

A HAZAI ERDÉSZETI ÉS FAIPARI SEKTOR SZÉNMELEGÉNEK ELŐREJELZÉSE AZ ERDŐIPARI SZÉN MODELL FELHASZNÁLÁSÁVAL

Borovics Attila¹, Király Éva¹ és Kottek Péter²

¹Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézet

²Agrárminisztérium Erdőrendezési Főosztály

Kivonat

Az erdőalapú klímamitigáció napjainkban egyre inkább kulcsszerepet kap a nemzetközi klímapolitikában, így egyre fontosabbá válik az ágazat szénmegkötő képességét befolyásoló mechanizmusok megértése. Tanulmányunkban különböző erdőkezelési stratégiák klímamitigációs hatását értékeltük. Létrehoztunk egy új szénforgalmi modellt, az Erdőipari Szén Modellt (Forest Industry Carbon Model, FICM), amely az erdei biomassa, az elhalt szerves anyagok, a talaj és a fatermékek szénegyenlegét, valamint a termék- és energiahelyettesítések útján elkerült kibocsátásokat számszerűsíti. A modell segítségével a magyar erdőipar széndioxid mérlegét három forgatókönyv szerint jeleztük előre. A Business as Usual (BAU) scenárióban változatlan erdőtelepítési és fakitermelési szinteket feltételezünk. Az Extenzifikációs scenárióban azt feltételeztük, hogy az erdőtelepítések és a fakitermelés mértéke a felére csökken. Az Intenzifikációs forgatókönyvben pedig az erdőtelepítés növekedését, megnövelt ipari választékarányt, és a fakitermelés fokozatos növekedését vettük alapul. Eredményeink azt mutatják, hogy az Intenzifikációs forgatókönyvet jellemzi a legnagyobb nettó szénmegkötés és itt érvényesül a maximális termék- és energiahelyettesítési hatás. A nettó erdőipari szénegyenleg 2050-re a BAU scenárióban -8447 kt CO₂ egyenérték, az Extenzifikációs scenárióban -7011 kt CO₂ egyenérték, míg az Intenzifikációs scenárióban $-22\ 135$ kt CO₂ egyenérték szintet ér el. Bár a termékhelyettesítés hatása a LULUCF szektorban nem számolható el, az ipari és energetikai kibocsátások csökkenésének kedvező hatása megjelenik a nemzeti üvegházgáz mérlegben. A modellezési eredmények azt mutatják, hogy az EU által Magyarország számára kijelölt 2030-as LULUCF szénmegkötési célérték az Intenzifikációs scenárióban elérhető. Prognózisunk szerint a fahasználat drasztikus korlátozása csupán rövid távú megoldást jelenthet, kedvező hatásai 2050-re megszűnnek, és a BAU forgatókönyvhöz képest többletkibocsátásokat eredményez.

A cikk a Borovics et al. 2024 (Projection of the Carbon Balance of the Hungarian Forestry and Wood Industry Sector Using the Forest Industry Carbon Model) eredeti közlés részben módosított fordítása.

Kulcsszavak: CO₂, HWP, erdőkezelési forgatókönyvek, klímamitigáció, termékhelyettesítés, energiahelyettesítés



PREDICTING CARBON BALANCE IN THE HUNGARIAN FORESTRY AND WOOD INDUSTRY SECTOR VIA THE FOREST INDUSTRY CARBON MODEL

Abstract

As forest-based climate change mitigation gains greater importance within international climate policy, understanding the mechanisms influencing the carbon offsetting capacity of the sector becomes increasingly important. Our study evaluates the climate benefits of contrasting forest management strategies: one focuses on reducing harvest and expanding forest carbon stocks, while the other aims to increase harvest to enhance carbon uptake, wood product carbon pools, and substitution effects. We analyse the carbon balance of the Hungarian forest industry under three scenarios: the business as usual (BAU) scenario with no changes in current harvest and afforestation levels, the extensification scenario with reduced harvest and afforestation levels, and the intensification scenario involving increased afforestation, improved wood assortments, and gradually increasing timber extraction which is still meeting sustainability criteria. We introduce the Forest Industry Carbon Model (FICM), a novel carbon accounting tool encompassing various carbon pools including forest biomass, dead organic matter, soil, harvested wood products, and emissions avoided through product and energy substitution. Our findings indicate that the intensification scenario performs the highest net removals and optimized product and energy substitution effects. By 2050, the net carbon balance of the forest industry will reach $-8,447$ kt CO₂ eq in the BAU scenario, $-7,011$ kt CO₂ eq in the extensification scenario and $-22,135$ kt CO₂ eq in the intensification scenario. Although substitution effects are not accounted for under the land-use, land-use change, and forestry (LULUCF) sector in Greenhouse Gas Inventories, emission reductions in the industry and energy sectors positively influence the national carbon balance. Our projections reveal that Hungary can meet the 2030 LULUCF greenhouse gas removal target set by EU legislation under the intensification scenario, necessitating significant innovation within the wood sector. In comparison, forest non-utilization proves to be a short-term solution, with its favourable effects diminishing by 2050 and leading to additional emissions as compared to the BAU scenario.

This article is based on the original publication by Borovics et al. 2024 (Projection of the Carbon Balance of the Hungarian Forestry and Wood Industry Sector Using the Forest Industry Carbon Model).

Keywords: CO₂, HWP, forest management scenarios, climate change mitigation, product substitution, energy substitution

BEVEZETÉS

Az erdőalapú klímamitigáció a Párizsi Megállapodás és az EU klímátörvényének kulcseleme (Friedlingstein et al. 2019, Grassi et al. 2017, EU/2021/1119). A nettó nulla kibocsátási cél elérése csak akkor lesz megvalósítható, ha az elkerülhetetlen kibocsátásokat ökoszisztéma alapú szénmegkötésekkel vagy műszaki megoldások segítségével ellensúlyozzuk (Fankhauser és mtsai 2022, Levin et al. 2020, Rogelj et al. 2021). Az erdők megkötik a széndioxidot (CO₂) a légkörből, és tárolják a szenet a biomasszában, a holt szerves anyagokban és a talajban. A hosszú élettartamú fatermékek (HWP) pedig erdőn kívüli széntárolást tesznek lehetővé, emellett faalapú termékek használatával a termék- és energiahelyettesítő hatásuk révén jelentős fosszilis CO₂ kibocsátásokat kerülhetünk el az energetikai és ipari szektorokban (Köhl és Martes 2023, Korosuo et al. 2023). A fosszilis energia bioenergiával történő helyettesítése fontos lépés az EU által előírt körkörös biogazdaság felé (Korosuo et al. 2023, Borovics et al. 2023). A szénmegkötés, széntárolás és a szubsztitúciós hatások együttesen teremtik meg az erdőalapú ágazat teljes klímamitigációs potenciálját. A hosszú távra beépített faanyagban tárolt szén, illetve a bioenergia fontos szerepe miatt az erdészeti és faipari ágazatot együttesen gyakran erdőparként említik a nemzetközi szakirodalomban (Lipiäinen et al.

2022, Hurmekoski et al. 2022, Borovics és Király 2023 a, b). Ebben a cikkben az „erdőipar” fogalmat az erdészet és a faipar elválaszthatatlan, egymásra épülő anyagáramának hangsúlyozására használjuk. Ezzel a kifejezéssel azonban nem az erdei ökoszisztéma iparosítását célozzuk meg, hiszen elismerjük és hangsúlyozzuk, hogy az erdő sokkal több, mint egy szennyelő vagy szénraktár. Valójában a legösszetettebb szárazföldi ökoszisztéma, mely számos létfontosságú funkciót hordoz, amelyek messze túlmutatnak az éghajlatváltozás mérséklésének egyoldalú szempontján.

Az erdőipar klímamitigációs teljesítményének tágabb ökológiai és gazdasági kontextusba történő integrálását számos jogi aktus szolgálja, melyek egyben lehetőséget teremtenek a mitigációs hatások fokozását célzó üzleti megoldások előmozdítására is (Korosuo et al. 2023). A természet-helyreállítási törvényjavaslat (COM(2022)304), az EU 2030-ig szóló új erdőstratégiája (COM(2021)572), az új talaj-egészségügyi törvényre vonatkozó javaslatok (COM(2021)699, Európai Bizottság 2023), az erdőmonitoring és stratégiai tervezés új keretrendszere (Európai Bizottság 2022), a fenntartható szén ciklusokra (COM(2021)800) és a széndioxid eltávolítás tanúsítására vonatkozó rendelettervezetek (COM(2022)672), valamint a LULUCF rendelet (EU/2018/841) kiterjed az erdei ökoszisztémák védelmére és a teljes erdőipari klímamitigációs keretrendszer szabályozására.

Azonban annak ellenére, hogy a politikai figyelem egyre inkább az erdőalapú klímamitigációra irányul, az elmúlt években az EU erdeinek szénmegkötése a klímacélokkal ellentétes pályára állt, és folyamatosan és egyértelműen csökkenő tendenciát mutat (Korosuo et al. 2023). Korosuo és munkatársai (2023) szerint ezt a nemkívánatos trendet elsősorban az európai erdők folyamatos elöregedése indukálja. Említett szerzők a Carbon Budget Modell felhasználásával előrejelezték az európai erdők várható jövőbeli szénegyenlegét, és eredményeik szerint a szénelnyelés csökkenő tendenciája megmarad, így Európa erdei egyre nagyobb mértékben letérnek a 2030-as célérték eléréséhez számukra kijelölt útról. A nemkívánatos tendencia ellensúlyozására két lehetősége nyílik az erdőgazdálkodónak: vagy csökkenti a fakitermelést az erdő szénkészletének növelése érdekében – vagy növeli a kitermelést és minél több fatermék előállítását célozza meg a hosszútávú széntárolás és a helyettesítési hatások maximalizálása érdekében (Martes és Köhl 2022, Borovics 2022), ami az erdőn kívül a szénmegkötés növelését eredményezi.

Az erdők elöregedésének fent említett folyamata hazánk erdeit is jellemzi. Kottek és munkatársai (2023 a) legtöbb fafajunk esetében folyamatosan növekvő vágáskort mutattak ki az Országos Erdőállomány Adattár (OEA) adatai alapján. Míg Magyarországon az éves fakitermelés mennyisége évtizedek óta jóval a folyónövedék szintje alatti 7–8 millió m³-es szinten mozog, addig Borovics és munkatársai (2023) megállapították, hogy a hazai túltartott állományok élőkészlete az 1980-as évektől folyamatosan növekszik és 2022-ben több mint 45 millió m³ volt. Túltartottnak akkor minősül egy állomány, ha tényleges kora meghaladja az erdőtervezők által előírt vágásérettségi korát és a törvényi előírásoknak megfelelően kitermelhető lenne. Fontos kiemelni, hogy a magas természetvédelmi értékű területek, például az erdőrezervátumok, illetve az örökzöld és a faanyagtermelést nem szolgáló üzemmódú területek soha nem minősülnek túltartottnak a vizsgálatban, ezekhez ugyanis nem rendel vágásérettségi kort az adatbázis. Borovics és munkatársai (2023) növekvő fahasználati potenciált prognosztizálnak a 2024–2100 közötti időszakra a vágáskort elérő állományok területének növekedése miatt. Király és munkatársai (2024) pedig kimutatták, hogy a fakitermelés növelése és a hozzá kapcsolódó megnövekedett és hatékonyabbá váló faipari termelés jelentős többlet szénmegkötését és -tárolást tenne lehetővé hazai fatermékekben, miközben a termék- és energiahelyettesítés által elkerülhető kibocsátások mennyiségét is jelentősen növelné.



Tanulmányunk célja három eltérő erdőkezelési stratégia klímamitigációs hatásainak elemzése hazánk vonatkozásában. A vizsgált stratégiák a következők:

1. Fokozott természetvédelmi oltalom, és az erdei szénkészletek helyszíni megőrzése a fahasználatok csökkentése és minden más emberi beavatkozás mérséklése útján. (Extenzifikáció, EXT)
2. Intenzív erdőgazdálkodás fokozott fakitermeléssel, intenzív erdősítéssel, új fás ültetvények létesítésével kiegészítve, a hazai fafeldolgozó ipar felpörgetése faipari innovációk és kapacitásbővítés útján. (Intenzifikáció, INT)
3. Az erdőgazdálkodási gyakorlatok változatlan folytatása, azaz a szokásos ügymenet. (Business as Usual, BAU)

A három stratégiához kapcsolódó nettó szénegyenleget az Erdőipari Szén Modell felhasználásával (Forest Industry Carbon Model, FICM: Borovics et al. 2024, Kottek et al. 2023 b, Kottek 2023, Király et al. 2023) az OEA adatai alapján prognosztizáljuk, felhasználva az OKIR (2023), valamint a Központi Statisztikai Hivatal (OSAP 2023) fatermékekre és hulladékkezelésre vonatkozó adatait is.

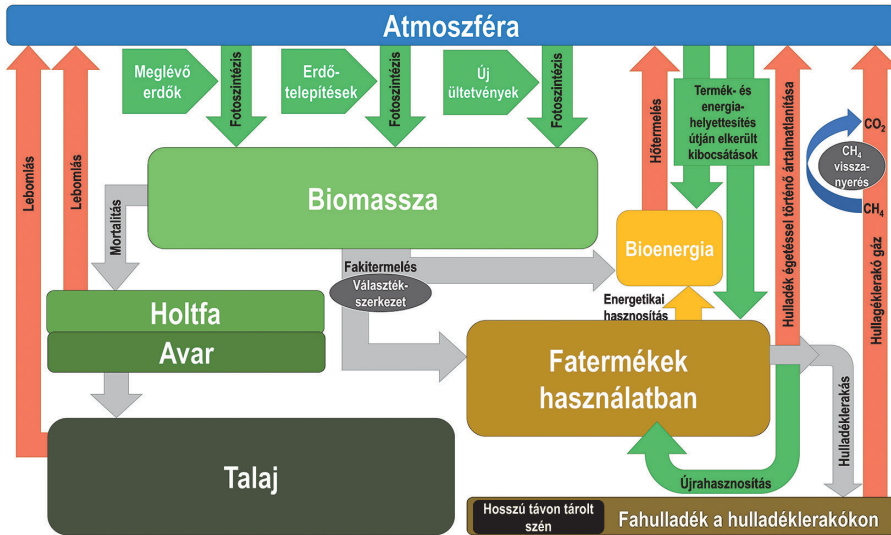
ADAT ÉS MÓDSZER

A modellezés kiindulási adatai az OEA 2020. évi statisztikai állapota szerinti erdőrésztlet szintű fafajsocki leírások voltak (Tobisch és Kottek 2013, Kottek et al. 2023 b). Az erdők és fatermékek szénmegkötésének, tárolásának és kibocsátásának előrejelzése az Erdőipari Szén Modell (1. ábra) segítségével történt, mely a térben explicit DAS erdőmodell (Kottek et al. 2023 b, Kottek 2023) továbbfejlesztett változata. A modell továbbfejlesztése az ErdőLab (Borovics 2022) projekt keretében valósult meg, melynek során a modellt talaj-, holt szervesanyag- és HWP modulokkal, valamint termék- és energiahelyettesítési modullal egészítettük ki (Király et al. 2023, Király et al. 2024). Az Erdőipari Szén Modell egy erdőrésztlet-alapú modell, amely alkalmas az élőfakészlet, a folyónövedék és a szénmérleg előrejelzésére az erdőrésztlet szintjén, illetve regionális és országos szinteken is. A HWP szénkészlet és szénegyenleg előrejelzése az IPCC módszertanon (IPCC 2006, 2013, 2019), míg a fahulladék-gazdálkodási előrejelzések az OKIR (2023) adatain és a Magyar Üvegházhatású Gázleltáron (NIR 2023) alapulnak. A termék- és energiahelyettesítési hatásokat Leskinen és munkatársai (2018) tanulmányából kiindulva a Király és munkatársai (2024) által ismertetett módszertan szerint prognosztizálja. A modellt a 2006–2015 közötti időszakot lefedő historikus OEA adatok alapján validáltuk. A validáló futtatások eredményei az élőfakészlet adat tekintetében országos szinten 1,1%-os eltérést mutattak a historikus élőfakészlet adatokhoz képest (Kottek 2023).

Munkánk során három forgatókönyvet dolgoztunk ki. Az Extenzifikációs (EXT) szcenárióban a fakitermelés csökkentése és a beavatkozások minimalizálása jellemző (2–3. ábra), mely a természetvédelmi célok dominanciájával magyarázható. Az EXT forgatókönyvben a fakitermelés csökkenésével arányosan csökkenést feltételeztünk a faipari termékek gyártásának volumenében is.

Az Intenzifikációs forgatókönyvet (INT) az intenzív erdőgazdálkodás, fokozatosan emelkedő fakitermelési szint, valamint intenzív erdőtelepítés jellemzi (2–3. ábra). A fakitermelés növelésének fenntartható bázisát a Borovics és munkatársai (2023) által prognosztizált maximális fahasználati potenciál jelenti (4. ábra), mely új erdőtelepítések nélkül is jelentős többlet fakitermelési lehetőséget jelez előre a 2050-ig terjedő időszakra, és megfelel a tartamosság követelményinek. Az INT szce-

nárióban feltételezett magas erdőtelepítési szint szintén hozzájárul a jövőbeli hozami lehetőségek bővüléséhez. Az INT scenárióban feltételeztük, hogy új, rövid vágásfordulójú fás szárú ipari ültetvényeket is nagy területen létesítenek az elkövetkező években. A másik lényeges feltételezés az INT forgatókönyvben a magyar fafeldolgozó ipar gyors kapacitásbővítése, és új, innovatív technológiák széleskörű térhódítása. Feltételeztük, hogy az országból nem exportálunk faanyagot, hanem minden alapanyagot belföldön dolgozunk fel, és növelni tudjuk a jó minőségű, tartós fatermékek gyártását. E feltételezés leképezésére megváltoztattuk a modellezett választékszerkezetet oly módon, hogy az ipari faválasztékok arányát növeltük (1. táblázat).



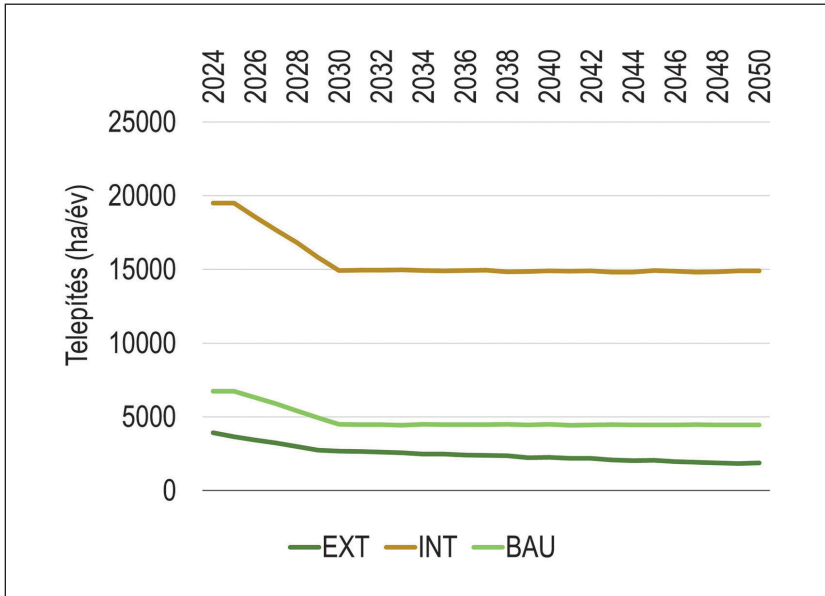
1. ábra: Az Erdőipari Szén Modell folyamatábrája
 Figure 1: Flowchart of the Forest Industry Carbon Model

A harmadik modellezett forgatókönyvben azt feltételeztük, hogy a jelenlegi erdőgazdálkodási gyakorlatok és a faipar helyzete változatlan marad a 2050-ig terjedő időszakban (Business as Usual, azaz BAU scenárió). Az alkalmazott főbb modellparamétereket a 2. táblázat tartalmazza.

A három modellezett forgatókönyv fakitermelési szintjeit illetően fontos hangsúlyozni, hogy a modellezési keretrendszer biztosítja, hogy az erdőrezervátumok, valamint a magas természetvédelmi értékű állományok, és a faanyagtermelést nem szolgáló üzemmódú területek ki legyenek zárva a fakitermelésből. Ez garantálja, hogy a jelentős ökológiai értékű területek egyik modellezett forgatókönyvben sem szenvednek bolygatást, így biztosítva az élőhelyek megőrzését.

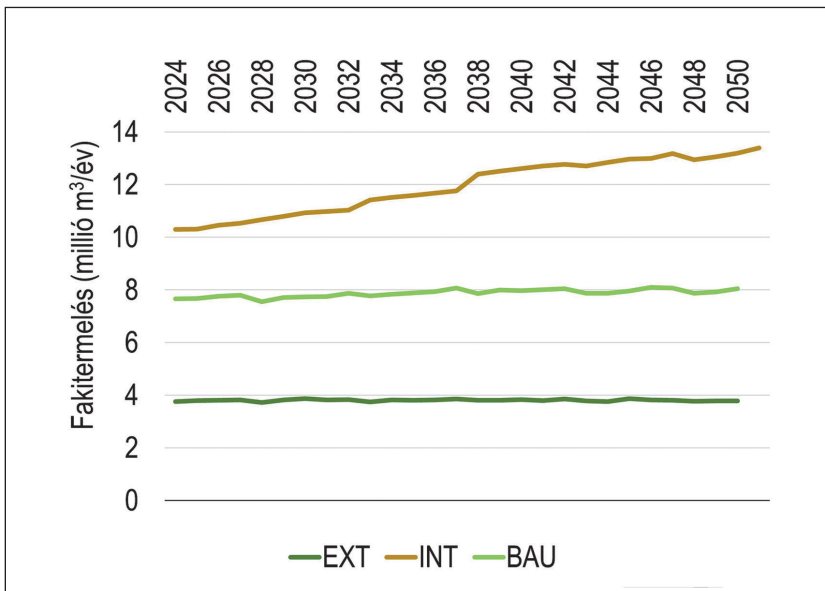
A modellezés során azt is megvizsgáltuk, hogy az EU által Magyarország számára a földhasználati szektorra (LULUCF) vonatkozóan 2030-ra kitűzött klímacél (azaz -5724 kt CO₂ egyenérték szintű szénmegkötés elérése) megvalósul-e. Ehhez csak az erdők és a fatermékek szénmérlegét vettük figyelembe, mivel a termék- és energiahelyettesítés nem része a LULUCF elszámolásnak (Martes és Köhl 2022). Bár a LULUCF célt a teljes LULUCF szektornak kell elérnie, ideértve a szántóföldeket, gyepeket, vizes területeket, településeket, erdőket és fatermékeket, mi csak az erdők és a fatermékek nettó szénegyenlegének célértékhez való viszonyát vizsgáltuk. Ezt az egyszerűsítést azért alkalmaztuk, mivel Magyarországon a LULUCF szektoron belül jelenleg az egyetlen szénnyelő

az erdőipar, így nagy valószínűséggel abban az esetben, ha az erdőalapú ágazat nem éri el a kitűzött célt, akkor a teljes LULUCF szektor is deficites marad.



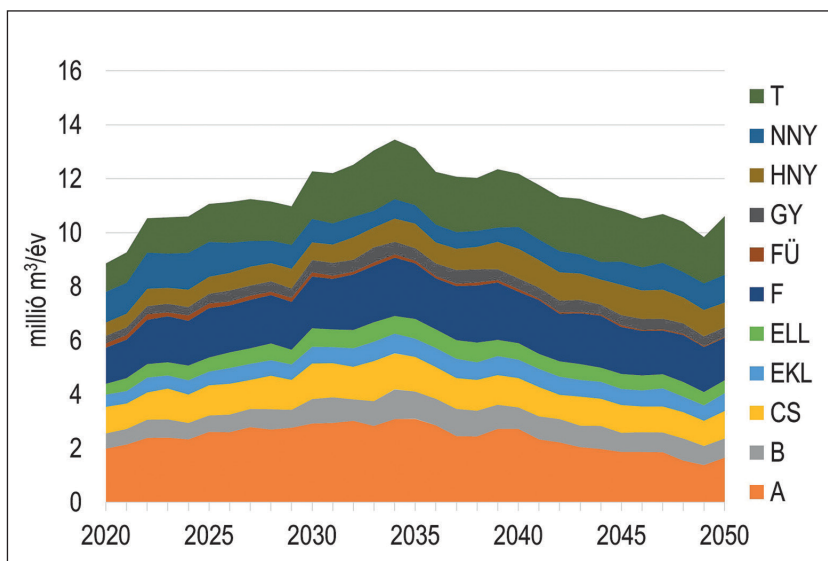
2. ábra: Az erdőtelepítések területe a három vizsgált scenárióban

Figure 2: Annual amount of harvested timber set in the three examined scenarios



3. ábra: A fakitermelés alakulása a három vizsgált scenárióban

Figure 3: Annual area of afforestation and new forest plantations set in the three examined scenarios



4. ábra: Az erdőtervezői vágásérettségi korokból levezetett maximális fahasználati potenciál, további erdőtelepítések figyelembevételével. A becslés az OEA 2020-as állapotából indul ki.

Erre alapozva állítottuk be az INT szcenárióban alkalmazott fahasználati intenzitást

Figure 4: Projection of the maximum wood mobilization potential based on the cutting ages as defined by the Forest Management Plans. These results were used as input data to set the harvesting intensity of the intensification scenario

1. táblázat: A három szcenárió prognosztizált faválaszték arányai. (A BAU és EXT választékarányok a 2017–2021-es időszak átlagos faválaszték adatain alapulnak (OSAP 2023), míg az INT választékarányokat szakértői becsléssel határoztuk meg)

Table 1: Wood assortments under the three examined scenarios. BAU and EXT assortments are based on the 2017–2021 average wood assortment (OSAP 2023), while INT assortments are based on expert judgement

	T	CS	B	GY	A	EKL	NNY	HNY	FÜ	ELL	F
BAU és EXT											
Fűrészipari rönk	25%	2%	23%	2%	10%	10%	55%	38%	11%	20%	26%
Rostfa	6%	4%	16%	10%	10%	8%	31%	23%	54%	14%	39%
Papírfa	0%	1%	1%	0%	0%	0%	5%	20%	2%	1%	21%
Tűzifa	69%	93%	59%	88%	80%	82%	8%	18%	33%	65%	14%
INT											
Fűrészipari rönk	50%	40%	40%	20%	40%	30%	50%	50%	20%	40%	40%
Rostfa	20%	20%	30%	30%	10%	30%	40%	30%	60%	30%	40%
Papírfa	5%	5%	5%	5%	0%	5%	5%	5%	5%	5%	10%
Tűzifa	25%	35%	25%	45%	50%	35%	5%	15%	15%	25%	10%

2. táblázat: A modell faiparhoz és hulladékkezeléshez kapcsolódó paraméterezése (A 2024-es évre a BAU paramétereket használtuk mindegyik scenárióban, az Intenzifikációs scenárióban a paramétereket fokozatosan változtattuk a 2024–2050 időszakban.)

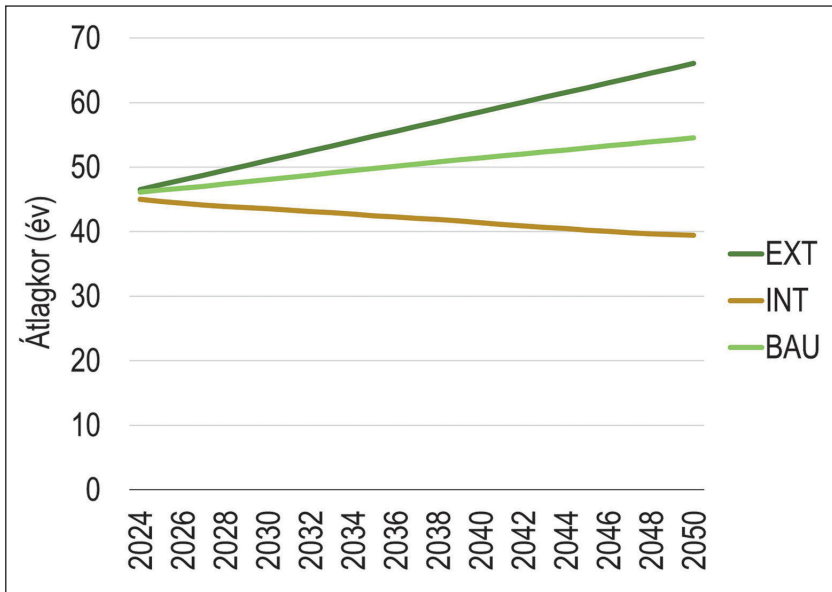
Table 2: Wood industry- and waste management related scenario parametrization (For the year 2024 BAU parameters were used in all scenarios. In the Intensification scenario the parameters were gradually changed between the years 2024 and 2050)

	BAU, 2050	EXT, 2050	INT, 2050
Fatermék termelés	Az utolsó 5 év historikus adatának átlaga	Az utolsó 5 év historikus adatai átlagának fele	A prognosztizált fokozatosan növekvő fakitermelési szint szerint növekvő faipari termelés
Fűrészáru felezési ideje	35	35	50
Laptermékek felezési ideje	25	25	35
Papír és karton felezési ideje	2	2	2
Hulladéklerakóra kerülő fahulladék %	6	6	2
Hulladéklerakóra kerülő papírhulladék %	10	10	2
Újrahasznosított fűrészáru %	25	25	60
Újrahasznosított laptermékek %	25	25	60
Újrahasznosított papír és karton %	71	71	90
Metánvisszanyerés %	7	7	60
Szubsztitúciós faktor fatermékekre	1,2	1,2	1,2
Szubsztitúciós faktor bioenergetikai felhasználásra	0,67	0,67	0,67

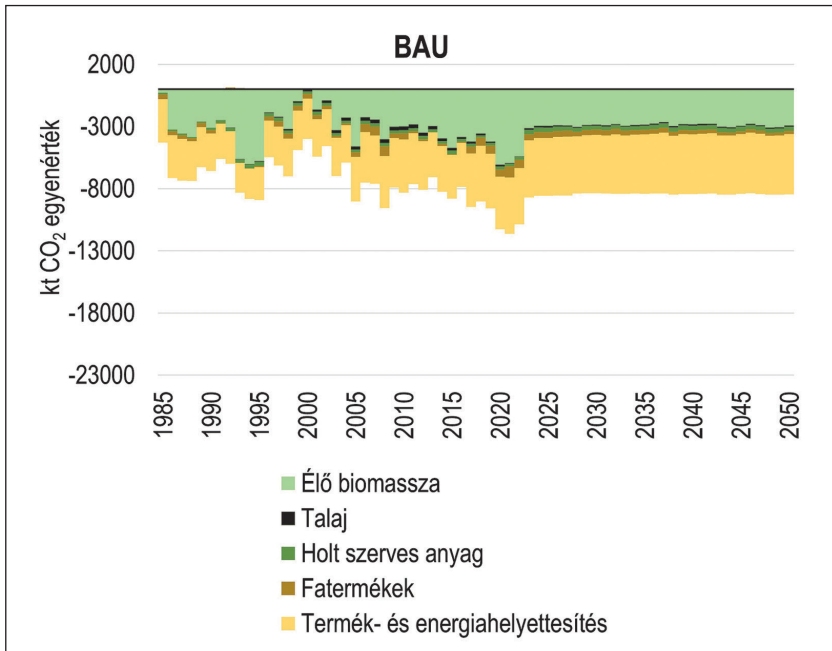
EREDMÉNYEK

Eredményeink szerint a prognosztizált korosztályszerkezetben jelentős eltérések mutatkoznak a három scenárió között (5. ábra). A BAU forgatókönyvben erdeink előregedésének folyamata változatlan ütemben folytatódik. Az EXT forgatókönyvben a hazai erdők átlagéletkora a BAU-hoz képest radikálisan nő, a jelenlegi 45,5 évről 2050-re 66,1 évre emelkedik. Ezzel szemben az INT forgatókönyv esetén a folyamat megfordul és erdeink átlagéletkora 2050-re 39,5 évre csökken.

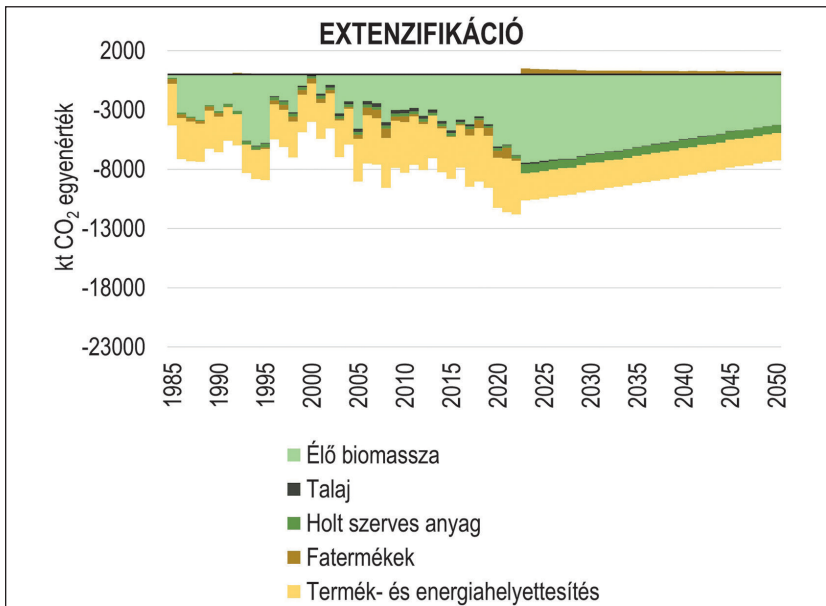
A három forgatókönyv szénmérlegét tekintve azt állapíthatjuk meg, hogy a BAU és az EXT scenáriókban a legfontosabb szénnyelő az erdei élő biomassza (föld feletti és föld alatti), míg az INT scenárióban az élőfakészlet mellett a fatermékek is azonos nagyságrendű elnyelést produkálnak (6-8. ábra). A BAU forgatókönyvben a termék- és energiahelyettesítési hatások hasonló nagyságrendűek, mint az erdei szénnyelők (6. ábra). Az EXT forgatókönyv esetén a helyettesítési hatások kevésbé jelentősek (7. ábra), míg az INT forgatókönyv esetében a helyettesítési hatásokhoz köthető a legnagyobb kibocsátáscsökkentés (8. ábra).



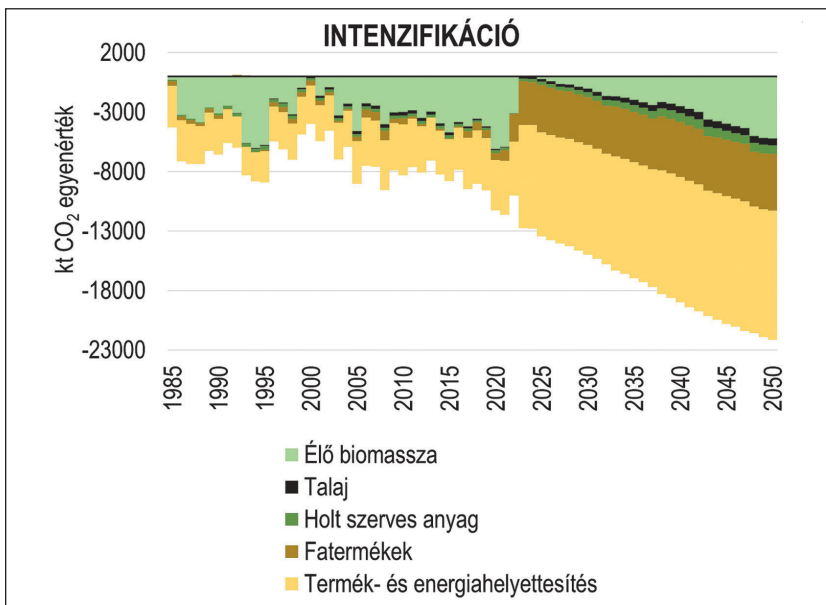
5. ábra: A hazai erdőállomány átlagkorának alakulása a három prognosztizált scenárióban
 Figure 5: Average age of Hungarian forest stands under the three examined scenarios



6. ábra: A BAU scenárió prognosztizált szénegyenlege széntárólok szerinti bontásban, a termékhelyettesítés által elkerült kibocsátások számított értékét is feltüntetve
 Figure 6: Projected carbon balance of the living biomass, DOM, soil, and HWP pools, as well as product and energy substitution effects under the BAU scenario

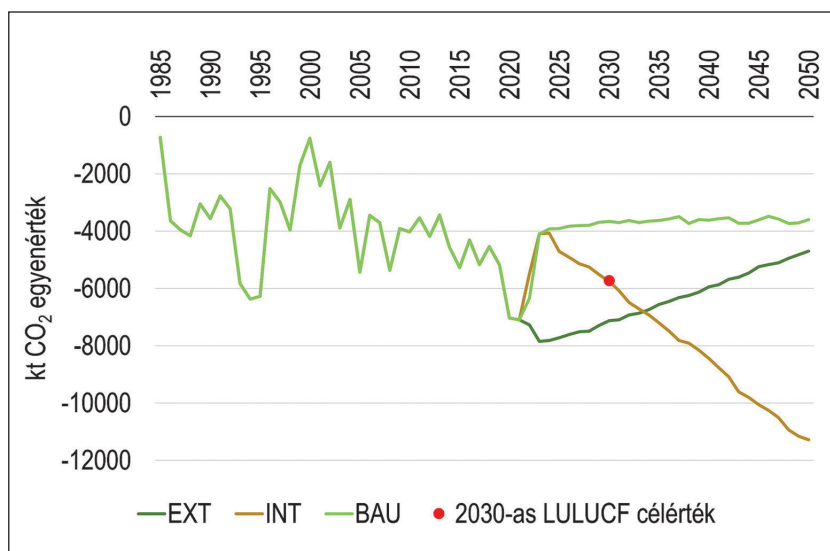


7. ábra: Az Extenzifikációs scenárió prognosztizált szénegyenlege széntárolók szerinti bontásban, a termékhelyettesítés által elkerült kibocsátások számított értékét is feltüntetve
 Figure 7: Projected carbon balance of the living biomass, DOM, soil, and HWP pools, as well as product and energy substitution effects under the Extensification scenario



8. ábra: Az Intenzifikációs scenárió prognosztizált szénegyenlege széntárolók szerinti bontásban, a termékhelyettesítés által elkerült kibocsátások számított értékét is feltüntetve
 Figure 8: Projected carbon balance of the living biomass, DOM, soil, and HWP pools, as well as product and energy substitution effects under the Intensification scenario

A 9. ábra a három vizsgált forgatókönyv nettó erdő és fatermék szénegyenlegét szemlélteti Magyarország 2030-as LULUCF szénmegkötési célértékéhez (-5724 kt CO₂ egyenérték) viszonyítva. A BAU forgatókönyv esetében az erdőalapú szektor 2030-as nettó szénmegkötése a prognózis szerint -3659 kt CO₂ egyenérték lesz. Ez azt jelenti, hogy a célérték csak akkor lenne elérhető, ha nagyon jelentős szénmegkötések valósulnának meg a szántó, a gyepek, a települések vagy a vizes élőhelyek LULUCF alszektorokban, aminek valószínűsége igen kicsi. Az EXT forgatókönyv esetén a prognosztizált szénelnyelés 2030-ban -7121 kt CO₂ egyenérték, míg az INT forgatókönyvben -5754 kt CO₂ egyenérték, ami azt jelenti, hogy az EU jogszabály által felállított cél mindkét forgatókönyvben teljesül.

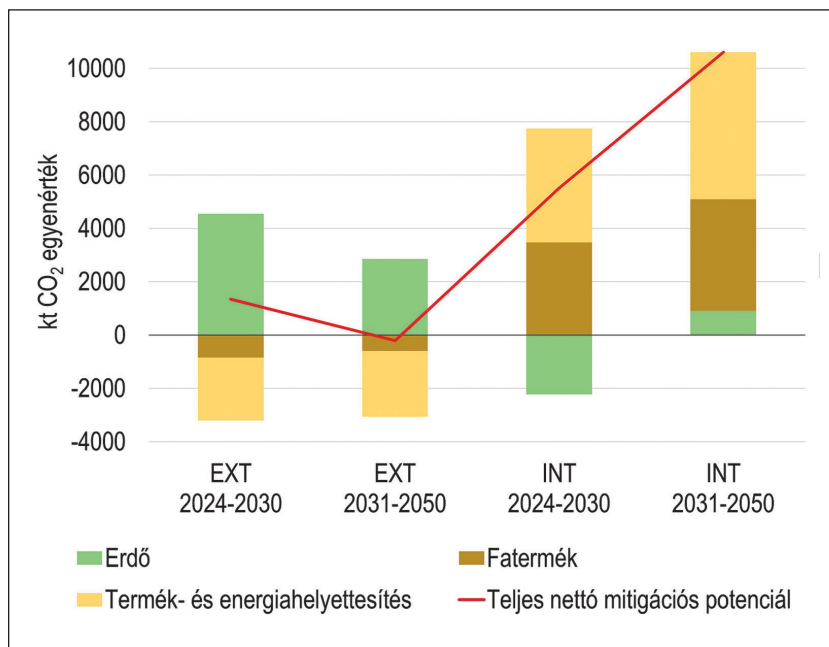


9. ábra: Az erdei széntárolók és a fatermékek szénegyenlege a három vizsgált szcenárióban összevetve a Magyarország számára előírt 2030-as LULUCF célértékkel (A negatív értékek szénmegkötést jelölnek az IPCC konvencióknak megfelelően.)

Figure 9: Projected net emissions of the forest and HWP sectors under the three examined scenarios and the 2030 LULUCF removal target (Negative numbers indicate carbon sequestration according to the IPCC conventions.)

A 10. ábra szemlélteti az INT és EXT forgatókönyvek klímamitigációs potenciálját a BAU nettó szénelnyelési szinthez viszonyítva. A 2024–2030 közötti időszakban az EXT forgatókönyv éves átlagos klímamitigációs potenciálja 1347 kt CO₂ egyenérték, míg az INT forgatókönyv esetében eléri az 5520 kt CO₂ egyenértéket. A 2031–2050 közötti időszakban az EXT forgatókönyv -206 kt CO₂ egyenérték negatív mitigációs potenciált produkál, ami azt jelenti, hogy ebben az időszakban az EXT szcenárió többletkibocsátó a BAU forgatókönyvhöz képest. Ugyanebben az időszakban az INT forgatókönyvben modellezett intenzív erdőipar 10 606 kt CO₂ egyenérték éves átlagos mitigációs potenciált ér el a BAU szintjéhez képest. Az EXT forgatókönyvben mindkét időszakban a fatermékek többletkibocsátók a BAU szcenárióhoz viszonyítva, és a termékhelyettesítési hatások is alacsonyabbak, ugyanakkor az erdei széntárolók többletmegkötők a BAU-val történő összehasonlításban. Az INT forgatókönyvben a 2024–2030-as időszakban az erdők kevesebb széndioxidot kötnek meg, mint a BAU forgatókönyv esetében, míg a fatermékek és a helyettesítési hatások többlet szén-

megkötést produkálnak. A 2031–2050-es időszakban az INT forgatókönyvben minden széntároló, valamint a termék- és energiahelyettesítési hatások is többlet szénmegkötést produkálnak a BAU szcenárióhoz viszonyítva.



10. ábra: Az Extenzifikációs és az Intenzifikációs szcenáriók átlagos éves mitigációs potenciálja a BAU szcenárióhoz viszonyítva a 2024–2030 és a 2031–2050 időszak vonatkozásában (A pozitív számok többlet szénmegkötést jelölnek a BAU szcenárióhoz képest, míg a negatív számok többlet kibocsátást jelölnek)

Figure 10: Average annual mitigation potential of the EXT and INT scenarios compared to the BAU scenario calculated for the periods 2024–2030 and 2031–2050 (Positive numbers indicate additional carbon sequestration as compared to the BAU level, while negative numbers indicate additional CO₂ emissions)

DISZKUSSZIÓ

A BAU forgatókönyvben feltételeztük a hazai erdőgazdálkodási gyakorlat és a fakitermelési szintek változatlanosságát. Előrejelzésünk szerint e gyakorlatok változatlan fenntartása csökkenő erdőalapú szénlekötést eredményez a 2050-ig terjedő időszakban, míg a termék- és energiahelyettesítési hatások szintje konstans marad. Az erdei szénlekötés csökkenése nagy valószínűséggel a hazai erdők korosztályszerkezetének tudható be, az erdők átlagkorának folyamatos emelkedése ugyanis a folyónövedék fokozatos csökkenéséhez vezet. Ez az eredmény azért jelentős, mert rámutat arra, hogy további intézkedések nélkül a Magyarország számára kitűzött 2030-as LULUCF célérték valószínűleg nem lesz teljesíthető.

Az INT forgatókönyv szénmérlegének elemzése azt támasztja alá, hogy Magyarországon a kitermelt fa mennyisége növelhető úgy, hogy ez egyben a szénlekötés növelését is eredményezze. Ez összhangban van Köhl és Martes (2023) megállapításaival, akik szerint az erdészeti ágazat sokkal nagyobb mértékben tud hozzájárulni a klímacélok megvalósulásához a fa kitermelésével és

alacsony károsanyag kibocsátású feldolgozásával, valamint hosszú távú beépítésével, mint in-situ erdei szénraktározás útján. Moreau és munkatársai (2022) a LANDIS-II térben explicit erdőmodell, illetve a Forest Carbon Succession és a Carbon Budget Model for Harvested Wood Products modellek felhasználásával prognosztizálták egy északi mérsékelt égövi erdő szénmérlegét különböző erdőkezelési forgatókönyveket feltételezve. Megállapították, hogy a legintenzívebb gazdálkodással jellemzett forgatókönyvek eredményezték a legmagasabb folyónövedéket és a legnagyobb szénmegkötést. Fiorese és Guariso (2013) eredményei is összhangban vannak a mi megállapításainkkal, e szerzők regionális elemzést végeztek az olasz erdőalapú ágazat szénmérlegére vonatkozóan, és megállapították, hogy a vizsgált területen a fakitermelés maximalizálása bizonyult az optimális forgatókönyvnek négy erdőtípusból három esetében. Ezzel szemben Heinonen és munkatársai (2017) Finnország esetében arra az eredményre jutottak, hogy az erdészeti ágazat összesített kumulatív széndioxid-mérlege alacsony kitermelési szintek alkalmazása esetén volt a legkedvezőbb. Ugyanakkor azt is hangsúlyozták, hogy a magasabb fakitermeléssel jellemzett forgatókönyvek kedvezőbb HWP szénegyensúlyt mutattak, illetve a termékhelyettesítési hatások tekintetében is kedvezőbbnek bizonyultak. Pukkala (2014) rávilágít, hogy a termék- és energiahelyettesítési hatások integrálása az erdőalapú szektor szénmérlegének modellezésébe jelentősen növeli a kimutatott klímamitigációs hatások nagyságát.

Az EXT forgatókönyv esetében az előrejelzésünk azt mutatja, hogy az erdei szénnyelő hirtelen jelentős megnövekedését követően a biomassza szénmegkötése csökkenő tendenciát mutat és 2050-re majdnem a BAU-szintre esik vissza. Ezt a tendenciát tovább rontja, hogy az EXT forgatókönyv esetében a helyettesítési hatások jóval alacsonyabbak, mint a másik két forgatókönyvben, ami a csökkentett fakitermelési szint következménye. Martes és Köhl (2022) a BEKLIFUH modellt használták az erdőkezelési forgatókönyv értékelésére a hamburgi nagyvárosi térségben. Eredményeinkkel összhangban azt találták, hogy míg a helyszíni védelem magasabb szénkészletet eredményezett az erdei biomasszában, addig a fatermékek és a termékhelyettesítési hatások számításba vétele esetén már a nagyobb fahasználati intenzitással jellemzett forgatókönyvek mutatkoztak klímamitigációs szempontból kedvezőbbnek.

Az EXT forgatókönyv esetében a modellezés a hazai erdők jelentős előregedését prognosztizálja, 2050-re az erdők átlagéletkora meghaladja a 66 évet. Ezek a túltartott állományok az idő előrehaladtával valószínűleg egyre sérülékenyebbé válnak és a természetes bolygatásokkal szembeni ellenálló képességük is romolhat. Ez jelentős probléma forrásává válhat a folyamatban lévő klímaváltozásra tekintettel, ami kiterjedt erdőkárokat okozhat. Modellezésünk során nem vettük figyelembe az éghajlatváltozás potenciális kedvezőtlen hatásait a fatermőképességre és a fajok elterjedési területére. E hatás elhanyagolását indokolja a lehetséges hatások jelentős bizonytalansága, illetve a projekció viszonylag rövid időablaka is. Ugyanakkor közismert tény, hogy a klíma előrejelzések szerint számos faj elterjedési területe csökkenni fog Magyarországon (Illés és Móricz 2022), különösen a szárazsági határ közelében tenyésző populációk lehetnek súlyosan érintettek (Mátyás et al. 2010; Borovics és Mátyás 2013). Mindezek alapján valószínűsíthető, hogy az erdők nettó szénmegkötése minden forgatókönyvben csökkenne az erősödő felmelegedés hatására. Fontos hangsúlyozni, hogy az erdőgazdálkodásnak jelentős szerepe lehet abban, hogy elősegítse az erdőállományok alkalmazkodását a jövőbeli termőhelyi feltételekhez (Messier et al., 2019; Mina et al., 2021). Például egy fokozott fakitermeléssel jellemzett gazdálkodási forgatókönyv esetében a beavatkozások olyan állományokat célozhatnak meg, amelyek a leginkább érzékenyek a biotikus és abioti-



kus károkkal szemben, vagy amelyek esetében a fatermőképesség csökkenése a legdrasztikusabb, ily módon csökkenthetőek az erdőkárok, és az alkalmazkodás folyamata felgyorsítható (Hennigar és MacLean, 2010; MacLean et al., 2007, Moreau et al. 2022). A felújítási időszak kulcsfontosságú a klímaváltozáshoz való alkalmazkodás tekintetében, mivel teret ad a természetes genetikai diverzitás útján történő alkalmazkodásnak, ugyanakkor lehetőséget teremt preadaptált szaporítóanyag alkalmazására is (Borovics et al. 2023). A véghasználat és a felújítás elhalasztása lassítja az alkalmazkodási folyamatot, és növeli a természetes bolygatások következtében fellépő többlet széndioxid kibocsátás kockázatát is. Egy intenzívebb gazdálkodási forgatókönyv esetében az erdőgazdálkodók aktívan befolyásolhatják a fajajösszetételt, ezzel segítve az erdők hosszútávú fennmaradását, és növelve ellenálló képességüket a változó éghajlattal szemben (Moreau et al. 2022).

A hazai fakitermelés szintje évtizedek óta stabil, mintegy 7,5 millió m³ körüli. Eredményeink ugyanakkor azt mutatják, hogy a kitermelt mennyiség jelentősen növelhető lenne anélkül, hogy ez negatív hatást gyakorolna a klímaváltozás mérséklésére. Az INT forgatókönyv megvalósulásához azonban jelentős beruházásokra és innovációra lenne szükség a hazai faiparban, annak érdekében, hogy az addicionális 2-4 millió m³ faanyag feldolgozása, hosszú távú beépítése lehetővé váljon. Az elkövetkező évtizedekben a szárazságtűrő fafajok, például a cser (*Quercus cerris*) és a hazai nyárok (*Populus alba*, *Populus x canescens*, *Populus tremula*) faanyaga egyre jelentősebb mennyiségben válik majd elérhetővé Magyarországon (Borovics et al. 2023). Ezért célszerű lenne új terméktípusokat tervezni és innovatív gyártási folyamatokat kialakítani, hogy e jelenleg alulhasznosított fafajok faanyaga hatékonyan feldolgozhatóvá váljon, és magas minőségű, hosszú élettartamú termékek előállítását valósíthassuk meg belőlük. A következő évtizedek elsődleges kihívása a magyar erdőipar számára a kihasználatlan favagyon mozgósítása és a megnyíló további kitermelési lehetőségek optimális kihasználása lesz. A túltartott állományok megfelelő hasznosításához szakmai integrációra, valamint térinformatikai támogatásra is szükség van. A kitermelhető fakészletek mennyiségére és értékére vonatkozó pontos és földrajzilag meghatározott adatok újszerű vállalkozói kultúra és innovatív megoldások elterjedését alapozhatnák meg az erdészeti és faipari szektorban (Borovics et al. 2023).

Vizsgálatunk hiányossága az, hogy a klímaváltozás erdőkre gyakorolt jövőbeli hatását nem vetjük figyelembe a modellezés során. Modellünket a folyamatban lévő ErdőLab (Borovics 2022) projekt keretében tervezzük továbbfejleszteni, hogy lehetővé váljon a klímaváltozás hatásainak integrálása is, és olyan modellfutások végrehajtása, melyek egyszerre vizsgálják a különféle erdőkezelési forgatókönyvek, valamint az egyes klímaszcenáriók hatásait.

ÖSSZEFOGLALÁS

Eredményeink arra engednek következtetni, hogy az erdőiparhoz kapcsolódó klímamitigációs potenciál jelentős része a fatermékek széntárolásában, valamint a termék- és energiahelyettesítési hatásokban rejlik. Így az erdei szénkészletek növelése vagy fenntartása a fahasználat elhagyása útján az éghajlatváltozás mérséklése érdekében egy téves koncepció, amely az erdőipar kulcsfontosságú elemeinek figyelmen kívül hagyásából származik. Ez a megoldási javaslat ugyanis nem veszi figyelembe az erdőn kívüli, a technoszférában zajló folyamatokat, sem az ott tárolt szénkészleteket. Az erdőgazdálkodás és a faipar átfogó és koherens ismerete, valamint az alulhasznosított fafajok fafeldolgozásának innovatív megoldása elengedhetetlen a legkedvezőbb szénmérleg eléréséhez.

A klímasemlegesség erdészeti és faipari intézkedések együttes végrehajtásával, és elsősorban faipari innovációkkal és intenzifikációval kombinált aktív alkalmazkodással érhető el.

A gazdálkodás nélküli erdőben, vagy csökkentett kitermeléssel jellemezhető erdőgazdálkodási modell esetén felhalmozódó faanyagot a lebontó szervezetek botják le, amely során ugyanannyi széndioxid szabadul fel, mint ha azt tűzifa égetésével fosszilis energiahordozók kiváltására hasznosítanánk. A fenntartható erdőgazdálkodás során a fakitermeléssel és hasznosítással éppen a lebontást végző fogyasztók elől csapoljuk meg ezt a szénforrást ügyelve egyúttal arra is, hogy az ökoszisztéma működéséhez és a biodiverzitás fenntartásához szükséges mennyiségű holtfát is hagyjunk az erdőben. A korosztály eloszlás és a véghasználatok eltolása, átmenetileg és csak rövid távon csökkenti a légkör széntartalmát, miközben elmaradnak az erdők érdekében végrehajtandó alkalmazkodást segítő beavatkozások, mint például a fafajcserék, az előalkalmazkodott, klímarezisztens szaporítóanyaggal végzett felújítások és állománykiegészítések, valamint a kevesebb vízfelhasználást eredményező faállomány szerkezet kialakítását segítő gyéritések végrehajtása. A fentiekből következően a faanyag hasznosításának elmaradása csak rövidtávon eredményezhet többlet szénmegkötést, hosszabb távon korlátozza a klímaváltozás mérséklését, valamint a klímaváltozáshoz történő alkalmazkodást. A legtöbb addicionális szénmegkötést éppen az innovatív fatermékek és a faalapú termékhelyettesítés révén érhetjük el, mobilizálva az erdőkben eddig nem hasznosított favagyont. Ez az erdőgazdálkodás intenzifikációjával egybekötött faipari innováció, mint erdőipari fejlesztés az, amely a legtöbb szénmegkötést képes megvalósítani 2050-re. Ennek elérését ösztönző zöld beruházási gazdasági eszközök fejlesztése és a teljes folyamat jobb bemutatását és kommunikációját lehetővé tevő képzési tartalmak kidolgozása jelenleg zajlik az ErdőLab projekt keretében, az ökológiai, biológiai, ökonómiai és műszaki tudományterületek együttműködésében.

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.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Borovics A., Király É. & Kottek P. 2024: Projection of the Carbon Balance of the Hungarian Forestry and Wood Industry Sector Using the Forest Industry Carbon Model. *Forests* 15(4):600. <https://doi.org/10.3390/f15040600>
- Borovics A. & Király É. 2023a: Klímamitigáció és alkalmazkodás a magyar erdőiparban. *Erdészeti Lapok* 158: (1): 5-9.
- Borovics A. & Király É. 2023b: The Challenge of Mobilizing the Unused Wood Stock Reserve to Foster a Sustainable and Prosperous Hungarian Forest Industry, *Chemical Engineering Transactions* 107: 637-642. <https://doi.org/10.3303/CET23107107>
- 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>
- Borovics A. 2022: ErdőLab: A Soproni Egyetem Erdészeti és Faipari Projektje: Fókuszban az Éghajlatváltozás Mérséklése; *Erdészeti Lapok* 157(4): 114–115.



- Borovics A. & Mátyás Cs. 2013: Decline of genetic diversity of sessile oak at the re-tracting (xeric) limits. *Annals of Forest Science* 70: 835–844. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0324-6>
- COM(2021) 572: European Commission. New EU forest strategy for 2030. COM. (2021) 572 final. Communication from the commission to the European parliament, the council, the European Economic and social committee and the committee of the regions. 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0572>
- COM(2021) 699: European Commission. EU soil strategy for 2030 – Reaping the ben-efits of healthy soils people, food, nature and climate. COM(2021) 699 final. Communica-tion from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions. 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>
- COM(2021) 800: EC. Communication from the commission to the European parlia-ment and the council. Sustainable carbon cycles. COM(2021) 800 final. 2021.
- COM(2022) 304: European Commission. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on na-ture restoration. COM(2022) 304 final. 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2022:304:FIN>
- COM(2022) 672: European Commission. Proposal for a member of the European par-liament and the council establish-ing a union certification framework for carbon removals. COM(2022) 672 final. 2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/HIS/?uri=CELEX:52022PC0672>
- EU/2018/841: Regulation (EU) 2018/841: of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy frame-work, and amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU (Text with EEA relevance) <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/841/oj>
- EU/2021/1119: European Climate Law. Regulation (EU) 2021/1119 of the European parliament and of the council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality and amending regulations (EC) no 401/2009 and (EU) 2018/1999 ('Eu-ropean Climate Law'). PE/27/2021/REV/1. <http://data.europa.eu/eli/reg/2021/1119/oj>
- Európai Bizottság 2022: EU forests – new EU framework for forest monitoring and strategic plans. 2022. https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13396-EU-forests-new-EU-Framework-for-Forest-Monitoring-and-Strategic-Plans_en
- Európai Bizottság 2023: Soil Health. 2023. https://environment.ec.europa.eu/topics/soil-and-land/soil-health_en
- Fankhauser S., Smith S., Allen M., Axelsson K., Hale T., Hepburn C. et al.2022: The meaning of net zero and how to get it right. *Nature Climate Change* 12: 15–21. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01245-w>.
- Fiorese G. & Guariso G. 2013: Modelling the role of forests in a regional carbon mitigation plan, *Renewable Energy* 52: 175-182. ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.060>
- Forest Act of Hungary 2024: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0900037.tv>
- Friedlingstein P., Jones M.W., O’Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P. et al. 2019: Global carbon budget 2019. *Earth System Science Data* 11(4): 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Grassi G., House J., Dentener F., Federici S., den Elzen M. & Penman J. 2017: The key role of forests in mee-ting climate targets requires science for credible mitigation. *Nature Climate Change* 7(3): 220–226. <https://doi.org/10.1038/nclimate3227>
- Heinonen T., Pukkala T., Mehtätalo L., Asikainen A., Kangas J. & Peltola H. 2017: Scenario analyses for the effects of harvesting intensity on development of forest resources, timber supply, carbon balance and biodiversity of Finnish forestry, *Forest Policy and Economics* 80: 80-98. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.03.011>
- Hennigar C.R.H.R. & MacLean D.A.M.A. 2010: Spruce budworm and management effects on forest and wood product carbon for an intensively managed forest. *Canadian Journal of Forest Research* <https://doi.org/10.1139/X10-104>
- Hurmekoski E., Kilpeläinen A. & Seppälä J. 2022: Climate-Change Mitigation in the Forest-Based Sector: A Holistic View. Chap-ter 8 In: Hetemäki L. et al. (eds.): *Forest Bioeconomy and Climate Change, Managing Forest Ecosystems* 42 https://doi.org/10.1007/978-3-030-99206-4_8
- Illés G. & Móczár N. 2022: Climate envelope analyses suggests significant rear-rangements in the distribution ranges of Central European tree species. *Annals of Forest Science* 79: 35.

- IPCC 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. and Tanabe K. (eds).
- IPCC 2013: Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T.G. (eds). Pp. 268.
- IPCC 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. and Federici, S. (eds).
- 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. <https://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.1.7286>
- 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>
- Korosuo A., Pilli R., Abad Viñas R. et al. 2023: The role of forests in the EU climate policy: are we on the right track? *Carbon Balance and Management* 18: 15. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00234-0>
- Kottek P. 2023: Hosszútávú erdőállomány prognózisok. PhD Értekezés. 142 p. Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola, Soproni Egyetem. Sopron.
- 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-parametrization of the DAS Model Based on 2016-2021 Data of the National Forestry Database: New Results on Cutting Age Distributions. *Acta Silvatica & Lignaria Hungarica* 19(2): 61–74. <https://doi.org/10.37045/aslh-2023-0005>
- Köhl M. & Martes L. M. 2023: Forests: A passive CO₂ sink or an active CO₂ pump? *Forest Policy and Economics* 155(10): 103040. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103040>
- Leskinen P., Cardellini G., González-García S., Hurmekoski E., Sathre R., Seppälä J., Smyth C., Stern T. & Verkerk P.J. 2018: Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. *From Science to Policy* 7. European Forest Institute. pp. 28.
- Levin K., Rich D., Ross K., Fransen T. & Elliott C. 2020: Designing and Communicating Net-Zero Targets. World Resources Institute. Designing and communicating net-zero targets (apo.org.au).
- Lipiäinen S., Sermyagina E., Kuparinen K. & Vakkilainen E. 2022: Future of forest industry in carbon-neutral reality: Finnish and Swedish visions, *Energy Reports* 8: 2588-2600. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.191>
- MacLean D., Porter K., Quiring D. & Hennigar C. 2007: Optimized harvest planning under alternative foliage-age-protection scenarios to reduce volume losses to spruce budworm. *Canadian Journal of Forest Research* 37(10): 1755–1769. <https://doi.org/10.1139/X07-001>
- Martes L. & Köhl M. 2022: Improving the Contribution of Forests to Carbon Neutrality under Different Policies—A Case Study from the Hamburg Metropolitan Area. *Sustainability* 14(4): 2088. <https://doi.org/10.3390/su14042088>
- Mátyás Cs., Berki I., Czúcz B., Gálos B., Móczis N. & Rasztovis E. 2010: Future of Beech in Southeast Europe from the Perspective of Evolutionary Ecology. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 6(1): 91–110.
- Messier C., Bauhus J., Doyon F., Maure F., Sousa-Silva R., Nolet P., Mina M., Aquilué N., Fortin M.J. & Puettmann K. 2019: The functional complex network approach to foster forest resilience to global changes. *Forest Ecosystems* 6: 21. <https://doi.org/10.1186/s40663-019-0166-2>
- Mina M., Messier C., Duveneck M., Fortin M.J. & Aquilué N. 2021: Network analysis can guide resilience-based management in forest landscapes under global change. *Ecological Applications* 31(1): e2221. <https://doi.org/10.1002/eap.2221>
- Moreau L., Thiffault E., Cyr D., Boulanger Y. & Beauregard R. 2022: How can the forest sector mitigate climate change in a changing climate? Case studies of boreal and northern temperate forests in eastern Canada. *Forest Ecosystems* 9: 100026. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2022.100026>
- NIR 2023: National Inventory Report for 1985–2021. Hungary. Hungarian Meteorological Service: Budapest, Hungary.



OKIR 2024: Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer <http://web.okir.hu/en/>

OSAP 2023: <https://agrarstatisztika.kormany.hu/erdogazdalkodas2>

Pukkala T. 2014: Does biofuel harvesting and continuous cover management increase carbon sequestration? *Forest Policy and Economics* 43(6): 41-50. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2014.03.004>

Rogelj J., Geden O., Cowie A. & Reisinger A. 2021: Three ways to improve net-zero emissions targets. *Nature* 591: 365–368. <https://doi.org/10.1038/d41586-021-00662-3>

Tobisch T. & Kottek P. 2013: *Forestry-Related Databases of the Hungarian Forestry Directorate, Version 1.1*; Hungarian Forestry Directorate: Budapest, Hungary.

Érkezett: 2024. 07. 23.

Közlésre elfogadva: 2024. 09. 16.