Erdészettudományi Közlemények 14. évfolyam 1. szám 2024

DOI: https://doi.org/10.17164/EK.2024.05

63–86. oldal

A HAZAI FAIPARHOZ KAPCSOLÓDÓ KLÍMAMITIGÁCIÓS INTÉZKEDÉSEK HATÁSBECSLÉSE

Király Éva[1], Kis-Kovács Gábor[2], Börcsök Zoltán[3], Kocsis Zoltán[3], Kottek Péter[4], Mertl Tamás[1], Németh Gábor[3], Polgár András[5] és Borovics Attila[1]

[1]Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézet
[2]HungaroMet Zrt.
[3]Soproni Egyetem Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar
[4]Agrárminisztérium Erdőrendezési Főosztály
[5]Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar

Kivonat

A fatermékek (HWP) jelentős mennyiségű szenet tárolnak, a hosszú élettartamú termékek és a fa épületszerkezeti elemek a széntárolás egyik leghatékonyabb módját valósítják meg. A faipari termékek élettartamának meghosszabbítása, valamint a megfelelő hulladékkezelés, újrahasznosítás és újrafelhasználás jelentősen hozzájárulhatnak a klímacélok eléréséhez. Tanulmányunkban 10 különböző forgatókönyv alapján 2050-ig vetítettük előre a hazai fatermékek széntárolását, illetve széndioxid és metán kibocsátásait annak érdekében, hogy megtaláljuk a legnagyobb klímavédelmi hatással bíró faipari intézkedések kombinációját. Az előrejelzéshez az országspecifikus HWP-RIAL modellt használtuk, mely alkalmas a fatermékek széntárolásának prognosztizálására, valamint az életciklus végéhez és a hulladékkezeléshez kapcsolódó kibocsátások előrejelzésére is. A vizsgálatunk leglényegesebb következtetése az, hogy további intézkedések nélkül a magyarországi fatermékek 2047-re széndioxid nyelőből kibocsátóvá válnak. A szénmegkötés folyamatos fenntartása érdekében elengedhetetlen további klímavédelmi intézkedések bevezetése, beleértve a kaszkád termékértékláncokat és a körkörös biogazdálkodási megközelítést. A leghatékonyabb egyedi intézkedések közé tartozik a termékek életidejének növelése, az újrahasznosítási arány növelése és az iparifa mennyiségének növelése az ipari választékarány növelésével, vagy a kitermelés fokozásával. Ezen intézkedések kombinációjával a 2022-2050 közötti időszakban éves átlagban maximum 1,5 millió t CO_2 egyenérték klímamitigációs potenciál érhető el.

A cikk a Király et al. 2024 (Climate change mitigation potentials of wood industry related measures in Hungary) eredeti közlés részben módosított fordítása.

Kulcsszavak: CO_2, HWP, klímamitigáció, szénkészlet változás, életidő, égetéssel történő ártalmatlanítás, hulladéklerakás

Levelező szerző/Correspondence:
Király Éva, 9600 Sárvár, Várkerület 30/A.; e-mail: kiraly.eva.ilona@uni-sopron.hu

MITIGATING CLIMATE CHANGE THROUGH WOOD INDUSTRY MEASURES IN HUNGARY

Abstract

Harvested wood products (HWPs) hold a significant amount of carbon, with long-lasting products and wooden buildings being some of the most effective methods for carbon storage. Extending the lifespan of wood products, along with proper waste management, recycling, and reuse, can further help meet climate goals. In our study, we projected the carbon storage, carbon dioxide, and methane emissions of the Hungarian HWP pool up to 2050 under 10 different scenarios to identify the combination of wood industry measures with the greatest impact on climate change mitigation. We utilized the country-specific HWP-RIAL model to forecast emissions related to the end-of-life and waste management of wood products. Our main finding is that without additional measures, the Hungarian HWP pool would turn from a carbon sink to a source of emissions by 2047. To ensure the Hungarian HWP pool remains a carbon sink, it is crucial to implement further climate mitigation strategies, including cascading product value chains and circular bioeconomy approaches. The most effective individual measures include increasing product half-life, boosting the recycling rate, and enhancing industrial wood production through increased assortments and harvesting. By combining these measures, an average annual climate change mitigation potential of up to 1.5 Mt CO_2 equivalents could be achieved during the 2022–2050 period.

This article is based on the original publication by Király et al. 2024 (Climate change mitigation potentials of wood industry related measures in Hungary).

Keywords: CO_2, HWP, climate change mitigation, carbon storage, half-life extension, incineration, solid waste disposal

BEVEZETÉS

Az erdészeti- és faipari szektor, másnéven fagazdaság négy módon járulhat hozzá a klímaváltozás mérsékléséhez: a szén erdei ökoszisztémában történő megkötése és tárolása útján, a hosszú élettartamú faipari termékek széntárolása által, széndioxid-intenzív termékek anyagának helyettesítése révén, valamint a fosszilis tüzelőanyagok bioenergiával történő helyettesítése útján (Borovics 2022, Verkerk et al. 2022). A fa energiatakarékos, alacsony széndioxid-kibocsátású építőanyag, amely megfelelő felhasználása esetén jelentősen hozzájárulhat az európai klímapolitikai célok eléréséhez (Sikemma et al. 2023). Az erdővédelmi intézkedések, mint például a biodiverzitás megőrzése vagy a csökkentett kitermelés az erdei ökoszisztémákban történő széntárolásra összpontosítanak, és korlátozott fakitermelést igényelnek, míg a faipari termékekben történő széntárolásra vagy a helyettesítési hatásokra összpontosító intézkedések negatív következményekkel járhatnak az erdei ökoszisztémákban megvalósuló széntárolásra nézve (Johnston & Radeloff 2019, Churkina et al. 2020, Verkerk et al. 2022). Ezt az ellentmondást az erdő funkcióinak szétválasztásával lehet feloldani (Kottek et al. 2023a). Az alacsony természetességi szintű erdők szénpumpaként funkcionálhatnak, amelyek szerepe nem a széntárolás, hanem a szénmegkötés és a faipari termékekben hosszú távon tárolt szén mennyiségének növelése, ezzel nyersanyagot biztosítva egy innovatív és klímabarát erdőipar számára (Kottek et al. 2023a).

Az éghajlatváltozás következményeként egyre kiterjedtebb és súlyosabb erdőkárokra számíthatunk (Verkerk et al. 2022). A fafajok eloszlásának modellezése azt mutatja, hogy az elkövetkező évtizedekben szinte minden fő európai fafaj elterjedési területe visszaszorulhat, különösen Kelet- és Dél-Európában (Verkerk et al. 2022). A hazai vonatkozásokat nézve az optimistább forgatókönyv

szerint is a hazai tölgyfajok klimatikus igényeinek megfelelő területek nagysága az ezredfordulós értékekhez képest az egyötödére eshet vissza a század végére, míg a bükk (*Fagus silvatica*) számára klimatikus szempontból alkalmas területek nagysága a tizedére csökkenhet (Illés & Móricz 2022a,b). Ez alátámasztja a faipari innováció fontosságát, mivel a jövőben elkerülhetetlennek tűnik a szárazságtűrő fafajok faanyagának kiterjedtebb ipari célú felhasználása.

Sokan kétségbe vonják a keményfa nyersanyag potenciálját és a puhafa helyettesítésére való alkalmasságát (Auer et al. 2020). Ugyanakkor az utóbbi időben újra feléledt az érdeklődés a hőkezelési eljárások iránt a jó minőségű faanyag csökkenő rendelkezésre állása és a fenntartható építőanyagok iránti növekvő kereslet miatt (Boonstra 2008, Esteves & Pereira 2009). Számos tanulmány elemzi a szárazságtűrő fafajok technológiai tulajdonságainak javítási lehetőségeit és módszereit, és felmerül az igény további információk gyűjtésére az alacsonyabb ipari kihasználtságú és gyengébb tartósságú faanyag típusok jellemzőiről és teljesítményéről (Esteves & Pereira 2009, Todaro 2012). Ígéretes eredmények születtek a csertölgy (*Quercus cerris*) faanyag tulajdonságainak hidrotermikus kezeléssel történő javításával és új ipari alkalmazási lehetőségeinek megteremtésével kapcsolatban (Todaro et al. 2012, 2013, Cetera et al. 2016). Az innovatív faipari termékek mellett a technológiai fejlődés javíthatja a faipari feldolgozás hatékonyságát, minimalizálhatja a hulladékkeletkezést (Li et al. 2022), és támogathatja az újrahasznosítást is (Wilson 2010, Király et al. 2023), ami szintén elősegítheti a fatermékek (HWP) szénegyenlegének kedvezőbb alakulását.

Magyarországon az ErdőLab projekt (Borovics 2022, Borovics 2024) keretében végzünk modellezési munkát a legmegfelelőbb fagazdasági klímamitigációs útvonalak azonosítása érdekében. A faipari termékmodellek értékes eszközök a fatermékek jövőbeli szénmérlegének becslésére, lehetővé téve a klímaváltozás mérsékléséhez történő hozzájárulásuk értékelését (Brunet-Navarro et al. 2018, 2021, Király et al. 2023). Az ErdőLab projekt keretében egy új faipari termékmodellt fejlesztettünk, a HWP-RIAL modellt (Harvested Wood Product Recycling, Incineration and Landfill model; Király et al. 2023). Ez az anyagáram-modell az IPCC módszertanán alapul (IPCC 2006, 2019), és magyarországi viszonyokra paraméterezett, tehát országspecifikusnak mondható. Tartalmaz egy saját fejlesztésű újrahasznosítási és hulladékút-választó modult is. Ezáltal képes előrejelezni a használatban lévő faipari termékekben, illetve a hulladéklerakókon felhalmozódott faipari termékekben tárolt szén mennyiségét, valamint a használatból kikerülő és égetéssel vagy hulladéklerakással ártalmatlanított termékekből származó széndioxid (CO_2) és metán (CH_4) kibocsátásokat is (Király et al. 2023).

Tanulmányunkban a HWP-RIAL modellt használtuk a faipari ágazathoz kapcsolódó klímamitigációs intézkedések országos szintű hatásainak becslésére. Vizsgálatunk célja az volt, hogy szimuláljuk a magyarországi HWP tárolóból származó nettó kibocsátásokat különböző forgatókönyvek szerint, és megtaláljuk az optimális intézkedéskombinációt a legkedvezőbb klímamitigációs hatás elérése érdekében.

ADAT ÉS MÓDSZER

Tanulmányunkban különböző forgatókönyvek alapján előrejeleztük a hazai fatermékek széntárolását és a belőlük életciklusuk végén keletkező üvegházgáz-kibocsátások mértékét a 2022–2050 közötti időszakra vonatkozóan. Ehhez először megvizsgáltuk az egyes fatermék-csoportok hazai termelésére vonatkozó historikus adatokat. Ezt követően a fentiekben részletezett hozamvizsgálat eredményeiből kiindulva előrevetítettük a fakitermelés mértékét a kitermelés volumenének növekedését feltételező for-

gatókönyv, illetve változatlan tendenciákat feltételező (Business as Usual, BAU) forgatókönyv szerint. Ezután a választékszerkezet alakulását is előrejeleztük BAU megközelítésben, illetve az ipari választékok arányának növekedését feltételezve. Így összesen két fakitermelési és két választékszerkezetre vonatkozó forgatókönyvet vizsgáltunk, melyek alapján a fatermékek termelési volumenét előrejeleztük.

A fatermékek széntárolásának számszerűsítésére, és a belőlük származó élettartam végi emissziók előrejelzésére az ErdőLab projekt (Borovics 2022) keretében kidolgozott HWP-RIAL modellt (Király et al. 2023) használtuk. A modell segítségével vizsgáltuk a fatermékek előállításához, felhasználásához és élettartam végi kezeléséhez kapcsolódó egyedi és kombinált mitigációs intézkedések hatásait a 2022-2050 közötti időszakban. Ezzel az volt a célunk, hogy számszerűen meghatározzuk az egyes intézkedések és intézkedéscsoportok hatását a fatermékek széntárolására, valamint üvegházgáz kibocsátásaik és elnyeléseik egyenlegére.

A modellezés során tíz különböző forgatókönyvet dolgoztunk ki. A szcenáriókat úgy állítottuk be, hogy vizsgálni tudjuk a BAU, és a megnövelt fakitermelés hatásait. Emellett vizsgáltuk a választékszerkezet változatlanul hagyásának, valamint az ipari választékarány növelésének következményeit is. Fentiek mellet vizsgáltuk a körkörös biogazdasághoz kapcsolódó mitigációs intézkedések hatásait, azaz a termékek életidejének megnöveléséhez, illetve az újrahasznosítás növeléséhez kapcsolódó hatásokat, valamint a hulladéklerakás mértékének csökkentéséhez, és a metánvisszanyerés növeléséhez kapcsolódó hatásokat. Létrehoztunk olyan kombinált szcenáriókat is, melyekkel az intézkedések együttes hatásait értékeltük.

A felhasznált adatokat, az előrejelzéseket, a kibocsátások becslésének módszertanát és a modell paraméterezését az alábbi alfejezetekben ismertetjük részletesen.

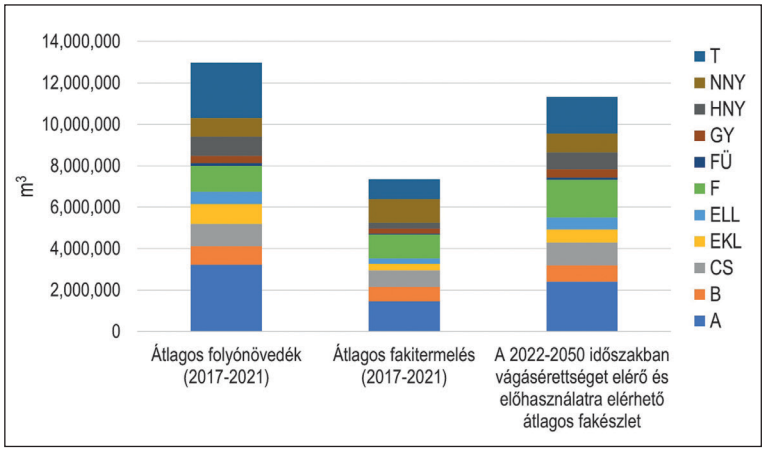
Historikus fatermék termelési adatok

Elemzésünkben az egyes fatermék-csoportok hazai termelésére vonatkozóan a hazai Üvegházgáz Leltárjelentésben (ÜHG leltár; NIR 2023) is felhasznált input adatokat használtuk. Ezeket az adatokat Király és munkatársai (2022) részletesen bemutatják és elemzik. Az adatok az 1964-2021 közötti időszakot fedik le. Az adatok forrása a KSH adatgyűjtése, az Országos Statisztikai Adatgyűjtési Program, valamint a KSH által kiadott statisztikai évkönyvek, illetve Halász Aladár (1960, 1966, 1994) munkái. Tanulmányunkban az import faanyagból készülő termékeket nem zártuk ki a vizsgálatból, noha azok széntárolását az ÜHG leltár módszertana szerint hazánk nem számolhatja el. Azért döntöttünk az importból származó fatermékek bevonása mellett, mert így kaphatunk teljeskörű képet a hazai fatermékek teljes széntárolásáról, illetve az importált fatermékek megfelelő hulladékkezelése is jelentős klímamitigációs hatással bírhat.

A fakitermelés előrejelzése különböző forgatókönyvek szerint

A szcenáriók paraméterezéséhez két különböző fakitermelési előrejelzést használtunk (1. ábra). Az elsőben azt feltételeztük, hogy a kitermelt fa mennyisége megegyezik a 2017–2021 közötti évek átlagos fakitermelésével, és a fafajösszetétel is azonos az ebben az időszakban tapasztalható átlagértékekkel. A második esetben a Borovics és munkatársai (2023) által kidolgozott vágásérettségi korokon alapuló hozamelőrejelzés eredményeit használtuk a 2022-2050 közötti időszakban kitermelhető faanyag lehetséges maximális mennyiségére vonatkozóan. Vizsgálatunkban a 2022–2050 idő-

szakra előrejelzett évente kitermelhető faanyag egy évre vonatkozó átlagát használtuk a fatermékek termeléséhez kapcsolódó szcenáriók paraméterezéséhez.



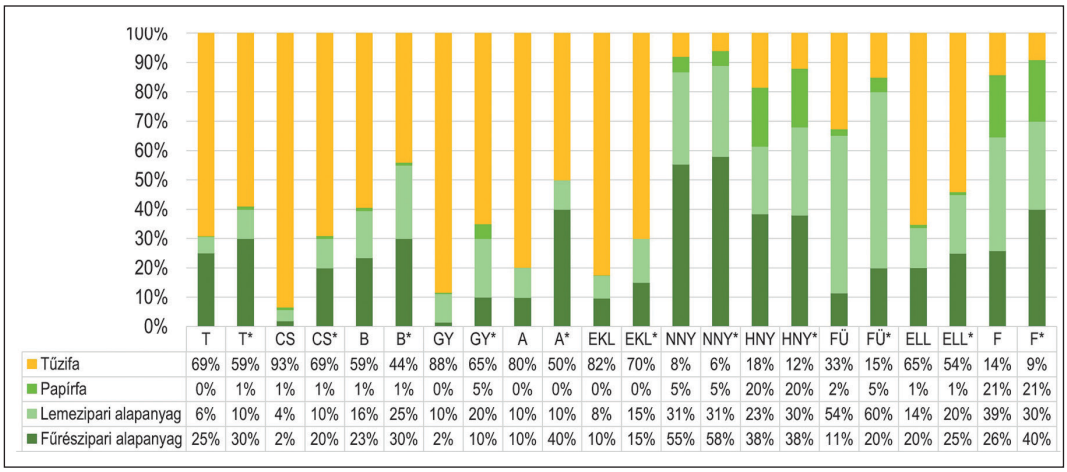
1. ábra: *A 2017–2021 közötti átlagos folyónövedék és fakitermelés (NFK 2023) és a 2022–2050 időszakra prognosztizált évente átlagosan kitermelésre elérhetővé váló élőfakészlet mennyisége*
Figure 1*: Average 2017–2021 annual increment and harvest and the average timber annually becoming available for harvest in the 2022–2050 period*

Az 1. ábra szerint a várható maximális fakitermelés is lényegesen alacsonyabb, mint az elmúlt öt év átlagos éves folyónövedéke. Ezt figyelembe véve, valamint tekintve azt, hogy a felhasznált hozamvizsgálat az erdőtervekben előírt tervezői vágásérettségi korokat vette alapul, megállapíthatjuk, hogy a megnövelt fahasználattal számoló forgatókönyv sem ütközik tartamossági akadályokba.

Elemzésünkben nem vizsgáltuk a klímaváltozás lehetséges hatásait a folyónövedékre és a fafajösszetételre. Ennek egyik indoka az, hogy ezek a hatások viszonylag nagy bizonytalansággal terheltek, másrészt az elemzés időablaka viszonylag rövid, ami szintén megengedi ezt az egyszerűsítést. A klímaváltozás kedvezőtlen hatásai ugyanakkor előidézhetnek erdőkárokat és tömeges mortalitást is, ami a fapiac számára váratlan és nagy mennyiségű többlet alapanyagot jelenthet. Ezen esetekre való felkészülésként is értelmezhető a megemelt fahasználattal jellemzett forgatókönyv, illetve a faipar intenzifikációjának felvetése.

A választékszerkezet előrejelzése különböző forgatókönyvek szerint

A szcenáriók kialakítása során két különböző választékszerkezet-előrejelzést használtunk (2. ábra). A BAU forgatókönyv szerint az Országos Statisztikai Adatgyűjtési Program fafajcsoportonkénti választék-adatainak öt éves átlagát vettük alapul. Emellett feltételeztünk módosított választékszerkezettel kalkuláló szcenáriókat is, amelyekben egyes jelenleg kisebb iparifa kihozatallal jellemzett fafajcsoportok esetében az ipari választékok arányát megnöveltük. Ezzel modelleztük a faipari innováció hatásait, és a szárazságtűrő, kevésbé értékes ipari alapanyagnak tartott fafajok nagyobb térnyerését az ipari felhasználásban. A módosított választékszerkezettel dolgozó szcenáriók esetében a választékszerkezetre vonatkozóan Börcsök és munkatársai (2023) szakértői becslését használtuk.

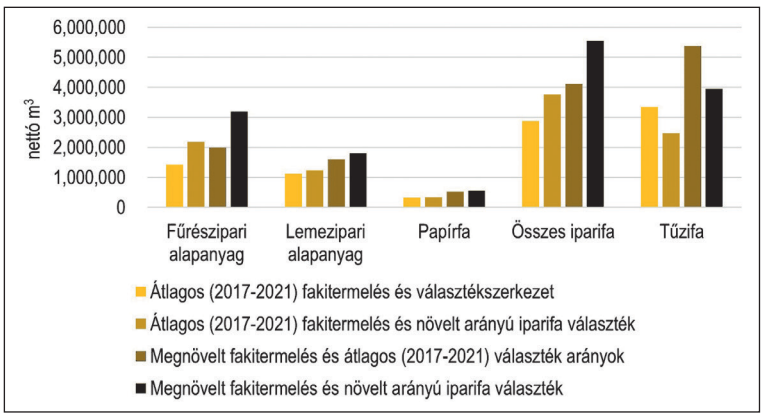


	T	T*	CS	CS*	B	B*	GY	GY*	A	A*	EKL	EKL*	NNY	NNY*	HNY	HNY*	FÜ	FÜ*	ELL	ELL*	F	F*
Tűzifa	69%	59%	93%	69%	59%	44%	88%	65%	80%	50%	82%	70%	8%	6%	18%	12%	33%	15%	65%	54%	14%	9%
Papírfa	0%	1%	1%	1%	1%	1%	0%	5%	0%	0%	0%	0%	5%	5%	20%	20%	2%	5%	1%	1%	21%	21%
Lemezipari alapanyag	6%	10%	4%	10%	16%	25%	10%	20%	10%	10%	8%	15%	31%	31%	23%	30%	54%	60%	14%	20%	39%	30%
Fűrészipari alapanyag	25%	30%	2%	20%	23%	30%	2%	10%	10%	40%	10%	15%	55%	58%	38%	38%	11%	20%	20%	25%	26%	40%

2. ábra: *Az iparifa választékok lehetséges növelésére vonatkozó szakértői becslés (Börcsök et al. 2023). A baloldali oszlopok mutatják fafajcsoportonként a 2017–2021 időszak átlagos választék arányait, a jobboldali (*-gal jelölt) oszlopok pedig a választékszerkezet becsült lehetséges átalakítását*

Figure 2: *Average 2017–2021 assortment composition and estimated potential for increased industrial wood assortment by tree species groups*

A fűrészrönk, a papírfa, a rostfa és tűzifa választékok nettó mennyiségét a két különböző fakitermelési előrejelzés alapján (növelt fakitermelés és az utóbbi öt év átlagos fakitermelési szintje) és a két lehetséges választékszerkezeti előrejelzés alapján (változatlan választékszerkezet, illetve növelt ipari választék) becsültük. Így összesen négy forgatókönyvet vizsgáltunk: 1) a korábbi években tapasztalt átlagos fakitermelés és választékszerkezet; 2) a korábbi években tapasztalt átlagos fakitermelési szint és megnövelt ipari választékarány; 3) a hozamvizsgálat eredményein alapuló megnövelt fakitermelés és a korábbi években tapasztalható átlagos választékarányok; 4) a hozamvizsgálat eredményein alapuló megnövelt fakitermelés és megnövelt ipari választékarány.



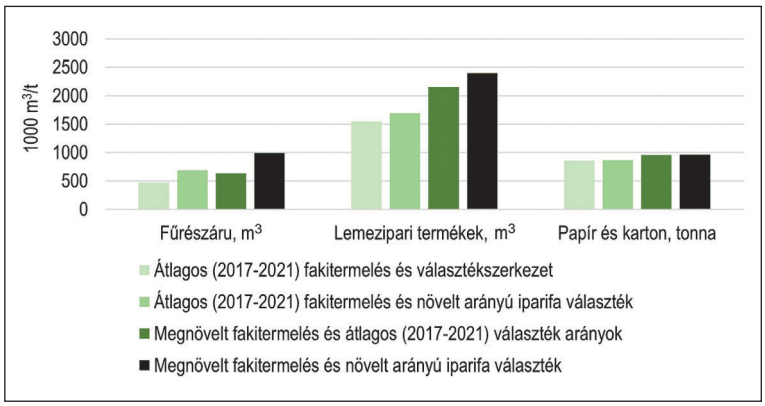
3. ábra: *A faválasztékok 2017–2021 közötti átlagos mennyisége, valamint növelt iparifa választékkal, illetve megnövelt fakitermeléssel kalkuláló lehetséges forgatókönyvek alapján készített választék-előrejelzések*

Figure 3: *Average 2017–2021 and projected industrial wood assortments under four different approaches*

A választékok számítását mind a négy esetben fafajcsoportonként végeztük el, majd az eredményeket összegeztük és így kaptuk meg az egyes választékok teljes nettó mennyiségét (3. ábra).

Fatermékek gyártásának előrejelzése

Az elérhető ipari választékok mennyiségéből kiindulva az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete (IPCC) által közreadott módszertan (IPCC 2013, 2019) szerint becsültük a fűrészipari és lemezipari termékek termelésének volumenét a prognosztizált időszakban. A 4. ábra szemlélteti a négy különböző forgatókönyv szerint előre jelzett termelési adatokat.



4. ábra: *A fatermékek 2017–2021 közötti átlagos termelése, illetve megnövelt fakitermeléssel kalkuláló lehetséges forgatókönyvek alapján készített előrejelzések*
Figure 4: *Average 2017–2021 and projected HWP production under four different scenarios*

A mitigációs forgatókönyvek kiértékeléséhez használt modell: a HWP-RIAL modell

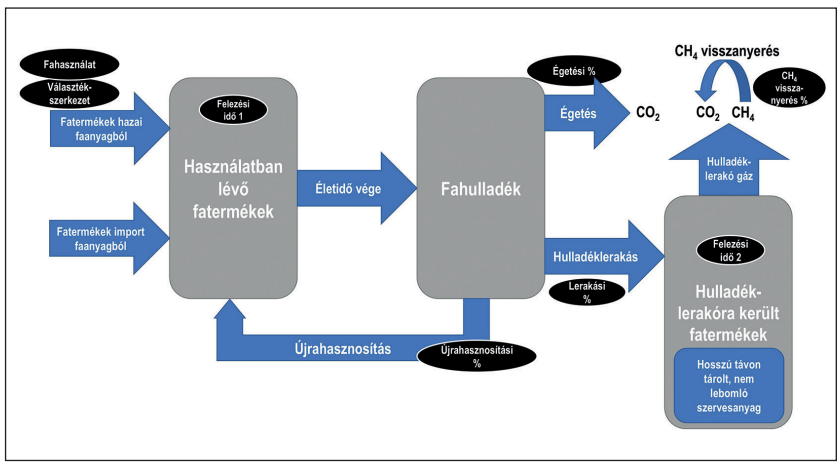
Annak érdekében, hogy a fatermékek széntároló kapacitása optimalizálható legyen nagyon fontos, hogy termelésük, felhasználásuk és hulladékkezelésük során is minél nagyobb mértékben érvényesítsük a klímavédelmi szempontokat. Ezért ismernünk kell a termékfejlesztés, újrahasznosítás és az egyes hulladékkezelési technológiák széntárolásra és kibocsátásokra gyakorolt hatásait. Az ErdőLab projekt (Borovics 2022) keretében e célok elérésére új modellt fejlesztettünk, amely képes előrevetíteni a fatermékek széntárolásának és a belőlük származó kibocsátások alakulását. A kifejlesztett HWP-RIAL modell (Harvested Wood Product Recycling, Incineration And Landfill model) a Nemzeti Üvegházhatásúgáz Leltárjelentés (NIR 2023) készítésében is alkalmazott, az IPCC (2006, 2019) által kidolgozott módszertant használja az emissziók számításához. Az IPCC hulladéklerakókra vonatkozó modelljét kombinálja a fatermékek széntárolását és emisszióit leíró IPCC egyenletekkel, mindezt kiegészítve egy saját fejlesztésű újrahasznosítási és hulladékút-választó modullal.

A modell (5. ábra) a vizsgált termékeknek és körülményeknek megfelelően paraméterezhető, tetszőlegesen beállítható a termékek életideje, az újrahasznosítás százalékos értéke, a hulladéklerakóra és az energetikai hasznosításra vagy égetéssel történő ártalmatlanításra kerülő termékek mennyisége, valamint a hulladéklerakón történő metánvisszanyerés mértéke. Emellett beállítható az

újrahasznosítás útvonala is, azaz megadható, hogy a hulladékká váló faanyagból milyen típusú új terméket állítunk elő, pl. fűrészáruból forgácslapot.

A HWP-RIAL modell egy országspecifikus modell, hiszen a lerakott és újrahasznosított fahulladék aránya és a hulladéklerakón képződő metán visszanyerésének mértéke is hazai adatbázisok feldolgozásából és elemzéséből származik. A modell paraméterezéséhez felhasznált adatforrások az Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer (OKIR 2023), a Nemzeti Üvegházgáz Leltárjelentés (NIR 2023) és az Országos Hulladékgazdálkodási Terv (2021). A modell működését és módszertani leírását Király és munkatársai (2023) mutatják be.

A vizsgált szcenáriókhoz kapcsolódó széntárolás és kibocsátások modellezésére a HWP-RIAL modellt használtuk.



5. ábra: *A HWP-RIAL modell folyamatábrája*
Figure 5: *Flowchart of the HWP-RIAL model*

A modellezés során a hazai fatermékek kezdeti szénkészletét az ÜHG leltár módszertana szerint számítottuk ki (IPCC 2019, Király et al. 2022, NIR 2023), azonban a modellezés során az import faanyagból gyártott termékeket is számításba vettük. A modellezés kezdő éve a használatban lévő fatermékek esetében 1964 volt, ekkorra történt a kezdeti szénkészlet IPCC módszertan szerinti meghatározása.

A modell újrahasznosítási modulja az életciklusuk végét elérő termékek egy részét a körkörös biogazdaság koncepciója szerint új termékek gyártásához nyersanyagként veszi figyelembe. Az újrahasznosítási arány a modellben beállítható. Jelen vizsgálatban a modellt úgy állítottuk be, hogy az újrahasznosított fahulladékot fűrészáru (20%), forgácslap (50%), MDF (20%) és egyéb lemez (10%) előállítására használjuk fel. A BAU szcenárióban a termékek felezési idejét az IPCC (2019) által megadott értékekre állítottuk be. A modell hulladéklerakókra vonatkozó moduljának paraméterezése a Nemzeti Üvegházgáz Leltárjelentéssel konzisztens módon történt.

A szcenáriók paraméterezése

Ebben a tanulmányban 10 különböző szcenáriót vizsgáltunk (1. táblázat és M.1. táblázat). A BAU forgatókönyv paraméterezéséhez az Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer (OKIR 2023), a Nemzeti Üvegházgáz Leltárjelentés (NIR 2023) és az Országos Hulladékgazdálkodási Terv (2021) adatait használtuk fel. A felezési idő és széntartalom értékeket az IPCC (2019) módszertan szerint állítottuk be.

A további szcenáriókat az egyes faiparhoz kapcsolódó klímamitigációs intézkedések (termék életidő növelése, újrahasznosítás növelése, ipari választékok arányának növelése, hulladéklerakás csökkentése, metánvisszanyerés növelése) kibocsátást csökkentő hatásainak vizsgálatára hoztuk létre. A növelt ipari választékarány beállításához Börcsök és munkatársai (2023) szakértői becslését használtuk. Ebben az esetben kizárólag a választékarány változását modelleztük, míg az intézkedések együttesének hatásait a kombinált szcenáriókban vizsgáltuk. A megnövelt fakitermeléssel jellemzett szcenárióban a Borovics és munkatársai (2023) által előrejelzett maximális fahasználati potenciálból és annak általuk előrejelzett fafajösszetételéből indultunk ki.

Emellett létrehoztunk kombinált szcenáriókat is, melyekkel az intézkedések együttes hatásait értékeltük, illetve vizsgáltuk a megnövelt fakitermeléssel elérhető, a fatermékekben megvalósuló többlet széntárolás mértékét is.

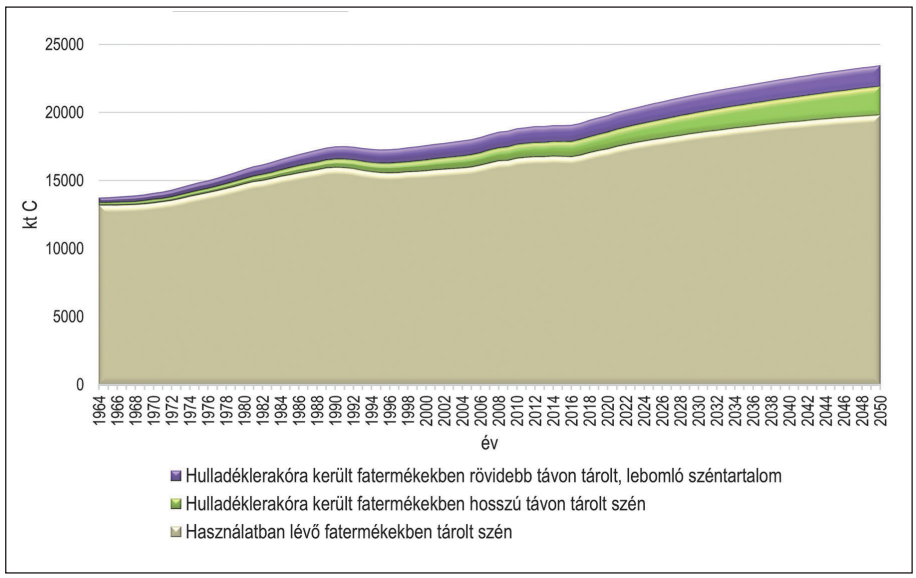
Az újrahasznosítás százalékos értékeit a BAU szcenárióban az OKIR adatai, valamint az Országos Hulladékgazdálkodási Terv adatai és előrejelzései alapján állítottuk be.

1. táblázat: *A szcenáriók ismertetése*
Table 1: *Description of the scenarios examined in this study*

Szcenárió elnevezése	Szcenárió rövid leírása
BAU	Business as Usual, azaz a jelenlegi általános gyakorlat szerint
Növelt életidő	Megnövelt életidő
Növelt újrahasznosítás	Megnövelt újrahasznosítás
Kedvezőbb hulladékkezelés	Csökkentett hulladéklerakás, megnövelt metánvisszanyerés
Növelt ipari választékarány	Növelt iparifa választék, változatlan fahasználat
Növelt fakitermelés	Megnövelt fahasználat
Növelt fakitermelés és ipari választékarány	Megnövelt fahasználat, megnövelt iparifa választék
Kombinált intézkedések 1	Megnövelt életidő, megnövelt újrahasznosítás, csökkentett hulladéklerakás, megnövelt metánvisszanyerés, változatlan fahasználat és választékszerkezet
Kombinált intézkedések 2	Megnövelt életidő, megnövelt újrahasznosítás, csökkentett hulladéklerakás, megnövelt metánvisszanyerés, változatlan fahasználat, megnövelt iparifa választék
Kombinált intézkedések 3	Megnövelt életidő, megnövelt újrahasznosítás, csökkentett hulladéklerakás, megnövelt metánvisszanyerés, megnövelt fahasználat, megnövelt iparifa választék

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

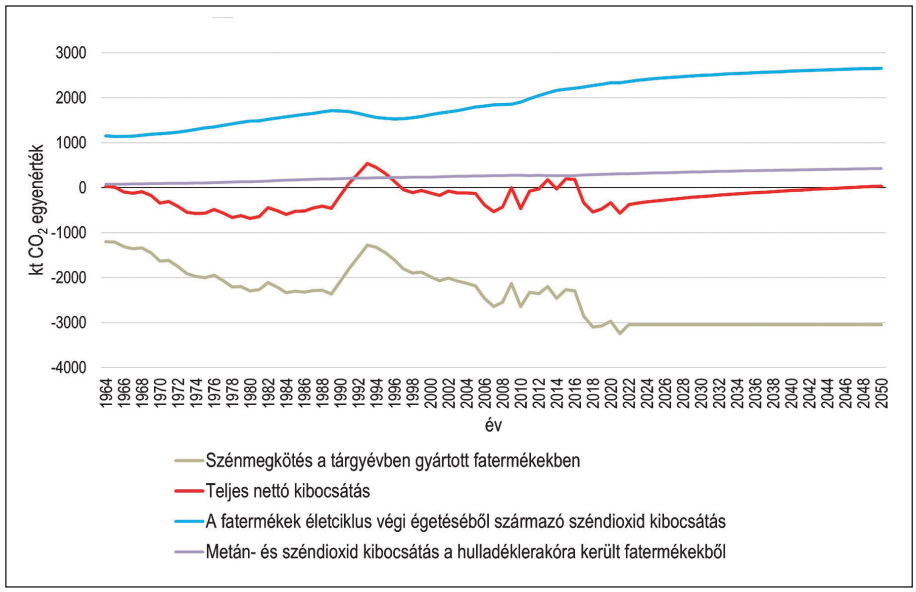
A 6. ábra mutatja be a BAU szcenárió esetében a fatermékek szénkészletének alakulását a vizsgált időszakban. A 7. ábra a szénmegkötés és a kibocsátások évenkénti alakulását szemlélteti szintén a BAU szcenárióban. Számításaink szerint 1964 és 2021 között a használatban lévő fatermékek szénkészlete 13 193 kilotonna (kt) szénről 17 489 kt szén értékre nőtt. A BAU forgatókönyv szerint a használatban lévő fatermékek szénkészlete 2050-re 19 804 kilotonnára nő. A hulladéklerakókon felhalmozódó hosszú távon tárolt, nem lebontható szén, illetve a lebomló szerves szén is fokozatosan növekszik a BAU forgatókönyv szerint, mivel a lerakott fa- és papírhulladék aránya nem változik a teljes előrejelzett időszakban. A 7. ábrán piros vonal szemlélteti a fatermék széntároló teljes nettó széndioxid kibocsátásait. A hazai fatermékek a jelenlegi trendek (Business as Usual) folytatása esetén 2047-re szénelnyelőkből kibocsátókká válnak, és 2050-re várhatóan 33 kt széndioxid egyenértéket bocsátanak ki.



6. ábra: *A fatermékekben tárolt szén historikus értékei, illetve a BAU szcenárió szerinti előre jelzett mennyiségek*
Figure 6: *Historic and projected carbon stock of HWPs in use and HWPs deposited in SWDSs under the BAU scenario*

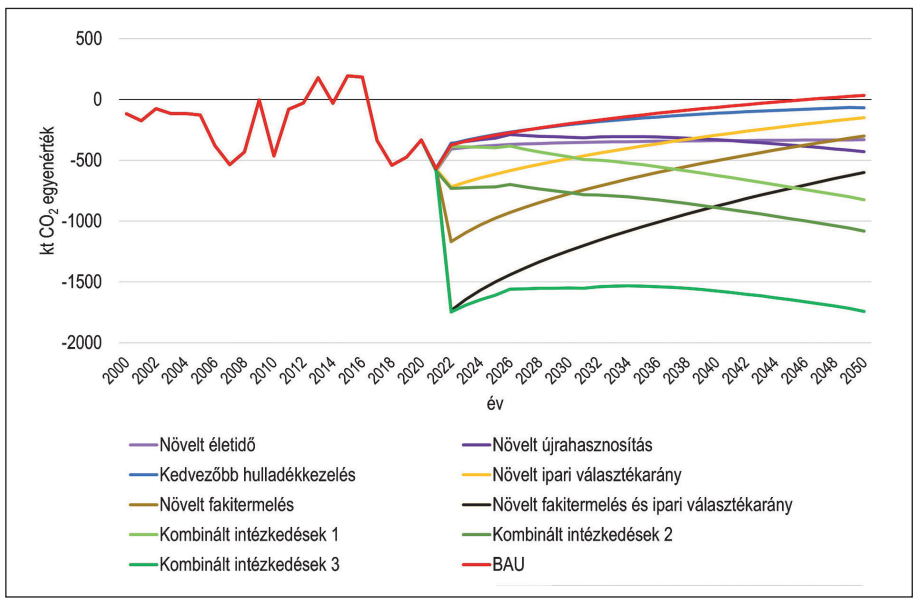
A 10 különböző szcenárió prognosztizált kibocsátásait/megkötéseit a 8. ábra szemlélteti. Míg a BAU forgatókönyv szerint a fatermékek 2047-re kibocsátóvá válnak, az összes többi forgatókönyv szerint szénelnyelők maradnak a teljes vizsgált időszakban. A hulladékgazdálkodáshoz kapcsolódó intézkedéseket modellező forgatókönyv eredményezi a legkisebb többlet szénmegkötést, míg a megnövelt fakitermeléssel és iparifa választékokkal számoló forgatókönyvek eredményezik a legnagyobb többlet megkötéseket a fatermék széntárolóban.

A felezési idő meghosszabbítása gyorsabban csökkenti a kibocsátást, míg az újrahasznosítás növelésének kibocsátáscsökkentő hatása hosszabb lefutású. A fatermékek termelésének növelése csak rövid távon növeli a szénmegkötést, amely hatás az idő múlásával csökken. Ezzel szemben az életidő- és az újrahasznosítás növelése hosszabb távon fejti ki hatását, és a hozzá kapcsolódó kibocsátáscsökkenés mértéke az idő előrehaladtával fokozatosan növekszik.



7. ábra: *A fatermékekben realizálódó historikus és a BAU szcenárió szerint előre jelzett szénmegkötés értékek, és a historikus és előre jelzett széndioxid- és metán kibocsátások értékei széndioxid egyenértékben kifejezve. (A negatív értékek széndioxid megkötéseket, míg a pozitív értékek kibocsátásokat jelölnek.)*

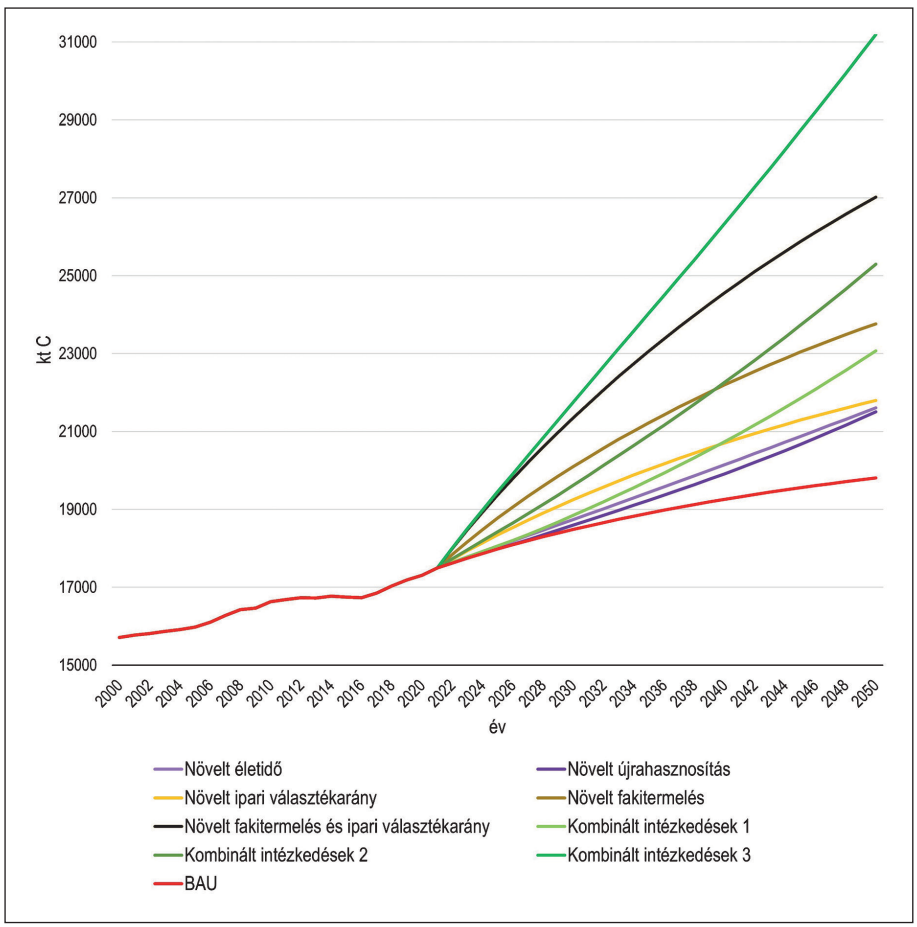
Figure 7: *Historic and projected inflow and CH_4 and CO_2 emissions (expressed in kt CO_2 eq units) under the BAU scenario*



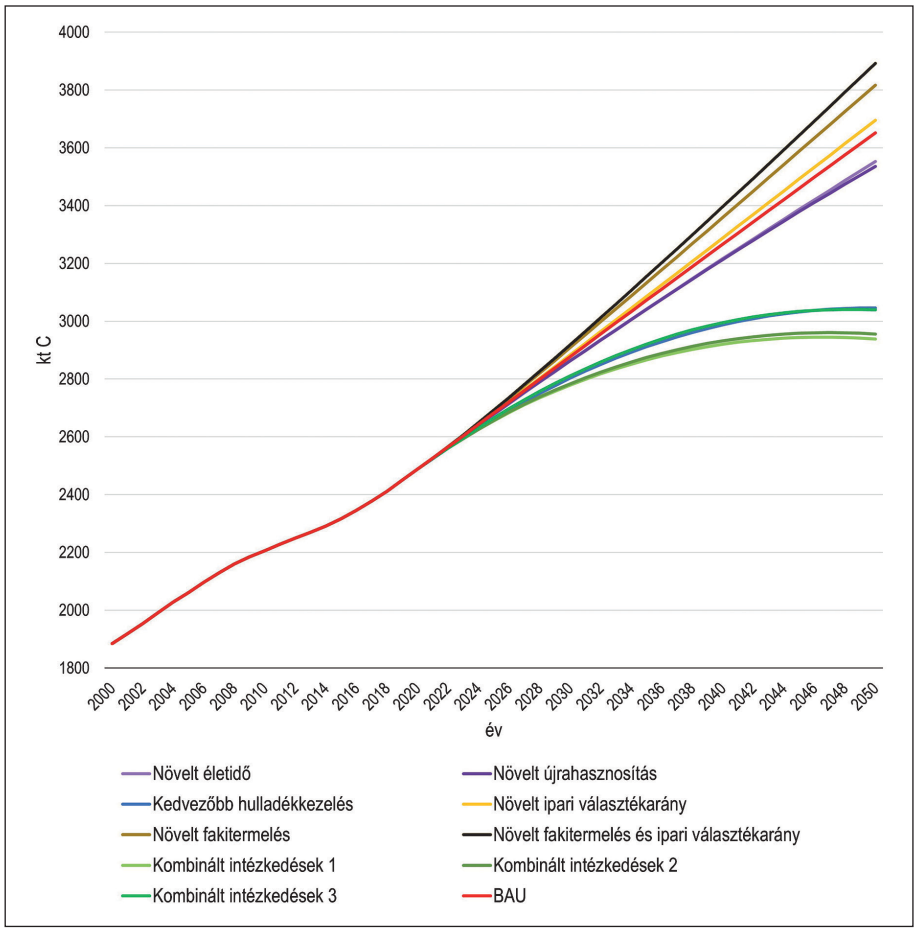
8. ábra: *A vizsgált szcenáriók teljes nettó széndioxid egyenértékben kifejezett emissziói 2050-ig előrevetítve (beleértve a metán, valamint a széndioxid emissziókat is). (A negatív értékek széndioxid megkötéseket, míg a pozitív értékek kibocsátásokat jelölnek.)*

Figure 8: *Total net emissions (including CH_4 and CO_2 emissions) under the examined scenarios up to 2050*

A 9. ábra a használatban lévő fatermékek teljes szénkészletének alakulását mutatja a különböző forgatókönyvek szerint. A fatermékekben tárolt szén 2050-re előrejelzett mennyisége a BAU forgatókönyv szerint 19 804 kt, míg a kombinált intézkedésekkel (megnövelt ipari választék, megnövelt fakitermelési volumen, megnövelt életidő és újrahasznosítás) számoló szcenárió szerint 31 194 kt szén. Ez azt jelenti, hogy nagy (akár 11 390 kt szén) különbség van a forgatókönyvek között a használatban lévő fatermékekben történő széntárolás mértékét illetően. A 10. ábra a hulladéklerakón felhalmozódó fatermékek szénkészletének alakulását szemlélteti. A lerakókon tárolt szénmennyiség legmagasabb 2050-re prognosztizált értéke 2 235 kt szén, mely változatlan hulladéklerakási arányok és megnövelt faipari termelés esetén következik be. A legkisebb prognosztizált szénkészlet a lerakókon 1 700 kt szén, mely a megnövelt újrahasznosítási arányok és a csökkentett hulladéklerakás eredménye.



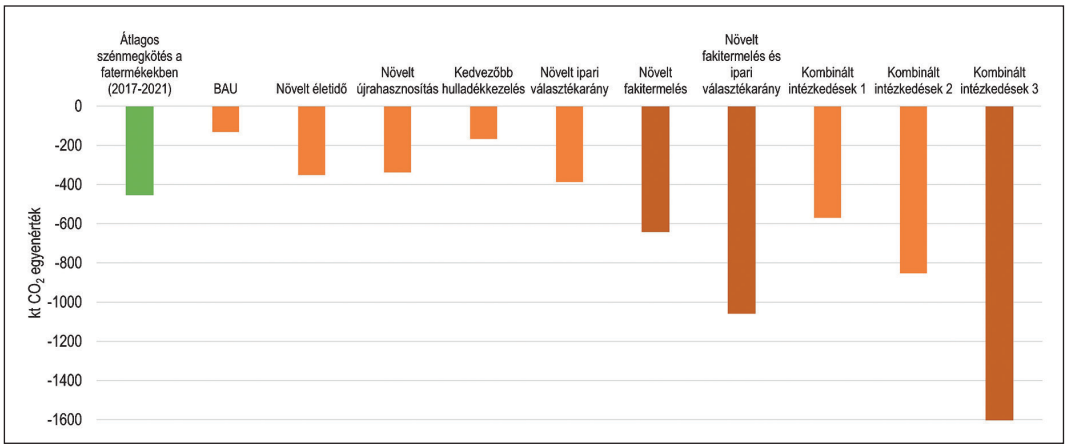
9. ábra: *A használatban lévő fatermékek teljes szénkészlete 2050-ig előrevetítve a vizsgált szcenáriók szerint*
Figure 9: *Total carbon stock of the HWPs in use as projected under the examined scenarios up to 2050*



10. ábra: *A hulladéklerakókon akkumulálódó fatermékek szénkészlete a különböző vizsgált szcenáriók szerint 2050-ig előrevetítve*
Figure 10: *Total carbon stock accumulated in SWDSs as projected under the examined scenarios up to 2050*

A 11. ábra mutatja a hazai fatermékek 2017–2021 közötti átlagos historikus szénmegkötéseit, illetve a vizsgált forgatókönyvek szerint a 2022–2050 időszakra prognosztizált átlagos éves szénmegkötések mértékét. A BAU forgatókönyv, azaz a változatlan fatermék gyártási és kezelési tendenciák fokozatosan csökkenő szénmegkötéseket eredményeznek, így a prognosztizált időszakra előre jelzett átlagos éves szénmegkötés jóval alatta marad az utóbbi öt évre jellemző historikus értékeknek. Az életidő és az újrahasznosítás növelése, illetve az ipari választékok arányának emelése önmagában nem képes annyira növelni a fatermékekben megvalósuló szénmegkötést, hogy az a teljes előrejelzett időszakra vonatkozó átlagban elérje a jelenleg tapasztalható szintet. Az egyes mitigációs intézkedések kombinációi azonban már többlet szénmegkötéseket eredményeznek a fatermék széntárolóban megvalósuló szénmegkötések jelenlegi szintjéhez képest. Ugyanez igaz a megnövelt fakitermelési volumennel számoló szcenáriókra is, melyek szintén többlet szénmegkötéseket eredményeznek a jelenlegi szinthez képest.

Az összes vizsgált mitigációs intézkedés együttes alkalmazása és a fakitermelés növelése évente összesen 1 604 kt CO_2 egyenértékű szénmegkötést eredményezhet a fatermékekben, ami a jelenlegi érték 3,5-szerese. A fakitermelés volumenének növelése nélkül, az életidő hosszabbításával, az újrahasznosítás növelésével és kedvezőbb hulladékkezelési gyakorlattal elérhető átlagos szénmegkötés a prognosztizált időszakban 835 kt CO_2 egyenérték, mely 1,9-szerese az elmúlt öt évben tapasztalt szénmegkötési szintnek.

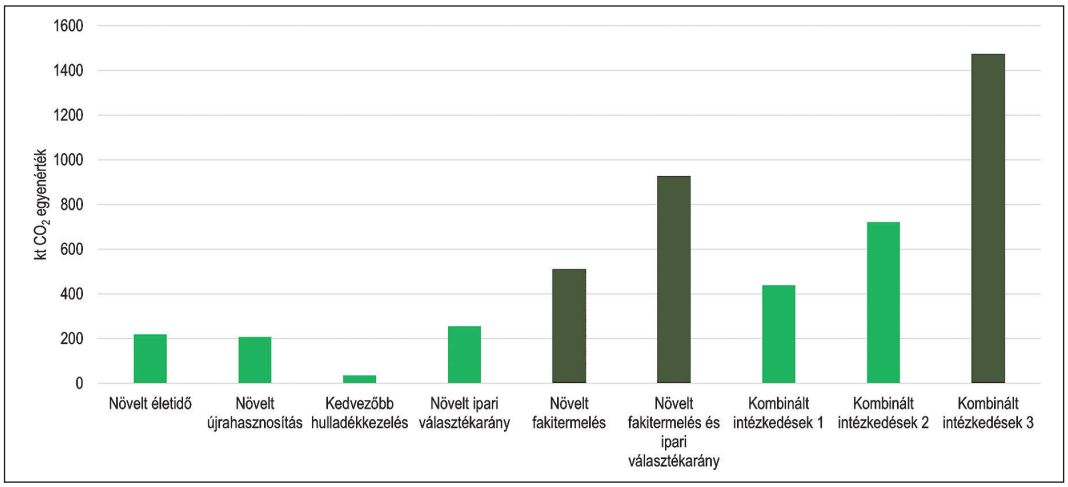


11. ábra: *A hazai fatermékek 2017-2021 közötti átlagos nettó szénmegkötése és a különböző szcenáriók szerinti prognosztizált szénmegkötések a 2022–2050 időszak vonatkozásában. (A zöld oszlop historikus adatokat jelöl, míg a narancssárga oszlopok előre jelzett adatokat jelölnek. A sötétebb narancs oszlopok jelölik a 2017–2021 időszak átlagához képest megnövelt fakitermeléssel jellemzett szcenáriókat. A negatív értékek széndioxid megkötéseket jelölnek.)*
Figure 11: *Average historic net annual carbon sequestration in HWPs in the 2017–2021 period and the projected average annual net emissions for the period 2022–2050 under 10 different scenarios. (Green coloumn indicates historic data whereas orange coloumns indicate projected data. Darker orange coloumns indicate the scenarios where the harvest is increased as compared to the average annual harvest of the 2017–2021 period.)*

Végül meghatároztuk az egyes szcenáriók 2022–2050 időszakra vonatkozó átlagos éves klímamitigációs potenciálját (12. ábra). A mitigációs potenciál az adott szcenárióhoz tartozó átlagos szénmegkötési érték és a BAU szcenárióhoz tartozó átlagos szénmegkötési érték különbségeként számítható.

Az életidő növelése, az újrahasznosítás fokozása és az ipari választékarány növelése hasonló mértékű klímavédelmi potenciállal bírnak. A fahulladék ártalmatlanításhoz kapcsolódó intézkedések rendelkeztek a legkisebb mitigációs potenciállal a vizsgált időszakban. Ez annak tudható be, hogy az Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer (OKIR 2023) adatai szerint jelenleg a lerakott fahulladék aránya 6%, míg a papírhulladéké 10%. Mivel a lerakott hulladék aránya alacsony, ennek az aránynak a további csökkentése már nem rendelkezik jelentős kibocsátáscsökkentő hatással. A metán energetikai célú hasznosítása, vagy fáklyázása azonban hasznos intézkedés a szilárd hulladékok ártalmatlanításából származó negatív környezeti hatások mérséklésére és a hulladéklerakó gázból származó energia hasznosítására.

Elemzésünk szerint a fakitermelés növelésével és a különféle mitigációs intézkedések kombinálásával lehet elérni a legnagyobb mitigációs hatást a fatremékekben (12. ábra).



12. ábra: *A vizsgált szcenáriók átlagos éves klímamitigációs potenciálja a BAU szcenárióhoz képest. (Az értékek azt mutatják, hogy mennyi addicionális szénmegkötést lehet évente elérni az egyes intézkedések és intézkedéscsoportok segítségével a BAU szinthez képest. A sötétzöld oszlopok jelölik a 2017–2021 időszak átlagához képest megnövelt fakitermeléssel jellemzett szcenáriókat.)*

Figure 12: *Average annual climate change mitigation potential of the examined scenarios as compared to the BAU scenario. (Darker green coloumns indicate the scenarios where the harvest is increased as compared to the average annual harvest of the 2017-2021 period.)*

ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkban 10 különböző forgatókönyv szerint vetítettük előre a hazai fatermékek széntárolását és széndioxid-, valamint metán kibocsátásait 2050-ig. A vizsgálat célja a leginkább klímabarát gyakorlatok azonosítása és a legkedvezőbb faipari vonatkozású mitigációs intézkedések és intézkedés-kombinációk megtalálása volt.

Tanulmányunk egyik fő következtetése az, hogy további mitigációs intézkedések nélkül (BAU szcenárió) a magyar fatermékek (beleértve a használatban lévő fatermékeket és a hulladéklerakón lévő fatermékeket is) 2047-re szénnyelőből széndioxid kibocsátóvá válnak. Így a folyamatos szénelnyelés fenntartásához, illetve a megkötések növeléséhez mindenképpen további klímamitigációs intézkedések szükségesek. E cél elérése érdekében a leghatékonyabb intézkedések a termékek életidejének növelése, az újrahasznosítás arányának növelése, illetve a nagyobb volumenű faipari termelés (mely az ipari választékok arányának növelése, illetve nagyobb volumenű fakitermelés útján valósítható meg).

A hazai faiparral kapcsolatos egyedi és kombinált klímamitigációs intézkedések hatásainak vizsgálata alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy az optimális hatás az egyes intézkedések kombinációjával érhető el, mivel a vizsgált intézkedések egymás hatását erősítik. Az életidő meghosszabbítása és az újrahasznosítás a körkörös biogazdaság alapját képező intézkedések (EC 2020). Ezek az intézkedések hosszabb időn keresztül tartják a faanyagot használatban, így az abban megkötött szén hosszabb távú tárolását biztosítják (IPCC 2022, Verkerk et al. 2022). A faipari termelés volumenének növelése az újrahasznosítás növelésével, valamint az életidő növelésével kiegészítve hosszú távon nagy mennyiségű szenet tart a rendszerben megkötve.

Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a megnövelt fakitermeléssel számoló szcenáriók esetében a teljes földhasználati és erdészeti (LULUCF) szektor szénegyenlegére vonatkozóan jelen vizsgálat nem nyújt információt. A megnövelt fakitermelés átmenetileg az erdei ökoszisztémákban megvalósuló széntárolás csökkenését eredményezi, mivel az ott megkötött szenet a hosszú élettartamú fatermékekben tárolja tovább. Fontos tehát az itt bemutatott vizsgálati eredmények komplex, a teljes LULUCF szektorra kiterjedő értékelése és értelmezése is.

Hangsúlyozni kell azonban azt, hogy még azokban a vizsgált forgatókönyvekben is teljesült a fenntartható erdőgazdálkodás kritériuma, ahol megnövelt fakitermeléssel számoltunk, hiszen Borovics és munkatársai (2023) csak azokat az erdőket tekintették fakitermelésre elérhetőnek a hozamvizsgálatban, amelyek elérték az előírt vágásérettségi korukat; illetve az átlagos fakitermelés mértéke az éves átlagos folyónövedék szintje alatt maradt.

Vizsgálatunk másik fontos eredménye az, hogy a 2022–2050 időszakban a fakitermelés volumenének növelése nélkül is a BAU szcenárióhoz viszonyítva évi 721 kt CO_2 többlet megkötés érhető el a hazai faiparban a körkörös biogazdaság elvei szerint megvalósított mitigációs intézkedések kombinációjával. Ez az éves átlagos mitigációs potenciál összesen 20 922 kt CO_2 egyenérték többlet szénmegkötést jelent a 2022–2050 közötti időszakban a BAU forgatókönyvhöz viszonyítva. Tehát a magyar faiparban még a fakitermelés volumenének növelése nélkül is nagy klímamitigációs potenciál rejlik, így a jól megtervezett faiparral kapcsolatos intézkedések jelentős szerepet játszhatnak a 2050-es klímacélok elérésében.

A megnövelt fakitermeléssel számoló forgatókönyvek esetében éves szinten átlagosan maximum 1 473 kt CO_2 egyenérték mértékű mitigációs potenciál érhető el, ami 42 711 kt CO_2 egyenérték többletmegkötést jelent a 2022-2050 időszakban. Ez a mennyiség hétszerese a 2017–2021-es évek átlagos LULUCF szénmegkötésének. Az iparifa felhasználás növelésével tehát nagyon jelentős szénmegkötés és széntárolás érhető el a fatermékekben.

Fontos azonban hangsúlyozni, hogy a faipar klímamitigációs potenciáljának kihasználásához jelentős faipari innovációk és az erdőgazdálkodás intenzifikációja szükségesek, annak érdekében, hogy a jelenleg alulhasznosított fafajok is magas minőségű termékekként kerülhessenek a piacra. Emellett a használatból kikerülő fatermékek visszagyűjtésének és újrahasznosításának megszervezése is fontos feladat, ami a körkörös biogazdaság megvalósítása szempontjából elkerülhetetlen. Fontos itt még megemlíteni a termékhelyettesítési hatásokat is, melyek az ipari- és energetikai szektorokban tesznek lehetővé jelentős kibocsátáscsökkentést (Leskinen et al. 2018). Hazánk esetében a termékhelyettesítés útján elkerült kibocsátások nagyságrendjét Király és munkatársai (2024) 4 500 kt CO_2 egyenérték nagyságrendűre becsülik, amely megegyezik a teljes erdő-alapú szektor éves szénmegkötésének nagyságrendjével.

Az iparifa választékok bővítése a kitermelt fában megkötött szén hosszú távú tárolását elősegítő intézkedés, ezért kedvezőbb a fa azonnali energetikai hasznosításánál (Verkerk et al. 2022, Li et al. 2022). Ugyanakkor a társadalom energiaigénye is fontos szempont, melyet figyelembe kell vennünk. A fa éghajlatbarát bioenergia-forrás (Verkerk et al. 2022), amely helyettesítheti a fosszilis tüzelőanyagokat. A biomassza az egyik legrugalmasabb megújuló energiaforrás, mivel könnyen tárolható, és villamosenergia, hőenergia, valamint üzemanyag előállítására is alkalmas (Sartori et al. 2006). Az iparifa választékok arányának növelésekor fontos az új tűzifaforrások felkutatása is. A megnövekedett fakitermeléssel számoló forgatókönyvek esetében a tűzifa prognosztizált mennyisége nem csökken a 2017–2021-es átlagos tűzifa termeléshez képest (3. ábra). Ezzel szemben a megnö-

velt iparifa választékokkal és változatlan fakitermelési volumennel számoló forgatókönyv esetében a tűzifa prognosztizált mennyisége a 2017–2021-es átlag alatt marad (3. ábra). Ebben az esetben jó megoldást jelenthetnek a hosszú- vagy rövid vágásfordulójú energetikai faültetvények a kieső tűzifa biztosítására (Searchinger et al. 2008, Djomo et al. 2011). Emellett a kaszkád felhasználás koncepcióját követve (Budzinski et al. 2020) az élettartamuk végét elérő fatermékek energetikailag is hasznosíthatóak, amennyiben nem alkalmasak újrafelhasználásra, vagy nyersanyagként történő újrahasznosításra (Verkerk et al. 2022).

Végezetül fontos megjegyezni, hogy ebben a tanulmányban az életciklusuk végéhez érő fatermékek égetéséből származó kibocsátásokat és a hulladéklerakóra került fatermékekből származó kibocsátásokat együttesen vettük figyelembe. Emellett figyelembe vettük az import nyersanyagból gyártott fatermékek széntárolását és kibocsátásait is. Fentiek miatt a jelen tanulmányban számított összes nettó kibocsátás nem egy az egyben összevethető a Nemzeti Üvegházgáz Leltárjelentés LULUCF szektorában megadott kibocsátás értékekkel. Ennek egyik oka az, hogy az ÜHG leltárban az import nyersanyagból származó fatermékek széntárolása, és a belőlük származó kibocsátások sem elszámolandóak. Illetve a másik ok az, hogy az ÜHG leltárban az életciklusuk végét elérő fatermékek azonnali oxidációjával számolnak, mely egy egyszerűsítő feltételezés. Ebben a tanulmányban azért vettük figyelembe a hulladéklerakóról származó kibocsátásokat, hogy a szektorok közötti (LULUCF és hulladék szektor) hatásokat minél teljesebb mértékben fel tudjuk térképezni, illetve, hogy a fatermékek teljes életciklusát vizsgáljuk, beleértve a hulladékkezelésüket is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen publikáció a „TKP2021-NKTA-43 azonosítószámú ErdőLab” projekt keretében az Innovációs és Technológiai Minisztérium (jogutód: Kulturális és Innovációs Minisztérium) Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

MELLÉKLET

M.1. táblázat: *A szcenáriók paraméterezése*
Table M.1: *Parametrisation of the examined scenarios*

		2022	2050
BAU	Fatermékek termelési volumene	A 2017–2021 évi termelés átlaga.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71	71
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	7
Növelt életidő	Fatermékek termelési volumene	A 2017–2021 évi termelés átlaga.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	50
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	35
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71	71
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	7
Növelt újrahasznosítás	Fatermékek termelési volumene	A 2017–2021 évi termelés átlaga.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	60
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	60
	Újrahasznosított papír és karton %	71	90
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	7

M.1. táblázat folytatása / Table M.1: continued

		2022	2050
Kedvezőbb hulladékkezelés	Fatermékek termelési volumene	A 2017-2021 évi termelés átlaga.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	2
	Lerakott papírhulladék %	10	2
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71	71
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	60
Növelt ipari választékarány	Fatermékek termelési volumene	Megnövelt termelési volumen a megnövelt ipari választékarány következtében.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71	71
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	7
Növelt fakitermelés	Fatermékek termelési volumene	Megnövelt termelési volumen a megnövelt fakitermelés következtében.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71	71
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	7

M.1. táblázat folytatása / Table M.1: continued

		2022	2050
Növelt fakitermelés és ipari választékarány	Fatermékek termelési volumene	Megnövelt termelési volumen a megnövelt fakitermelés és a megnövelt ipari választékarány következtében.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71	71
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	7
Kombinált intézkedések 1	Fatermékek termelési volumene	A 2017-2021 évi termelés átlaga.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	50
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	35
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	2
	Lerakott papírhulladék %	10	2
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	60
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	60
	Újrahasznosított papír és karton %	71	90
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	60
Kombinált intézkedések 2	Fatermékek termelési volumene	Megnövelt termelési volumen a megnövelt ipari választékarány következtében.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	50
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	35
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	2
	Lerakott papírhulladék %	10	2
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	60
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	60
	Újrahasznosított papír és karton %	71	90
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	60

M.1. táblázat folytatása / Table M.1: continued

		2022	2050
Kombinált intézkedések 3	Fatermékek termelési volumene	Megnövelt termelési volumen a megnövelt fakitermelés és a megnövelt ipari választékarány következtében.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	50
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	35
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	2
	Lerakott papírhulladék %	10	2
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	60
	Újrahasznosított lemezipari termékek %	25	60
	Újrahasznosított papír és karton %	71	90
	Metán visszanyerés a hulladéklerakókon %	7	60

FELHASZNÁLT IRODALOM

Auer V. & Rauch P. 2020: Assessing hardwood flows from resource to production through Material Flow Analysis. 9th Hardwood Proceedings, Vol 9 - pt I: An Underutilized Resource: Hardwood Oriented Research. Nemeth, R.; Rademacher, P.; Hansmann, C.; Bak, M.; Bader, M. eds. 13-20.

Boonstra M. 2008: A two-stage thermal modification of wood. Ph.D. Thesis in Applied Biological Sciences: Soil and Forest management. Henry Poincaré University-Nancy, France.

Borovics A. 2022: ErdőLab: a Soproni Egyetem erdészeti és faipari projektje: Fókuszban az éghajlatváltozás mérséklése. Erdészeti Lapok 157: 114–115.

Borovics A., Mertl T., Király É. & Kottek P. 2023: Estimation of the overmature wood stock and the projection of the maximum wood mobilization potential up to 2100 in Hungary. Forests 14(8): 1516. https://doi.org/10.3390/f14081516

Börcsök Z., Németh G. & Kocsis Z. 2023: Expert judgement ont he future assortment composition of harvested wood in Hungary. University of Sopron. Kézirat.

Brunet-Navarro P., Jochheim H., Cardellini G., Richter K. & Muys B. 2021: Climate mitigation by energy and material substitution of wood products has an expiry date, Journal of Cleaner Production 303: 127026, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127026

Brunet-Navarro P., Jochheim H., Kroiher F. & Muys B. 2018: Effect of cascade use on the carbon balance of the German and European wood sectors. Journal of Cleaner Production 170: 137–146. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.135

Budzinski M., Bezama A. & Thrän D. 2020: Estimating the potentials for reducing the impacts on climate change by increasing the cascade use and extending the lifetime of wood products in Germany. Resources Conservation & Recycling 10(6): 100034. https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100034

Cetera P., Todaro L., Lovaglio T., Moretti N. & Rita A. 2016: Steaming treatment decreases MOE and compression strength of Turkey oak wood. Wood Research 61(2): 255-264. ISSN: 13364561

Churkina G., Organschi A., Reyer C.P.O., Ruff A., Vinke K., Liu Z., Reck B.K., Graedel T.E. & Schellnhuber H.J. 2020: Buildings as a global carbon sink. Nature Sustainability 3: 269-276, https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4

CRF 2023: Common Reporting Format Tables of Hungary as submitted to the UNFCCC. https://unfccc.int/documents/627846

Djomo S.N., El Kasmioui O. & Ceulemans R. 2011: Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: a review. Global Change Biology Bioenergy 3: 181–197. https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01073.x

EC 2020: European Commission. A New Circular Economic Plan for a Cleaner and More Competitive Europe, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; COM (2020) 98 final; European Commission: Brussels.

Esteves M.B. & Pereira H.M. 2009: Wood modification by heat treatment: a review. Bioresource Technology 4(1): 370–404. https://doi.org/10.15376/biores.4.1.370-404

Fortin M., Ningre F., Robert N. & Mothe F. 2012: Quantifying the impact of forest management on the carbon balance of the forest-wood product chain: A case study applied to even-aged oak stands in France. Forest Ecology and Management 279: 176–188. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.05.031

Illés G. & Móricz N. 2022a: Climate envelope analyses suggests significant rearrangements in the distribution ranges of Central European tree species. Annals of Forest Science 79(1): 35 https://doi.org/10.1186/s13595-022-01154-8

Illés G. & Móricz N. 2022b: Hazai fafajok klímaanalóg területeinek vizsgálata a klímaváltozás tükrében. Erdészettudományi Közlemények 12(2): 91-112. https://doi.org/10.17164/EK.2022.06

IPCC 2006: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme; Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., Eds.; IGES: Kanagawa.

IPCC 2019: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P., Federici, S., Eds.; IPCC: Geneva.

IPCC 2022: Sixth Assessment Report, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, the Working Group III Contribution. Chapter 7 Agriculture, Forestry, and Other Land Uses (AFOLU); IPCC: Geneva.

Johnston C.M.T. & Radeloff V.C. 2019: Global mitigation potential of carbon stored in harvested wood products. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 116: 14526–14531. https://doi.org/10.1073/pnas.1904231116

Király É., Börcsök Z., Kocsis Z., Németh G., Polgár A. & Borovics A. 2022: Carbon Sequestration in Harvested Wood Products in Hungary an Estimation Based on the IPCC 2019 Refinement. Forests 13(11): 1809. https://doi.org/10.3390/f13111809

Király É., Börcsök Z., Kocsis Z., Németh G., Polgár A. & Borovics A. 2024: Climate change mitigation through carbon storage and product substitution in the Hungarian wood industry. Wood Research 69(1): 72-86 doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.1.7286

Király É., Forsell N., Schulte M., Kis-Kovács G., Börcsök Z., Kocsis Z., Kottek P., Mertl T., Németh G., Polgár A. & Borovics A. 2024: Climate change mitigation potentials of wood industry related measures in Hungary. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change 29: 62. https://doi.org/10.1007/s11027-024-10161-1

Király É., Kis-Kovács G., Börcsök Z., Kocsis Z., Németh G., Polgár A. & Borovics A. 2023: Modelling Carbon Storage Dynamics of Wood Products with the HWP-RIAL Model—Projection of Particleboard End-of-Life Emissions under Different Climate Mitigation Measures. Sustainability 15(7):6322. https://doi.org/10.3390/su15076322

Kottek P. 2017: National Forest Projection–2050; University of Sopron, Faculty of Forestry, VI. Faculty Scientific Conference Book of Abstracts; Bidló, A., Facskó, F., Eds.; Publishing Office of the University of Sopron: Sopron, Hungary, 59 p.

Kottek P., Király É., Mertl T. & Borovics A. 2023a: Trends of Forest Harvesting Ages by Ownership and Function and the Effects of the Recent Changes of the Forest Law in Hungary. Forests 14(4):679. https://doi.org/10.3390/f14040679

Kottek P., Király É., Mertl T. & Borovics A. 2023b: The re-parametrisation of the DAS model based on 2016-2021 data of the National Forestry Database: new results on cutting age distributions. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica 19(2): 61–74.

Krankina O.N., Harmon M.E., Schnekenburger F. & Sierra C.A. 2012: Carbon balance on federal forest lands of Western Oregon and Washington: The impact of the Northwest forest plan. Forest Ecology and Management 286: 171–182. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.08.028

Lakatos F. 1999: Bark beetles on pine in Hungary. In: Foster B., Knizek M. and Grodzki W. (Eds.): Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe: 248-249.

Leskinen P., Cardellini G., González-García S., Hurmekoski E., Sathre R., Seppälä J. et al. 2018: Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy 7. European Forest Institute. https://doi.org/10.36333/fs07

Li L., Wei X.Y., Zhao J. H., Hayes D., Daigneault A., Weiskittel A., Kizha A. R. & ,Neill S.R.O. 2022: Technological advancement expands carbon storage in harvested wood products in Maine, USA. Biomass and Bioenergy 161: 106457. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106457

Mátyás Cs., Berki I., Bidló A., Csóka GY., Czimber K., Führer E., Gálos B., Gribovszki Z., Illés G., Hirka A. & Somogyi Z. 2018: Sustainability of Forest Cover under Climate Change on the Temperate-Continental Xeric Limits. Forests 9: 489. https://doi.org/10.3390/f9080489

Mátyás Cs., Berki I., Czúcz B., Gálos B., Móricz N. & Rasztovits E. 2010: Future of Beech in Southeast Europe from the Perspective of Evolutionary Ecology. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica 91-110. ISSN 1786-691X

NFK 2023: Summary Data on Forests in Hungary; National Land Centre, Forestry Department. https://nfk.gov.hu/Magyarorszag_erdeivel_kapcsolatos_adatok_news_513

NIR 2023: National Inventory Report for 1985–2021. Hungary. Chapter: Land-Use, Land-Use Change and Forestry; Somogyi, Z., Tobisch, T., Király É., Hungarian Meteorological Service: Budapest.

OKIR 2023: National Environmental Information System. http://web.okir.hu/en/

Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2021: Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2021–2027. Innovációs és Technológiai Minisztérium. https://kormany.hu/dokumentumtar/orszagos-hulladekgazdalkodasi-terv-2021-2027

Sanchez Lopez J., Grassi G., Vizzarri M., Fiorese G., Pilli R., Jonsson R. et al. 2021: Brief on the role of the forest-based bioeconomy in mitigating climate change through carbon storage and material substitution, Sanchez Lopez, J., Jasinevičius, G. and Avraamides, M. editor(s), European Commission, JRC124374

Sartori F., Lal R., Ebinger M.H. & Parrish D.J. 2006: Potential soil carbon sequestration and CO_2 offset by dedicated energy crops in the USA. Critical Reviews in Plant Sciences 25: 441–472. https://doi.org/10.1080/07352680600961021

Schelhaas M.J., Esch P.W., Groen T.A., Jong B.H.J., Kanninen M., Liski J. et al. 2004: CO2FIX V 3.1 – A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems. ALTERRA Rapport No.1068. Wageningen, Netherlands, ALTERRA. 122 p. ISBN: 1566-7197.

Searchinger T., Heimlich R. & Houghton R.A. 2008: Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land-use change. Science 319: 1238–1240. https://doi.org/10.1126/science.1151861

Sikkema R., Styles D., Jonsson R., Tobin B. & Byrne K.A. 2023: A market inventory of construction wood for residential building in Europe—In the light of the Green Deal and new circular economy ambitions. Sustainable Cities and Society 90: 104–370. https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104370

Todaro L. 2012: Effect of steaming treatment on resistance to footprints in Turkey oak wood for flooring. European Journal of Wood and Wood Products 70(1-3): 209-214. https://doi.org/10.1007/s00107-011-0542-2

Todaro L., Dichicco P., Moretti N. & D'Auria M. 2013: Effect of combined steam and heat treatments on extractives and lignin in sapwood and heartwood of Turkey oak (*Quercus cerris L.*) wood. BioResources 8(2): 1718-1730. https://doi.org/10.15376/biores.8.2.1718-1730

Todaro L., Zanuttini R., Scopa A. & Moretti N. 2012: Influence of combined hydrothermal treatments on selected properties of Turkey oak (*Quercus cerris L.*) wood. Wood Science and Technology 46(1): 563-578. https://doi.org/10.1007/s00226-011-0430-2

Ujvári-Jármay É., Nagy L. & Mátyás Cs. 2016: The IUFRO 1964/68 inventory provenance trial of Norway spruce in Nyírjes, Hungary—results and conclusions of five decades. Acta Silvatica et Lignaria Hungarica 12: 178. https://doi.org/10.1515/aslh-2016-0001

Verkerk P.J., Delacote P., Hurmekoski E., Kunttu J., Matthews R., Mäkipää R. et al. 2022: Forest-Based Climate Change Mitigation and Adaptation in Europe. From Science to Policy 14. European Forest Institute: Joensuu, Finland, ISBN 978-952-7426-22-7. https://doi.org/10.36333/fs14

Wilson J. 2010: Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. Wood and Fiber Science 42 (CORRIM Special Issue): 90–106. file:///C:/Users/%C3%89va/Downloads/1349-Article%20Text-1349-1-10-20141206.pdf

Érkezett: 2024. 07. 23.
Közlésre elfogadva: 2024. 09. 17.