatolásához. A csertölgy esetében a telítődés mértékét nem a légritkítás időtartama, hanem a belső faanatómiai gátak korlátozzák: a gesztedényekben jelen lévő tiliszek, a kései pászta vastag sejtfalai és a nyitott gödörkék alacsony aránya meggátolják a folyadék mélyebb penetrációját, amely belső fizikai akadályokat pusztán a légritkítási idő meghosszabbításával nem lehet áttörni.

A csertölgy esetében hipotézisünknek megfelelően a telített terület arány alacsonyabb maradt (83,6–86,1%) a vizsgált keresztmetszeteken, és nem mutatott szignifikáns különbséget a különböző menetrendek között. A minimális beszívódási mélységek eltérő értékei a gyűrűslikacsú szerkezetből, a sűrű szövetű kései pásztából illetve a tiliszekkel eltömődött edényekből adódhatnak, amelyek miatt a kezelőszer nehezebben járhatja át a faanyagot (*4. ábra*). A bükk minták mindegyik kezelési menetrend mellett szinte teljes mértékben telítették a vizsgált keresztmetszeteket (98,8–100%), ezért esetükben a legkisebb védőszerbeszívódást nem értékeltük. A két fafaj eltérő anatómiai sajátosságait és különböző telíthetőségét tükröző eredményeket a *2. táblázat*ban foglaltuk össze.

2. Táblázat. A védőszerfelvétel, telített keresztmetszet és a legkisebb védőszerbeszívódás átlagértékei

Eljárás	Eljárás	Felvett védőszer tömege (g)	Felvett $CuSO_4$ tömege (g)	Telített területarány átlag (%)	Min. beszívódás átlag (µm)
1. menetrend	Csertölgy	*63,99*	*3,20*	*83,8*	*166*
	Bükk	*189,84*	*9,49*	*99,4*	-
2. menetrend	Csertölgy	*76,37*	*3,82*	*85,1*	*79*
	Bükk	*199,39*	*9,97*	*98,8*	-
3. menetrend	Csertölgy	*71,64*	*3,58*	*86,1*	*140*
	Bükk	*210,93*	*10,55*	*99,9*	-
4. menetrend	Csertölgy	*51,37*	*2,57*	*83,6*	*148*
	Bükk	*203,07*	*10,19*	*100,0*	-

A cser minták esetében közepes erősségű pozitív korreláció mutatkozott a telített területarány és a legkisebb beszívódási mélység között ($R = \sim 0{,}35$), azonban a kapcsolat statisztikailag nem bizonyult szignifikánsnak ($p > 0{,}05$). A cser próbatestek esetén a telített keresztmetszet és a felvett kezelőszer tömeg között gyenge, negatív irányú kapcsolat mutatkozott ($R = \sim -0{,}26$), azonban az összefüggés statisztikailag nem bizonyult szignifikánsnak ($p > 0{,}3$). A minták által a felvett tömeget valószínűleg nem a telített keresztmetszet aránya, hanem más tényezők (pl. faanatómiai tulajdonságok) befolyásolták döntő mértékben. A csertölgy próbatesteknél megfigyelt gyenge, negatív irányú kapcsolat hátterében a faanyag makro- és mikroszerkezeti heterogenitása állhat. Mivel a csertölgy szijácsa könnyen telíthető (1. impregnálhatósági osztály), míg a gesztje erősen impregnálásálló (4. osztály), a próbatestekben lévő szijács-geszt arány kismértékű eltérése is jelentősen befolyásolja a mért paramétereket. Egy magasabb szijácsarányú mintánál a folyadék kiterjedtebben beszívódhat (nagyobb telített területarányt eredményezve), ám ha a faanyag helyi sűrűsége vagy az évgyűrűszerkezete eltérő, az össztömeg-növekedés elmaradhat a várt értéktől. Ezen felül a tiliszesedés egyenetlen eloszlása miatt a védőszer a keresztmetszeten hálózatosan, nagy területet lefedve terjedhet el anélkül, hogy a sűrűbb sejtfalú kései pásztát vagy a geszt mélyebb részeit teljes sejttérfogatban feltöltené. A telített keresztmetszet aránya és a felvett oldat tömege között közepesen erős, szignifikáns pozitív korreláció mutatkozott ($R = 0{,}54$; $p < 0{,}01$) a bükk próbatestek esetén. Ez arra utal, hogy a magasabb arányú telítettség általában nagyobb felvett tömeggel párosult. Ezt a fafaj homogénebb, szórt likacsú anatómiai szerkezete magyarázza: a jól átjárható edények és a nyitott gödörsúlyos kapillárisok révén a védőszer nemcsak a felületi rétegeket, hanem a teljes keresztmetszetet egyenletesen átjárja, így a vizuálisan igazolt kiterjedtebb telítődés közvetlen és egyenes arányos kapcsolatban áll a felvett oldat tömegével.

Összefoglalás

A vizsgálatok eredményei alátámasztották a hipotézisünket: a bükk faanyag minden kezelési menetrend esetén jelentősen nagyobb mennyiségű védőszert vett fel, mint a csertölgy, amely a két fafaj eltérő anatómiai sajátosságaiból adódik. A csertölgy gyűrűslikacsú szerkezete, valamint a tiliszekkel eltömődött edényei, vastag sejtfalai a kései pásztában gátolták a védőszer beszívódását, míg a szórt likacsú bükk faanyaga szinte teljes keresztmetszetében könnyen telíthetőnek bizonyult.

Az elővákuum időtartamának növelése önmagában nem eredményezett szignifikánsan nagyobb tömegfelvételt egyik fafaj esetében sem, a menetrendek közti különbségek inkább az anatómiai különbségekből adódtak.

A korrelációs vizsgálatok szerint a csertölgy esetében a telítettség és a minimális beszívódási mélység között közepes erősségű, de statisztikailag nem szignifikáns kapcsolat mutatkozott, míg a telítettség és a felvett tömeg között gyenge negatív összefüggés volt kimutatható. Ezzel szemben a bükk próbatesteknél a telített keresztmetszet aránya és a felvett tömeg között közepesen erős, szignifikáns pozitív korreláció állt fenn, ami megerősíti, hogy a teljes keresztmetszet telítődése közvetlenül hozzájárul a nagyobb oldatfelvételhez.

Összességében a kutatás rámutatott arra, hogy a faanyag anatómiai szerkezete alapvetően meghatározza a telíthetőséget és a védőszerfelvételt.

Méréseink gyakorlati és ipari szempontból is fontos technológiai következtetésekkel szolgálnak. A tapasztalt eredmények alapján a Bethell-eljárás során a csertölgy faanyag esetében felesleges a 15 percnél hosszabb elővákuum alkalmazása, mivel az nem javítja a védőszer-behatolást és a tömegfelvételt. A rövidebb elővákuum-idő alkalmazásával az ipari telítési ciklusidő lerövidíthető, ami jelentős energia- és költségmegtakarítást eredményezhet a fafeldolgozó üzemekben.

Mivel a hagyományos Bethell-eljárás paramétereinek módosítása (az elővákuum-idő növelése) nem hozott áttörést a nehezen impregnálható csertölgy telítettségében, a jövőbeni technológiai fejlesztések során az alábbi alternatív irányokat célszerű vizsgálni:

1. A nyomási fázis intenzifikálása: A telítőszernyomás megemelése (8 bar felett) vagy a nyomás alatti tartási idő meghosszabbítása a sűrűbb sejtfalak és a kései pászta átjárhatóságának fokozására.
2. Előkezelési eljárások alkalmazása: A faanyag telítés előtti gőzölése, kíméletes hőkezelése vagy nedvesítőszerek alkalmazása, amelyek elősegíthetik a tiliszek és az edényzáródások feltárását.
3. Alternatív telítési technológiák: Korlátozott cellás eljárások (például Rüping- vagy Lowry-módszer), illetve axiális telítési technikák bevonása a kutatásba a hatékonyabb védőszer-eloszlás elérésére.

Eredményeink hozzájárulnak a faanyagvédelem és az ipari impregnálási technológiák fejlesztéséhez, különösen a nehezen telíthető, de a jövőben nagyobb jelentőségű fafajok, így a csertölgy kezelésének optimalizálásában.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak a próbatestek precíz legyártásáért Horváth Imre munkatársnak, valamint publikáció elkészítéséhez nyújtott támogatásért az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Programnak.

Az EKÖP-24-3-II-SOE-73 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.



Irodalomjegyzék

[1] Bálint, Gy.: Épületek védelme, 1967, p. 184
[2] Cao J., Kamdem D. P.: Microdistribution of copper in copper-ethanolamine (Cu-EA) treated southern yellow pine (Pinus spp.) related to density distribution, 2005 https://doi.org/10.1515/HF.2005.013
[3] Civardi C., Schwarze F., Wick P.: Micronized copper wood preservatives: An efficiency and potential health risk assessment for copper-based nanoparticles, 2015 https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.02.018
[4] Damay J., Fredon E., Gérardin P., Lemmens P.: Evaluation of axial impregnation as an alternative to classical wood vacuum pressure impregnation method, Maderas, Cienc. tecnol. vol.17 no.4 Concepción, 2015, http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000077
[5] Deaconu, I., Porojan, M., Timar, MC, Bedelean, B. és Campean, M.: Comparative research on the structure, chemistry, and physical properties of Turkey oak and sessile oak wood, *BioResources* 18(3), 2023, pp. 5724-5749. DOI: 10.15376/biores.18.3.5724-5749
[6] Gyarmati B.; Igmándy Z.; Pagony H.: Faanyagvédelem, Mezőgazdasági Kiadó (1964), pp. 264-266.
[7] Kovács, A.: Speciális faanyag-kezelő berendezés műszerezésének és vezérlésének fejlesztése, TDK dolgozat, 2018, p. 7
[8] Kovács, L.: Pannónia nyár alapanyagú, kísérleti rétegelt-ragasztott faanyagok védőszerfelvételi vizsgálatai, diplomamunka, Soproni Egyetem, 2022, p. 29
[9] Molnár S.: Cser. In: Molnár S., Farkas P., Börcsök Z., Zoltán Gy. (szerk.): Földünk ipari fái, ERFARET Nonprofit Kft., Sopron, 2016, p. 48.
[10] Molnár, S.: Faanyagismeret, 2004, pp. 341, 344-345, 364
[11] Müller, Johann (2005): Holzschutz im Hochbau pp. 255-258
[12] MSZ EN 113:2021: A fa és a fa alapanyagú termékek tartóssága. A farontó bazídiumos gombák elleni védekezés meghatározásának vizsgálati módszere.
[13] MSZ EN 350:2016: Durability of wood and wood-based products. Testing and classification of the durability to biological agents of wood and wood-based materials. (A fa és a fa alapanyagú termékek tartóssága. A fa és a fa alapanyagú termékek biológiai anyagainak tartóssági vizsgálata és osztályozása.)
[14] CEN EN 14734:2022(MAIN) Durability of wood and wood-based products - Determination of treatability of timber species to be impregnated with wood preservatives - Laboratory method
[15] Sandberg, D., Kutnar, A., Mantanis, G.: Wood modification technologies - a review, iForest - Biogeosciences and Forestry, Volume 10, Issue 6, 2017, pp. 895-908 https://doi.org/10.3832/ifor2380-010
[16] Reinprecht, L.: Wood protection, 2013, pp. 128-129
[17] Wilkinson, J. G.: Industrial timber preservation, 1979 p. 212