

Doktori (PhD) értekezés
Soproni Egyetem
Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása (E1) Program

ERDÉSZETI ÉS FAIPARI KLÍMAMITIGÁCIÓS STRATÉGIÁK

Készítette:
Király Éva Ilona

Témavezető:
Dr. Borovics Attila

Sopron
2026

ERDÉSZETI ÉS FAIPARI KLÍMAMITIGÁCIÓS STRATÉGIÁK

Értekezés doktori (PhD) fokozat elnyerése érdekében

Írta:

Király Éva Ilona

Készült a Soproni Egyetem

Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola

Erdei ökoszisztémák ökológiája és diverzitása (E1) programja keretében

Témavezető(k): Dr. Borovics Attila

Az értekezés témavezetőként elfogadásra javasolt: igen / nem

témavezető(k) aláírása

Az értekezés bírálóként elfogadásra javasolt (igen /nem)

1. bíráló: Dr. _____ igen / nem _____
(aláírás)

2. bíráló: Dr. _____ igen / nem _____
(aláírás)

Az értekezés nyilvános védésének eredménye: _____%

Kelt Sopron, 20 ____ év ____ hónap ____ nap

a Bíráló Bizottság elnöke

A doktori (PhD) oklevél minősítése: _____

az EDHT elnöke

NYILATKOZAT

Alulírott Király Éva Ilona, jelen nyilatkozat aláírásával kijelentem, hogy a(z) Erdészeti és faipari klímamitigációs stratégiák című PhD értekezésem önálló munkám, az értekezés készítése során betartottam a szerzői jogról szóló 1999. évi LXXVI. törvény szabályait, valamint a Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola által előírt, a doktori értekezés készítésére vonatkozó szabályokat, különösen a hivatkozások és idézések tekintetében.¹

Kijelentem továbbá, hogy az értekezés készítése során az önálló kutatómunka kitétel tekintetében témavezetőmet, illetve a programvezetőt nem tévesztettem meg.

Jelen nyilatkozat aláírásával tudomásul veszem, hogy amennyiben bizonyítható, hogy az értekezést nem magam készítettem, vagy az értekezéssel kapcsolatban szerzői jogsértés ténye merül fel, a Soproni Egyetem megtagadja az értekezés befogadását.

Az értekezés befogadásának megtagadása nem érinti a szerzői jogsértés miatti egyéb (polgári jogi, szabálysértési jogi, büntetőjogi) jogkövetkezményeket.

Sopron, 20.....

.....

doktorjelölt

¹ 1999. évi LXXVI. tv. 34. § (1) A mű részletét – az átvevő mű jellege és célja által indokolt terjedelemben és az eredetihez híven – a forrás, valamint az ott megjelölt szerző megnevezésével bárki idézheti.

36. § (1) Nyilvánosan tartott előadások és más hasonló művek részletei, valamint politikai beszédek tájékoztatás céljára – a cél által indokolt terjedelemben – szabadon felhasználhatók. Ilyen felhasználás esetén a forrást – a szerző nevével együtt – fel kell tüntetni, hacsak ez lehetetlennek nem bizonyul.

Tartalomjegyzék

KIVONAT	1
ABSTRACT	2
1 BEVEZETÉS.....	3
1.1 A téma aktualitása.....	3
1.2 A kutatás célkitűzése.....	3
2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	5
2.1 Az erdőalapú szektor klímamitigációs szerepe.....	5
2.2 Az erdőalapú szektor szénforgalmi modellezése	7
2.2.1 A CASMOFOR modell.....	8
2.2.2 A DAS erdőállomány prognózis modell.....	10
2.3 A fatermékek klímamitigációs szerepe	12
2.4 A fatermékek szénegyenlegének modellezése	15
2.5 Az agrárerdészeti megoldások szerepe a klímavédelemben	19
2.6 Agrárerdészeti rendszerek szénforgalmi modellezése	24
3 ANYAG ÉS MÓDSZER	26
3.1 Az Erdőipari Szén Modell létrehozása.....	26
3.2 A HWP részmodell megalkotása	30
3.2.1 A HWP modell szerkezete, formalizált leírása és alapértelmezett paraméterei	31
3.2.1.1 Használatban lévő termékek modulja	31
3.2.1.2 Újrahasznosítási és hulladékút-választó modul	33
3.2.1.3 Hulladék modul.....	34
3.2.1.4 Termék- és energiahelyettesítési modul.....	37
3.3 Az agrárerdészeti részmodell létrehozása	39
3.3.1 Az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősávokra vonatkozó adatainak vizsgálata	39
3.3.1.1 A mezővédő erdősávok fatermési osztályának vizsgálata	39
3.3.1.2 A mezővédő erdősávok záródásának vizsgálata	43
3.3.2 Az agrárerdészeti modul paraméterezése.....	47
4 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK	49
4.1 Termék szintű prognózisok különböző hulladékkezelési forgatókönyvek szerint.....	49
4.1.1 Kivonat.....	49
4.1.2 Célkitűzés.....	49
4.1.3 Input adatok és paraméterezés	50
4.1.4 Eredmények és megvitatásuk.....	52

4.1.5 Következtetések	59
4.2 A hazai HWP széntároló szénegyenlegének előrejelzése 10 scenárióban	61
4.2.1 Kivonat.....	61
4.2.2 Célkitűzés.....	61
4.2.3 Input adatok és paraméterezés	61
4.2.4 Eredmények és megvitatásuk.....	71
4.2.5 Következtetések	79
4.3 A hazai HWP széntároló szénegyenlegének és termékhelyettesítési potenciáljának historikus vizsgálata és előrejelzése megnövekedett hazai feldolgozás esetén	82
4.3.1 Kivonat.....	82
4.3.2 Célkitűzés.....	82
4.3.3 Input adatok és paraméterezés	82
4.3.4 Eredmények és megvitatásuk.....	85
4.3.5 Következtetések	90
4.4 A háztartásokban elégetett fahulladék mennyiségének és energiatartalmának becslése az FICM HWP modell output adatai alapján	91
4.4.1 Kivonat.....	91
4.4.2 Háttér.....	91
4.4.3 Célkitűzés.....	93
4.4.4 Adat és módszer	93
4.4.5 Eredmények és megvitatásuk.....	94
4.4.6 Következtetések	97
4.5 Mezővédő erdősávok telepítésére vonatkozó szénforgalmi prognózis	99
4.5.1 Kivonat.....	99
4.5.2 Célkitűzés.....	99
4.5.3 Input adatok és paraméterezés	99
4.5.4 Eredmények és megvitatásuk.....	100
4.5.5 Következtetések	105
5 ÖSSZEFOGLALÁS	107
5.1 Tézisek.....	107
6 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	112
7 HIVATKOZÁSOK	114
8 ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	126

KIVONAT

Cím: Erdészeti és faipari klímamitigációs stratégiák

Az erdészeti és faipari szektor kiemelt szerepet tölt be a klímaváltozás mérséklésében, ugyanis a fotoszintézis lehetőséget biztosít az ökoszisztéma alapú szénmegkötésre, illetve a faalapú széntárolásra. A szektor klímamitigációs szerepe négy alapvető úton valósulhat meg. Első az erdők szénmegkötése és az in-situ széntárolás az ökoszisztémán belül. Második lehetőség a szén faalapú termékekben megvalósuló hosszú távú tárolása, mely akár évszázadokon is átívelhet. Végül a harmadik útvonal a termékhelyettesítés, mely lehetővé teszi szén-dioxid-intenzív termékek fatermékekkel történő helyettesítését és így jelentős emissziók elkerülését az energetikai és ipari szektorban. Negyedik lehetőségként pedig a faalapú bioenergia termelést kell megemlíteni, mely lehetővé teszi a fosszilis tüzelőanyagok helyettesítését, ami által szintén kibocsátásokat kerülhetünk el.

Doktori kutatásom az ErdőLab projekt nagyívű kutatásához kapcsolódóan azt vizsgálja, hogy hogyan modellezhetőek és értékelhetőek e mitigációs útvonalak a hazai erdészeti szektorban. Kutatásom során kidolgoztam az Erdőipari Szén Modell (FICM) fatermék (HWP) részmodelljét a fatermékek széntárolásának és szénegyenlegének prognosztizálására. A modell konzisztens a Nemzeti Üvegházhatású Gázleltár jelentéssel, illetve az IPCC módszertanával. A modellel számszerűsíthető a fatermékekben megkötött és tárolt szén mennyisége, illetve az életidő végén a fahulladékok kezelése során felszabaduló szén-dioxid és metán kibocsátások nagyságrendje. A modell számol a fatermékek újrahasznosításával is. Termékhelyettesítési modulja segítségével pedig becsülhető a fatermékek termék- és energiahelyettesítési hatása útján elkerült kibocsátások mértéke.

Kutatásom során emellett megalkottam az FICM agrárerdészeti részmodelljét is, melyet az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősávokra vonatkozó adatai, valamint nemzetközi szakirodalmi adatok segítségével paramétereztem. A modell képes mezővédő erdősávok biomassza, holtfa, avar és talaj széntárolói szénegyenlegének prognosztizálására. A megalkotott két részmodell felhasználásával szénforgalmi prognózisokat készítettem különböző klímamitigációs intézkedések hatásértékelésére.

ABSTRACT

Title: Climate change mitigation strategies in the forestry and wood industry sector

The forest-based sector contributes significantly to climate change mitigation through ecosystem carbon sequestration and carbon storage in wood-based products. Its mitigation potential is realized through four mechanisms: in situ forest carbon storage, long-term storage in harvested wood products, product substitution of emission-intensive materials, and bioenergy substitution for fossil fuels. This doctoral research, conducted within the ForestLab project, aimed to model and evaluate these pathways in the domestic forest-based sector. The Harvested Wood Products (HWP) sub-model of the Forest Industry Carbon Model (FICM) was developed in accordance with IPCC and National Greenhouse Gas Inventory methodologies. It quantifies carbon storage, end-of-life emissions, recycling processes, and substitution effects. In addition, an agroforestry sub-model was developed using data from the National Forestry Database and international literature to simulate carbon dynamics in biomass, dead wood, litter, and soil pools of shelterbelts. Based on these models, carbon balance projections were performed to assess the impacts of climate change mitigation measures.

1 BEVEZETÉS

1.1 A téma aktualitása

A klímaváltozás hatásainak egyre nyilvánvalóbbá válása, valamint a nemzetközi politikai környezet változásai egyre aktuálisabbá teszik a klímamitigáció kérdését. Az erdőalapú szektor speciálisan előnyös helyzetben van a klímaváltozás elleni küzdelemben, hiszen itt nem csak az emissziócsökkentés a rendelkezésre álló opció, hanem az ökoszisztémák természetes, fotoszintézis alapú szénmegkötő képessége révén lehetőség van a kibocsátások ellentételezésére is, és a szén-dioxid (CO₂) megkötésére, valamint hosszú távú tárolására. Emellett a fa a körkörös biogazdaság megújuló nyersanyaga, melynek termék- és energiahelyettesítési hatásai az ipari és energetikai szektorok kibocsátásait is képesek csökkenteni.

A Soproni Egyetem összes karának együttműködésében indult 2022-ben az ErdőLab projekt (Borovics 2022), melynek fő célja a hazai erdészeti és faipari szektor klímavédelmi szerepének és lehetséges mitigációs útvonalaik feltérképezése és hatásértékelése volt.

A projekt egyik célja volt az erdőgazdálkodás és a faipar, azaz együttesen a fagazdaság területét érintő klímamitigációs stratégiák szénegyenlegének komplex vizsgálatára alkalmas szénforgalmi modell létrehozása, mely lehetővé teszi a különböző mitigációs útvonalak jövőbeli szénegyenlegének vizsgálatát. A modellezési munkában az Egyetem több kara, illetve külső kutatók is részt vettek. Doktori kutatásom ehhez a nagyobb kutatáshoz kapcsolódott, és próbált hozzájárulni a modellezési munka sikerességéhez.

A modellezési munka eredményeként született aztán meg az Erdőipari Szén Modell (Borovics 2024), melynek fatermék és agrárerdészeti moduljai kidolgozásához magam is hozzájárultam.

1.2 A kutatás célkitűzése

A doktori kutatásom fentiekhez kapcsolódó speciális célkitűzései tehát az alábbiak voltak.

1. Egy fatermék (HWP) részmodell kidolgozása, mely az Üvegházhatású Gázleltárjelentés (ÜHG-leltár) készítését szabályozó, az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testülete (IPCC) által kidolgozott módszertannal konzisztens módon írja le a fatermékek széntárolását és a belőlük az életidő végén keletkező szén-dioxid és

metán emissziókat, valamint számszerűsíti a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátásokat is.

2. A HWP modell tesztelése kisebb termékmennyiségre vonatkozó modellezés, illetve a HWP széntároló országos szintű szénmérlegének modellezése útján.
3. Egy agrárerdészeti részmodell kidolgozása, mely az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősávokra vonatkozó adatain alapul, és az ÜHG-leltárral és az IPCC útmutatókkal konzisztens módon modellezi a mezővédő erdősávok szénmérlegét.
4. Az agrárerdészeti részmodell felhasználásával agrárerdészeti klímamitigációs intézkedések mitigációs potenciáljának értékelése.

2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Kutatásom megalapozására szakirodalmi áttekintést végeztem, mely során megvizsgáltam az erdőalapú szektor klímamitigációs szerepét, valamint szénforgalma modellezésének eddigi megoldásait. A szakirodalom áttekintése során kiemelt figyelmet fordítottam a fatermékek és az agrárerdészeti megoldások klímamitigációs szerepének áttekintésére.

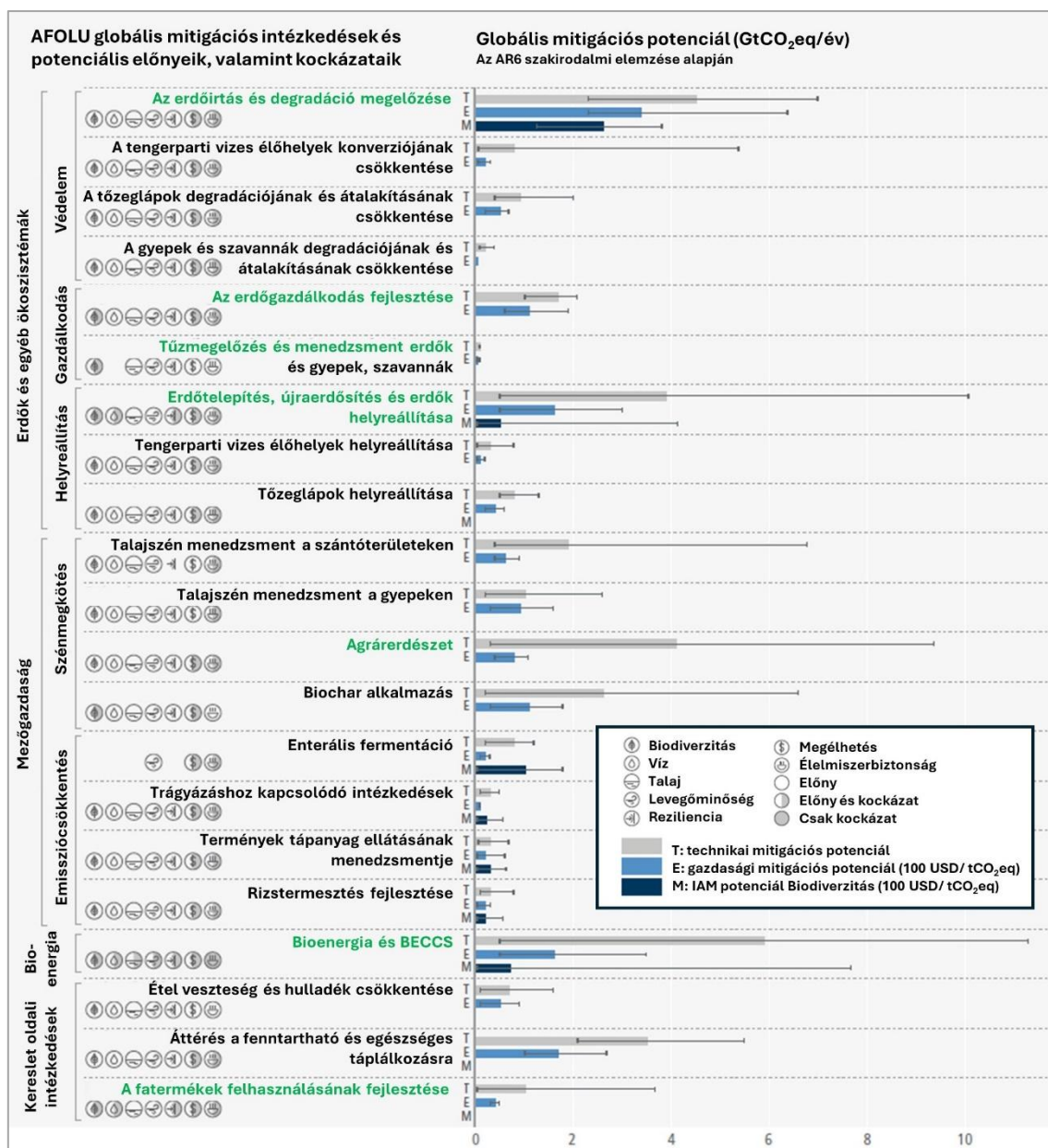
2.1 Az erdőalapú szektor klímamitigációs szerepe

Az erdészeti szektor kiemelt szerepet tölt be a klímaváltozás mérséklése terén (vagyis a klímamitigációban), ugyanis ebben a szektorban lehetőség van az emissziócsökkentés mellett a természet adta szénmegkötési megoldások mitigációs hatásainak kiaknázására is.

Borovics (2022) szerint az erdészeti szektorban négy út áll rendelkezésre a klímaváltozás mérséklésére, melyek a következők:

1. szén-tárolás az ökoszisztémán belül;
2. szén-tárolás faalapú termékekben;
3. emberi tevékenységekből származó szén-dioxid kibocsátás csökkentése azáltal, hogy a faalapú termékekkel helyettesítenek magasabb kibocsátású anyagból készült termékeket;
4. energiaforrásokból származó szén-dioxid kibocsátás csökkentése a fosszilis tüzelőanyagok fával való helyettesítése útján.

Verkerk et al. (2022) szerint a különböző intézkedés kombinációkhoz más-más klímamitigációs potenciál értékek társíthatók, és az intézkedések adott országra vagy régióra optimalizált kombinációja a legkedvezőbb klímamitigációs szempontból. Az IPCC Hatodik Értékelő Jelentése globális szinten értékeli az erdőalapú szektorhoz, valamint a mezőgazdasághoz kapcsolódó lehetséges klímamitigációs intézkedések mitigációs hatását (*1. ábra*).



1. ábra: Az AFOLU szektorhoz kapcsolódó klímamitigációs intézkedések mitigációs potenciál értékei az IPCC Hatodik Értékelő Jelentése (IPCC 2022) szerint.
(Az erdészeti- és faipari ágazathoz kapcsolódó intézkedések zöldel vannak kiemelve. Az IAM potenciál az Integrated Assessment Modellek segítségével meghatározott mitigációs potenciál értékeket jelenti.)

Globális szinten az erdőirtás csökkentésének nagy a jelentősége a klímamitigáció terén, azonban ez az intézkedés elsősorban a fejlődő országokban releváns. Emellett az erdőtelepítés, az erdőgazdálkodás fejlesztése, az agrárerdészeti gyakorlatok elterjesztése, illetve a bioenergia

felhasználás és a fatermékek felhasználásának optimalizálása is jelentős mitigációs potenciállal rendelkező intézkedések.

Verkerk et al. (2022) szerint Európában az olyan mitigációs tevékenységek kombinálhatóak sikeresen, mint az erdőirtás elkerülése, az erdősítés/újraerdősítés, a faanyag többlepcsős (kaskád) felhasználása és a hatékonyság növelése a faiparban. Ezek kombinálása évente akár 72 MtCO₂eq többlet mitigációs potenciált is biztosíthat 2050-re az EU-27 szintjén. Ez a mitigációs potenciál érték évi 138 MtCO₂eq-ra növelhető további aktív erdőgazdálkodási tevékenységek alkalmazásával. Ez több mint kétszerese Magyarország teljes éves üvegházhatásúgáz-kibocsátásának.

Hazánk vonatkozásában az ErdőLab projekt keretében Borovics et al. (2024) értékelték a klímamitigációs lehetőségek különféle kombinációit az erdészeti és faipari szektorban. Megállapították, hogy a fagazdaság intenzifikációja, a fakitermelés növelése és a faanyag hosszú élettartamú fatermékek formájában történő feldolgozása jelentős klímamitigációs hatással bír, és 2050-ig vizsgálva mitigációs hatása felülmúlja a fakitermelés csökkentésének rövidtávú mitigációs hatásait. Elemzésükben rámutattak arra, hogy az erdők szénraktárként való tekintése a hosszabb távon kedvezőtlen szénmérleg mellett megnehezíti az erdők megújítását, a klímarezisztens származások elterjesztését, és így a klímaváltozáshoz történő adaptációt is.

2.2 Az erdőalapú szektor szénforgalmi modellezése

Az erdőalapú ágazat szénforgalmának jövőre vonatkozó modellezése képezi alapját a klímamitigációs stratégiák tervezésének.

Az erdei szén ciklus modellek a növekedést két megközelítésben képesek modellezni (Zhao et al. 2022). Egyik esetben a fotoszintézis szimulációja segítségével (például 3-PG, Landsberg és Waring 1997; BIOME-BGC, Running és Gower 1991; CENTURY, Metherall et al. 1993; TEM, Tian et al. 1999). Másik esetben pedig fatermési táblák segítségével történik a növedékesítés (pl. EFISCEN, Nabuurs et al. 2000; CO2FIX, Masera et al. 2003; FORMICA, Böttcher et al. 2008a; CASMOFOR, Somogyi 2023; DAS, Kottek 2023; FOX, REKK 2024).

A fotoszintézis-vezérelt folyamatalapú modellekhez olyan bemeneti adatokra van szükség, mint a levélfelületi-index (Running és Gower 1991), illetve éghajlati- és talajjellemzők

(McGuire et al. 2002). Az empirikus hozamadatokkal vezérelt modellekhez fatermési adatokra van szükség az állomány típusának és korának függvényében. Ilyen adatokat a szisztematikus erdőleltárak (NFI), illetve az erdőrésztlet alapú erdőállomány leírások (pl. a hazai Országos Erdőállomány Adattár) is képesek szolgáltatni, illetve célzott kutatások útján is levezethetőek (Kollár és Borovics 2021). A fatermési függvények által vezérelt modellek különösen alkalmasak az emberi tevékenységek és a természetes zavarások explicit szimulálására és a jelenlegi és a közeljövőbeli erdők szénkészleteire és szénáramára gyakorolt hatásaik leírására (Pilli et al. 2017). Ezek a modellek a növekedést szimulálják és a múltbeli megfigyelések alapján számítják ki a szénkészleteket, elsődleges szerepük van az erdőművelési beavatkozások rövidtávú szénegyenleg módosító hatásainak modellezésében országos szinten és az erdőrésztlet szintjén is (Pilli et al. 2013, Pilli et al. 2016b, Böttcher et al. 2008b). Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy a fatermési táblák a múltbeli növekedési minták alapján működnek és nem biztos, hogy a változó klíma miatt megváltozó növekedési mintákat képesek előrejelezni.

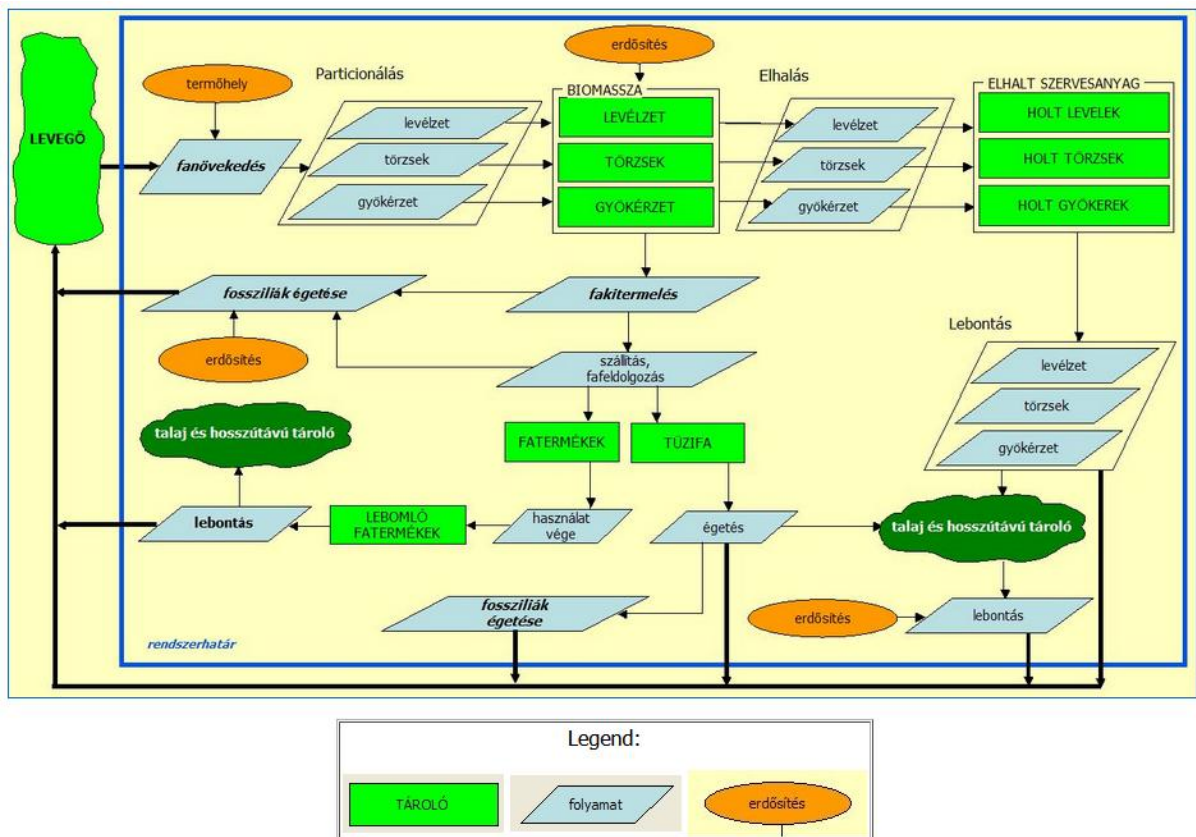
2.2.1 A CASMOFOR modell

Somogyi (1997) fejlesztette ki az erdőtelepítések szénforgalmának országspecifikus becslésére szolgáló első hazai modellt (Carbon Sequestration Model for Forestations, CASMOR) a COMAP (Comprehensive Mitigation Assessment Process; Sathaye et al. 1995) alapján. A CASMOFOR modell (Somogyi 2023, 2. ábra) az előző modell alapvetően újraalkotott változata, amely az IPCC módszertanán alapul, és az 1990-es évek óta folyamatos fejlesztés alatt áll. Fatermési tábla adatokat, valamint sűrűség és biomassza-expanziós tényezőket alkalmaz. Emellett felhasznál az állomány kezelésével kapcsolatos információkat, és egyéb állandókat, amelyek egy része faj- és termőhely-specifikus (Somogyi 2023).

A CASMOFOR-t eredetileg erdőtelepítések szénmegkötésének modellezésére hozták létre, de képes már meglévő erdőket és ültetvényeket is modellezni. Az átlátható modellezési keretrendszernek köszönhetően a modell más országokban is adaptálható, amennyiben rendelkezésre állnak a fák növekedésére és a holtfa lebomlására, valamint az erdőgazdálkodásra vonatkozó alapvető adatok.

A CASMOFOR egy MS Excel alapú rendszer, mely kifejezetten felhasználóbarát, rendelkezik online elérhető felhasználói kézikönyvvel, maga a modell pedig letölthető és a sajátgépen

futtatható. A modellel közérthető interface segítségével, illetve paraméter fájlok útján kommunikálhatunk.



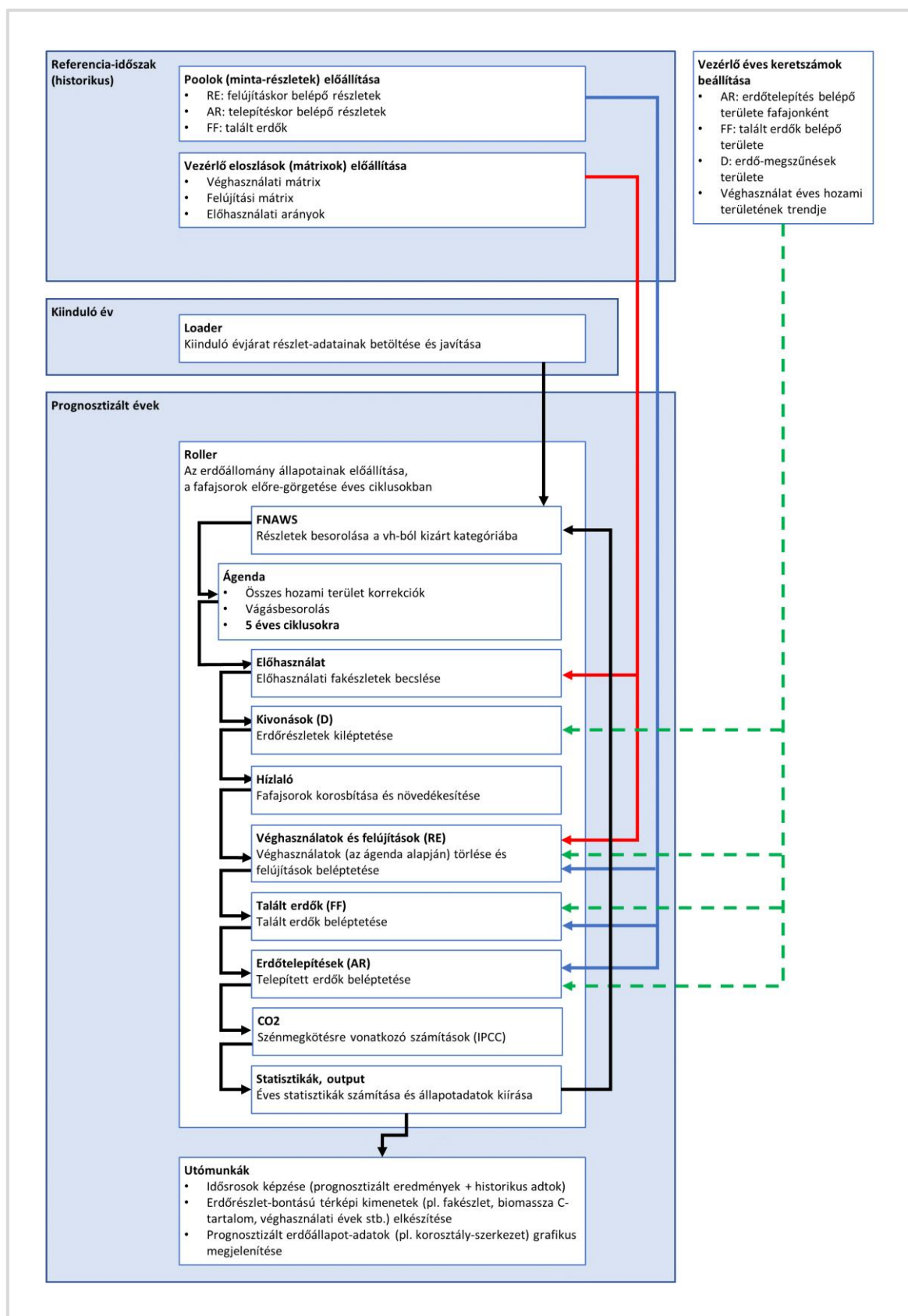
2. ábra: A CASMOFOR modell folyamatábrája. (Forrás: Somogyi 2023)

A CASMOFOR-NFDB elnevezésű modell a teljes magyarországi erdőállomány szénforgalmi modellezésére alkalmas (Somogyi et al. 2019; Somogyi 2020), és az EU 2018/841 rendelet szerinti új ÜHG jelentéstételi követelmények teljesítése céljából hozta létre a Szerző az országspecifikus Erdő Referenciaszint (FRL) kialakítása érdekében.

A modell összhangban van a magyar Üvegházhatású Gázleltár jelentéssel és az IPCC módszertani útmutatóival. A modellben felhasznált tevékenységi adatok fő forrása az Országos Erdőállomány Adattár és a Nemzeti Üvegházhatású Gázleltár jelentés. A modellben fatermési táblák helyett az Országos Erdőállomány Adattár adatai alapján levezetett növekedési függvények működnek, így biztosítva a legteljesebb konzisztenciát az Országos Erdőállomány Adattárral és a Nemzeti Üvegházhatású Gázleltár jelentéssel (Somogyi et al. 2019, Somogyi 2020).

2.2.2 A DAS erdőállomány prognózis modell

A DAS erdőállomány prognózis modellt (Distributions Applied on Stands model) Kottek (2017, 2023) hozta létre (*3. ábra*). Ez a modell egy erdőrészlet alapú erdőállomány prognózis modell, amely alkalmas az élőfakészlet, a növedék, a kitermelt elő- és véghasználati fatérfogat és a szénmegkötés előrejelzésére erdőrészlet szinten, valamint regionális és országos szinten is (Kottek et al. 2023). A modell az Országos Erdőállomány Adattár adatait használja. Alkalmas térben meghatározott bemeneti paraméterek fogadására (pl. klímaváltozási előrejelzések) és az eredmények térképi megjelenítésre is, így azok térinformatikai szoftverekkel feldolgozhatóak. A modell kb. 600 ezer erdőrészlet és 1,2 millió fafajsor adatait kezeli. A szabályzó paramétersorok a referencia-időszak ténylegesen tapasztalt folyamatain alapulnak: a modellben valós vágáskor-eloszlások és valós felújítási viszonyok működnek, azaz a modell historikus adatokból levezetett véghasználati- és felújítási mátrixokat használ. A modell újra paraméterezése a 2016-2021 időszak historikus adatainak felhasználásával az ErdőLab projekt (Borovics 2022) keretében történt meg (Kottek et al. 2023). A modell jelenlegi verziója statikus éghajlati és termőhelyi környezettel számol.



3. ábra: A DAS modell folyamatábrája (Forrás: Kottek 2023)

2.3 A fatermékek klímamitigációs szerepe



4. ábra: A fa hosszú távú beépítése az egyik legigéretesebb klímamitigációs lehetőség (fotó: Dr. Borovics Attila).

A fa energiatakarékos, alacsony szén-dioxid-kibocsátású nyersanyag, amely megfelelő felhasználása esetén jelentősen hozzájárulhat az európai klímapolitikai célok eléréséhez (Sikemma et al. 2023). Ennek ellenére az erdők pozitív szerepe a klímaváltozás mérséklésében általában sokkal közismertebb, mint a fatermékek és a fakitermelés klímamitigációs előnyei (Leskinen et al. 2018).

A faanyag hosszú élettartamú termékekben és tartósan beépítve évtizedeken, vagy akár évszázadokon át képes tárolni a szenet, így kivonva azt az atmoszférából. Emellett a fatermékek és a bioenergia fontos helyettesítő hatásokkal is rendelkeznek, hiszen szén-dioxid-

intenzív anyagokat és energiahordozókat képesek helyettesíteni (Helin et al. 2013). Így a fa a körkörös biogazdaság kulcsfontosságú alapanyaga.

Mindezek felvetik a kérdést, hogy hogyan növelhető vajon a fa iránti kereslet? A faanyag mitigációs hatásainak kiaknázása hogyan hat az egyéb erdőket érintő mitigációs intézkedésekre?

Az erdővédelmi intézkedések, mint például a biodiverzitás megőrzése vagy a csökkentett kitermelés az erdei ökoszisztémákban történő széntárolásra összpontosítanak, és a fakitermelés korlátozását teszik szükségessé. Így a faipari termékekben történő széntárolásra vagy a termék és energiahelyettesítési hatásokra összpontosító intézkedések negatív következményekkel járhatnak az erdei ökoszisztémákban megvalósuló széntárolásra nézve (Johnston és Radeloff 2019; Churkina et al. 2020; Verkerk et al. 2022).

Ezt az ellentmondást Kottek et al. (2023a) szerint az erdő funkcióinak szétválasztásával lehet feloldani. Az alacsony természetességi szintű erdők szénpumpaként funkcionálhatnak, amelyek szerepe nem az in situ széntárolás, hanem a szénmegkötés és a faipari termékekben hosszú távon tárolt szén mennyiségének növelése, ezzel nyersanyagot biztosítva egy innovatív és klímabarát fagazdasági szektor számára (Kottek et al. 2023a).

Figyelembe kell venni, hogy 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, RCP4.5 kibocsátási 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 és Móricz 2022a,b). Ez alátámasztja a faipari innováció fontosságát, mivel a jövőben elkerülhetetlennek tűnik a szárazságtűrő fafajok faanyagának kiterjedtebb ipari célú felhasználása (Borovics et al. 2023, 2024).

Sokan kétségbe vonják a keményfa erőforrás-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 és Pereira

2009, Jančíková és Jablonský 2025). 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 és 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 hulladéktermelést (Li et al. 2022), és támogathatja az újrahasznosítást is (Wilson 2010, Király et al. 2023, Borovics et al. 2023, 2024), ami szintén elősegítheti a fatermékek (HWP) szénegyenlegének kedvezőbb alakulását.

A termék és energiahelyettesítési hatások szintén nagyon fontosak klímamitigációs szempontból, és ezek is a fatermékek minél kiterjedtebb felhasználásának kedvező mivoltát támasztják alá. Az ENSZ Éghajlatváltozási Keretegyezménye (UNFCCC) és a Párizsi Egyezmény előírásai szerint a fatermékek szénegyenlegét az erdészeti és földhasználati (LULUCF) szektorban kell elszámolni az Üvegházhatású Gázleltár jelentésekben (ÜHG leltár). Ugyanakkor a termék és energiahelyettesítés által elkerült kibocsátások nem tartoznak a LULUCF szektorban elszámolható, a szénegyenleget kedvezően befolyásoló tényezők közé. Noha ezek a hatások implicit megjelennek az energia és ipari szektorok szénmérlegében, számszerűsítésük mégis nehézségekbe ütközik, arra nincs olyan szabványosított módszertan, mint amilyenek az IPCC (2006, 2013, 2019) útmutatói, melyek részletesen szabályozzák a LULUCF szektorban elszámolható széntárolókra vonatkozó szénegyenleg számításokat.

A helyettesítési hatások mértékének becslése azonban elengedhetetlen, hogyha minden fontos szempontot figyelembe akarunk venni a fagazdasági szektort érintő mitigációs intézkedések és stratégiák tervezése terén (Leskinen et al. 2018).

A szakirodalomban számos tanulmány foglalkozik termékhelyettesítési tényezők számszerűsítésével, melyeknek eredményei nagyon diverzek, nagy szórással rendelkeznek, sokszor ellentmondásosak és nagyban függenek a rendszerhatároktól is (Leskinen et al. 2018).

A helyettesítési tényezők (szubsztitúciós faktorok) azt írják le, hogy mekkora ÜHG-kibocsátás kerülhető el, ha egy nem-fa termék helyett faalapú terméket használnak ugyanazon funkció

ellátására, legyen az kémiai vegyület, építőelem, textilszál vagy energiaszolgáltatás (Leskinen et al. 2018). A fatermékek helyettesítési hatásai úgy becsülhetők meg, hogy az előállított vagy felhasznált fatermékek mennyiségére vonatkozó információkat a termékspecifikus helyettesítési tényezőkkel kombináljuk (Leskinen et al. 2018).

Az Európai Erdészeti Intézet (Leskinen et al. 2018) egy 51 tanulmányból álló meta-analízis segítségével vizsgálta a fatermékek helyettesítési hatásait. 433 különálló helyettesítési tényezőt elemeztek, melyből azt állapították meg, hogy a vizsgált tanulmányok túlnyomó többsége alátámasztotta, hogy a fa és a faalapú termékek használata alacsonyabb fosszilis és folyamatalapú kibocsátással jár, mint a nem fatermékeké (Leskinen et al. 2018). Leskinen et al. (2018) tanulmányukban 1,2-es átlagos helyettesítési tényezőt javasolnak, ami azt jelenti, hogy a nem fatermékeket helyettesítő fatermékek minden kilogramm széntartalmára átlagosan körülbelül 1,2 kg C értékű elkerült kibocsátás is esik, így valójában a klímamitigációs hatásuk a széntartalmuknak összesen 2,2-szerese.

Geng et al. (2017) szerint a termékhelyettesítés hatékonyabb, mint az energiahelyettesítés. Myllyviita et al. (2021) meta-analízise szerint a szakirodalomban a legtöbb energiahelyettesítési tényező 0,8-nál alacsonyabb, ami azt jelzi, hogy a faalapú tüzelőanyagok nem helyettesítik a fosszilis energiát, vagy alacsony kibocsátású fosszilis energiát helyettesítenek. Knauf et al. (2015, 2016), Härtl et al. (2017) és Schweinle et al. (2018) 0,67-es helyettesítési tényezőt javasolnak az energiahelyettesítés számszerűsítésére.

2.4 A fatermékek szénegyenlegének modellezése

A fatermékekre vonatkozó szénforgalmi modellek fontos eszközök a fatermékek jövőbeli szénmérlegének becslésére, lehetővé téve a klímaváltozás mérsékléséhez történő hozzájárulásuk értékelését (Brunet-Navarro et al. 2018, 2021, Király et al. 2023).

A HWP szénraktározásának és üvegházhatású gáz (ÜHG) kibocsátásának modellezése különféle eszközökkel és megközelítésekkel történhet (Brunet-Navarro et al. 2016, 2018). A fatermékek szénegyenlegének modellezése történhet életciklus elemzés (LCA) jellegű eszközökkel, illetve az ÜHG leltárak igényeit előtérbe helyezve, kifejezetten az IPCC módszertanához igazodva. Ebben az esetben a hangsúly a fatermékek anyagában tárolt szén áramaira helyeződik és a járulékos kibocsátások nem szerepelnek a modellezésben.

A fatermékekre vonatkozó szénmérleg számítások a Kyotói Jegyzőkönyv második kötelezettségvállalási időszakának kezdete (azaz 2013) óta kötelező elemei az ÜHG leltárnak. A historikus szénmérleg számítás IPCC módszertanát Rüter (Rüter 2011, IPCC 2014) dolgozta ki. Később ezt a módszertant továbbfejlesztve kidolgozta a WoodCarbonMonitor modell (Rüter 2016) jelenlegi változatát.

A módszer lényege, hogy a fatermékek termelésére vonatkozó statisztikai adatok és egy kezdeti szénkészlet becslése alapján éves szinten képes számolni, illetve előrejelezni a HWP széntárolóba beáramló és kiáramló szén mennyiségét.

Ezen a módszeren alapul az IPCC (2019) legújabb módszertani útmutatójának HWP szénegyenleg számítása is. Hazánk vonatkozásában a módszert Király és Kottek (2014) adaptálták, de ezt alkalmazza Somogyi (2023) is a CASMOFOR modell HWP moduljában.

Ez a módszertan a faanyag újrahasznosításával nem számol, és az életidő végén azonnali oxidációt feltételez, azaz nem számol a hulladéklerakóra irányuló termékáramokkal sem.

A CO2FIX (Schelhaas et al. 2004), a LANDCARB (Krankina et al. 2012) és a CAPSIS (Fortin et al. 2012) modellek figyelembe veszik a faanyag újrahasznosítását az emissziós modellezés során.

A HWP modellek növekvő összetettsége egyre inkább lehetővé teszi az ipari termelés hatékonyságának, a termékek élettartamának és újrahasznosítási arányának fejlettebb elemzését (Brunet-Navarro et al. 2018).

A faipari termékmodelleket két csoportra oszthatjuk (Brunet-Navarro et al. 2016). Az egyik csoport a faipari termékek termelési és kereskedelmi adatait használja fel statisztikai adatbázisokból. Ilyen elveken működő modell a WoodCarbonMonitor (Rüter 2011, Rüter 2016), az IPCC (2014), az IPCC (2019) modellek, illetve Aleinikovas et al. (2018), Börcsök et al. (2011), Király et al. (2014) és Kohlmaier et al. (2007) számításai. A másik csoport a dinamikus erdőnövekedési modellekkel vagy fatermési táblák alapján becsült fakitermelés adatokat használ fel. Ilyen például Profft et al. (2009) vagy Fortin et al. (2012) modellje.

Budzinski et al. (2020), Essel et al. (2014), Klein et al. (2013), Sokka et al. (2015), Vis et al. (2016) és Werner et al. (2010) hangsúlyozzák, hogy az újrahasznosítás fontos tényező, amely

befolyásolja a faipari termékekben tárolt szén mennyiségét. A faipari termékmodellekben az újrahasznosítás kezelésének általános módszere, hogy minden termékkategóriához újrahasznosítási arányt rendelnek, majd az újrahasznosított termékeket vagy azok egy részét ugyanabba a termékkategóriába sorolják (Brunet-Navarro et al. 2018). A CO2FIX (Schelhaas et al. 2004), a LANDCARB (Krankina et al. 2012) és a CAPSIS (Fortin et al. 2012) modellek ezt a módszertant alkalmazzák. Brunet-Navarro et al. (2018) modelljükben az újrahasznosítási láncok hatásait elemzik azáltal, hogy a végtelen újrahasznosítási köröket egy vagy két újrahasznosítási körrel helyettesítik, és megváltoztatják az újrahasznosított termékek felhasználását is.

A legtöbb faipari termékmodell nem veszi figyelembe a hulladéklerakóból származó kibocsátásokat, mivel a hulladéklerakóra kerülő HWP széntartalmát a LULUCF szektorban nem kötelező jelenteni, és az IPCC módszertana szerint nem a LULUCF szektorban, hanem a hulladék szektorban kell elszámolni (IPCC 2014, IPCC 2019). Az Európai Hulladéklerakó Irányelv (EC 1999, EC 2018a) és a Hulladékokra és egyes irányelvek hatályon kívül helyezésére vonatkozó irányelv (EC 2008, EC 2018b), amelyet 2025-ig teljes mértékben végre kell hajtani, nem engedélyezi a biológiailag lebomló hulladékok elhelyezését a szilárd hulladéklerakókban, és sok EU-országban az organikus hulladék lerakása is tilos (BioReg 2018, Brunet-Navarro et al. 2018). Ugyanakkor az elmúlt évtizedekben lerakott fahulladék emisszióinak becsléséhez az IPCC Hulladék Modell (IPCC 2006, IPCC 2019) megfelelő eszköz, melyet az ÜHG leltár hulladék szektorában alkalmaznak.

Az EU a körkörös gazdaság felé vezető útján nagy hangsúlyt fektet a hulladékcsökkentésre és az erőforrás-hatékonyságra (EC 2014). Az EU körkörös gazdasági stratégiája (EC 2016) olyan intézkedéseket ösztönöz, amelyek a termékek életciklusának zárását szolgálják azok újrafelhasználásával és újrahasznosításával, figyelembe véve a fenntarthatóságot és az egyik iparág melléktermékeinek nyersanyagként történő felhasználását egy másik iparágban. Az EU körkörös gazdasági cselekvési terve (EC 2015) a termékek, anyagok és erőforrások értékének lehető leghosszabb ideig történő megőrzését szorgalmazza, miközben a hulladékkeletkezés minimalizálására törekszik (Husgafvel et al. 2018). A biológiai alapú anyagok jelentős szerepet játszhatnak a klímaváltozás mérséklésében az átmeneti szénraktározás révén (Jørgensen et al. 2015), a kaszkád felhasználás növelheti ezt a potenciált (Husgafvel et al. 2018). A körkörös gazdasági célok közé tartozik az anyag- és energiahatékonyság javítása, valamint a melléktermékek és hulladékok értékes nyersanyagként történő felhasználásának jelentős

növelése (Husgafvel et al. 2018, Ellen MacArthur Foundation 2014). Az életciklus-elemzés alkalmazása az iparban megkönnyítheti a környezetileg fenntartható technológiák prioritásának meghatározását (OECD 2009, Cherubini et al. 2011, Li és Toppinen 2011).

Mindez egyre fontosabbá teszi a hulladékká váló fatermékek szénáramainak minél körültekintőbb modellezését és értékelését, melyre jelen doktori értekezésben is kísérletet teszek.

2.5 Az agrárerdészeti megoldások szerepe a klímavédelemben



5. ábra: A mezővédő erdősávok a legjellegzetesebb hazai agrárerdészeti tájelemek (Magyarország, Üröm, fotó: Király Éva)

A Párizsi Megállapodás és az Európai Zöld Megállapodás által meghatározott klímavédelmi célok az antropogén eredetű üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátásának jelentős csökkentését és az elkerülhetetlen kibocsátások hatékony ellentételezését sürgetik (Verkerk et al. 2022, Király et al. 2022, Borovics–Király 2023). A földhasználati szektor azon képessége, hogy eltávolítsa a szén-dioxidot a légkörből, és tárolja azt az élő és holt biomasszában, valamint a talajban, kulcsfontosságú a klímaváltozás mérséklésében (Verkerk et al. 2022). A LULUCF szektor döntő szerepet játszik a mezőgazdasági, energetikai és ipari szektorok kibocsátásának ellensúlyozásában (Borovics és Király 2022, Borovics és Király 2023). Az agrárerdészeti gyakorlatok kulcsfontosságúak a termőföldeken a szénmegkötés és -tárolás fokozásában (Borovics és mtsai 2017, Borovics és Király 2022, Honfy et al. 2023).

Az agrárerdészet egy olyan földhasználati és gazdálkodási rendszer, amely a fák vagy cserjék termesztését integrálja a mezőgazdasági gyakorlatba, és fenntartható és interaktív módon kombinálja mezőgazdasági növények termesztésével vagy állattartással (Nair 2011, Borovics et al. 2017). Az agrárerdészeti rendszerek optimalizálják mindkét komponens, a fák és a mezőgazdasági tevékenységek előnyeit, növelve a termelékenységet, a biodiverzitást és a környezeti fenntarthatóságot (Borovics et al. 2017). Az agrárerdészeti rendszerek gazdasági, társadalmi és környezeti előnyöket is nyújtanak a hagyományos mezőgazdasági rendszerekhez

képest, és az agrárerdészeti gyakorlatok gyakran kedvező földegyenérték aránnyal is rendelkeznek (Borovics et al. 2017, Honfy et al. 2023, Király et al. 2024).

Az International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF) az agrárerdészet kifejezést egy dinamikus, ökológiai-alapú természeti erőforrás-gazdálkodási rendszerként határozza meg, amely a fák mezőgazdasági területeken történő integrálásával diverzifikálja a termelést a társadalmi, gazdasági és környezeti előnyök növelése érdekében (Mosquera-Losada et al. 2009).

A World Agroforestry Centre (WAC) kiemeli, hogy az agrárerdészeti rendszerekben a fásszárú évelők (fák, cserjék stb.) szándékosan ugyanazon gazdálkodási egységen kerülnek felhasználásra, mint a mezőgazdasági növények vagy állatok, a kultúrák kombinációja történhet valamilyen térbeli elrendezésben, vagy akár időbeli sorrendben is (Mosquera-Losada et al. 2009).

Az Association for Temperate Agroforestry (AFTA 1997), valamint Alavalapati és Nair (2001) meghatározásai alapján jelenleg öt agrárerdészeti gyakorlatot különböztetünk meg a mérsékelt égövi területeken. Ezek a mezővédő erdő és cserjesávok, a köztes termesztési rendszerek, a szilvopasztorális rendszerek – vagyis olyan gazdálkodási rendszerek, amelyekben fák és legelőn tartott állatok egy területen, integrált módon jelennek meg –, valamint a partmenti pufferzónák és a forest farming rendszerek, amelyekben az erdő lombkoronája alatt termesztett növények vagy más nem fa erdei termékek adják a gazdálkodás fő hozamát. Nair (1993) a mezővédő sávokat fák, cserjék és/vagy lágyszárúak keskeny sávjaként határozza meg, amelyeket a mezők, épületek, csatornák és egyéb területek szélétől és homokfűvástól történő védelmére ültetnek. Európában a leggyakoribb agrárerdészeti formák közé tartoznak a mezővédő erdősávok, a köztes termesztési rendszerek, illetve a szilvopasztorális rendszerek (Joffre et al. 1988, Rigueiro-Rodriguez 2009).

Az agrárerdészet fenntartható gazdálkodási formának tekinthető, mely kedvező hatással van a klímaváltozás mérséklésére és az erőforrás-gazdálkodásra (Honfy et al. 2023, Király et al. 2024a). Az agrárerdészeti rendszerek olyan mikroklímát hoznak létre, amely elősegíti a kedvező interakciókat a növények, állatok és talajorganizmusok között (Borovics et al. 2017), ami a tápanyagforgalom javulását, a talajerózió csökkenését, a talaj egészségének javulását eredményezi, emellett elősegíti a vízvisszatartást és növeli az élőhelyek diverzitását is, ezáltal hozzájárul a teljes ökoszisztéma egészségéhez és rezilienciájához (Nair et al. 2010). Az agrárerdészet szintén kulcsfontosságú szerepet játszik a klímaváltozás mérséklésében azáltal,

hogy szén-dioxidot köt meg a légkörből (IPCC 2022), így a mezőgazdasági területek klímavédelmi szerepének növelésében kiemelten fontos. A mérsékeltövi agrárerdészeti rendszerek legfontosabb előnyeit az *I. táblázat* mutatja be.

Az agrárerdészeti rendszerek a fás és lágyszárú biomasszában, a holt szerves anyagokban (holtfa, avar), valamint a talajban is megkötnek, illetve tárolnak szén (UNFCCC 2006, 2007, Nair et al. 2010, Nair 2011). Az agrárerdészeti rendszerek felszín feletti részei körülbelül a tárolt szén egyharmadát tartalmazzák, míg a talaj (beleértve a gyökereket és egyéb élő biomasszát) a kétharmadát (Lal 2010). A teljes széntárolás mértéke régióként, illetve az agrárerdészeti rendszer típusa, az összetevők jellemzői, a fásszárú komponensek kora, a talaj minősége és a korábbi földhasználat szerint is nagyon jelentős eltéréseket mutat (Nair 2011).

A fákban történő szénmegkötés számszerűsítése elvégezhető egész fa kidöntése és mérése segítségével, illetve allometrikus egyenletek vagy fatermési táblák használatával is (Nair 2011, Fernández-Núñez et al. 2010). Azonban agrárerdészeti rendszerekre vonatkozó speciális allometrikus egyenletek és hozamtáblázatok szinte alig állnak rendelkezésre a nemzetközi szakirodalomban, és az e tárgyban rendelkezésre álló egyenletek és becslési módok is sok esetben durva közelítéseket használnak (Nair 2011).

Magyarországon a fatermési táblák három generációja áll rendelkezésre, melyek az összes fontos erdei fafajra vonatkozóan tartalmazzák országspecifikus adatokat (Bondor 1988, Peszlen 2015), azonban ezek egyike sem vonatkozik agrárerdészeti rendszerekre.

1. táblázat: A mérsékelt övi agrárerdészeti rendszerek kedvező és kedvezőtlen hatásainak áttekintése Dmuchowski et al. (2024) meta-analízise alapján.

Az agrárerdészeti rendszer típusa	Mintapontok száma	Megfigyelések száma	Pozitív hatás	Indifferens vagy negatív hatás	Forrás
Nem specifikált	51	154	Megnövekedett fajgazdagság és biodiverzitás a növények, állatok, gombák és ízeltlábúak esetében		Plieninger et al. 2014
Szilvopasztorális rendszerek, fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek, illetve kevert rendszerek	53	365	Erózió elleni védelem, biodiverzitás és a talaj termékenységének növelése, lefolyás kontroll, tápanyag visszatartás	Ellátási szolgáltatások korlátozása, biomassza-termelés csökkentése	Torralba et al. 2016
Szilvopasztorális rendszerek, fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek	78	858	Talaj szerves szén tartalmának növelése		Chatterjee et al. 2018
Agroszilvopasztorális rendszerek	52	250	Talaj szerves szén tartalmának növelése		De Stefano and Jacobson 2018*
Köztes termesztés, mezővédő erdősávok, szilvopasztorális rendszerek, konyhakertek	72	427	Talaj szerves szén tartalmának növelése		Shi et al. 2018*
Fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek, valamint konyhakertek és szilvopasztorális rendszerek	86	162	Talaj szerves szén tartalmának növelése		Feliciano et al. 2018*
Fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek	12		Talaj szerves szén tartalmának növelése, földigiliszták számának megnövelése		Cardinael et al. 2019
Fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek	50		A biodiverzitás növekedése különösen a madarak és az ízeltlábúak tekintetében		Mupepele et al. 2021
Szilvopasztorális rendszerek	22	41	Megnövekedett fatermés és takarmány termelés		Pent 2020
Köztes termesztés, fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek	13			Termés csökkenése	Ivezic et al. 2021
Fákat és szántóföldi művelést kombináló rendszerek	18	195		Termés csökkenés: az őszi kultúrákban kisebb mértékű a terméscsökkenés, mint a tavaszi kultúrákban	Panozzo et al. 2022
Köztes termesztés, védősávok	141	509	Talaj szerves szén tartalmának és a föld alatti biomassza széntartalmának megnövelése		Ma et al. 2020*
Köztes termesztés, védősávok, szilvopasztorális rendszerek	61		Talaj szerves szén tartalmának növelése, a szél- és vízerózió megelőzése, az infiltráció és a vízvisszatartás megnövekedése		Mayer et al. 2022

*A kutatás nem csak a mérsékelt égvízi terjedt ki, így az adatoknak csak egy része volt relevánsnak tekinthető.

Hazánkban a mezővédő erdősávok a legelterjedtebb agrárerdészeti tájelemek, amelyek védik a mezőgazdasági területeket a szélről és megakadályozzák a talajeróziót (Király et al. 2024a). A Carbon Farming EU irányelv céljaival összhangban új ösztönzők kerültek bevezetésre a magyar mezőgazdasági támogatási rendszerben, amelyek előmozdítják a mezővédő erdősávok, valamint egyes fák ültetését a szántóföldeken és gyepterületeken (NAK 2022). A magyar mezőgazdasági támogatási rendszer 2023-ban bevezetett fontos újítása, hogy az agrárerdészeti rendszerek által elfoglalt mezőgazdasági terület továbbra is jogosult marad a közvetlen terület alapú támogatásokra is (NAK 2022). Emellett az agrárerdészeti rendszerek agro-ökológiai program elemekként és tájelemekként is elszámolhatóak. Figyelembe véve a támogatási rendszer kedvező változásait, fontos felmérni ezen területek szénmegkötési potenciálját, mivel e területek a földhasználati és mezőgazdasági (AFOLU) szektor klímamitigációs potenciálját is jelentősen növelhetik.

Király et al. (2024a) becslése szerint a magyarországi mezővédő erdősávok föld feletti biomasszájában megvalósuló éves összes szénmegkötés $-33 \text{ ktCO}_2/\text{év}$, míg az átlagos hektáronkénti szénmegkötés pedig $-2,4 \text{ tCO}_2/\text{ha}/\text{év}$ volt a 2010–2020 közötti időszakban. Utóbbi érték nagyon közel áll az összes hazai erdő hektáronkénti átlagos éves szénmegkötési értékéhez (NIR 2023), ami arra enged következtetni, hogy a mezővédő erdősávok klímamitigációs potenciálja igen kedvező lehetne, amennyiben nagy területen tudnánk alkalmazni őket.

2.6 Agrárerdészeti rendszerek szénforgalmi modellezése

Az agrárerdészeti rendszerek szénmérlegének számítása és modellezése komplex módszertanokat és modelleket igényel. A legnyilvánvalóbb módszer a biomassa és a talaj szénkészleteinek közvetlen mérése. Emellett léteznek például távérzékelésen alapuló közvetett megközelítések is. Az agrárerdészeti rendszermodellek elősegítik e rendszerek ökológiai folyamatainak megértését (Malézieux et al. 2009). Ugyanakkor az agrárerdészeti rendszerek összetett térbeli és időbeli kölcsönhatásai kihívásokat jelentenek a modellek fejlesztésében (Dupraz et al. 2019).

Az agrárerdészeti modellek fő célkitűzései magukban foglalják a fény-, víz- és tápanyag-kölcsönhatások föld feletti és felszín alatti dinamikájának szimulálását, valamint az élelmiszer, rost- és tüzelőanyag hozamok előrejelzését. Emellett e modellek kísérletet tehetnek a többlet ökoszisztéma szolgáltatások értékelésére és előrejelzésére is, mint amilyen a megnövelt talaj tápanyag szint, a talajerózió mérséklése, és a szénmegkötés (Luedeling et al. 2016).

Az agrárerdészeti rendszerek modellezésében gyakoribbak a folyamat-alapú modellek, az empirikus modellek ritkábbak. A folyamat-alapú modellek ugyanis képesek az összetett fák köztes növény kölcsönhatások szimulálására és a rendelkezésre álló adatokon túlmutató extrapolációkra (De Angelis–Mooij 2003, Oreske 2003, Aumann 2007). Annak ellenére, hogy számos folyamat-alapú modell áll rendelkezésre mind az erdők, mind a mezőgazdasági területek modellezése terén, agrárerdészeti rendszerekre vonatkozóan csak jóval alacsonyabb számú modell érhető el (Malézieux et al. 2009, Luedeling et al. 2016).

Az alapvető agrárerdészeti modelleket általában mezőgazdasági növényekre vonatkozó modellekből adaptálták. Például a CROPGRO (Boote 1998) és a STICS (Brisson et al. 1998) modelleket alkalmazták agrárerdészeti rendszerek szimulálására, az elérhető fénymennyiség csökkentésével (Zamora et al. 2009, Dufour et al. 2013). Hasonlóképpen a CROPGRO és az EPIC (Williams et al. 1989) adaptációit használták a mezővédő erdősávok mezőgazdasági növényekre gyakorolt hatásának felmérésére, ebben az esetben a növények szélnek és sugárzásnak való kitettségét módosították (Easterling 1997, Qi et al. 2001). A WIMISA modell szimulálja a talajvízért folytatott versenyt az agrárerdészeti rendszerek fás elemei és a köztes növények között (Mayus et al. 1999). Azonban ezek az alapmodellek nem predikálják a fák növekedését, és nem szimulálják a mezőgazdasági növények hozamváltozásait több szezonen átívelően.

Bizonyos folyamat-alapú modelleket kifejezetten agrárerdészeti rendszerekhez fejlesztettek ki. Az agrárerdészeti modellek közül a WaNuLCAS (Van Noordwijk–Lusiana 1999) emelkedik ki, mint a leggyakrabban és leghatékonyabban használt modell, amely képes szimulálni az agrárerdészeti rendszeren belül a fényért, vízért és nitrogénért folytatott versenyt egy teljes vágásfordulón keresztül. E modellt számos trópusi agrárerdészeti rendszerre sikeresen alkalmazták (Walker et al. 2007, Martin–van Noordwijk 2009, Pansak et al. 2010, Cahyo et al. 2016), a WaNuLCAS modell ugyanis eredendően nem mérsékeltövi rendszerekre lett kifejlesztve.

Egy másik példa a Yield-SAFE, amely egy egydimenziós biofizikai modell, amely képes agrárerdészeti rendszerek termelékenységét szimulálni egy teljes vágásfordulón keresztül, figyelembe véve a fény és víz kölcsönhatásokat. A modell tartalmaz egy bioökonómiai részmodellt is a jövedelmezőség értékelésére (Graves et al. 2007, Graves et al. 2010).

Az APSIM modellt sövények növekedésének szimulálására adaptálták, a modell figyelembe veszi a szomszédos mezőgazdasági kultúrával a vízért és fényért folytatott versengés hatását is egy kétdimenziós leegyszerűsített séma szerint (Huth et al. 2002).

A HyPAR modell (Mobbs et al. 1998), amely a Hybrid erdőmodell (Friend et al. 1997) és a PARCH mezőgazdasági növénymodell (Stephens–Hess 1999) ötvözete, az agrárerdészeti rendszerek termelékenységének előrejelzésére szolgált különböző ariditási grádiensek mentén (Cannell et al. 1998).

A Hi-sAFé modell a Silvoarable Agroforestry for Europe (SAFE) projekt részeként került kifejlesztésre. Ez egy háromdimenziós, folyamat-alapú biofizikai modell, amely integrálja a fa-növény kölcsönhatásokat az agrárerdészeti rendszerekben belül (Dupraz et al. 2005, Talbot 2011, Dupraz et al. 2019).

Az AFOLU Carbon Calculator (Winrock International 2014) és az Egyesült Államok Mezőgazdasági Minisztériumának Integrated Farm System Model-je (Rotz et al. 2022) is felhasználhatóak az agrárerdészeti konfigurációk hozamának és szénmegkötési potenciáljának előrejelzésére különböző környezeti feltételek mellett.

Az összes felsorolt agrárerdészeti modell esetében általánosan elmondható, hogy az interakciók szimulálásának összetettsége hatalmas kihívást jelent, illetve a modellek paraméterezése is sokkal összetettebb feladat, mint a csak erdőket, vagy csak mezőgazdasági növényeket szimuláló modellek esetében (Luedeling et al. 2016).

3 ANYAG ÉS MÓDSZER

3.1 Az Erdőipari Szén Modell létrehozása

Az ErdőLab projekt (Borovics 2022) keretében létrehoztuk az Erdőipari Szén Modellt (6. ábra), mely a DAS erdőállomány prognózis modell továbbfejlesztésén alapult. A modellfejlesztés eredménye egy komplex szénforgalmi modell kialakítása volt, mely lefedi a fagazdasági ágazat egészét és részletes szénforgalmi prognózisokat képes készíteni mind országos szinten, mind kisebb területegységekre.

A modell lefedi az ÜHG leltár LULUCF főszektorában az erdészeti alszektor esetében jelentett összes széntárolót, azaz az élő és holt biomasszát, a talajt és a fatermékeket is. Emellett kiterjed a hulladékká váló fatermékek emisszióinak nyomon követésére a hulladéklerakókon is, mely emissziók az ÜHG leltár Hulladék főszektorában kerülnek elszámolásra.

A modell az erdők vonatkozásában térben explicit előrejelzéseket is képes szolgáltatni, a fatermékek és a hulladéklerakók vonatkozásában pedig összesített eredményeket ad. A modell részben Microsoft Visual FoxPro, részben pedig Excel alapú.

A modell kifejlesztése egy karokon és intézményeken átívelő team munkájának eredménye, melyben részt vettek a Soproni Egyetem ERTI, EMK, FMK, valamint a HungaroMet Zrt. és az AM Erdőrendezési Főosztály munkatársai is.

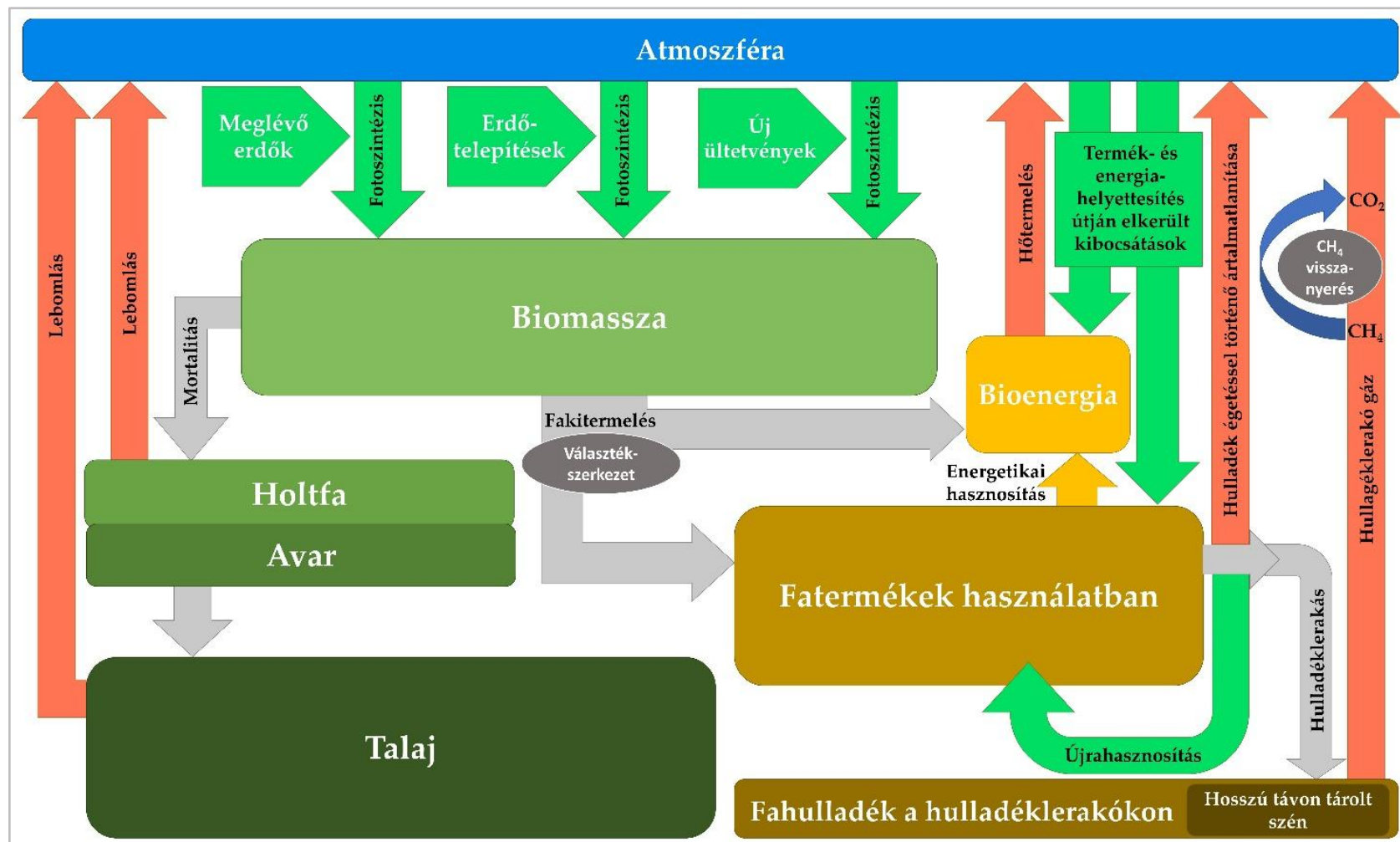
Az Erdőipari Szén Modell felhasználásával a projekt keretében több erdőkezelési és faipari forgatókönyv mentén modelleztük a hazai erdőalapú szektor szénmérlegét, és számszerűsítettük az intézkedésekhez kapcsolódó mitigációs potenciált (Borovics et al. 2024). A modellfuttatásokat három klimatikus kerethelyzetre érdemes elvégezni, melyek a következők:

- 1) a klímaváltozás hatása nem érvényesül és az erdőállomány jelenleg jellemző hozamai fennmaradnak az évszázad végéig;
- 2) a klímaváltozás hatására az erdőállomány hozama megváltozik, és a várható klímaváltozás mértékét az RCP4.5 kibocsátási forgatókönyv jellemzi;
- 3) a klímaváltozás hatására az erdőállomány hozama megváltozik, és a várható klímaváltozás mértékét az RCP8.5 kibocsátási forgatókönyv jellemzi.

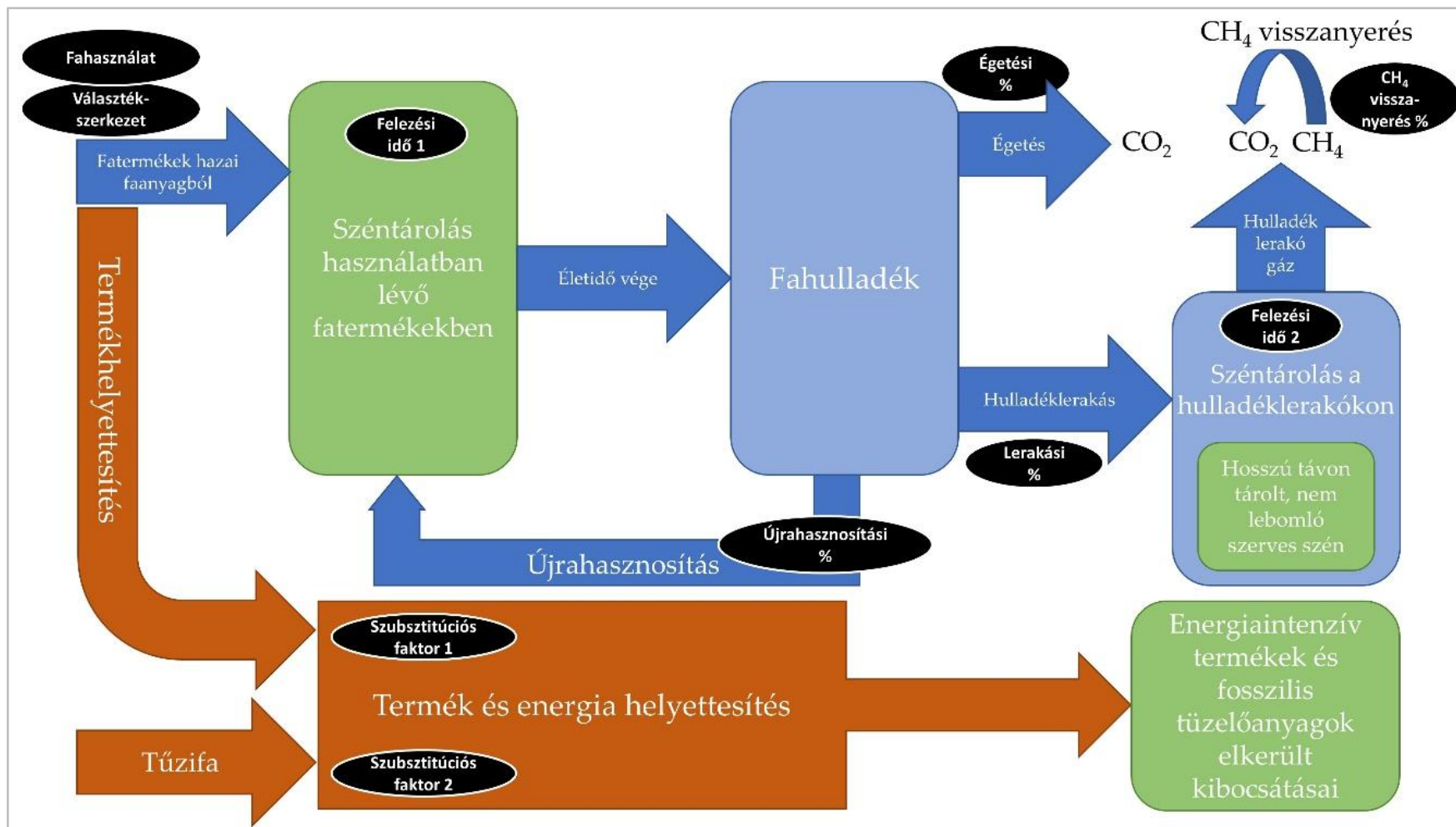
Alapesetnek az (1) forgatókönyvet tekintettük. Ebben az esetben az vizsgálható, hogy az erdőgazdálkodás és a faanyagfelhasználás scenáriói mentén milyen tartományban változtatható az erdőalapú szektor szénegyenlege. Másképpen fogalmazva, ez a kerethelyzet lehetővé teszi annak elemzését, hogy változatlan klimatikus feltételek mellett milyen mértékben befolyásolható a szénmérleg és a mitigációs potenciál.

Jelenlegi modellfuttatásaink egyelőre csak ezt a referenciaesetet fedik le. A klímaváltozás hatásainak modellbe történő integrálása folyamatban van, azonban az erre vonatkozó előzetes eredmények bemutatása túlmutat e dolgozat terjedelmi korlátain. Ezeket az eredményeket a közeljövőben megjelenő cikkekben és tanulmányokban kívánjuk részletesen ismertetni.

Az Erdőipari Szén Modell létrehozásához kapcsolódóan saját tudományos eredményként a modell HWP és agrárerdészeti moduljainak kidolgozását tekintem, ezért a PhD értekezésemben az ezekhez kapcsolódó módszertant és eredményeket mutatom be részletebben.



6. ábra: Az Erdőipari Szén Modell, azaz Forest Industry Carbon Modell (FICM) folyamatábrája.



7. ábra: A HWP részmodell folyamatábrája.

3.2 A HWP részmodell megalkotása

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, az FICM HWP részmodelljét (korábban HWP-RIAL modellként is említjük a szakirodalomban, pl. Király et al. 2022, 2023a,b).

E részmodell képes előrevetíteni a fatermékek széntárolásának időtartamát és a belőlük származó kibocsátások alakulását. A kifejlesztett modell a Nemzeti Üvegházhatásúgáz Leltárjelentés (azaz ÜHG leltár, 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 (7. ábra) a vizsgált termékeknek és körülményeknek megfelelően paramétereizhető, 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.

Az FICM HWP részmodellje 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 paramétereizéséhez 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 et al. (2023) mutatják be a leg részletesebben.

A modell önállóan, az FICM erdő moduljától függetlenül is használható, illetve tetszés szerint összekapcsolható más erdőállomány prognózis modellekkel is.

3.2.1 A HWP modell szerkezete, formalizált leírása és alapértelmezett paraméterei

A HWP részmodell részletes formalizált leírását és a használt paramétereket (Király 2022, 2023a,b) nyomán ismertetjük.

3.2.1.1 Használatban lévő termékek modulja

Egy adott HWP termékkategóriában tárolt szén mennyiségének, valamint az élettartama végét elérő és a használatból kikerülő HWP mennyiségének becsléséhez az IPCC (2019) által javasolt megközelítést használtuk. Becslésünkben az IPCC irányelveinek (IPCC 2006, 2019) megfelelően importált fából előállított HWP-t nem vettünk figyelembe.

Az 2. táblázat az IPCC (2019) által definiált alapértelmezett felezési időket és konverziós faktorokat összegzi. A termékek szénkészletét a táblázatban megadott C konverziós faktorok segítségével számítjuk ki a térfogat és tömeg egységekben megadott adatok alapján.

A Business as Usual (BAU) forgatókönyvekben az alapértelmezett felezési idő értékeket használjuk; azonban a felezési idő értékek módosíthatóak a modellezés során az egyes scenáriók kívánalmainak megfelelően. Ugyanez igaz az újrahasznosítási és metán visszanyerési arányokra is.

2. táblázat: alapértelmezett felezési idők és konverziós faktorok az IPCC (2019) szerint.

	Felezési idő (év)	Sűrűség (abszolút száraz tömeg légszáraz térfogatra vetítve) [Mg/m ³]	Széntartalom	C konverziós faktor (C tartalom légszáraz térfogatra vetítve) [Mg C/m ³]
Fenyő fűrészáru	35	0,45	0,5	0,28
Lombos fűrészáru	35	0,56	0,5	0,225
Funér	25	0,505	0,5	0,253
Rétegelt lemez	25	0,542	0,493	0,267
Forgácslap	25	0,596	0,451	0,269
HDF	25	0,788	0,425	0,335
MDF	25	0,691	0,427	0,295
Farostlemez	25	0,739	0,426	0,315
Egyéb lemez	25	0,159	0,474	0,075
	Felezési idő (év)	Relatív száraz tömeg (abszolút száraz tömeg légszáraz tömegre vetítve) [Mg/Mg]		C konverziós faktor (C tartalom légszáraz tömegre vetítve) [Mg C/m ³]
Papír és karton	2	0,9	-	0,386

A használatban lévő HWP szénkészletét és annak változását az IPCC (2019) 12.2 egyenlete szerint számítja a modell, azaz egy elsőrendű bomlási egyenlet segítségével becsüli meg a használatból kikerülő termékmennyiséget (outflow). A beáramló mennyiség az inflow mennyisége, mely országos szinten becsülhető a KSH adatai alapján (Király és Kottek 2014), illetve egy erdőállomány prognózis modell outputja segítségével is.

A szénkészlet és szénkészlet változás számítása az alábbiak szerint írható le:

$$\Delta C(i) = C(i + 1) - C(i)$$

ahol

$$C(i + 1) = e^{-k} \cdot C(i) + \left[\frac{(1 - e^{-k})}{k} \right] \cdot \text{inflow}(i)$$

i: év;

C(i): az adott HWP termékkategória szénkészlete az *i* év kezdetén, *t C*;

k: az elsőrendű bomlási egyenlet bomlási állandója, mely minden HWP termékkategóriára külön számítható. Mértékegysége év^{-1} ($k = \ln(2)/HL$, ahol *HL* az adott termékkategória felezési ideje években kifejezve);

inflow(i): a szénbeáramlás az adott HWP termékkategóriába *i* évben, *t C* év^{-1} ;

$\Delta C(i)$: adott HWP termékkategória szénkészlet változása *i* évben, *t C* év^{-1} .

A modellezés kezdeti feltétele szerint a HWP széntároló egy kezdeti évben egyensúlyban van. Tekintettel az országos szintű statisztikai adatok elérhetőségére kezdeti évként az 1963-as évet választottuk, összhangban az ÜHG leltárral (NIR 2023). Kezdeti szénkészlet számításra csak országos szintű modellezésnél van szükség. Egy adott termékmennyiség életútjának követése esetén csak inflow mennyiséggel számolunk, kezdeti készlettel nem.

A kezdeti évben a $\Delta C(t_0)$ mennyiség nullára van beállítva. A kezdeti egyensúlyi szénkészlet $C(t_0)$ minden HWP termékkategória esetében az első 5 statisztikai adatokkal már rendelkező év (1964-1968) átlagos inflow mennyiségéből kerül becslésre a következőképpen:

$$C_i(t_0) = \frac{\text{inflow}_{i \text{ average}}}{k}$$

Az éves szénkészlet változás és az outflow számítása az alábbiak szerint történik.

$$\Delta C(i) = C(i + 1) - C(i)$$

$$C(i + 1) = e^{-k} \cdot C(i) + \left[\frac{(1 - e^{-k})}{k} \right] \cdot \text{inflow}(i)$$

$$\text{outflow}(i) = (1 - e^{-k}) \cdot C(i) + \left[1 - \frac{(1 - e^{-k})}{k} \right] \cdot \text{inflow}(i)$$

i: év;

C(i): az adott HWP termékkategória szénkészlete az *i* év kezdetén, *t C*;

k: az elsőrendű bomlási egyenlet bomlási állandója, mely minden HWP termékkategóriára külön számítható. Mértékegysége év^{-1} ($k = \ln(2)/HL$, ahol *HL* az adott termékkategória felezési ideje években kifejezve);

inflow(i): a szénbeáramlás az adott HWP termékkategóriába *i* évben, *t C* év^{-1} ;

$\Delta C(i)$: adott HWP termékkategória szénkészlet változása *i* évben, *t C* év^{-1}

outflow(i): az *i* évben a használatból kikerülő, azaz hulladékká váló HWP mennyiség adott termékkategórián belül, *t C* év^{-1} .

3.2.1.2 Újrahasznosítási és hulladékút-választó modul

Az outflow, azaz a hulladékká váló HWP a modellben három különböző úton haladhat tovább, ezek az újrahasznosítás, az égetés és a hulladéklerakás. A modellben beállítható, hogy az adott évben keletkező hulladékmennyiség milyen arányban kerüljön elosztásra az egyes útvonalak között. Az újrahasznosításra allokált mennyiség esetében az is megadható, hogy az újrahasznosított alapanyag milyen arányban kerüljön elosztásra az egyes termékkategóriák között.

Az újrahasznosított és a lerakott hulladékmennyiség az alábbiak szerint számítható:

$$\text{recycled WW}(i) = \text{outflow}(i) \cdot F_{\text{recycled WW}}$$

$$\text{landfilled WW}(i) = \text{outflow}(i) \cdot F_{\text{landfilled WW}}$$

$$\text{incinerated WW}(i) = \text{outflow}(i) \cdot (1 - F_{\text{recycled WW}} - F_{\text{landfilled WW}})$$

$$\text{CO}_2 \text{ Emissions from incineration}(i) = \text{incinerated WW}(i) \cdot 44/12$$

recycled WW(i): az adott HWP kategóriában az *i* évben keletkező hulladék mennyiség, melyet újrahasznosítunk, *t C* év^{-1} ;

F_{recycled WW}: a beállított újrahasznosítási arány *i* évben;

landfilled WW (i): az adott HWP kategóriában az i évben keletkező hulladék mennyiség, amely hulladéklerakóra kerül, t C év⁻¹;

F_{recycled WW}: a beállított hulladéklerakási arány i évben;

incinerated WW (i): az adott HWP kategóriában az i évben keletkező hulladék mennyiség, amely égetéssel kerül ártalmatlanításra, t C év⁻¹;

44/12: CO₂/C moláris tömeg arány.

3.2.1.3 Hulladék modul

A lerakott fahulladékból keletkező CH₄ és CO₂ emissziók számítására az IPCC (2006) Hulladék Modell módosított verzióját használjuk, melyet az ÜHG leltár készítése során Magyarországra paramétereztek (NIR 2023).

A hulladéklerakók realisztikus kezdeti készletének beállítása érdekében az országos szintű futásoknál a hulladék modell kezdő évét 1940-re állítottuk be, és egy konstans HWP outflow értékkel számoltunk az 1940-1964 évekre, amely az 1965-1969 évekre számított outflow értékkel egyezett meg. Ezzel 1964-re beállítottuk a lerakók feltételezett feltételezett HWP készletét.

Azokon a hulladéklerakókon, ahol anaerob körülmények állnak fenn a lerakott fahulladék bomlása során a CO₂ mellett CH₄ is keletkezik. A keletkező CH₄ egy része a hulladéklerakó takaró rétegében már oxidálódik és CO₂ formájában kerül az atmoszférába. A CH₄ formájában távozó gáz visszanyerhető és CO₂-vé alakítható elfáklázás vagy energetikai hasznosítás során. A metánvisszanyerés mértéke a modellben tetszőlegesen beállítható. A hulladékból származó CH₄ mennyisége a lerakást követő évtizedekben fokozatosan csökken. A fahulladék hulladéklerakón történő lebomlását az IPCC Hulladék Modell (2006) szintén egy elsőrendű bomlási egyenlet segítségével írja le. A keletkező CH₄ mennyiség számításának alapját a DDOC_m (Decomposable Degradable Organic Carbon) mennyiség adja, amely az a szervesanyag mennyiség, amely anaerob körülmények között idővel le fog bomlani. A rendelkezésre álló DDOC_m és a felhalmozódó, illetve lebomló fahulladék mennyiségek az alábbi egyenletek szerint számíthatóak:

$$DDOC_m = C \cdot DOC_f \cdot MCF$$

$$DDOC_m \text{ accum}_T = DDOCmd_T + (DDOCmd_{T-1} \cdot e^{-k})$$

$$\text{DDOCm decomp}_T = \text{DDOCm accum}_{T-1} \cdot (1 - e^{-k})$$

DDOCm: a lerakóra kerülő lebomlásra képes szerves anyag mennyisége, t C;

C: a lerakott teljes szerves anyag (fahulladék) mennyisége, kt C;

DOCf: a HWP hulladék lebomlásra képes frakciója;

MCF: CH₄ korrekciós faktor, azt fejezi ki, hogy a hulladéklerakóban a szerves anyag lebomlásának mekkora része zajlik anaerob (azaz metánképződést indukáló) körülmények között, figyelembe véve, hogy a lerakás évében a lebomlás egy része még aerob módon történik, így nem jár metánkibocsátással;

DDOCm accum_T: DDOCm mennyiség, amely a T év végén felhalmozódott a lerakón, t C;

DDOCm accum_{T-1}: DDOCm mennyiség, amely a lerakón található a (T-1) év végén, t C;

DDOCmd_T: DDOCm mennyiség, amely a T évben kerül lerakásra a hulladéklerakóra, t C;

DDOCm decomp_T: DDOCm mennyiség, amely a T évben lebomlik a hulladéklerakón, t C;

k: CH₄ képződési konstans, év⁻¹ ($k = \ln(2)/HL$, ahol HL a fahulladék, illetve a papírhulladék felezési ideje).

A fahulladéknak csak egy része fog a lerakón lebomlani és CH₄ és CO₂ gázokká alakulni. Az a rész, amely nem bomlik le hosszú távon tárolódik. A hosszú távon tárolt szénmennyiség az alábbi egyenlettel számítható:

$$C_{\text{Long-term } T} = C \cdot (1 - \text{DOC}_f) \cdot \text{MCF}$$

MCF: CH₄ korrekciós faktor, mellyel a lerakás évében aerob módon végbemenő lebomlást vesszük figyelembe;

DOCf: a HWP hulladék lebomlásra képes frakciója;

C_{Long-term T}: a hulladéklerakón hosszú távon tárolt szén a T évben, t C.

A keletkező és kibocsátott CH₄ számítása az alábbi egyenletekkel történik:

$$\text{CH}_4 \text{ generated}_T = \text{DDOCm decomp}_T \cdot F \cdot 16/12$$

$$\text{CH}_4 \text{ Emissions} = [\text{CH}_4 \text{ generated}_T - R_T] \cdot (1 - \text{OX}_T)$$

$\text{CH}_4 \text{ generated}_T$: a lebomlásra képes szerves anyagból T évben keletkező CH_4 mennyiség, $t \text{ CH}_4$;

DDOCm decomp_T : a T évben lebomló DDOCm mennyiség, $t \text{ C}$;

F : a CH_4 térfogataránya a keletkező hulladéklerakó gázban;

$16/12$: CH_4/C moláris tömeg arány;

$\text{CH}_4 \text{ Emissions}$: a T évben kibocsátott CH_4 mennyisége, $t \text{ CH}_4$;

R_T : a T évben visszanyert CH_4 mennyisége, $t \text{ CH}_4$;

OX_T : oxidációs faktor a T évben.

A visszanyert CH_4 mennyiség a keletkező mennyiség és a beállított visszanyerési arány alapján kerül kiszámításra. A modell a továbbiakban nem tesz különbséget a fáklyázással ártalmatlanított és az energetikai hasznosításra kerülő metán között, mivel mindkét esetben a CH_4 CO_2 -vé oxidálódik és akként jut ki az atmoszférába. A visszanyert metán mennyiség és a folyamat végén keletkező CO_2 emissziók az alábbiak szerint kerülnek kiszámításra:

$$R_T = \text{CH}_4 \text{ generated}_T \cdot \text{CH}_4 \text{ recovery\%}$$

$$\text{CO}_2 \text{ Emissions from landfills} = \left(\text{CH}_4 \text{ emissions} \cdot \frac{44}{16} \right) + \left(R_T \cdot \frac{44}{16} \right)$$

R_T : a T évben visszanyert CH_4 mennyisége, $t \text{ CH}_4$;

$\text{CH}_4 \text{ generated}_T$: a lebomlásra képes szerves anyagból T évben keletkező CH_4 mennyiség, $t \text{ CH}_4$;

$\text{CH}_4 \text{ recovery\%}$: a hulladéklerakó gázból visszanyert CH_4 aránya;

$44/16$: CO_2/CH_4 moláris tömeg arány;

$\text{CH}_4 \text{ Emissions}$: a T évben kibocsátott CH_4 mennyisége, $t \text{ CH}_4$;

$\text{CO}_2 \text{ Emissions from landfills}$: a T évben a metánvisszanyerés eredményeképp kibocsátott CO_2 mennyisége, $t \text{ CO}_2$.

A hulladék modul a hazai ÜHG leltár (NIR 2023), az Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer (OKIR 2023) és az IPCC (2006) adatai alapján került paraméterezésre. Az alapértelmezett paraméterezést a 3. táblázat részletezi.

3. táblázat: a hulladék részmodell paraméterezése.

DOCf (a HWP hulladék lebomlásra képes frakciója)	0,5
k (metán képződési konstans, év⁻¹) fahulladék	0,02
k (metán képződési konstans, év⁻¹) papírhulladék	0,04
HL (felezési idő, év) fahulladék	35
HL (felezési idő, év) papírhulladék	17
OX (oxidációs faktor, arányszám), kezelt hulladéklerakók	0,1
OX (oxidációs faktor, arányszám), nem kezelt hulladéklerakók	0
MCF (metán korrekciós faktor az első évben végbemenő aerob lebomlás figyelembevételére, arányszám), kezelt hulladéklerakók	1
MCF (metán korrekciós faktor az első évben végbemenő aerob lebomlás figyelembevételére, arányszám), nem kezelt, kis mélységű hulladéklerakók	0,4
MCF (metán korrekciós faktor az első évben végbemenő aerob lebomlás figyelembevételére, arányszám), nem kezelt, nagy mélységű hulladéklerakók	0,8
F (a metán aránya a lerakó gázban)	0,5

3.2.1.4 Termék- és energiahelyettesítési modul

A HWP termeléshez kapcsolódó termék- és energiahelyettesítési hatásokat a nemzetközi szakirodalomra támaszkodva becsültük. Elsősorban az Európai Erdészeti Intézet a témában kiadott részletes elemzését vettük alapul (Leskinen et al. 2018). Mivel Magyarországra specifikusan kialakított termék- és energiahelyettesítési faktorok nem érhetőek el, ezért a fatermékek termék helyettesítési hatásának becslésére a Leskinen et al. (2018) által megadott átlagos szubsztitúciós faktort (SF) vettük figyelembe.

A tűzifa energiahelyettesítő hatásának számításához pedig a Myllyviita et al. (2021), Knauf et al. (2015, 2016), Härtl et al. (2017), és Schweinle et al. (2018) által megadott faktort használtuk.

A helyettesítés útján elkerült kibocsátásokat az alábbi egyenlet szerint számítottuk:

$$SF = \frac{GHG_{non-wood} - GHG_{wood}}{WU_{wood} - WU_{non-wood}}$$

$$Avoided Emissions_{HWP} = Prod_{HWP} \times SF_1$$

$$Avoided Emissions_{firewood} = Prod_{firewood} \times SF_2$$

SF: szubsztitúciós faktor (mértékegység nélküli arány),

*SF*₁=1.2 (Leskinen et al. 2018),

*SF*₂=0.67 (Myllyviita et al. 2021, Knauf et al. 2015, 2016, Härtl et al. 2017, Schweinle et al. 2018);

GHG_{non-wood}: ÜHG emissziók, amelyek a nem-fa alternatíva használatához társíthatóak (t CO₂ eq);

GHG_{wood}: ÜHG emissziók, amelyek a faalapú alternatíva használatához társíthatóak (t CO₂ eq);

WU_{wood}: a faalapú alternatíva fatartalma szén-dioxid egyenértékben kifejezve (t CO₂ eq);

WU_{non-wood}: az alapvetően nem-fa alternatíva esetleges fatartalma szén-dioxid egyenértékben kifejezve (t CO₂ eq);

Avoided Emissions: a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátások (t CO₂ eq);

Prod_{HWP}: fatermékek termelésének mennyisége a fatermékek széntartalmával kifejezve szén-dioxid egyenértékben (t CO₂ eq);

Prod_{firewood}: tűzifa mennyisége a tűzifa széntartalmával kifejezve szén-dioxid egyenértékben (t CO₂ eq).

3.3 Az agrárerdészeti részmodell létrehozása

Annak érdekében, hogy agrárerdészeti rendszerek, elősorban mezővédő erdősávok vonatkozásában pontosabb szénforgalmi számításokat tudjunk végezni létrehoztuk az FICM agrárerdészeti modulját, melyet az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősávokra vonatkozó adatai, illetve nemzetközi szakirodalmi források alapján paramétereztünk.

A következőkben bemutatom az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősáv adatainak vizsgálatát, illetve a részmodell paraméterezését.

3.3.1 Az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősávokra vonatkozó adatainak vizsgálata

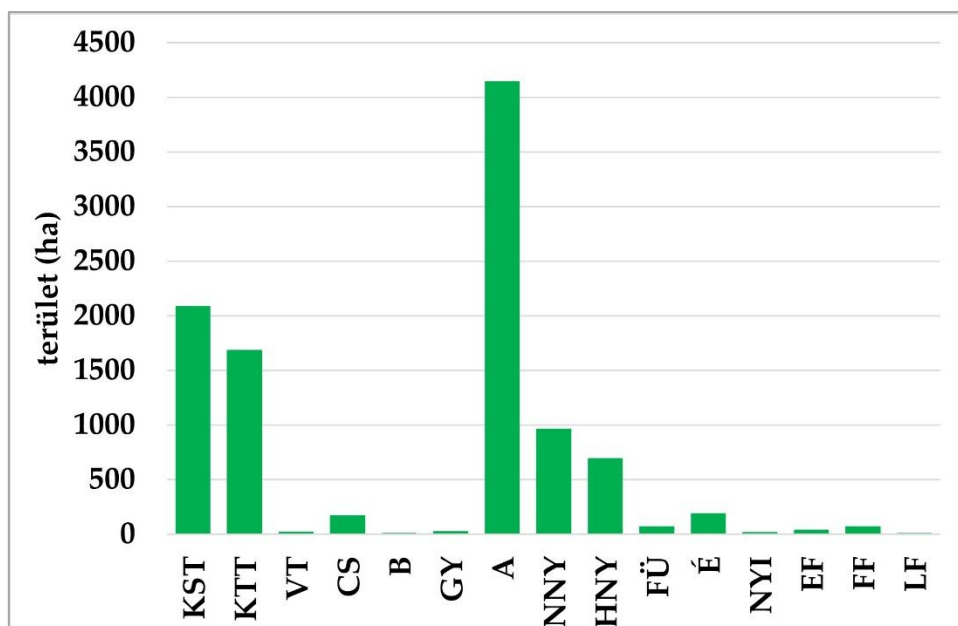
3.3.1.1 A mezővédő erdősávok fatermési osztályának vizsgálata

Vizsgálatunkban elsőként az Országos Erdőállomány Adattár (OEA) mezővédő erdősávokra vonatkozó fatermési osztály adatait elemeztük.

Az OEA részletes adatokat tartalmaz az erdőtervezett mezővédő erdősávok vonatkozásában, melyeket az erdőtervezés során gyűjtenek, és így minden erdőtervezéskor, azaz tíz évente aktualizálnak. A két erdőtervezés között a bejelentett fakitermelések mennyiségét levonják az élőfakészletből, illetve az OEA specifikus algoritmusai szerint évente növedékesítést végeznek, így becsülve a tárgyévben aktuális élőfakészletet (Tobisch és Kottek 2013, Kottek et al. 2023). Az erdőtervezés során meghatározzák az állományok magasságát, mellmagassági átmérőjét, korát, lombkoronazáródását, illetve a fatermési osztályt is (Tobisch és Kottek 2013). Az OEA tartalmaz adatot minden erdőrészlet elsődleges rendeltetéséről is, amely lehet pl. faanyagtermelő, mezővédő, természetvédelmi stb. (Király et al. 2024).

Elemzésünkhöz az OEA 2020. évi statisztikai állapotát használtuk, és leválogattuk az összes mezővédő rendeltetésű erdőrészlet adatait. Így minden mezővédő rendeltetésű erdőrészlet esetében adatokat nyertünk annak területéről, földrajzi helyéről, klímabesorolásáról, talajjellemzőiről, hidrológiájáról, koráról, záródásáról és fatermési osztályáról. Az adatokat a Statistica szoftver (14.0.1.25. verzió, Tulsa, OK, USA) segítségével elemeztük. Az adatelemzés célja az volt, hogy fafajcsoportonként és földrajzi egységenként fatermési osztály eloszlásokat kapjunk az FICM agrárerdészeti moduljának paraméterezéséhez.

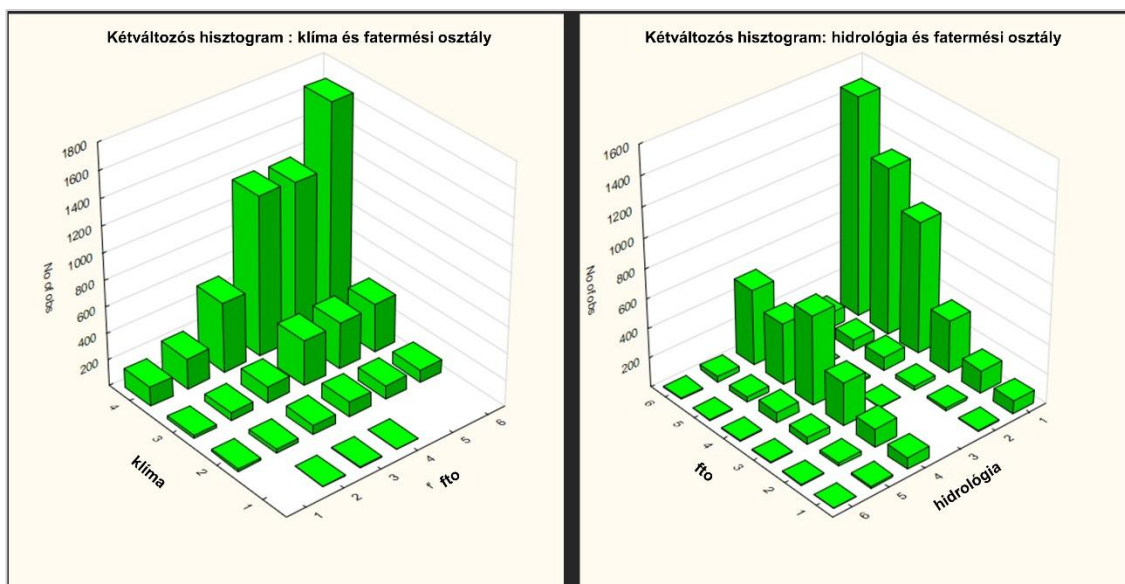
A mezővédő erdősávok területének legjelentősebb részén a főfafaj akác (*Robinia pseudoacacia*), kocsányos tölgy (*Quercus robur*), kocsánytalan tölgy (*Quercus petraea*), illetve nemes nyárok és hazai nyárok (8. ábra).



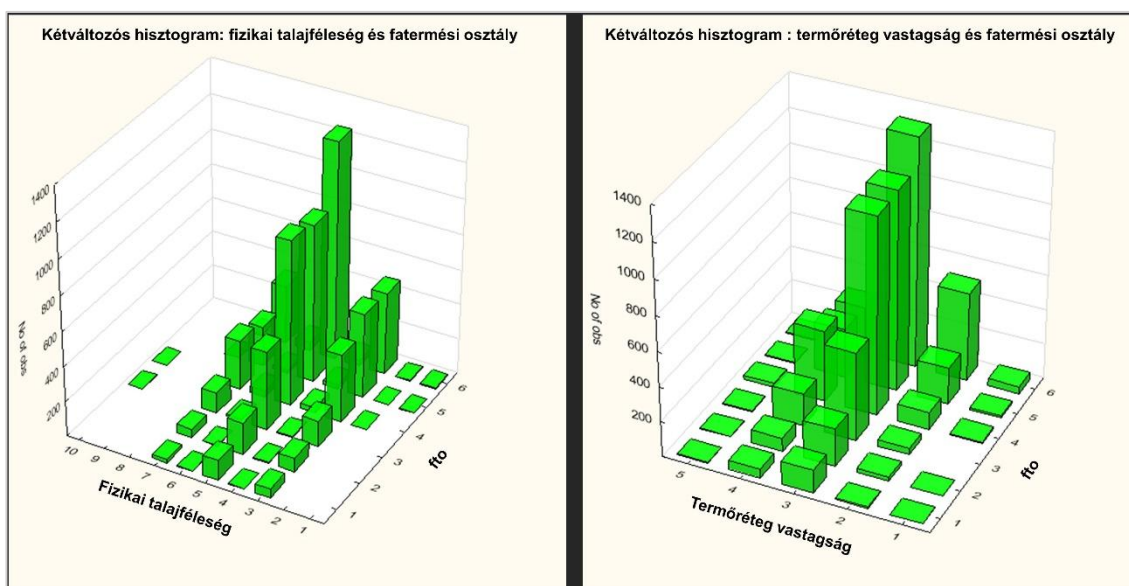
8. ábra: a mezővédő erdősávok területének megoszlása fajfajcsoportok szerint az OEA 2020. évi statisztikai állapotában. (KST: kocsányos tölgy, KTT: kocsánytalan tölgy, VT: vörös tölgy, CS: cser, B: bükk, GY: gyertyán, A: akác, NNY: nemesnyár, HNY: hazai nyár, FÜ: fűz, É: éger, NYI: nyír, EF: erdeifenyő, FF: feketefenyő, LF: lucfenyő)

A mezővédő erdősávok területének 31%-a tartozik a 6-os fatermési osztályba, míg 25-25%-a az 5-ös és 4-es fatermési osztályba. Az 1-3 fatermési osztály összesen a mezővédő erdősávok területének 19%-át teszi ki. A vizsgált mezővédő erdősávok területének 77%-a erdőssztyepp klímán található, 18%-uk pedig kocsánytalan tölgyes – cseres klímán található (9. ábra). Az erdőssztyepp éghajlati övezet a legszárazabb és a legkedvezőtlenebb az erdők növekedésére, ami magyarázza a 6-os fatermési osztály felülreprezentáltságát.

Az állományok hidrológiáját tekintve a terület 59%-án nem áll rendelkezésre többletvíz, 30%-a pedig időszakos vízhatás alatt áll (9. ábra). A terület 58%-án vályogtalaj, 65%-án közepes mélységű termőtalajréteg található (10. ábra). A mezővédő erdősávok területének 65%-a az Alföldön, 13%-a a Kisalföldön található, amelyek fontos mezőgazdasági területek, ahol a mezővédő erdősávok funkciója különösen fontos (11. ábra).

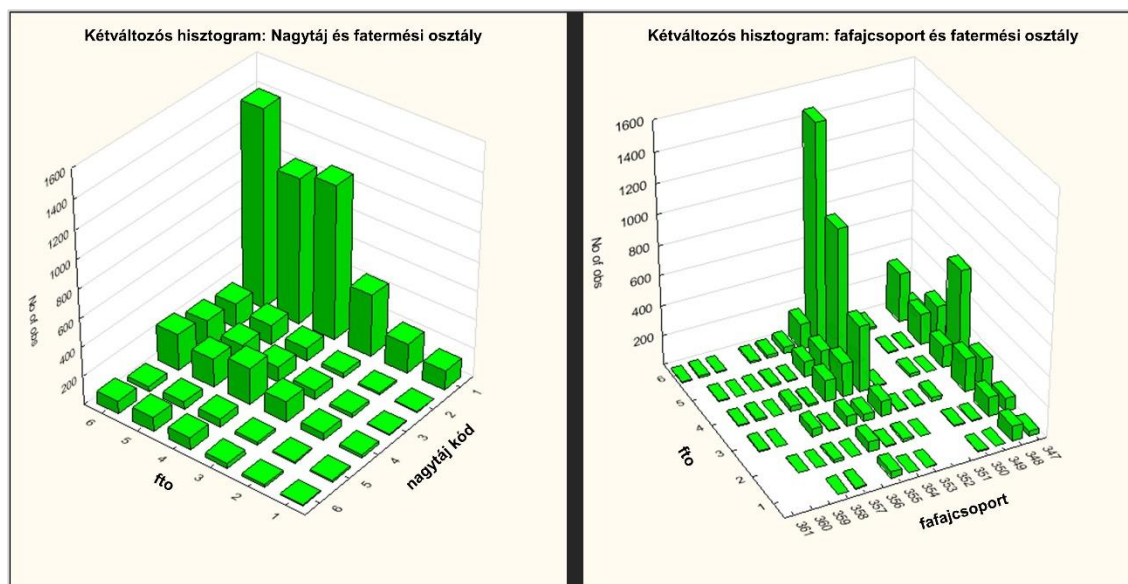


9. ábra: Balra: a mezővédő erdősávok klíma és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (A klíma kategóriák a következők: 1 Bükkös, 2 Gyertyános tölgyes, 3 Kocsánytalan tölgyes - cseres, 4 erdősztyepp. A fatermési osztály kódok a szokásos szerint 1 a legjobb, 6 a leggyengébb.) Jobbra: a mezővédő erdősávok hidrológia és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (A hidrológiai kódok: 1 Többetvízhatástól független, 2 Változó vízellátású, 3 Szivárgóvízű, 4 Időszakos vízhatású, 5 Állandó vízhatású, 6 Felszínig nedves, 7 Vízrel borított.)



10. ábra: Balra: a mezővédő erdősávok fizikai talajféleség és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Fizikai talajféleség kódok: 1 Törmelék, 2 Durva homok, 3 Homok, 4 Homokos vályog, 5 Vályog, 6 Agyagos vályog, 7 Agyag, 8 Agyagos homok, 9 Homokos)

agyag, 10 Nehéz agyag). Jobbra: a mezővédő erdősávok termőréteg vastagság és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Termőréteg vastagság kódok: 1 Igen sekély, 2 Sekély, 3 Közepes mélységű, 4 Mély, 5 Igen mély).



11. ábra: Balra: a mezővédő erdősávok nagytáj és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Nagytájak: 1 Nagyalföld, 2 Északi-középhegység, 3 Dunántúli-középhegység, 4 Kisalföld, 5 Nyugat-Dunántúl, 6 Dél-Dunántúl). Jobbra: a mezővédő erdősávok fajcsoport és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Fajcsoport kódok: 347 KST, 348 KTT, 349 vörös tölgy, 350 CS, 351 B, 352 GY, 353 A, 354 NNY, 355 HNY, 356 FÜ, 357 É, 358 NYI, 359 EF, 360 FF, 361 LF.)

Az akác (*Robinia pseudoacacia*) a leggyakoribb fafaj a mezővédő erdősávokban, a teljes terület 41%-át fedi le. Ez azzal magyarázható, hogy a hazánkban előforduló, mesterségesen lecsapolt szemiarid élőhelyeken gyakran csak a betelepített akác bizonyul életképesnek és alkalmasnak sikeres erdősítésre (Borovics és Király 2023). Az akác gyors növekedése és nagy szárazságtűrése miatt hazánkban igen kedvelt és elterjedt fafaj. A talaj termőképességére kedvezően ható nitrogénmegkötő faj. Az ültetvényes erdőgazdálkodásban világszerte meghatározó szerepe van a különböző éghajlati és termőhelyi viszonyokhoz való alkalmazkodóképessége, valamint jó minőségű faanyaga és mézelo képessége miatt (Ábri és Csajbók 2023). Az akác energetikai ültetvényként is egyre nagyobb jelentőséggel bír, köszönhetően gyors növekedésének és viszonylag könnyű és költséghatékony regenerációjának (Szomorad és Tímár 2014). Vizsgálatunk azt mutatja, hogy az akác az

agrárerdészeti rendszerek fontos fafaja Magyarországon. Az akác átlagos fatermési osztálya a mezővédő erdősávok esetében az 5-ös.

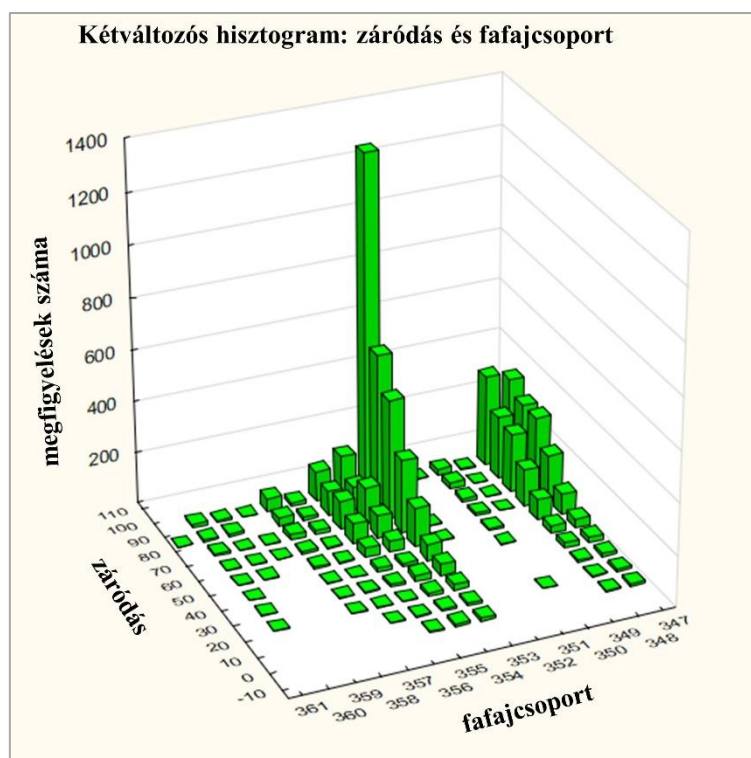
3.3.1.2 A mezővédő erdősávok záródásának vizsgálata

Az előző alfejezetben részletezett OEA adat leválogatás eredményeit felhasználva elvégeztük a mezővédő erdősávok záródásának vizsgálatát is. Az adatelemzés elsődleges célja az volt, hogy fafajcsoportonként átlagos lombkoronazáródási értékeket állapítsunk meg az FICM agrárerdészeti modul paraméterezéséhez. Emellett életkor szerint is értékeltük a lombkorona záródását. A lombkoronazáródás súlyozott átlagát fafajcsoportonként az *4. táblázat* részletezi. A legmagasabb lombkoronazáródási értéket a bükk (*Fagus sylvatica*) és a vörös tölgy (*Quercus rubra*) főfafajú erdősávokban regisztráltuk. A kocsányos tölgy, a kocsánytalan tölgy, a nyár, a fűz (*Salix*), a nyír (*Betula*) és a feketefenyő (*Pinus nigra*) esetében az átlagos lombkoronazáródás 80% alatt volt.

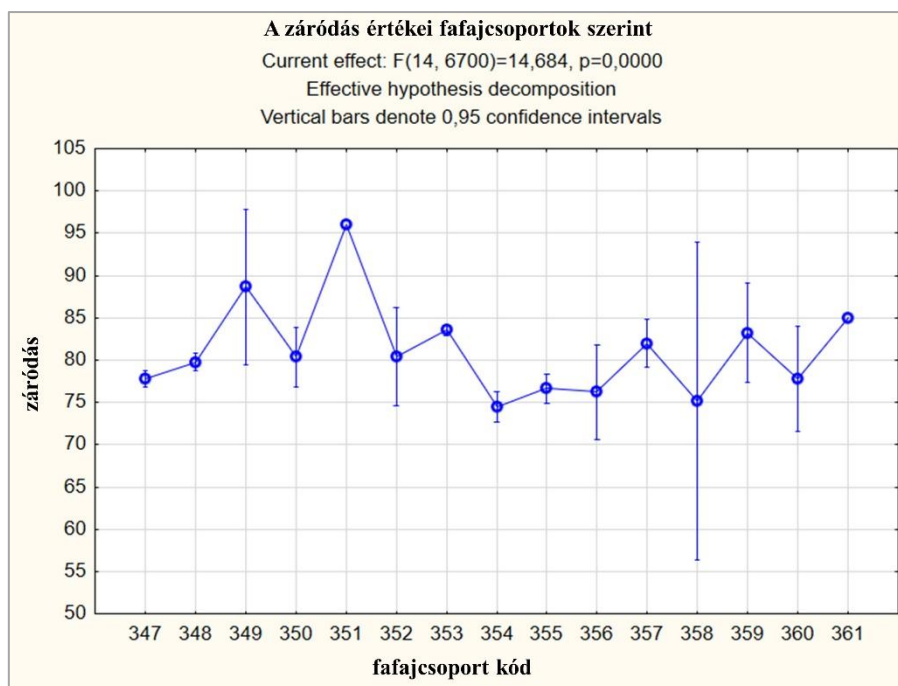
4. táblázat: A lombkoronazáródás értékek súlyozott átlaga fafajcsoportonként. (KST: kocsányos tölgy, KTT: kocsánytalan tölgy, VT: vörös tölgy, CS: cser, B: bükk, GY: gyertyán, A: akác, NNY: nemesnyár, HNY: hazai nyár, FÜ: fűz, É: éger, NYI: nyír, EF: erdeifenyő, FF: feketefenyő, LF: lucfenyő)

<i>A lombkoronazáródás értékek súlyozott átlaga fafajcsoportonként</i> Current effect: F(14, 6700)=14,684, p=0,0000 Effective hypothesis decomposition					
fajcsoport	záródás (átlag)	Záródás (Std.Err.)	(-95,00%)	(+95,00%)	Megfigyelések száma
KST	77.79	0.52	76.76	78.81	1221
KTT	79.78	0.53	78.74	80.81	1114
VT	88.64	4.11	79.49	97.79	11
CS	80.36	1.76	76.85	83.87	81
B	96.00				2
GY	80.40	2.80	74.55	86.25	20
A	83.53	0.32	82.89	84.16	2950
NNY	74.49	0.90	72.71	76.26	588
HNY	76.64	0.87	74.92	78.35	473
FÜ	76.20	2.81	70.57	81.83	55
É	81.99	1.42	79.19	84.79	129
NYI	75.20	6.76	56.42	93.98	5
EF	83.21	2.83	77.34	89.07	24
FF	77.76	3.07	71.54	83.97	41
LF	85.00				1

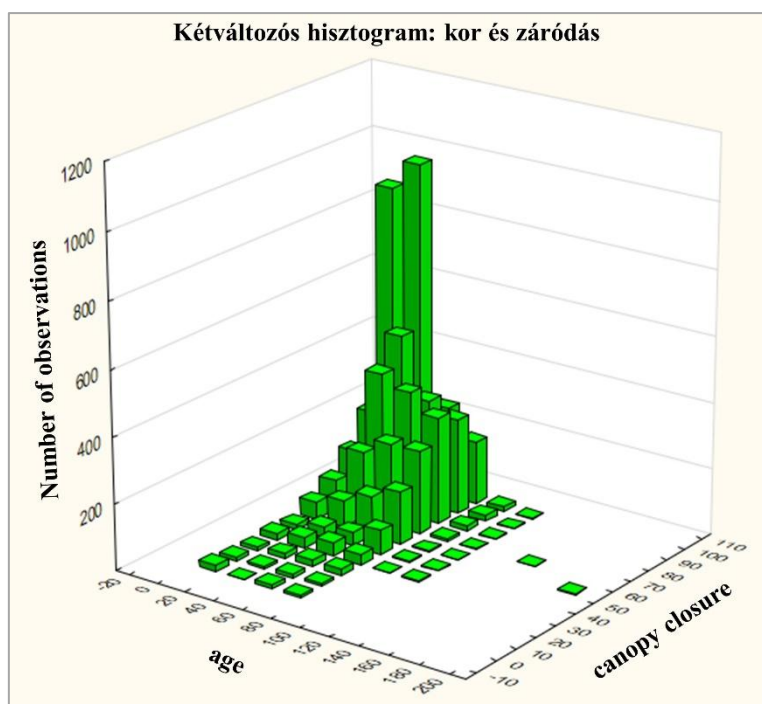
Az erdőtervezett mezővédő erdősávok lombkoronazárása viszonylag magas, 74-96% között mozog. A kis területtel reprezentált fajok esetében az átlag konfidencia intervallumai sokkal szélesebbek voltak (13. ábra). A vizsgált hatások közül a legfontosabb az életkor, amely a legnagyobb hatással van a lombkoronazárás értékére. A fajokcsoport és a fatermőképesség szintén befolyásolja a lombkoronazáródást. Ezek az eredmények összhangban vannak a mezővédő erdősávok szénmegkötésével kapcsolatos korábbi eredményeinkkel, amelyek kortól és fajától függően is erősen változtak (Király et al. 2024). Eredményeink szerint az erdősávok lombkoronazáródása az életkor előrehaladtával csökken, azonban az 1-10 éves korosztályban záródásnövekedés volt megfigyelhető (14. ábra és 15. ábra).



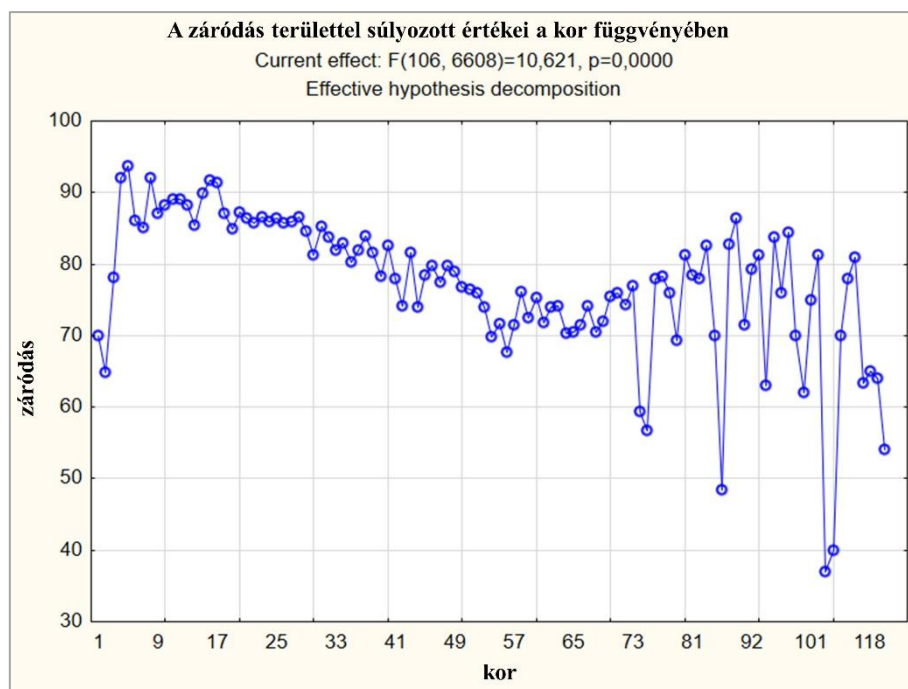
12. ábra: a mezővédő erdősávok fajcsoport és záródás szerinti kétváltozós hisztogramja. (Fajcsoport kódok: 347 KST, 348 KTT, 349 vörös tölgy, 350 CS, 351 B, 352 GY, 353 A, 354 NNY, 355 HNY, 356 FÜ, 357 éger, 358 nyír, 359 EF, 360 FF, 361 LF.)



13. ábra: a záródás értékek súlyozott átlaga fajcsoportonként a mezővédő erdősávokban.
 (Fajcsoport kódok: 347 KST, 348 KTT, 349 vörös tölgy, 350 CS, 351 B, 352 GY, 353 A, 354 NNY, 355 HNY, 356 FÜ, 357 éger, 358 nyír, 359 EF, 360 FF, 361 LF).



14. ábra: a mezővédő erdősávok kor és záródás szerinti kétváltozós hisztogramja.



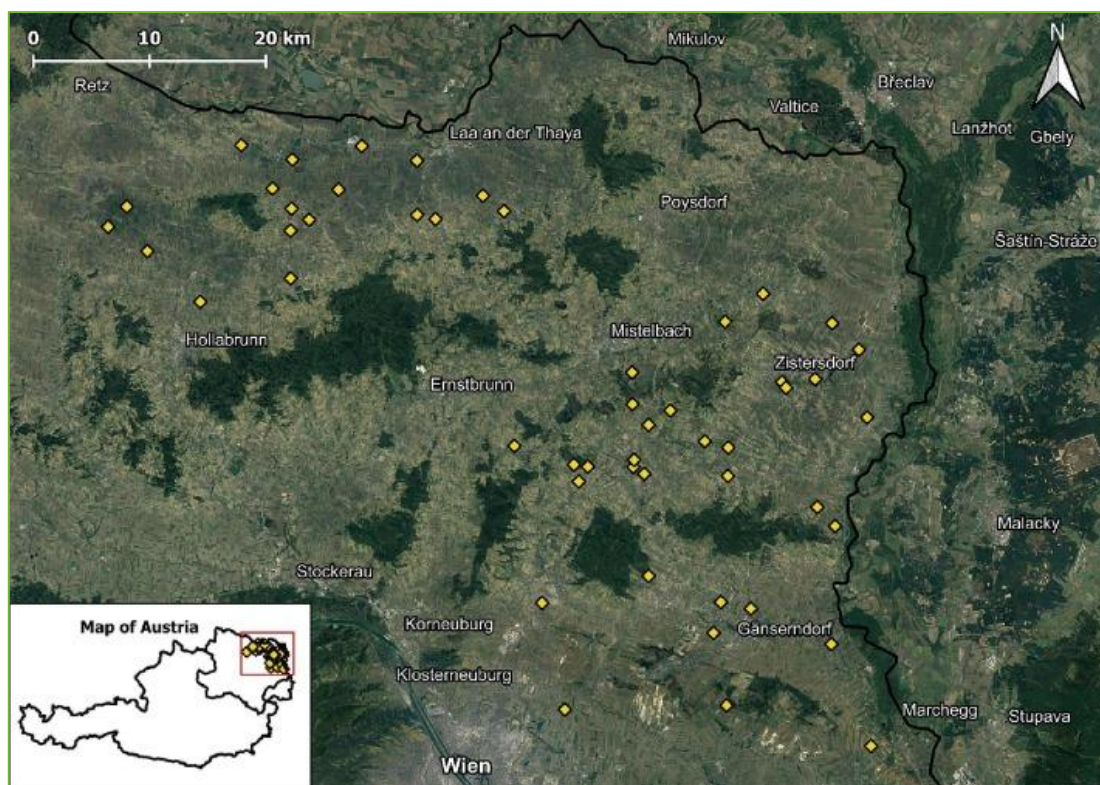
15. ábra: a vizsgált mezővédő erdősávok záródása a kor függvényében.

3.3.2 Az agrárerdészeti modul paraméterezése

A hazai mezővédő erdősávokra specifikus FICM modul elkészítéséhez az előző két alfejezetben részletezett vizsgálataink eredményeit vettük alapul, melyeket Király és Borovics is részletesen bemutat (Király–Borovics 2024a,b). Az eredmények alapján állítottuk be az FICM-ben használt fatermési függvényeket.

A modell talajszén-megkötési egyenleteit Wenzel et al. (2023) alapján paramétereztük.

Wenzel et al. (2023) hamis idősoros elemzést végeztek Ausztriában található mezővédő erdősávok korfüggő talajszénkészlet változásának meghatározására. A vizsgálatot Ausztria keleti részén végezték, a vizsgált erdősávok létesítése után 1-70 évvel. A vizsgálat helyszíneit a **16. ábra** szemlélteti.



16. ábra: Wenzel et al. (2023) mezővédő erdősávok talajszéntartalmának változására vonatkozó hamis idősoros vizsgálatának mintaterületei. (Forrás Wenzel et al. 2023)

A szerzők 54 helyszínen gyűjtöttek mintát az erdősáv és a szomszédos mezőgazdasági művelés alatt álló terület talajából 40 cm mélységig. Elemezték a mintákban a különböző stabilitású szerves szén (SOC) frakciókat és a kapcsolódó talajtulajdonságokat. Az összes SOC tartalom a talajban 20 cm mélységig szignifikánsan ($p < 0,05$) nőtt a telepítés óta eltelt idő függvényében. A szén megkötése tehát csak a felső talajrétegre korlátozódott (0–20 cm), az SOC változások 20–40 cm mélységben kicsik és nem szignifikánsak voltak ($p < 0,05$).

A szerzők elvégezték a talajszénkészlet változás lineáris regresszióját az erdősávok életkora függvényében (1–70 év). Ez $0,65 \pm 0,10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ év}^{-1}$ átlagos SOC megkötési arányt eredményezett 40 cm mélységig. Ezt az értéket használtuk fel az FICM modell paraméterezéséhez.

Az avar és holtfa szénmegkötési értékeit az ÜHG leltár alapján vezettük le (NIR 2023).

4 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

4.1 Termék szintű prognózisok különböző hulladékkezelési forgatókönyvek szerint

4.1.1 Kivonat

A fatermékek jelentős mennyiségű szenet tárolnak, élettartamuk meghosszabbítása, valamint a megfelelő hulladékkezelés, újrahasznosítás és újrahasználat jelentősen hozzájárulhat a klímacélok eléréséhez. Ebben a fejezetben különböző forgatókönyvek szerint vizsgáltuk egy hipotetikus gyártó által 2020-ban gyártott 200 000 m³ forgácslap széntárolását, valamint a hulladékká válást követően keletkező CO₂ és CH₄ kibocsátásokat. Vizsgálatunk célja az volt, hogy modellezzük a változó termékélettartam, újrahasznosítási arányok és hulladékkezelési gyakorlatok hatását a falemezek széntárolásának időtartamára és a kibocsátási mintázatokra. Az előrejelzésekhez az FICM HWP részmodellt használtuk, azon belül is a fatermék, a hulladék és az újrahasznosítási modulokat. A modellfutások a 2020-2130 közötti időszakot fedték le. Az eredmények szerint a kombinált kibocsátáscsökkentő intézkedésekkel jellemezhető forgatókönyv rendelkezett a legnagyobb mitigációs potenciállal a modellezett időszakban, ami 2050-re 32%-os kibocsátáscsökkentést eredményezett a Business as Usual (BAU) forgatókönyvhöz viszonyítva. Az egyes intézkedések közül a megnövelt újrahasznosítási aránynak volt a legnagyobb mitigációs hatása. A forgácslap élettartamának meghosszabbítása kiegészítő intézkedés lehet az éghajlatváltozás mérséklésére irányuló erőfeszítések, valamint a kaszkád újrahasználat, újrahasznosítás, és a körkörös biogazdaság koncepciójának támogatására. Az eredmények azt mutatták, hogy a lerakott fahulladék hosszú távon jelentős CH₄ kibocsátás forrása, így a fahulladék égetéssel történő ártalmatlanítása előnyösebb a lerakásnál.

4.1.2 Célkitűzés

Vizsgálatunk célja az volt, hogy modellezzük a változó termékélettartam, újrahasznosítási arány és hulladékgazdálkodási gyakorlatok hatását a falemezek szén-dioxid-tárolására az FICM HWP modell segítségével. E hatások vállalati szintű nagyságrendjének számszerűsítése érdekében nyolc különböző forgatókönyv szerint prognosztizáltuk egy feltételezett gyártó által 2020-ban gyártott 200 000 m³ forgácslap szén-dioxid tárolását, valamint CO₂ és CH₄ kibocsátását 2130-ig.

4.1.3 Input adatok és paraméterezés

Elemzésünkben input fatermék mennyiségként 200 000 m³ forgácslapot vizsgáltunk. Azért választottuk ezt a termékmennyiséget, mert ez összemérhető a Magyarországon működő nagy falemezgyártók átlagos éves termelésével.

Nyolc különböző forgatókönyvet dolgoztunk ki (*5. táblázat*) a lehetséges faiparral kapcsolatos intézkedések és a különböző hulladékkezelési gyakorlatok hatásának vizsgálatára. Ez lehetővé tette a különböző intézkedések klímamitigációs potenciáljának számszerűsítését. A forgatókönyvekben négy paramétert módosítottunk különböző koncepciók alapján. Ezek a paraméterek az újrahasznosított fahulladék aránya, a lerakott fahulladék aránya, a visszanyert metán aránya és az előállított forgácslap felezési ideje voltak.

5. táblázat: A vizsgált scenáriók paraméterezése.

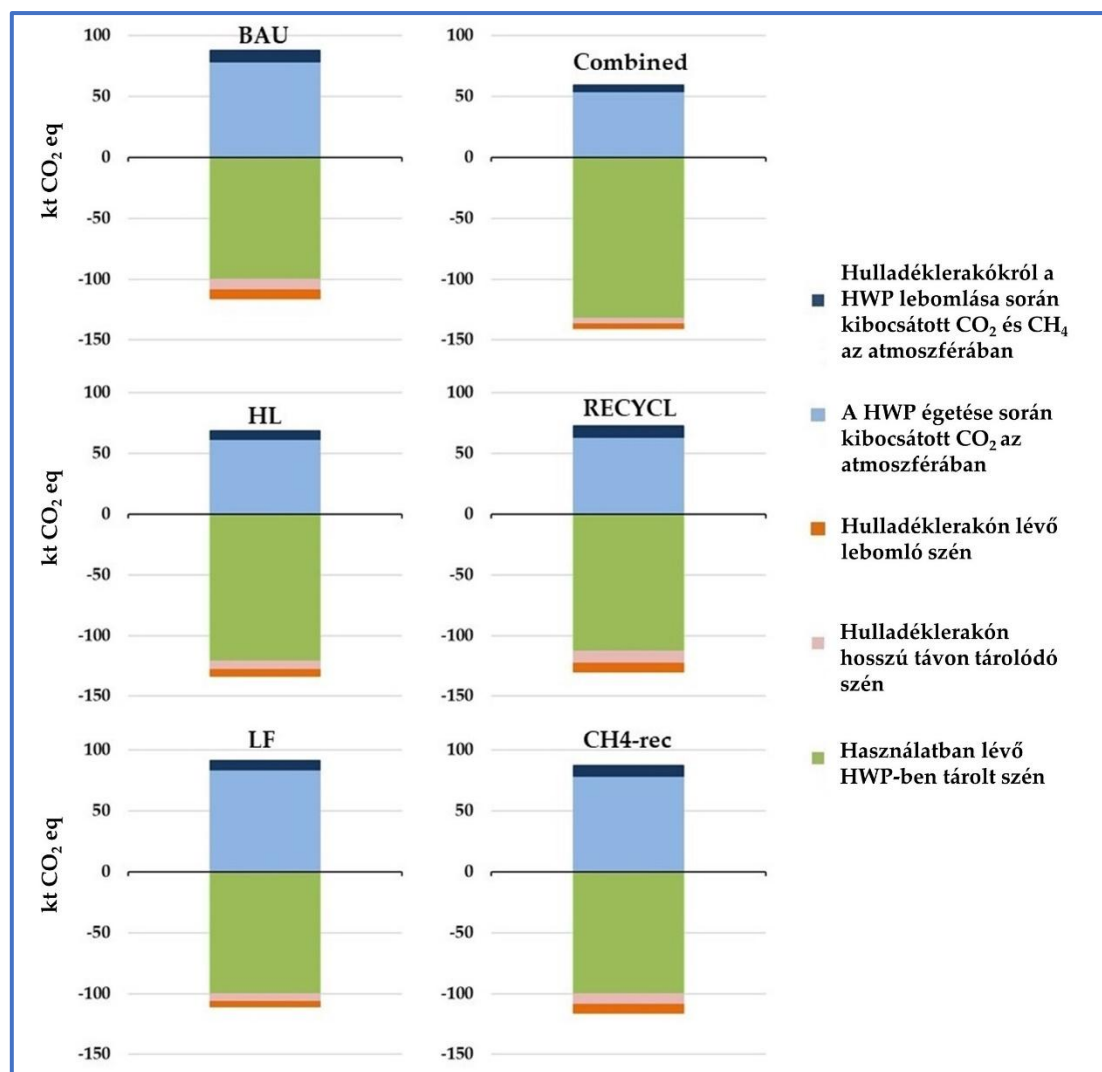
		2020	2050	2130
BAU	Felezési idő (év)	25	25	25
	Lerakott fahulladék %	15%	15%	15%
	Újrahasznosított HWP %	20%	20%	20%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	12%	12%
HL	Felezési idő (év)	35	35	35
	Lerakott fahulladék %	15%	15%	15%
	Újrahasznosított HWP %	20%	20%	20%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	12%	12%
RECYCL	Felezési idő (év)	25	25	25
	Lerakott fahulladék %	15%	15%	15%
	Újrahasznosított HWP %	20%	50%	80%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	12%	12%
LF	Felezési idő (év)	25	25	25
	Lerakott fahulladék %	15%	5%	3%
	Újrahasznosított HWP %	20%	20%	20%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	12%	12%
CH ₄ -rec	Felezési idő (év)	25	25	25
	Lerakott fahulladék %	15%	15%	15%
	Újrahasznosított HWP %	20%	20%	20%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	25%	50%
Kombinált	Felezési idő (év)	35	35	35
	Lerakott fahulladék %	15%	5%	3%
	Újrahasznosított HWP %	20%	50%	80%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	25%	50%
X.1	Felezési idő (év)	25	25	25
	Lerakott fahulladék %	65%	65%	65%
	Újrahasznosított HWP %	20%	20%	20%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	12%	12%
X.2	Felezési idő (év)	25	25	25
	Lerakott fahulladék %	65%	65%	65%
	Újrahasznosított HWP %	20%	20%	20%
	Visszanyert CH ₄ %	12%	25%	50%

Referencia forgatókönyvként egy „Business as Usual” (BAU) forgatókönyvet dolgoztunk ki. A BAU forgatókönyv paraméterezéséhez az Országos Hulladékgazdálkodási Terv 2021-2027

(2021), a Nemzeti Környezetvédelmi Információs Rendszer (2022) és a Magyar ÜHG leltár (NIR 2022) adatait használtuk fel. A felezési idő a BAU forgatókönyvben az IPCC (2019) által meghatározott alapértelmezett értékre lett állítva. A HL (half life, azaz felezési idő) forgatókönyvet azért dolgoztuk ki, hogy vizsgáljuk a faipari technológiai fejlesztések faipari termékek élettartamát meghosszabbító hatásait. A RECYCL (újrahasznosítás) forgatókönyv a megnövekedett újrahasznosítási arányok vizsgálatára készült. Az LF (landfill, azaz hulladéklerakó) forgatókönyv a lerakott fahulladék csökkenő részarányát modellezte a Nemzeti Hulladékgazdálkodási Tervben (2021) előírányzott módon. A CH₄-rec (metánvisszanyerés) forgatókönyv a hulladéklerakókon megvalósított megnövekedett metánvisszanyerés (fáklyázás és a metán energetikai célú hasznosítása) hatásait modellezte. A kombinált forgatókönyv a HL, RECYCL, LF és CH₄-rec forgatókönyvek együttes hatásait vizsgálta. Az X forgatókönyv sorozatot a lerakott fahulladék mennyiségének növekedése hatásainak bemutatására fejlesztettük ki, változatlan (X.1) és megnövekedett (X.2) metánvisszanyerés mellett.

4.1.4 Eredmények és megvitatásuk

A BAU forgatókönyvben az előrejelzett teljes kumulált kibocsátás 88 kt CO₂ ekvivalens (eq), illetve 197 kt CO₂ eq volt rendre 2050-ig, illetve 2130-ig. A fatermékekben tárolt szén előrejelzett mennyisége 2050-re -100 kt CO₂ eq, 2130-ra pedig -17 kt CO₂ eq mennyiségűnek adódott. A hulladéklerakókon hosszú távon tárolt szén teljes mennyisége 2050-ben -9 kt CO₂ eq, míg 2130-ban 17 kt CO₂ eq volt. A 17. ábra a különböző forgatókönyvek széntárolását és kumulált CO₂ és CH₄ kibocsátását szemlélteti 2050-ig.



17. ábra: Széntárolás és kumulatív kibocsátás 2020-tól 2050-ig.

(A mennyiségek kt CO₂ ekvivalens mértékegységben vannak kifejezve. A negatív értékek a tárolt-, a pozitív értékek pedig a kibocsátott és a légkörben felhalmozódott szén-dioxidot jelölik).

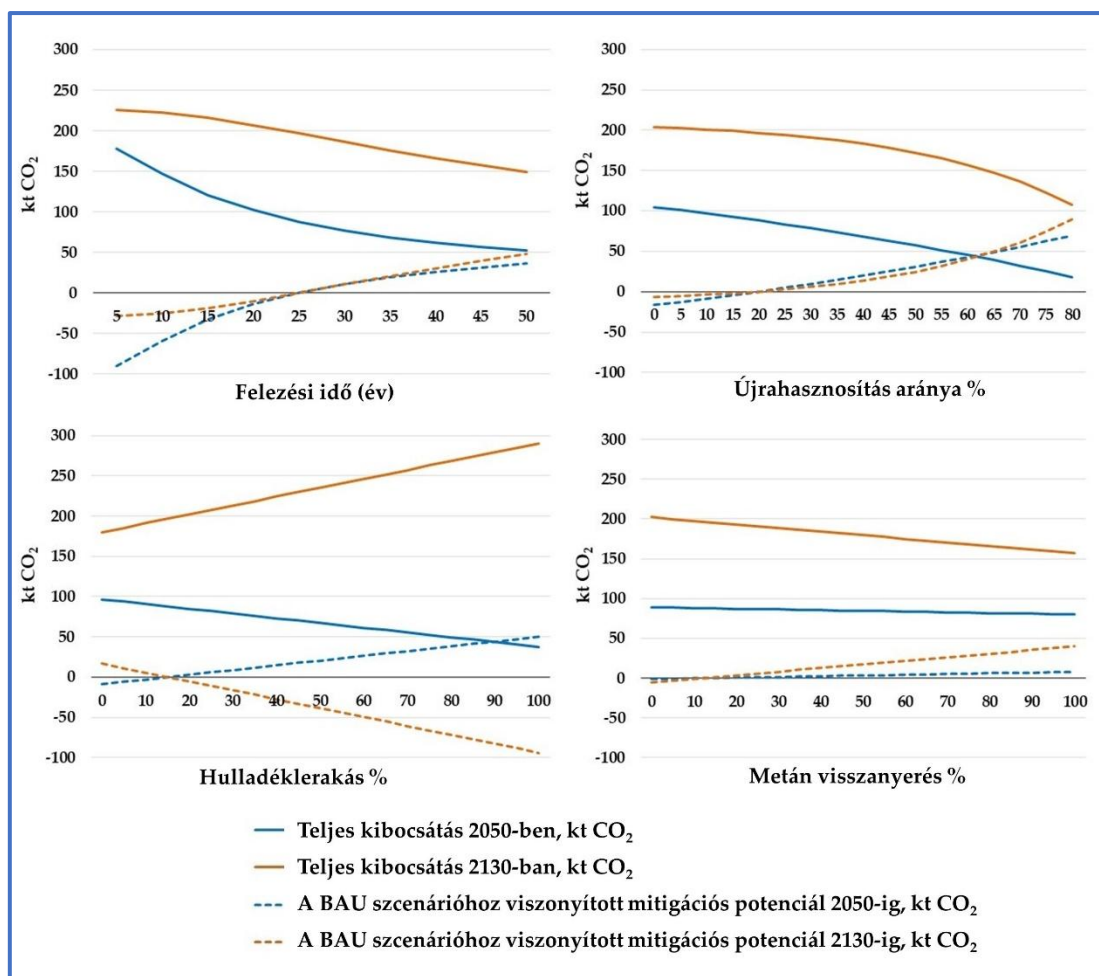
A legkevesebb kibocsátást eredményező forgatókönyv 2130-ig a Kombinált forgatókönyv volt (6. táblázat). Ha azonban csak 2050-ig vizsgáljuk, a Kombinált forgatókönyv csak a harmadik helyen állt a kibocsátáscsökkentésben. A megnövekedett fahulladék lerakással jellemezhető X forgatókönyvek a legkevesebb kibocsátást eredményezték 2050-ig. Ezzel szemben 2130-ra az X szcenárió teljesítménye megváltozott, és a BAU forgatókönyvéhez képest további többlet kibocsátásokat eredményeztek a prognózis szerint. Az X.1 forgatókönyv 28%-kal több kibocsátást eredményezett, mint a BAU forgatókönyv.

6. táblázat: A kidolgozott forgatókönyvek összesített kumulált kibocsátásai a BAU kibocsátás százalékában kifejezve.

(A pozitív értékek kibocsátás csökkenést, a negatív értékek többletkibocsátást jelölnek.)

Szenárió	2050	2130
HL	22%	11%
RECYCL	17%	18%
LF	-4%	3%
CH ₄ -rec	1%	5%
Kombinált	32%	37%
X.1	34%	-28%
X.2	37%	-7%

A **18. ábra** alapján látható, hogy a felezési idő, az újrahasznosítási arány és a metán visszanyerés növelése csökkentette a teljes előrejelzési időszakra vetített kibocsátást. Ugyanakkor a lerakott fahulladék mennyiségének növelése 2050-ig csökkentette a kibocsátást, 2050 és 2130 között azonban jelentősen megnövelte azt. A metán visszanyerés mértékének változtatása volt a legkisebb kibocsátáscsökkentő hatással a BAU forgatókönyvhöz viszonyítva. Ennek oka az, hogy a BAU forgatókönyvben a lerakott fahulladék mennyisége csupán 15%, így a CH₄ kibocsátás mértéke a BAU Szenárióban nem volt jelentős. Az újrahasznosítási arány növelésének volt a legnagyobb kibocsátáscsökkentő hatása, amit a felezési idő növelése követett.

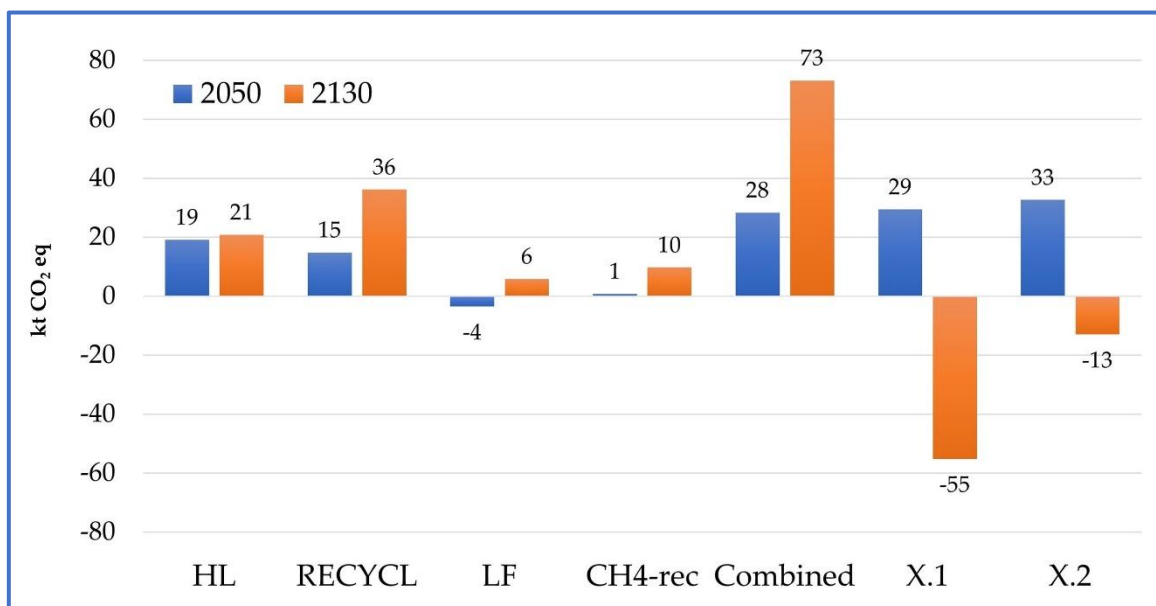


18. ábra: A teljes kumulatív kibocsátás és a mitigációs potenciál a paraméterek függvényében.

Az értékek kt CO₂ egyenértékben vannak kifejezve. Mindegyik ábrán három paramétert tartunk állandóan a BAU forgatókönyv értékein, és egy paramétert módosítunk a legalacsonyabb és legmagasabb értékei között. (A kibocsátások pozitív értékek. A mérséklési potenciál esetén a pozitív értékek a BAU scenárióhoz képest kibocsátás csökkenést, a negatív értékek pedig a BAU scenárióhoz képest kibocsátás növekedést jeleznek.)

Az egyes scenáriók mitigációs potenciálját a BAU scenárió és a vizsgált forgatókönyv kumulált kibocsátásának különbségeként számítottuk ki. A teljes előrejelzési időszakot tekintve a Kombinált forgatókönyv mitigációs potenciálja volt a legnagyobb, ezt követte a RECYCL forgatókönyvé (19. ábra). Ez azt jelenti, hogy ezek a forgatókönyvek tették lehetővé a legnagyobb kibocsátáscsökkentést a modellezett időszakban a BAU forgatókönyvhöz viszonyítva. Az X forgatókönyvek a 2130-ig terjedő időszakot figyelembe véve negatív

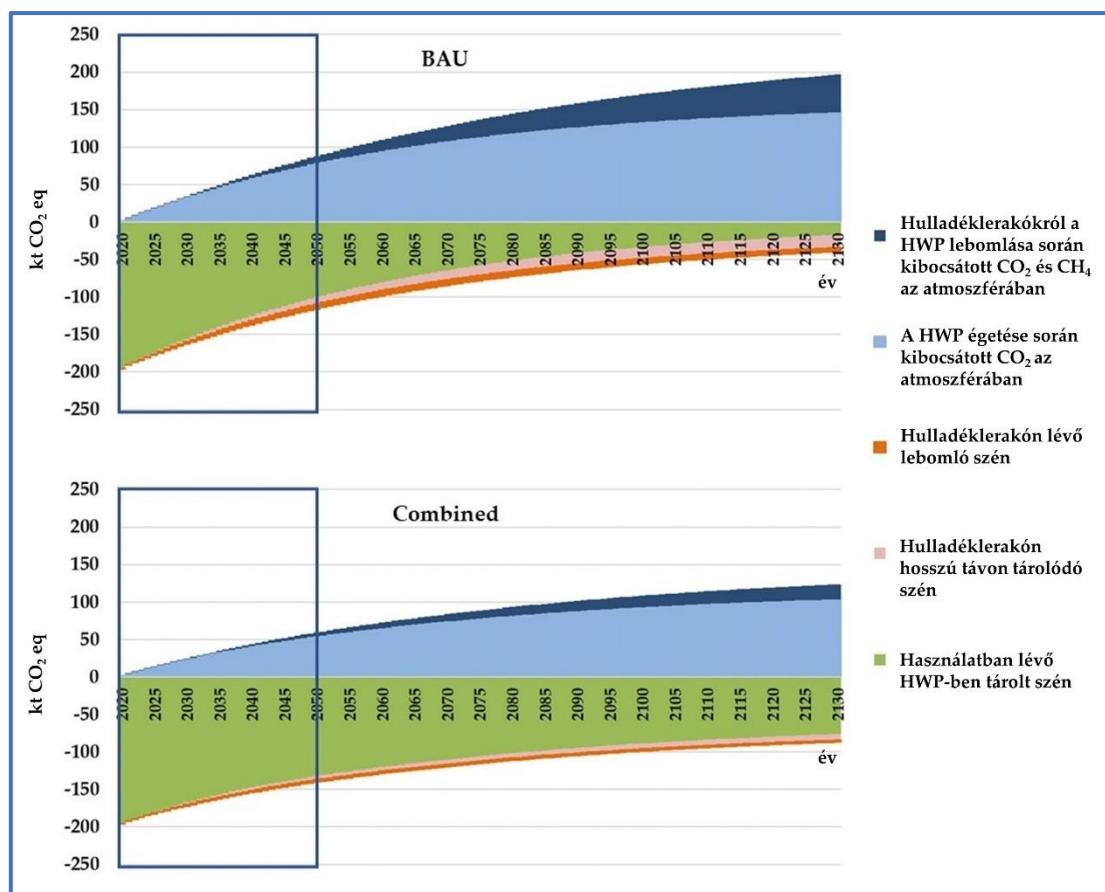
mitigációs potenciál értékekkel rendelkeztek, azaz ezek a forgatókönyvek többletkibocsátást eredményeztek a BAU forgatókönyvhöz képest.



19. ábra: Az egyes scenáriók mitigációs potenciál értékei 2050-ig és 2130-ig a BAU forgatókönyvéhez képest.

(Az értékek kt CO₂ egyenértékben vannak kifejezve. A pozitív értékek kibocsátás csökkenést, a negatív értékek többletkibocsátást jelentenek.)

A 20. ábra a BAU és a kombinált forgatókönyvek szénegyenlegét szemlélteti 2020 és 2130 között. A fatermékekben tárolt szén atmoszférába kerülése lassabb a kombinált forgatókönyvben, mint a BAU forgatókönyvben. A 2050-es évre előrejelzett modelleredmények szerint a fatermékekben tárolt szén mennyisége 32 kt CO₂ egyenértékkel volt magasabb a Kombinált forgatókönyvben, mint a BAU-ban. Míg 2130-ban 59 kt CO₂ egyenértékkel volt magasabb a Kombinált forgatókönyvben, mint a BAU forgatókönyvben. A lerakott fahulladékból származó kibocsátás 4, illetve 31 kt CO₂ egyenértékkel volt alacsonyabb a Kombinált forgatókönyvben, mint a BAU forgatókönyvében 2050-re, illetve 2130-ra vetítve.



20. ábra: Széntárolás és kumulált kibocsátások 2020-tól 2130-ig a BAU és a Kombinált scenáriókban.

Az értékek kt CO₂ egyenértékben vannak kifejezve. A negatív értékek a tárolt, a pozitív értékek pedig a kibocsátott és a légkörben felhalmozódó szén-dioxidot (és metánt) jelölik.

Eredményeink szerint a több mitigációs intézkedés együttes hatását modellező kombinált forgatókönyv rendelkezett a legnagyobb mitigációs potenciállal a modellezett időszakban. Az egyes mitigációs intézkedések közül a fahulladék újrahasznosítási arányának növelésének volt a legnagyobb mitigációs hatása, amelyet a gyártott forgácslap élettartamának növelése követett. A lerakott hulladék mennyiségének csökkentése és a metán visszanyerésének növelése csak kisebb mértékű mitigációs hatással bírt. Budzinski et al. (2020) hozzánk hasonlóan szintén megállapította, hogy a fatermékek kaszkád rendszerű újrahasználatának és újrahasznosításának növelése nagyobb mértékű mitigációs hatásokkal bír, mint az élettartamuk meghosszabbítása.

Az Európai Erdészeti Intézet jelentése szerint (Verkerk et al. 2022) az erdők és a fatermékek jelentős mértékben hozzájárulhatnak a klímasemlegesség eléréséhez 2050-ig, és a legnagyobb nettó kibocsátáscsökkentést eredményező fafelhasználási módokat kell előnyben részesíteni.

Az újrahasznosítási arányok növelése, a fa kaszkád felhasználása és a kitermelt fa hosszú élettartamú fatermékekben történő felhasználása növeli a széntárolás mértékét és hozzájárul a klímaváltozás mérsékléséhez (IPCC 2022, Brunet-Navarro et al. 2017, 2018, Jasinevičius et al. 2017, Xu et al. 2018, Xie et al. 2021).

Tekintettel az újrahasznosítás és a termékek kaszkád használatának klímamitigációban betöltött jelentős szerepére, fontos megvizsgálni az újrahasznosítási arányok növelésének lehetséges mértékét. Az újrahasznosításra kerülő hulladékfa különböző forrásokból származik, mint például háztartásokból, újrahasznosító központokból és ipari üzemekből. A vegyi anyagokkal kezelt és bevonattal ellátott fatermékek részaránya a hulladék eredetétől függ (Kharazipour – Kües 2007). Az olyan szennyeződések, mint a bevonatok, tartósító anyagok, kötőanyagok és lángmentesítő szerek meghatározzák az újrahasznosítási technológiák alkalmazhatóságát és a fatermékek újrahasznosításának lehetséges útját (Kharazipour – Kües 2007; Harms – Flamme 1999). A kezeletlen fahulladékok, valamint az organikus halogén vegyületektől és más káros anyagoktól mentes anyagokkal kezelt fatermékek és kompozitok alkalmasak forgácsolásra és fa kompozitok gyártására (Kharazipour – Kües 2007). A halogénezett szerves vegyületekkel kezelt és festett bútorok is alkalmasak lehetnek anyagukban történő újrahasznosításra, de csak a bevonatok és lakkok eltávolítása után (Kharazipour – Kües 2007). A tartósító anyagokkal kezelt és magas szennyezőanyagtartalmú fatermékek csak energetikai újrahasznosításra alkalmasak, míg a veszélyes PCB-tartalmú fa hulladékokat elkülönítetten szükséges kezelni és ártalmatlanítani (Kharazipour – Kües 2007).

A forgácslap esetében az élettartam meghosszabbításának lehetséges mértéke viszonylag korlátozott a termék típusa, felhasználása, illetve a fogyasztói hozzáállás miatt is Budzinski et al. (2020) szerint a legvalószínűbb termékélettartam növelési lehetőség Németországban 20% és 30% között változik. Az élettartam meghosszabbítása kiegészítő lehetőségnek tekinthető az újrahasznosítás és a kaszkád használat támogatására (Budzinski et al. 2020).

A fahulladék hulladéklerakással történő ártalmatlanításának hatásait illetően az X forgatókönyvsorozat eredményei a legrepresentatívabbak. A modellezési időszakot azért terjesztettük ki 2130-ig, hogy megvizsgáljuk a lerakókon lebomló szerves anyag bomlásának késleltetett hatásait. A fahulladék felezési ideje az IPCC (2006) szerint 35 év, így viszonylag lassan bomlik le, és sok évvel a lerakás után eredményez jelentős metánkibocsátást. Vizsgálatunk azt mutatja, hogy hosszú távon a lerakott fa hulladék mennyiségének növelése aránytalanul magas metánkibocsátást eredményez. Mivel a metán globális felmelegedési

potenciálja 25-szöröse a szén-dioxidénak, így a metánemisszió a CO₂ egyenértékben kifejezett kibocsátásokat nagyon jelentősen növeli meg. A klímacélok figyelembevételével elengedhetetlen, hogy minden lehetséges metán kibocsátást elkerüljünk, ezért a szerves hulladék lerakása a legrosszabb alternatíva (EC 1999, BioReg 2018). A metán energetikai célú visszanyerése vagy akár az elfáklázása is hasznos intézkedés a szilárd hulladék ártalmatlanítás negatív környezeti hatásainak mérséklésére, illetve a hulladéklerakó gáz energetikai felhasználására. Oonk (2012) szerint a legkorszerűbb szigetelő rétegekkel rendelkező lerakók esetében a lerakógáz gyűjtési hatékonysága akár 90% is lehet, a lezárt lerakók esetében a hatékonyság 10-90% között változik, míg az üzemben lévő lerakók esetében 10-80% között változik. Nagyon magas CH₄ visszanyerés esetén a lerakott fahulladék szén-dioxid nyelőként funkcionálhat jelentős további környezeti terhelés nélkül, azonban ez csak rendkívül magas CH₄ visszanyerési arány mellett lehetséges, ami jelenleg sajnos nem jellemző a magyarországi hulladéklerakók esetében.

Eredményeink azt mutatták, hogy egyetlen gyártó által egy év alatt gyártott forgácslap mennyiség is jelentős mennyiségű szén-dioxid képes tárolni a 2020-2050 közötti időszakban. A kombinált forgatókönyvben a 2050-re vetített összes szén-dioxid tárolás -140 kt CO₂ egyenértéknek adódott, ami a magyar HWP tároló 2020. évi szén-dioxid elnyelésének 22%-át teszi ki (Király et al. 2022), és egyenlő az elmúlt 20 évben telepített erdők éves szén-dioxid elnyelésének 12%-ával, valamint a 2010-2020 közötti átlagos LULUCF szénmegkötések 3%-ával (NIR 2022). Számításaink szerint a Kombinált forgatókönyv klímamitigációs potenciálja 28 kt CO₂ eq volt 2050-ig, ami a magyar HWP tároló 2020. évi szén-dioxid megkötésének 5%-át teszi ki (Király et al. 2022), és egyenlő az elmúlt 20 évben telepített erdők éves szén-dioxid megkötésének 2%-ával (NIR 2022). Ezek az összehasonlítások azt mutatják, hogy a vállalati szinten végrehajtott mérséklési intézkedések és klímavédelmi erőfeszítések jelentős hatással lehetnek a nemzeti kibocsátások alakítására 2050-ig. A vállalati szintű klímatudatosság és cselekvés nagy hatású és jelentős eredmények érhetők el technológiai fejlesztésekkel, a termékek élettartamának növelésével, azok újrahasznosításra történő visszagyűjtésével, valamint a fatermékek kaszkád újrahasznosításának és újrahasznosításának előmozdításával.

4.1.5 Következtetések

A 4. fejezetben egy hipotetikus gyártó által 2020-ban gyártott 200 000 m³ forgácslap széntárolását, valamint CO₂ és CH₄ kibocsátásait vizsgáltuk különböző forgatókönyvek szerint. Eredményeink szerint kombinált mitigációs tevékenységekkel érhetünk el legjobb

eredményt. Az egyes mitigációs tevékenységek közül a megnövelt újrahasznosítási arány rendelkezett a legnagyobb kibocsátáscsökkentési potenciállal. Emellett az élettartam meghosszabbítása a forgácslapok kaszkád felhasználását támogató kiegészítő intézkedésnek tekinthető.

Eredményeink azt mutatták, hogy a lerakott fahulladék hosszú távon jelentős metánkibocsátás forrása, ezért célszerű a lerakott fahulladék mennyiségét nullára csökkenteni. A fahulladék égetését előnyben kell részesíteni a hulladéklerakással szemben. A CH_4 hasznosítása jó lehetőség a már lerakott fahulladék kibocsátásának csökkentésére.

Javasolt a falemezek újrahasznosításának és kaszkád felhasználásának elősegítése érdekében környezetünkre és az emberi egészségre nem káros, környezetbarát bevonatok, tartósítóanyagok, kötőanyagok és lángálló anyagok kifejlesztése és alkalmazása.

A Kombinált forgatókönyv intézkedéseihez kapcsolódóan előrejelzett mitigációs potenciál értéke arra enged következtetni, hogy 200 000 m³ forgácslap előállításában, felhasználásában és hulladékkezelésében tapasztalható különbségek is szerepet játszhatnak a 2050-es klímacélok elérésében. Ez mutatja, hogy a vállalati szintű klímatudatosság és környezetvédelmi cselekvés is jelentős szereppel bír a nettó nulla kibocsátási célok elérésében. A fatermékek előállításának technológiai fejlesztése, valamint az újrafelhasználás és újrahasznosítás céljából történő gyűjtése és a körkörös biogazdaság jegyében vállalt gyártó felelősség kiemelten fontos szerepet töltenek be a klímavédelemben.

4.2 A hazai HWP széntároló szénegyenlegének előrejelzése 10 scenárióban

4.2.1 Kivonat

A fatermékek 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. Ebben a fejezetben 10 különböző forgatókönyv alapján 2050-ig vetítjük előre a hazai fatermékek széntárolását, illetve szén-dioxid és metán kibocsátásait annak érdekében, hogy megtaláljuk a legnagyobb klímavédelmi hatással bíró faipari intézkedések kombinációját. Az előrejelzéshez az az FICM HWP részmodellt használtuk, azon belül is a fatermék, a hulladék és az újrahasznosítási modulokat. A vizsgálatunk leglényegesebb következtetése az, hogy további intézkedések nélkül a magyarországi fatermékek 2047-re szén-dioxid nyelőlőből 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 Mt CO₂ egyenérték klímamitigációs potenciál érhető el.

4.2.2 Célkitűzés

Elemzésünkben az FICM HWP részmodellt 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.

4.2.3 Input adatok és paraméterezés

Vizsgálatunkban 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 forgatókönyv, 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 FICM HWP részmodellt 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 10 különböző scenáriót alakítottunk ki. A scenáriókat 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. Fentiek mellett vizsgáltuk a körkörös biogazdasághoz kapcsolódó mitigációs intézkedések hatásait is, 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 scenáriókat 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.

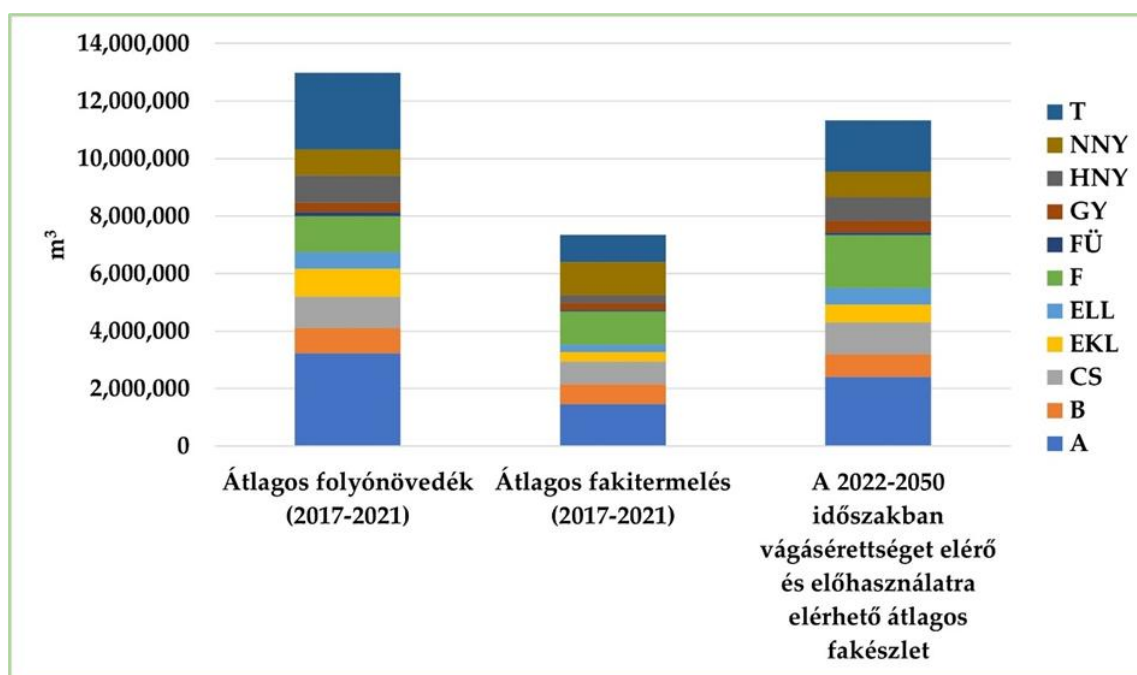
Historikus fatermék termelési adatok

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. Elemzésünkben az import

faanyagból készülő termékeket nem zártuk ki a vizsgálatból, noha azok széntárolását az ÜHG leltár módszertana szerint hazánk nem számolhatja el.

A fakitermelés előrejelzése különböző forgatókönyvek szerint

A scenáriók paraméterezéséhez két különböző fakitermelési előrejelzést használtunk (21. 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 et al. (2023) által készített vágásérettségi korokon alapuló egyszerű hozamelőrejelzés eredményeit használtuk a 2022-2050 közötti időszakban kitermelhető faanyag lehetséges maximális mennyiségére vonatkozóan. Vizsgálatunkban a 2022-2050 időszakra előre jelzett évente kitermelhető faanyag egy évre vonatkozó átlagát használtuk a fatermékek termeléséhez kapcsolódó scenáriók paraméterezéséhez.



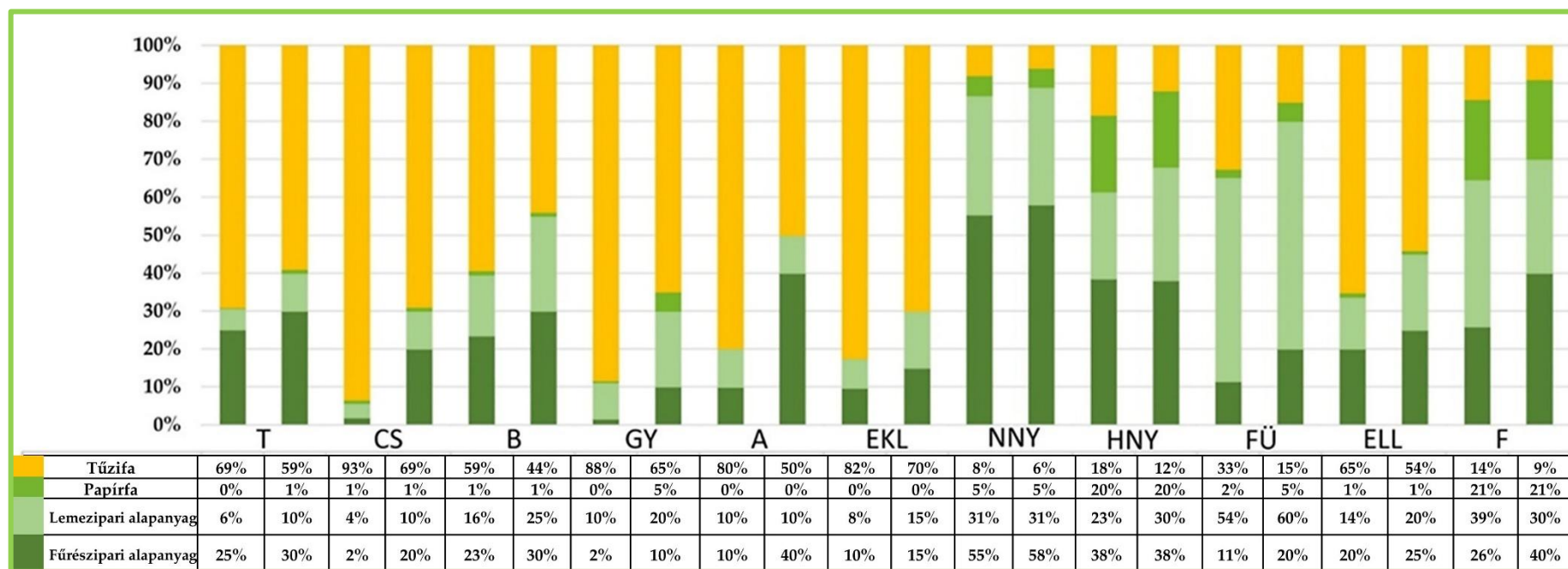
21. ábra: a 2017-2021 közötti átlagos folyónövedék és fakitermelés (NFK, 2023) és a 2022-2050 időszakra prognosztizált évente átlagosan kitermelésre elérhetővé váló előfakészlet mennyisége. (T: tölgy, NNY: nemesnyár, HNY: hazai nyár, GY: gyertyán, FÜ: fűz, ELL: egyéb lágylomb, EKL: egyéb keménylomb, CS: cser, B: bükk, A: akác)

Amint a 21. ábra mutatja, a fakitermelés előre jelzett maximális mennyisége is jóval alatta marad az elmúlt öt évben tapasztalt átlagos éves folyónövedéknek. 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.

A választékszerkezet előrejelzése különböző forgatókönyvek szerint

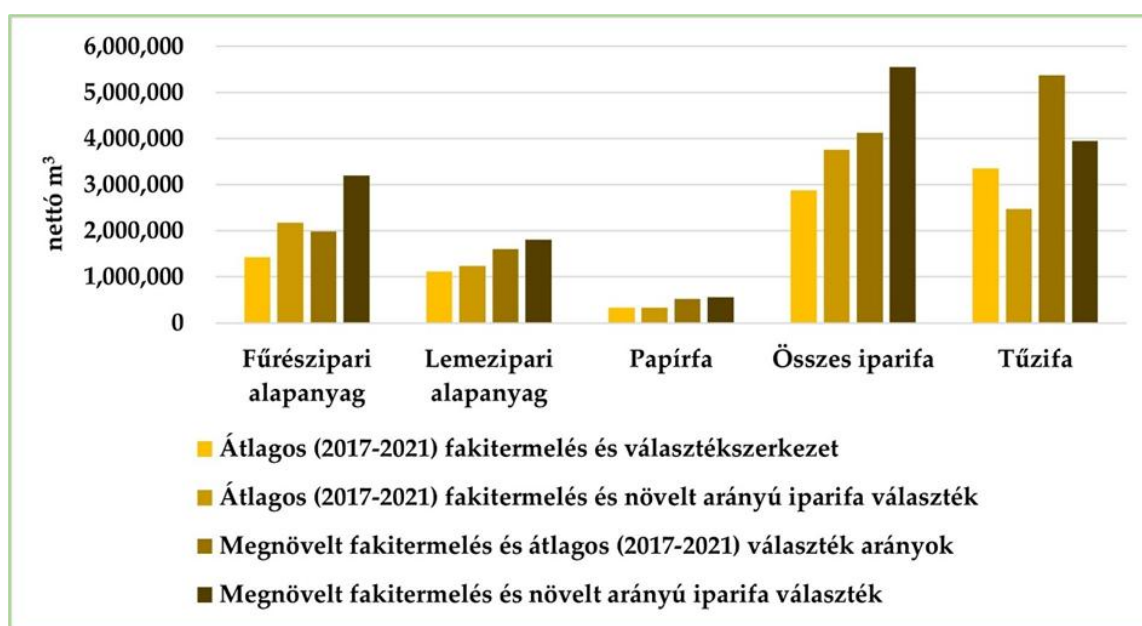
A scenáriók kialakítása során két különböző választékszerkezet-előrejelzést használtunk (22. ábra). A BAU forgatókönyv szerint az Országos Statisztikai Adatgyűjtési Program fajtájcsoportonkénti választék-adatainak öt éves átlagát vettük alapul. Emellett feltételeztünk módosított választékszerkezettel kalkuláló scenáriókat is, amelyekben egyes jelenleg kisebb iparifa kihozattal jellemzett fajtájcsoportok esetében az ipari választékok arányát megnöveltük. Ezzel modelleztük a faipari innováció hatásait, és a szárazságtűrő, kevésbé értékes ipari alapanyagként tartott fajták nagyobb térnyerését az ipari felhasználásban. A módosított választékszerkezettel dolgozó scenáriók esetében a választékszerkezetre vonatkozóan Böröcsök et al. (2023) szakértői becslését használtuk.



22. 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 oszlopok pedig a választékszerkezet becsült lehetséges átalakítását. (T: tölgy, NNY: nemesnyár, HNY: hazai nyár, GY: gyertyán, FÜ: fűz, ELL: egyéb lágylomb, EKL: egyéb keménylomb, CS: cser, B: bükk, A: akác)

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 (változatlan választékszerkezet, illetve növelt ipari választék) alapján 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.

A választékok számítását mind a négy esetben fafajcsoportonként végeztük el, majd az eredményeket összegeztük és így kaptuk meg az egyes választékok teljes nettó mennyiségét (23. ábra).

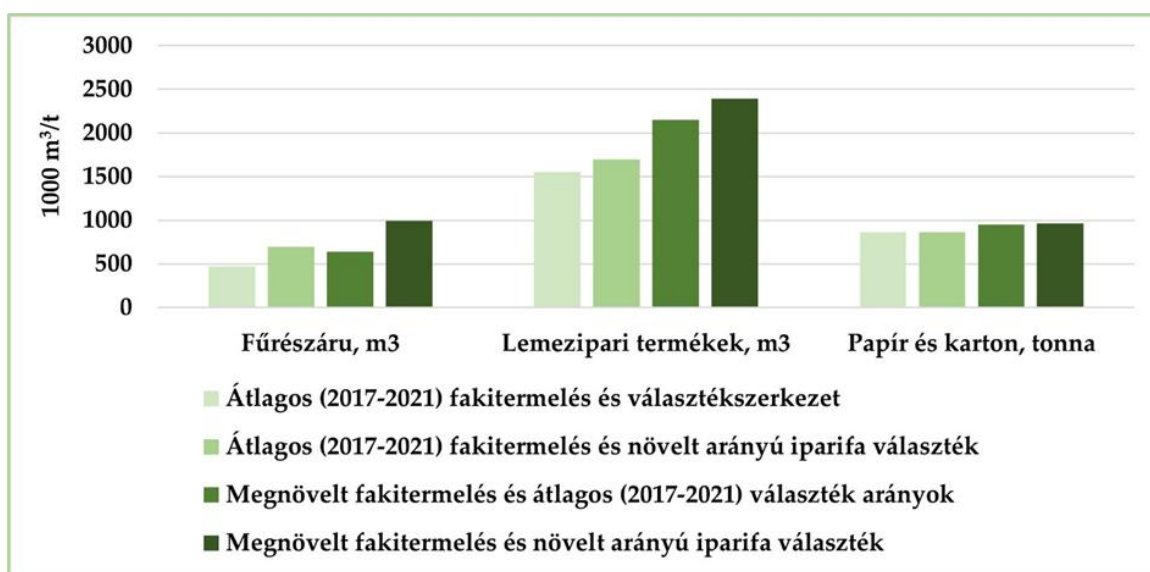


23. ábra: a faválasztékok 2017-2021 közötti átlagos mennyisége, valamint növelt iparifa választékkal, illetve megnövelt fakitermeléssel kalkuláló lehetséges forgatókönyvek alapján készített választék-előrejelzések.

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 24. ábra szemlélteti a négy különböző forgatókönyv szerint előre jelzett termelési adatokat.



24. ábra: a fatermékek 2017-2021 közötti átlagos termelése, illetve megnövelt fakitermeléssel kalkuláló lehetséges forgatókönyvek alapján készített előrejelzések.

A vizsgált scenáriókhoz kapcsolódó széntárolás és kibocsátások modellezésére a HWP részmodellt használtuk. 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 scenárióban 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 scenáriók paraméterezése

Ebben a fejezetben 10 különböző scenáriót vizsgáltunk (7. táblázat és 8. 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 scenáriókat 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. Emellett létrehoztunk kombinált scenáriókat is, melyekkel az intézkedések együttes hatásait értékeltük. Illetve vizsgáltuk a megnövelt fakitermeléssel elérhető, a fatermékekben megvalósuló többlet széntárolás mértékét is

7. táblázat: a scenáriók ismertetése.

Szenárió elnevezése	Szenárió rövid leírása
BAU	BAU
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

8. táblázat: a scenáriók paraméterezése.

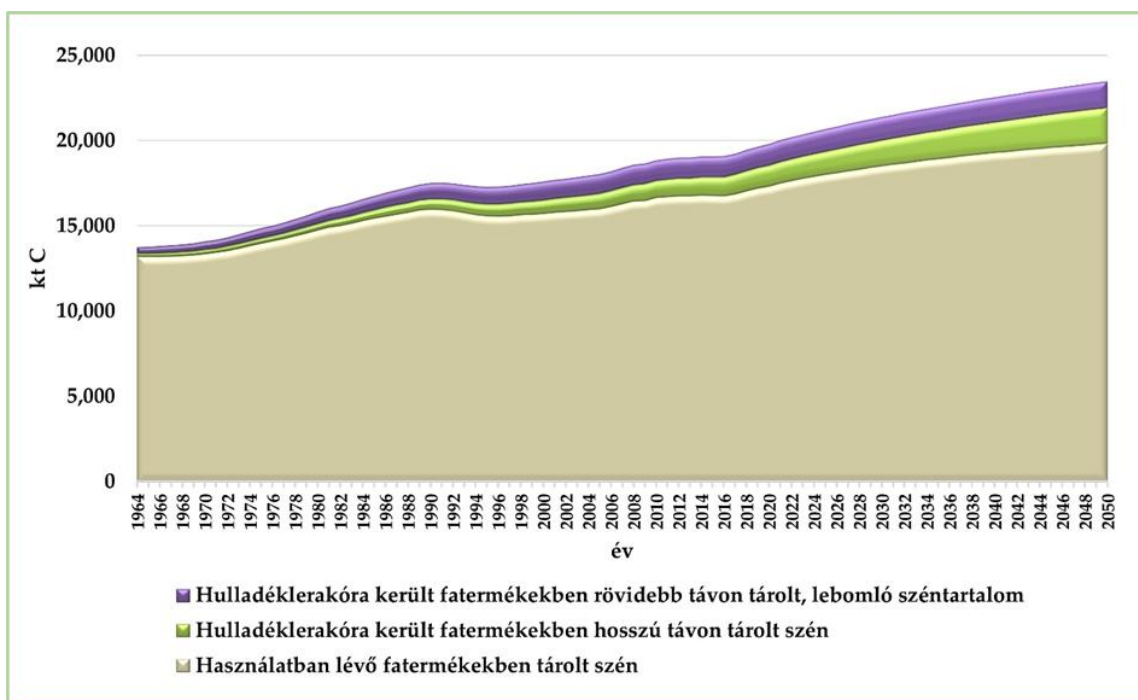
		2022	2050
BAU	Fatermékek termelési volumene	A 2017-2021 évi termelés átlaga.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	35
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	25
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	6
	Lerakott papírhulladék %	10	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25	25
	Újrahasznosított lemezipari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

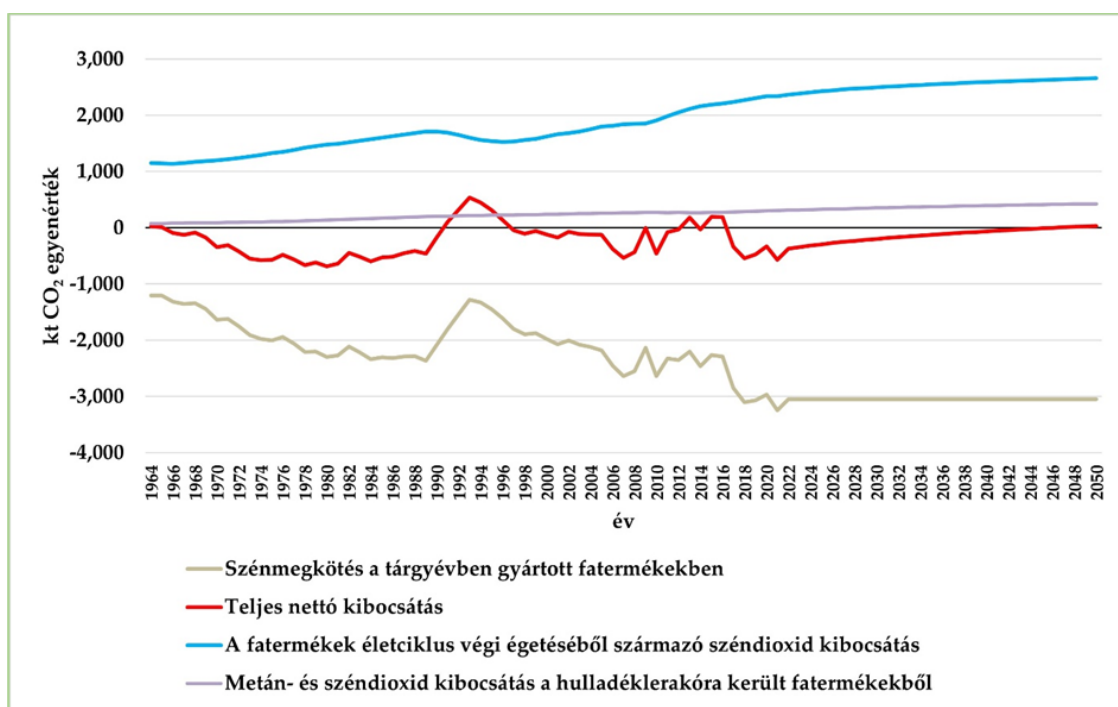
Kombinált intézkedések 2	Fatermékek termelési volumene	Megnövelt termelési volumen a megnövelt ipari választékarány következtében.	
	Felezési idő, fűrészáru	35	50
	Felezési idő, lemezipari termékek	25	35
	Felezési idő, papír és karton	2	2
	Lerakott fahulladék %	6	2
	Lerakott papírhulladék %	10	2
	Újrahasznosított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

4.2.4 Eredmények és megvitatásuk

A 25. ábra mutatja be a BAU scenárió esetében a fatermékek szénkészletének alakulását a vizsgált időszakban. A 26. ábra a szénmegkötés és a kibocsátások évenkénti alakulását szemlélteti szintén a BAU scenárióban. Számításaink szerint 1964 és 2021 között a használatban lévő fatermékek szénkészlete 13.193 kt szénről 17.489 kt szén értékre nőtt. A BAU forgatókönyv szerint a használatban lévő fatermékek szénkészlete 2050-re eléri a 19.804 kt szén értéket. A hulladéklerakókon felhalmozódó hosszú távon tárolt, nem lebontható szén, illetve a lebomló szerves szén is fokozatosan növekszik a BAU forgatókönyv szerint, mivel ebben az esetben a lerakásra kerülő fa- és papírhulladék részaránya változatlan a teljes prognosztizált időszakban. A 26. ábra által szemléltetett piros vonal jelöli a fatermék széntároló teljes nettó szén-dioxid kibocsátásait. A hazai fatermékek a Business as Usual feltételek mellett a 2047-es évre szénelnyelőkké válnak, a 2050-re előre jelzett kibocsátásuk 33 kt szén-dioxid egyenértékre tehető.



25. ábra: a fatermékekben tárolt szén historikus értékei, illetve a BAU scenárió szerinti előre jelzett mennyiségek.

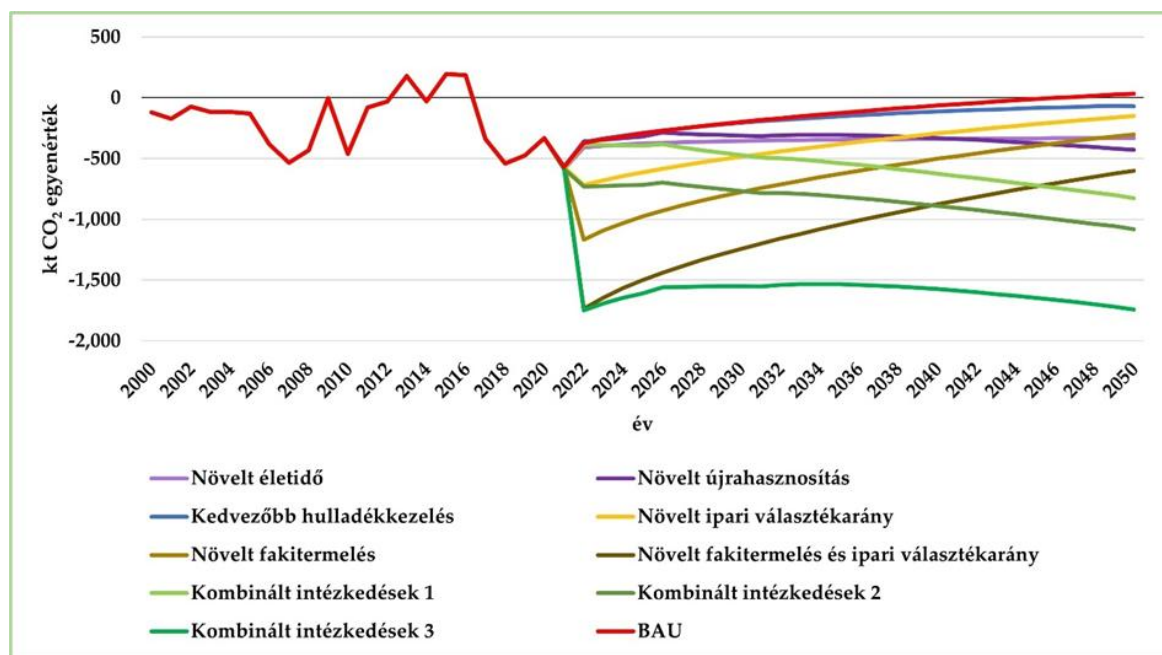


26. ábra: a fatermékekben realizálódó historikus és a BAU scenárió szerint előre jelzett szénmegkötés értékek, és a historikus és előre jelzett szén-dioxid- és metán kibocsátások értékei szén-dioxid egyenértékben kifejezve.

(A negatív értékek szén-dioxid megkötéseket jelölnek, míg a pozitív értékek kibocsátásokat.)

A 10 különböző scenárió prognosztizált kibocsátásait/megkötéseit a **27. 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.

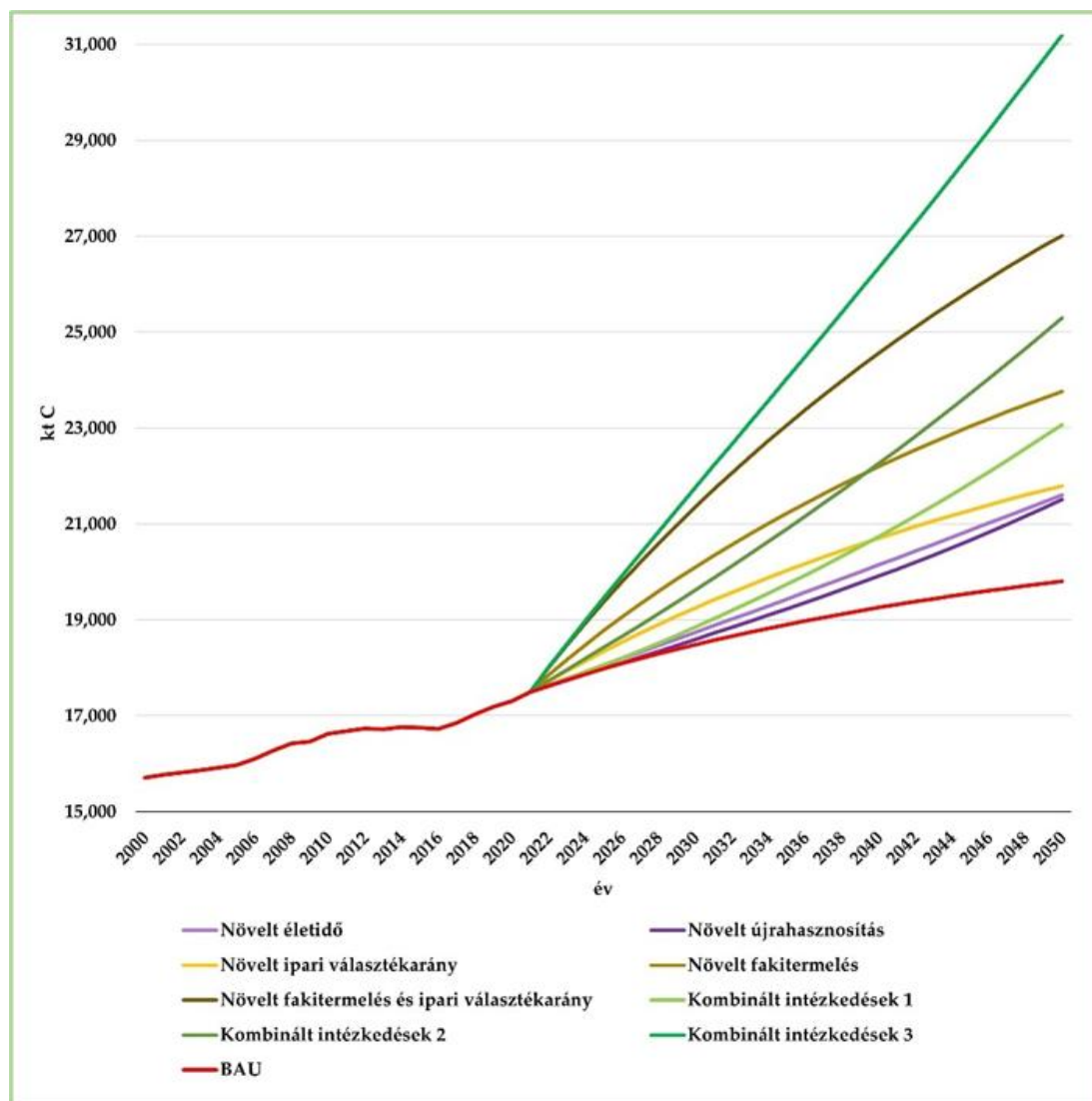
A felezési idő meghosszabbítása gyorsabban csökkenti a kibocsátást, míg az újrahasznosítás kibocsátáscsökkentő hatása hosszabb lefutású. A fatermékek termelési volumenének növelése egyszeri hatást fejt ki, melynek mértéke az időben előre haladva csökken. Ezzel szemben az életidő- és az újrahasznosítás növelése hosszabb távon fejt ki hatását, és a hozzá kapcsolódó kibocsátáscsökkenés mértéke az idő előrehaladtával fokozatosan növekszik.



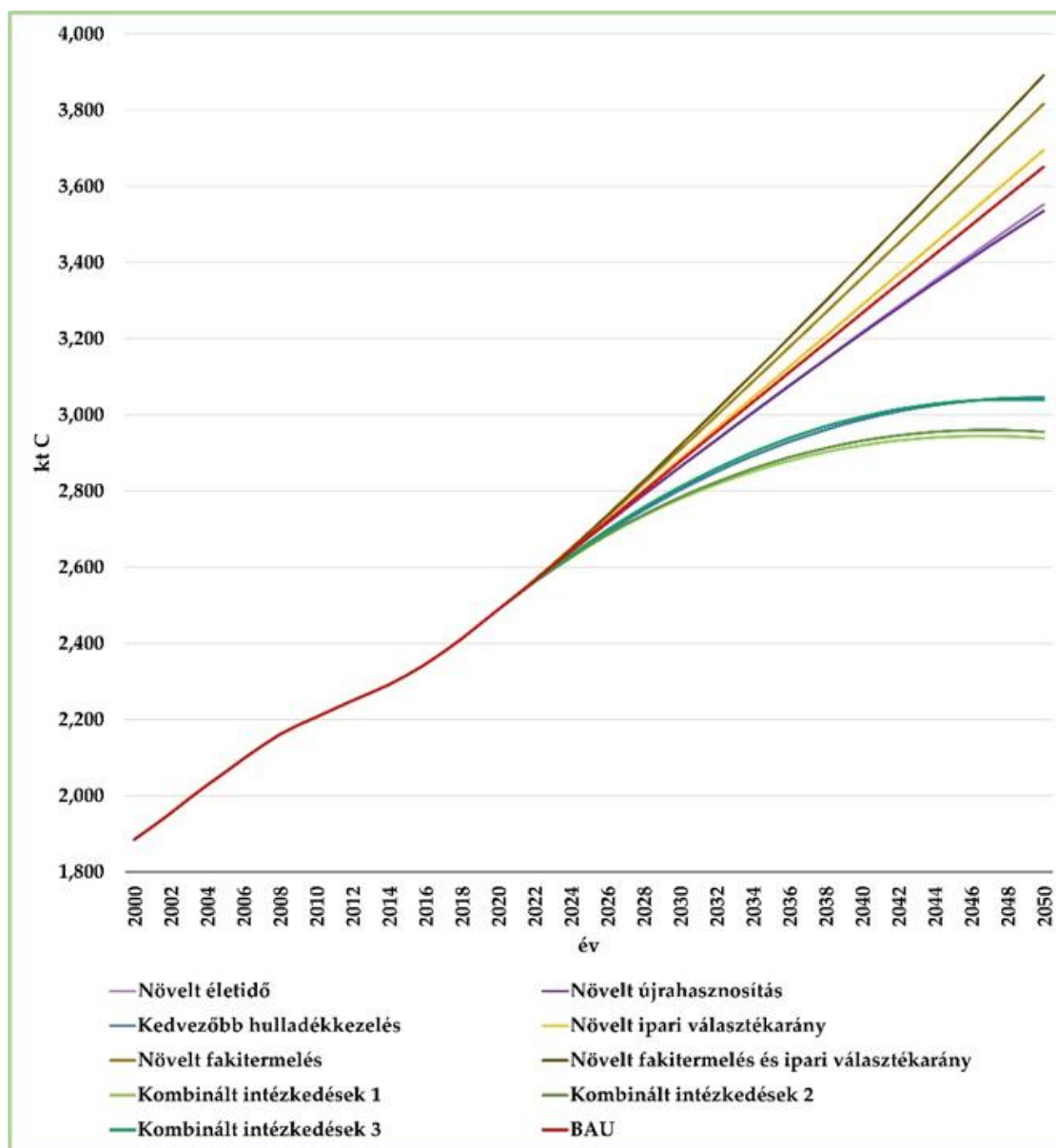
27. ábra: a vizsgált scenáriók teljes nettó szén-dioxid egyenértékben kifejezett emissziói 2050-ig előre vetítve (beleértve a metán, valamint a szén-dioxid emissziókat is). (A negatív értékek szén-dioxid megkötéseket jelölnek, míg a pozitív értékek kibocsátásokat.)

A **28. ábra** a használatban lévő fatermékek teljes szénkészletének alakulását mutatja a különböző forgatókönyvek szerint. A fatermékekben tárolt szén 2050-re előre jelzett mennyisége a BAU forgatókönyv szerint 19.804 kt, míg a kombinált intézkedésekkel (megnövelt ipari választék, megnövelt fakitermelési volumen, megnövelt életidő és

újrahasznosítás) számoló scenárió 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 29. 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.



28. ábra: a használatban lévő fatermékek teljes szénkészlete 2050-ig előre vetítve a vizsgált scenáriók szerint.



29. ábra: a hulladéklerakókon akumulálódó fatermékek szénkészlete a különböző vizsgált scenáriók szerint előrejelítve 2050-ig.

A 30. 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 értéknek. 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 előre jelzett időszakra vonatkozó átlagban elérje

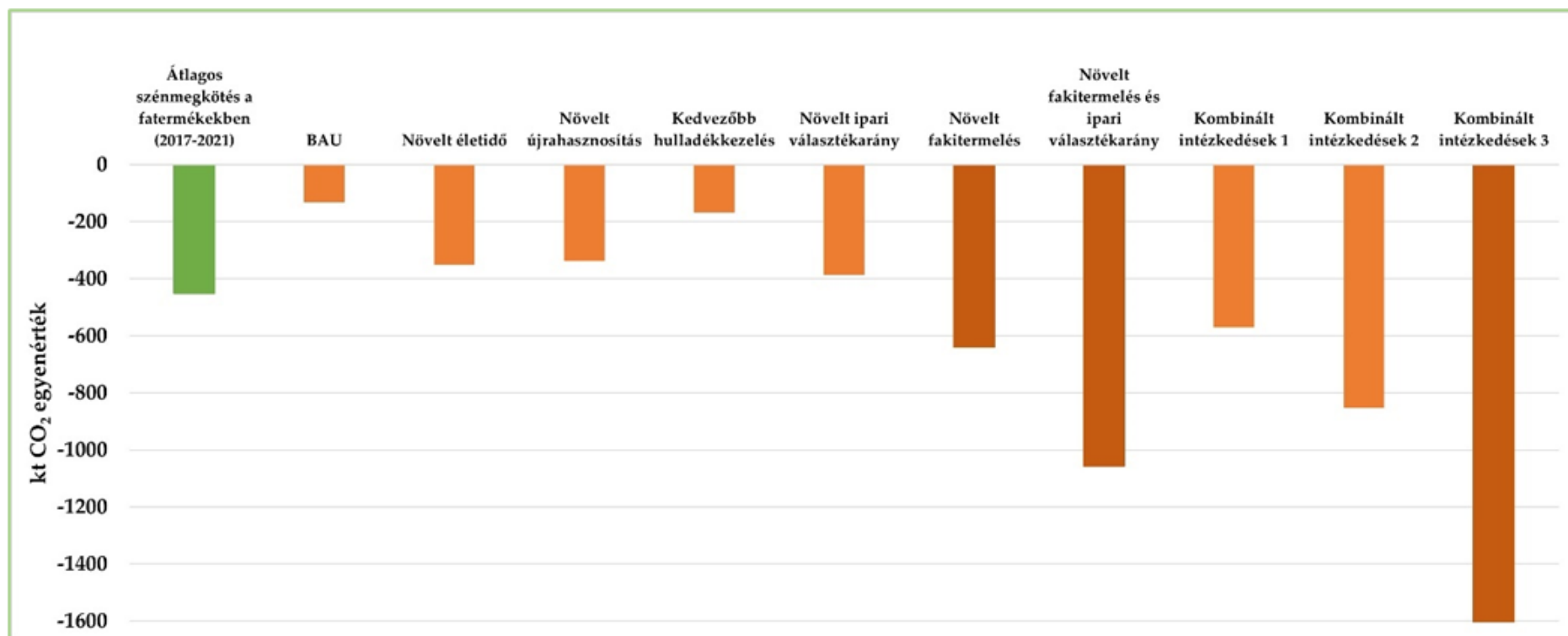
a jelenleg tapasztalható szintet. Az egyes mitigációs intézkedések kombinációi azonban már többlet szénmegkötéseket eredményeznek a fatermék széntárolóban megvalósuló szénmegkötések jelenlegi szintjéhez képest. Ugyanez igaz a megnövelt fakitermelési volumennel számoló scenáriókra is, melyek szintén többlet szénmegkötéseket eredményeznek a jelenlegi szinthez képest.

Az összes vizsgált mitigációs intézkedés együttes alkalmazása és a fakitermelés szintjének növelése összességében 1.604 kt CO₂ egyenérték éves szénmegkötést eredményezne a fatermékekben, amely a jelenlegi megkötés értékének 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 CO₂ egyenérték, mely 1,9-szerese az elmúlt öt évben tapasztalt szénmegkötési szintnek.

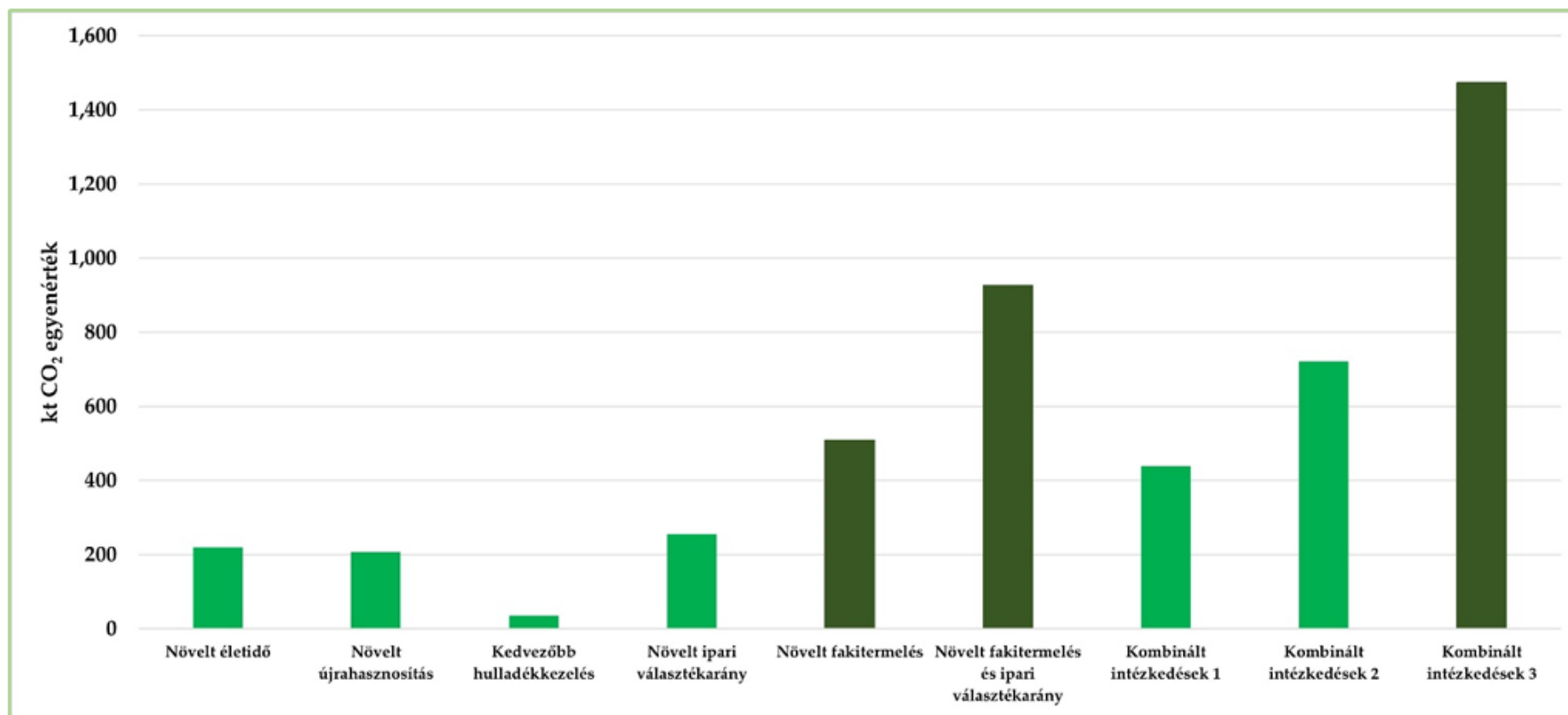
Végül meghatároztuk az egyes scenáriók 2022-2050 időszakra vonatkozó átlagos éves klímamitigációs potenciálját (**31. ábra**). A mitigációs potenciál az adott scenárióhoz tartozó átlagos szénmegkötési érték és a BAU scenárióhoz tartozó átlagos szénmegkötési érték különbségeként számítható. Az életidő növeléséhez, az újrahasznosítás növeléséhez, illetve az ipari választékarány növeléséhez kapcsolódó mitigációs potenciál értékek közel azonos nagyságúak.

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.

A fakitermelés növelésével és a különféle mitigációs intézkedések kombinálásával lehet elérni a vizsgálat szerint a legnagyobb mitigációs hatást a fatermék széntároló tekintetében (**31. ábra**).



30. ábra: a hazai fatermékek 2017-2021 közötti átlagos nettó szénmegkötése és a különböző scenáriók 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 scenáriókat. A negatív értékek szén-dioxid megkötéseket jelölnek.)



31. ábra: a vizsgált scenáriók átlagos éves klímamitigációs potenciálja a BAU scenárióhoz képest. (Az értékek azt mutatják, hogy mennyi addicionális szénmegkötést lehet évente elérni az egyes intézkedések és intézkedéskombinációk segítségével a BAU szintjéhez képest. A sötétzöld oszlopok jelölik a 2017-2021 időszak átlagához képest megnövelt fakitermeléssel jellemzett scenáriókat.)

4.2.5 Következtetések

Elemzésünkben 10 különböző forgatókönyv szerint vetítettük előre a hazai fatermékek széntárolását és szén-dioxid-, 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.

Vizsgálatunk egyik fő következtetése az, hogy további mérséklő intézkedések nélkül (BAU szcenárió) a magyar fatermék széntároló (beleértve a használatban lévő fatermékeket és a hulladéklerakón lévő fatermékeket is) 2047-re szénnyelőből szén-dioxid kibocsátóvá válik. Így a folyamatos szénelnyelés fenntartásához, illetve a megkötések növeléséhez mindenképpen további mitigációs intézkedések válnak szükségessé. E cél elérése érdekében a leghatékonyabb intézkedések a termékek élettidejének 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 élettidő 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 élettidő 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 növelt fakitermeléssel számoltunk, hiszen csak

azokat az erdőket tekintettük kitermelhetőnek az alkalmazott 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 fakitermelés volumenének növelése nélkül is éves szinten a 2022-2050 időszakban a BAU scenárióhoz viszonyítva 721 kt CO₂ többlet megkötés érhető el a hazai faiparban a körkörös biogazdaság elvei szerint megvalósított mitigációs intézkedések kombinációjával. Ez az éves átlagos mitigációs potenciál jóval meghaladja a hazai fatermékek jelenlegi éves szén-dioxid megkötését, és összesen 20.922 kt CO₂ egyenérték többlet szénmegkötést jelent a 2022-2050 közötti időszakban a BAU forgatókönyvhöz viszonyítva. Ez azt jelenti, hogy 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-ig kitűzött klímacélok elérésében.

A megnövelt fakitermeléssel számoló forgatókönyvek esetében éves szinten átlagosan maximum 1.473 kt CO₂ egyenérték mértékű mitigációs potenciál érhető el, ami 42.711 kt CO₂ 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, széntárolás érhető el a fatermékekben.

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 biomassa az egyik legrugalmasabb megújuló energiaforrás, mivel tárolható, és villamosenergia, hőenergia, valamint üzemanyag előállítására is alkalmas (Sartori et al. 2006). Az iparifa választékok arányának növelésekor fontos az új tűzifaforrások felkutatása. A megnövekedett fakitermeléssel számoló forgatókönyvek esetében a tűzifa prognosztizált mennyisége nem csökken a 2017-2021-es átlagos tűzifa-kitermeléshez képest (23. ábra). Ezzel szemben a megnövelt iparifa választékokkal és változatlan fakitermelési volumennel számoló forgatókönyv esetében a tűzifa prognosztizált mennyisége a 2017-2021-es átlag alatt marad (36. 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, ha nem alkalmasak újrafelhasználásra, vagy nyersanyagként történő újrahasznosításra (Verkerk et al. 2022).

Végezetül fontos megjegyezni, hogy ebben a vizsgálatban 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 vizsgálatban számított összes nettó kibocsátás nem egy az egyben összevethető a Nemzeti Üvegházgáz Leltárjelentésben, a LULUCF szektorban 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. A hulladéklerakóról származó kibocsátásokat azért vettük figyelembe, hogy a szektorok közötti (LULUCF és hulladék szektor) hatásokat minél teljesebb mértékben fel tudjuk térképezni, illetve, hogy a fatermékek teljes életciklusát vizsgáljuk, elhagyva az azonnali oxidáció általi egyszerűsítést, mely ezt nem tette volna lehetővé.

4.3 A hazai HWP széntároló szénegyenlegének és termékhelyettesítési potenciáljának historikus vizsgálata és előrejelzése megnövekedett hazai feldolgozás esetén

4.3.1 Kivonat

Ebben a fejezetben az FICM HWP részmodell fatermék, hulladék, valamint újrahasznosítási és termékhelyettesítési moduljait használtuk, ennek segítségével vizsgáltuk a HWP széntároló historikus szénegyenlegét, valamint két különböző forgatókönyv szerint jeleztük előre a széntároló jövőbeli szénmérlegét. Megbecsültük a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátások mennyiségét is. Eredményeink szerint az 1985-2021 közötti időszakban a HWP széntároló átlagos éves szintű nettó szénegyenlege a helyettesítési hatásokkal együtt összesen -3 800 kt CO₂ eq volt. Ebben az időszakban az erdészeti és faipari szektorhoz kapcsolódó klímamitigációs hatás 49%-a az erdőkben realizálódott in situ széntárolás révén, 4%-át a fatermékek széntárolása tette ki, 47%-a pedig a termék- és energiahelyettesítésnek volt betudható. Előrejelzésünk szerint a HWP széntároló nettó szénegyenlege a helyettesítési hatásokat beleértve 2050-ig elérheti a -14 994 kt CO₂ egyenértéket, amennyiben megvalósul a hazai fafeldolgozó ipar intenzifikációja. Ez azt jelenti, hogy a termékhelyettesítési hatások megháromszorozódhatnak, míg a HWP tároló nettó szénmegkötése a múltbeli értékek ötszöröse lehet.

4.3.2 Célkitűzés

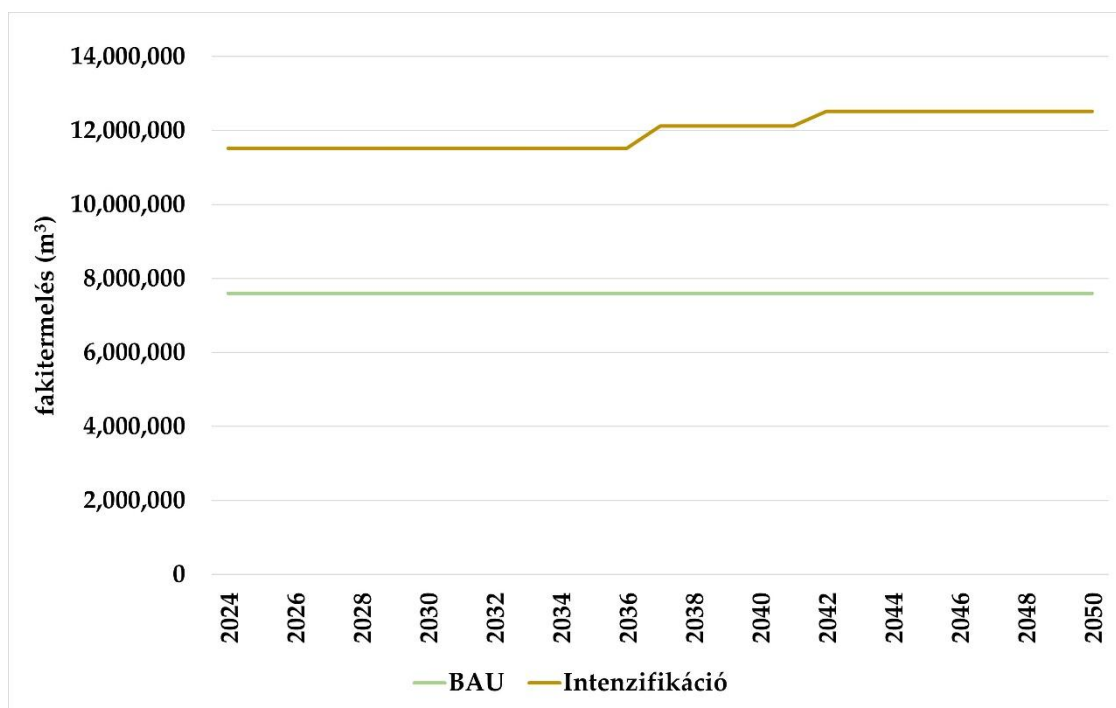
Vizsgálatunkban a hazai fatermékek szénmérlegét és termékhelyettesítő hatásait vizsgáltuk az 1985-2020 historikus időszak vonatkozásában, illetve 2020 és 2050 között két scenárióban, amihez az FICM HWP modellt használtuk.

4.3.3 Input adatok és paraméterezés

A modellezés során az Európai Erdészeti Intézet termékhelyettesítést vizsgáló átfogó jelentésében (Leskinen et al. 2018) megadott átlagos termékhelyettesítési tényezőket használtuk. Energiahelyettesítés esetében pedig a Myllyviita et al. (2021) által megadott energiahelyettesítési tényezőt alkalmaztuk, melyet Knauf et al. (2015, 2016), Härtl et al. (2017), valamint Schweinle et al. (2018) is megerősít. A számítás részletesebb leírása az Anyag és Módszer fejezetben a modell matematikai leírásánál szerepel. A modellezés során az import

faanyagból gyártott termékeket nem vettük figyelembe az IPCC módszertanával összhangban (IPCC 2013, 2019).

A fatermékek termelési statisztikáit a Király et al. (2022) által megadottak szerint használtuk, összhangban a hazai ÜHG leltárral (NIR 2023). A HWP szénegyenleg és a helyettesítési hatások előrejelzésére két forgatókönyv szerint használtunk fakitermelési előrejelzéseket (32. ábra). A BAU scenárió változatlan fakitermelési szintet feltételezett a teljes előrejelzési időszakban (2050-ig), míg az Intenzifikációs forgatókönyvben a Borovics et al. (2023) által meghatározott maximális fahasználati potenciál értékeket alkalmaztuk. Az 9. táblázat részletezi a két forgatókönyvben használt modellezési paramétereket. Az Intenzifikációs forgatókönyvben azt feltételeztük, hogy az összes kitermelt faanyag hazánkban kerül feldolgozásra.



32. ábra: Fakitermelési előrejelzések a két modellezett scenárióban (BAU és Intenzifikáció).

9. táblázat: Forгатókönyv-paraméterezés. (A 2022-es évre mindkét forгатókönyvben BAU paramétereket használtunk. Az Intenzifikációs forгатókönyvben a paraméterek fokozatosan változtak 2022 és 2050 között).

2050		
BAU	HWP termelés	Az utolsó 5 historikus év átlaga.
	Fűrészáru felezési ideje	35
	Laptermékek felezési ideje	25
	Papír és karton felezési ideje	2
	Lerakott fahulladék %	6
	Lerakott papírhulladék %	10
	Újrahasznosított fűrészáru %	25
	Újrahasznosított lap %	25
	Újrahasznosított papír és karton %	71
	Metán visszanyerés %	7
Intenzifikáció	HWP termelés	Megnövekedett termelés a megnövelt fakitermelés és a módosított választékarány szerint, illetve feltételezve, hogy az összes kitermelt faanyag hazánkban kerül feldolgozásra.
	Fűrészáru felezési ideje	50
	Laptermékek felezési ideje	35
	Papír és karton felezési ideje	2
	Lerakott fahulladék %	2
	Lerakott papírhulladék %	2
	Újrahasznosított fűrészáru %	60
	Újrahasznosított lap %	60
	Újrahasznosított papír és karton %	90
	Metán visszanyerés %	60

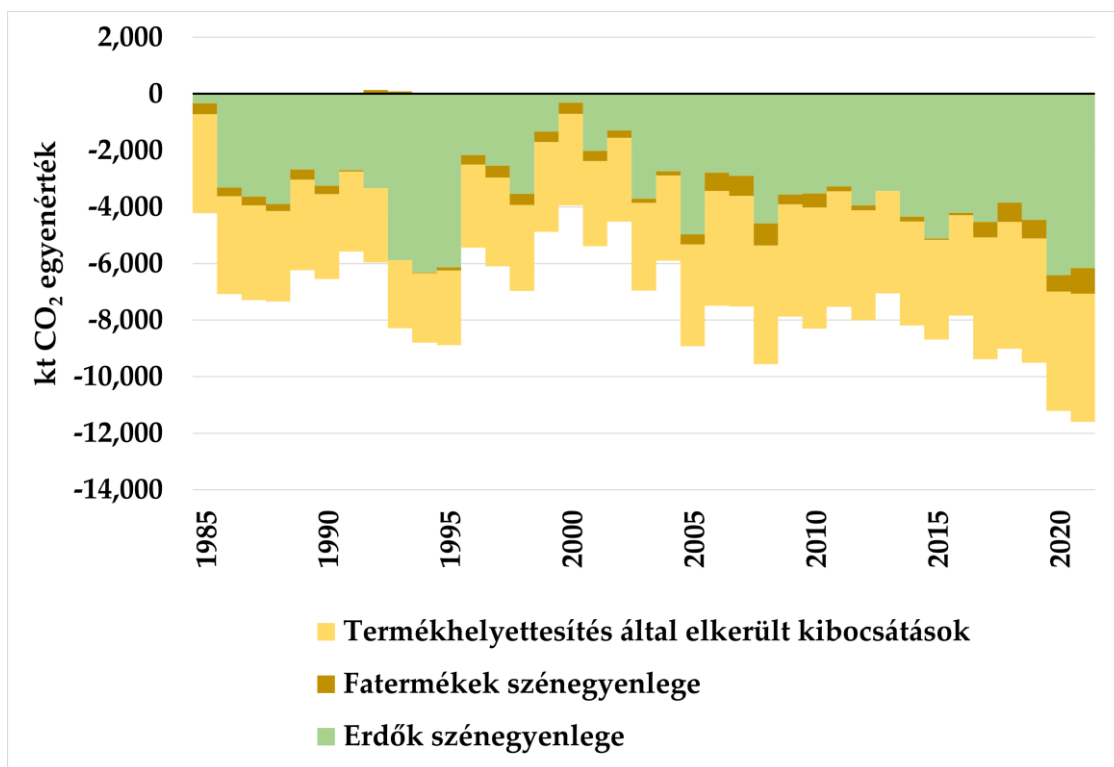
A BAU forgatókönyvben a HWP termelést a választékszerkezetre vonatkozó historikus adatok (OSAP 2022) alapján becsültük meg, míg az Intenzifikációs forgatókönyvben Borovics et al. (2024) szakértői becslése szerint megnövelt ipari választékarányt alkalmaztunk (**10. táblázat**). Az Intenzifikációs forgatókönyvben azt feltételeztük, hogy minden belföldön kitermelt faanyagot belföldön dolgoznak fel, és nem történik export. A gyártási melléktermékek és hulladékok arányának becsléséhez a Németh (2012) által megadott értékeket használtuk.

10. táblázat: Választékarányok a BAU (2017-2021 átlaga) és az Intenzifikációs (Borovics et al. 2024) scenárióban.

	T	CS	B	GY	A	EKL	NNY	HNY	FÜ	ELL	F
BAU											
Fűrészáru	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%
Intenzifikáció											
Fűrészáru	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%

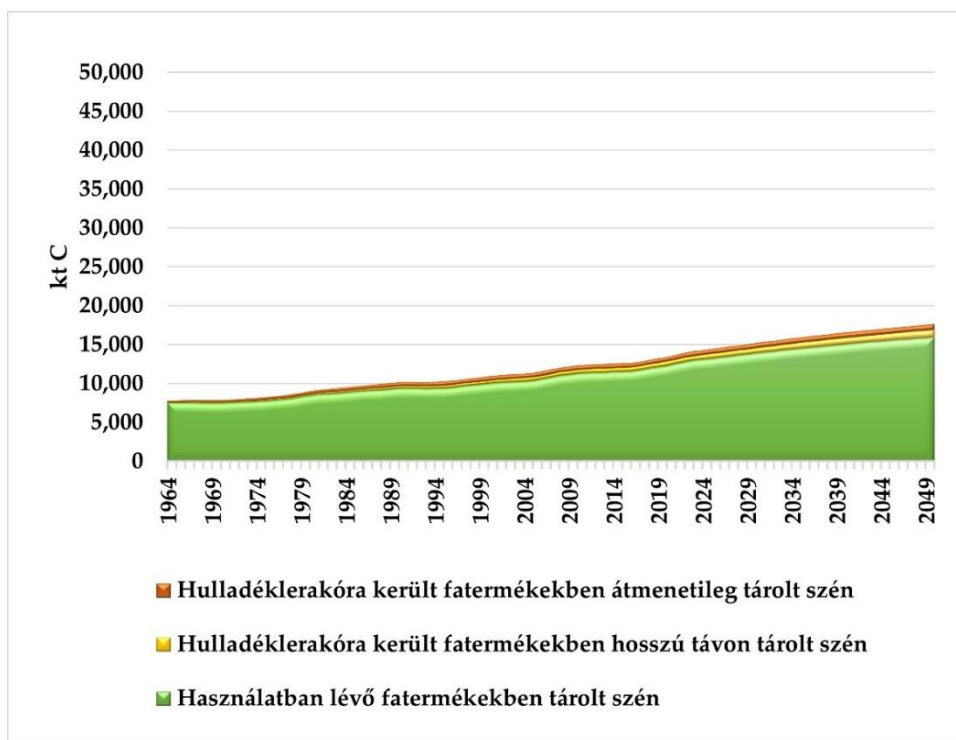
4.3.4 Eredmények és megvitatásuk

Eredményeink szerint a hazai HWP széntároló átlagos nettó kibocsátása az 1985-2021 közötti időszakban -327 kt CO₂ eq volt, míg a helyettesítéssel elkerült átlagos kibocsátás értéke -3 474 kt CO₂ egyenértékre tehető ugyanebben az időszakban (**33. ábra**). A hazai ÜHG leltár szerint a magyar erdők átlagos nettó szénmegkötése (beleértve az erdőtelepítéseket, a maradó erdőket és a kivonásokat) -3 597 kt CO₂ volt ugyanebben az időszakban. Így összesítve az erdészeti és faipari ágazat nettó szénegyenlegének átlaga -7 398 kt CO₂ eq volt. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált historikus időszakban az erdészeti és faipari szektorhoz kapcsolódó klímamitigációs hatás 49%-a az erdőkben történő széntárolás révén valósult meg, míg 4%-a a fatermékek széntárolásának, 47%-a pedig a termék- és energiahelyettesítésnek volt köszönhető.

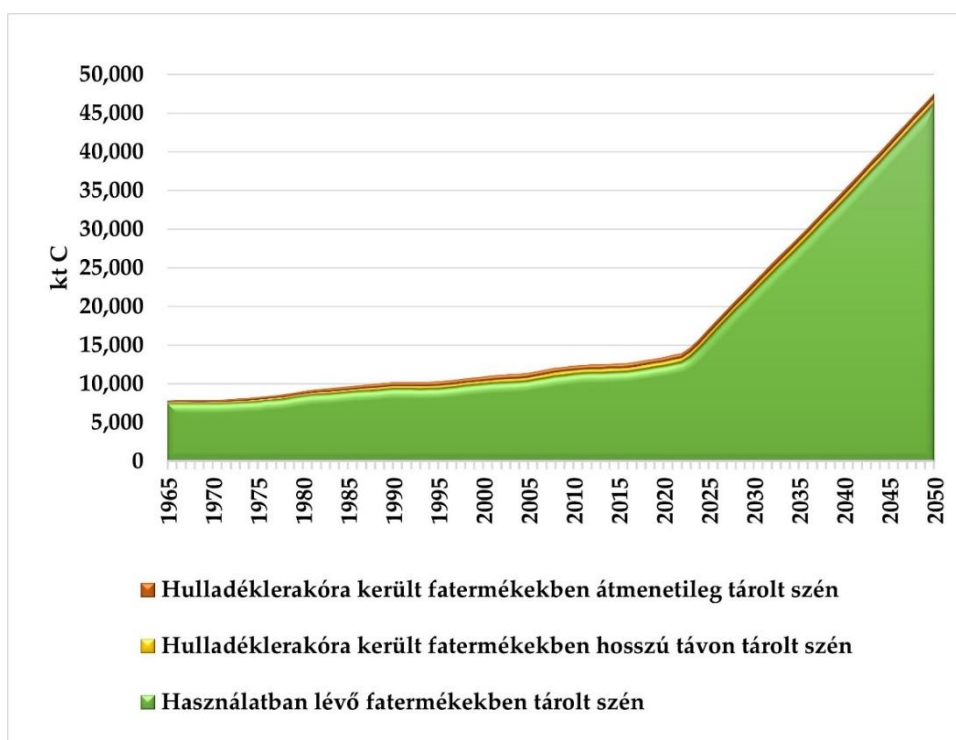


33. ábra: A hazai erdők historikus nettó szénegyenlege az ÜHG leltár szerint, illetve a modellezett nettó HWP szénegyenleg, valamint a termék- és energiahelyettesítés révén elkerült kibocsátások. (A negatív számok a szénmegkötést vagy elkerült, míg a pozitív számok a kibocsátást jelölnék.)

A modellezési eredmények szerint a használatban lévő fatermékek szénkészlete 12 511 kt C vol 2021-ben, míg a hulladéklerakókon tárolt fahulladék széntartalmát 1 168 kt C-re becsültük. A BAU forgatókönyv szerint a HWP-ben tárolt szén mennyisége 2050-ben 15 930 kt C-re becsülhető. A hulladéklerakókon tárolt szén pedig az előrejelzések szerint 1 695 kt C lesz (34. ábra). Az Intenzifikációs forgatókönyv szerint a fatermékekben tárolt szén mennyisége 2050-ben 46 112 kt C, a hulladéklerakókon tárolt szén pedig 1 395 kt C lesz (35. ábra). Ez azt jelenti, hogy az Intenzifikációs forgatókönyv esetén a HWP-ben tárolt szén mennyisége 2050-re közel négyszerese lehet a BAU forgatókönyv szerinti széntárolásnak.



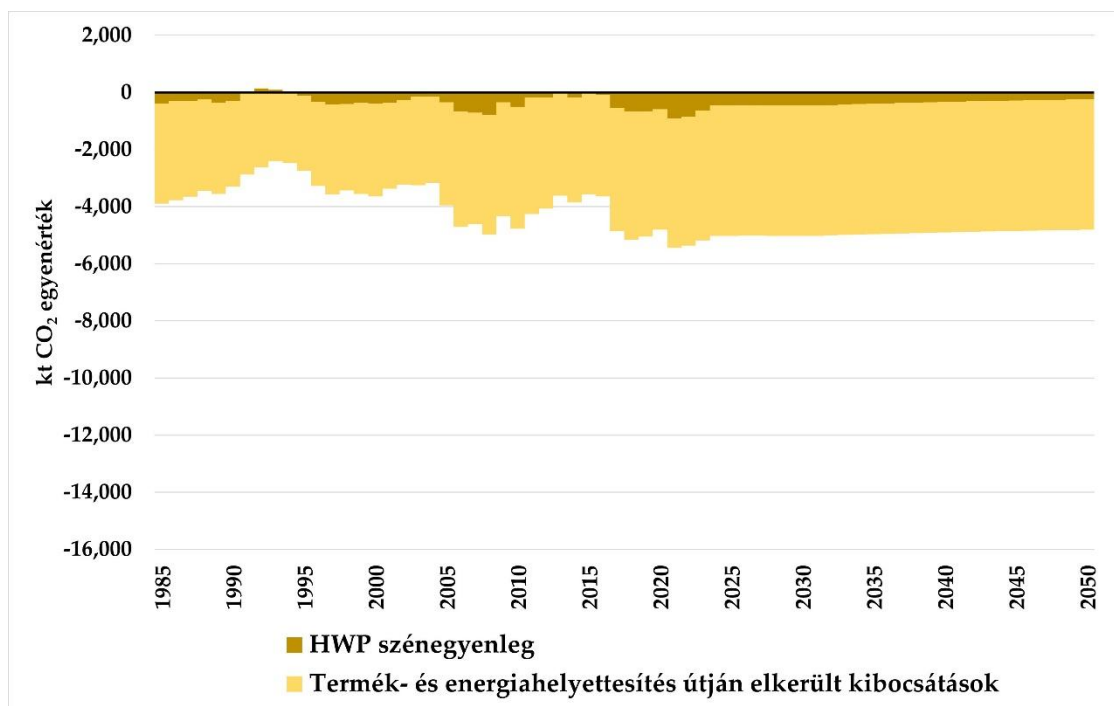
34. ábra: Historikus és prognosztizált szénkészletek a HWP széntárolóban és a hulladéklerakókon a BAU scenárió szerint.



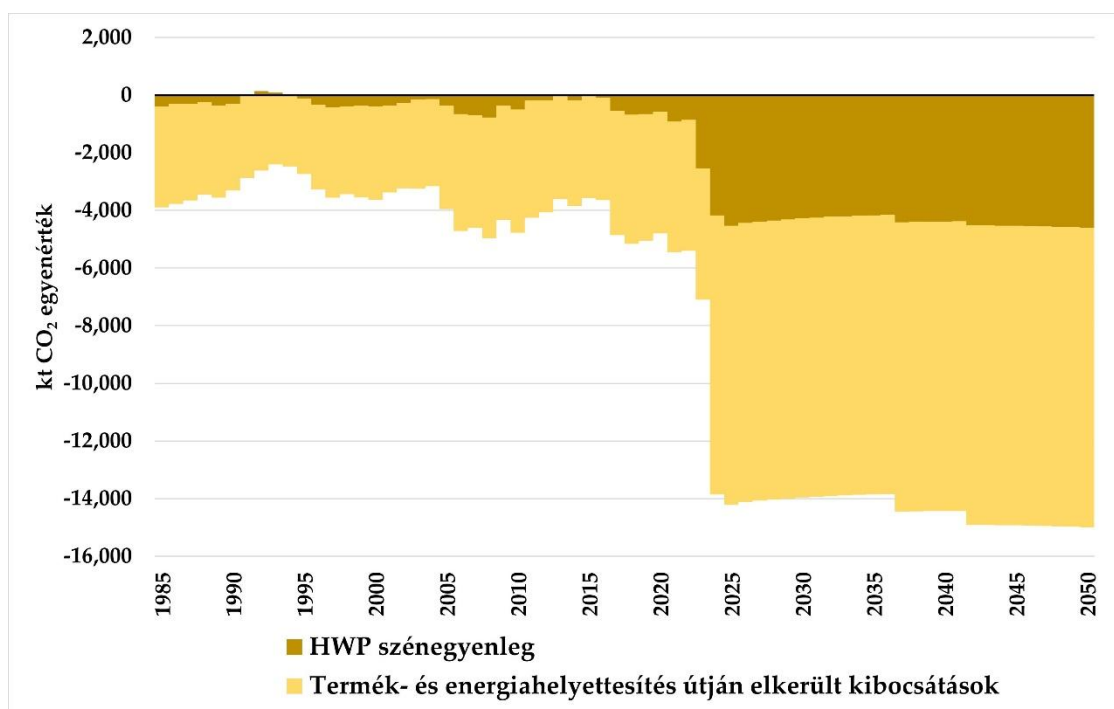
35. ábra: Historikus és prognosztizált szénkészletek a HWP széntárolóban és a hulladéklerakókon az Intenzifikációs scenárió szerint.

A BAU forgatókönyve szerint a HWP széntároló nettó szénelnyelése -905 kt CO₂ eq/év mennyiségről -242 kt CO₂ eq/évre csökken 2050-re. A termék és energiahelyettesítés útján elkerülhető kibocsátások a projekció időszakában -4 529 kt CO₂ eq és -4 566 kt CO₂ eq között mozognak a BAU scenárióban. A magyar faipar teljes nettó szénmérlege a BAU forgatókönyv szerint 2050-ben összesen -4 809 kt CO₂ eq (36. ábra). Az Intenzifikációs forgatókönyv szerint a HWP széntároló nettó szénegyenlege 2050-ig eléri a -4 607 kt CO₂ eq értéket, míg a termék- és energiahelyettesítéssel elkerült kibocsátás -4 529 kt CO₂ egyenértékről -10 387 kt CO₂ egyenértékre emelkedik (37. ábra). Ez azt jelenti, hogy a magyar faipar összesített nettó szénmérlege az Intenzifikációs forgatókönyv szerint 2050-ben összesen -14 994 kt CO₂ eq.

Eredményeink összhangban vannak Parobek et al. (2019) eredményeivel, akik arra a következtetésre jutottak, hogy a megnövekedett ipari faválaszték és a belföldi ffeldolgozás előnyben részesítése jelentősen növelheti a szénmegkötést és a HWP széntároló szénmérlegét kedvező irányban befolyásolhatja a fakitermelés növelése nélkül is; vizsgálatukban 273%-os növekedést prognosztizáltak a HWP tároló szénmegkötésében a fakitermelés növelése nélkül. Eredményeink szerint a megnövelt ipari faválaszték arány, a hazai feldolgozás és a megnövelt fakitermelés következtében a HWP nettó szénmegkötése és a helyettesítési hatások együttesen 275%-os növekedést érnek el. Becslésünk szerint a termékhelyettesítési hatások által elkerült kibocsátások mértéke 2050-ig 299%-ra növelhető. A HWP nettó szénmegkötésének előrejelzett növekedése 2050-re még nagyobb arányú, a HWP széntároló nettó szénmegkötése az Intenzifikációs forgatókönyv szerint ötszöröse a BAU forgatókönyv esetében prognosztizálnak.



36. ábra: Historikus és prognosztizált szénmérleg, illetve a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátások a BAU scenárió szerint. (A negatív számok szénmegkötést vagy elkerült kibocsátást, míg a pozitív számok kibocsátást jelölnek.)



37. ábra: Historikus és prognosztizált szénmérleg, illetve a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátások az Intenzifikációs scenárió szerint. (A negatív számok szénmegkötést vagy elkerült kibocsátást, míg a pozitív számok kibocsátást jelölnek.)

4.3.5 Következtetések

Tanulmányunkban felmértük a hazai faipar klímamitigációs potenciálját, amely a fatermékek széntárolásával és a termék- és energiahelyettesítéssel elkerülhető kibocsátásokkal együttesen érhető el. Eredményeink szerint a magyar HWP tároló nettó szénmegkötése jelentősen növelhető az fakitermelés növelésével, az ipari faválasztékok arányának növelésével és az összes kitermelt faanyag hazai feldolgozásával.

A faanyag hazai feldolgozhatóságának biztosítása érdekében jelentős faipari innováció, és a feldolgozó kapacitás jelentős bővítése elengedhetetlen, enélkül a számításaink eredményei pusztán hipotetikus lehetőségeket szemléltetnek.

4.4 A háztartásokban elégetett fahulladék mennyiségének és energiatartalmának becslése az FICM HWP modell output adatai alapján

4.4.1 Kivonat

A hazai erdészeti és faipari ágazatban számos vitát generált a Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (REKK) 2009-ben publikált tanulmánya, mely szerint a szilárd energetikai célú biomassa felhasználását és forrásait szembe állító mérlegben jelentős hiány áll fenn. A REKK tanulmány azt állította, hogy ezt a hiányt jelentős mértékű illegális fakitermeléssel lehet magyarázni. A Bio Screen CCE Projekt keretében a korábbi tanulmányt frissítették, amely a keresleti és kínálati oldalak összevetése alapján 37,2 PJ (43%) forrás oldali hiányt mutatott ki a szilárd energetikai biomassa mérlegben a 2019-es évre vonatkozóan. Jelen tanulmányunkban azt vizsgáltuk, hogy a Bio Screen CCE Projekt által becsült 37,2 PJ értékű hiánytétel mekkora része származhat háztartási fahulladékok égetéséből. Vizsgálatunkhoz a Forest Industry Carbon Modell HWP részmodelljét használtuk. Becslésünk szerint több, mint 1,2 millió m³ fahulladék kerülhet évente eltüzelésre a háztartásokban. A 2019-es évben az eltüzelésre kerülő fahulladék energiatartalma a számításaink szerint 14 PJ-ra tehető. Ez azt jelenti, hogy a Bio Screen CCE Projekt 2021-es jelentésében kimutatott hiány 39%-a a háztartási fahulladékok égetésével magyarázható.

4.4.2 Háttér

A hazai erdészeti és faipari ágazatban számos vitát generált a Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (REKK) 2009-ben publikált tanulmánya. E tanulmány az Országos Erdőállomány Adattár (OEA), valamint az ENSZ Élelmezésügyi és Mezőgazdasági Világszervezet (FAO), a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) és a Magyar Energia Hivatal (MEH) adatait elemezve arra a következtetésre jutott, hogy a biomassa felhasználás és forrás oldali mérleg adatai között jelentős hiány áll fenn. A tanulmány megállapítja, hogy a MEH és KSH statisztikai adatai alapján kimutatható szilárd biomassa felhasználás meghaladja az OEA által jelentett tűzifa kitermelés mértékét. A 2009-es REKK tanulmány Szerzői e hiányt 3-3,5 millió nettó m³ mennyiségűre becsülik, és azt a következtetést vonják le, hogy ez a háztartások tűzifa felhasználásában kimutatott mennyiség illegális fakitermelésből származik. Megállapítják továbbá erre alapozva azt is, hogy az OEA statisztikai adatai megbízhatatlanok.

A Fagazdasági Országos Szakmai Szövetség (FAGOSZ) nyolc oldal terjedelmű vélemény (Möcsényi 2009) megfogalmazásával reagált a REKK tanulmány kijelentéseire. Ebben megállapítja, hogy a REKK tanulmány számos módszertani hibával és bizonytalansággal terhelt, illetve nem számol az erdőkben végbemenő természetes mortalitás jelenségével. Összességében valószínűtlennek tartja, hogy a mérlegben kimutatott hiány illegális fakitermelésből származhat. Emellett rámutat arra, hogy a módszertan bizonytalansága miatt a kimutatott hiány akár 2 millió m³ mennyiséggel is kevesebb lehet, ami azt jelentené, hogy csak 1-1,5 millió m³ értékű. Emellett rámutat arra a jelenségre, hogy a véghasználatok során a gazdálkodók az Erdőtervek szerinti lehetőségeiket sem használják ki, így számos túltartott, már vágásérett állomány marad lábon, és a túltartott élőfakészlet volumene a 90-es évek óta folyamatosan nő. Ez a jelenség is valószínűtlenné teszi a REKK által feltételezett nagyarányú illegális fakitermelés létét. Borovics et al. (2023) részletesen elemzi a túltartás jelenségét, és megállapítja, hogy a túltartott állományok élőfakészlete a vizsgált időszakban folyamatosan növekedett, és 2021-ben már 45,6 millió m³-t tett ki.

A Bio Screen CCE Projekt 2021-es jelentése (Bódis et al. 2021) újra nyitja a szilárd biomassza mérleg keresleti és kínálati oldala eltérésének kérdését. A jelentés a keresleti oldal számszerűsítéséhez a KSH és a Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (MEKH) adatait használja fel. A jelentés a 2000-2019-es időszakot vizsgálja. Számol az OEA tűzifa kitermelés adatokkal, a tűzifa importtal, emellett becslést tartalmaz a nem erdőtervezett fás területekről származó fakitermelésre is, emellett számol az apadék mennyiségével, illetve a szalma és egyéb nem fás biomassza felhasználással is. A keresleti és kínálati oldal összevetése alapján 37,2 PJ (43%) forrás oldali hiányt számszerűsít.

A jelentés részletesen elemzi a keresleti oldalra vonatkozó számítások lehetséges bizonytalanságait. Leírja, hogy a háztartások szilárd biomassza felhasználásának megállapítása becsléssel történik a KSH által végzett háztartási költségvetési és életkörülmény adatfelvételhez (HKÉF) hozzáadott energiamodul eredményei, valamint a MEKH által végzett épületenergetikai számítások alapján. Az erre vonatkozó új módszertan az 431/2014-es számú uniós rendelet alapján 2016-ban került bevezetésre. A jelentés szerint az éves HKÉF a háztartások biomassza felhasználásával kapcsolatban két kérdést tesz fel az adatszolgáltató háztartásoknak: az egyik a felhasznált biomassza tüzelőanyagok mennyiségére, a másik pedig a velük kapcsolatos pénzügyi kiadásokra vonatkozik. A jelentés szerint fontos bizonytalansági tényező az esetleges hulladékégetés a háztartásokban. Noha a KSH felmérésében részletes

kérdések foglalkoztak a felhasznált szilárd biomassza típusával és forrásával, beleértve a fahulladékot is, mégis feltételezhető, hogy az alacsony jövedelmű vidéki területeken gyakori a hulladékkal való fűtés. Azonban valószínűsíthető, hogy az elégetett hulladék és fahulladék mennyiségét nem hajlandók a válaszadók jelenteni, hiszen a levegőminőségre gyakorolt káros hatásai miatt tilos háztartási hulladékot égetni, és e rendelkezés megszegése az önkormányzatok vagy a Katasztrófavédelem által kiszabott pénzbírságot vonhat maga után.

4.4.3 Célkitűzés

Kutatásunk során azt vizsgáltuk, hogy a Bio Screen CCE Projekt által becsült 37,2 PJ értékű hiánytétel mekkora része származhat háztartási fahulladékok égetéséből. Vizsgálatunkhoz a Forest Industry Carbon Modell (Borovics et al. 2024) HWP részmodelljét (Király et al. 2024) használtuk.

4.4.4 Adat és módszer

Vizsgálatunk során az ErdőLab projekt (Borovics 2022) keretében létrehozott Forest Industry Carbon Modell HWP részmodelljét alkalmaztuk. A modell fatermék modulja modellezi a használatban lévő fatermékek szénmérlegét, valamint az újrahasznosítás hatásait a szénmérlegre. Emellett számítja a tűzifa eltűzése során keletkező kibocsátásokat is. A hulladék modul számítja a hulladékká váló fatermékek mennyiségét, és ezek égetéséből, valamint hulladéklerakással történő ártalmatlanításából keletkező szén-dioxid- és metán-emissziókat. Emellett számolni tud a hulladéklerakón történő metánvisszanyerés hatásával, és mértékének változásaival is. A termékhelyettesítési modul számszerűsíti a termék- és energia helyettesítés útján az ÜHG leltárak Ipar és Energia szektoraiban elkerült kibocsátásokat. A HWP modell tehát lefedi és számszerűsíti a faanyag teljes életútját egészen a megsemmisülésig, és számot vet az összes lehetséges kimenettel. A HWP részmodell országspecifikus paraméterezése a KSH faipari termelési és kereskedelmi statisztikái (Király et al. 2022 szerint), a Nemzeti Üvegházhatású Gázleltárjelentés, az Országos Környezetvédelmi Információs Rendszer, illetve az Országos Hulladékgazdálkodási Terv (ITM 2021) alapján történt meg a Király et al. (2023a,b, 2024) által részletesen leírtak szerint.

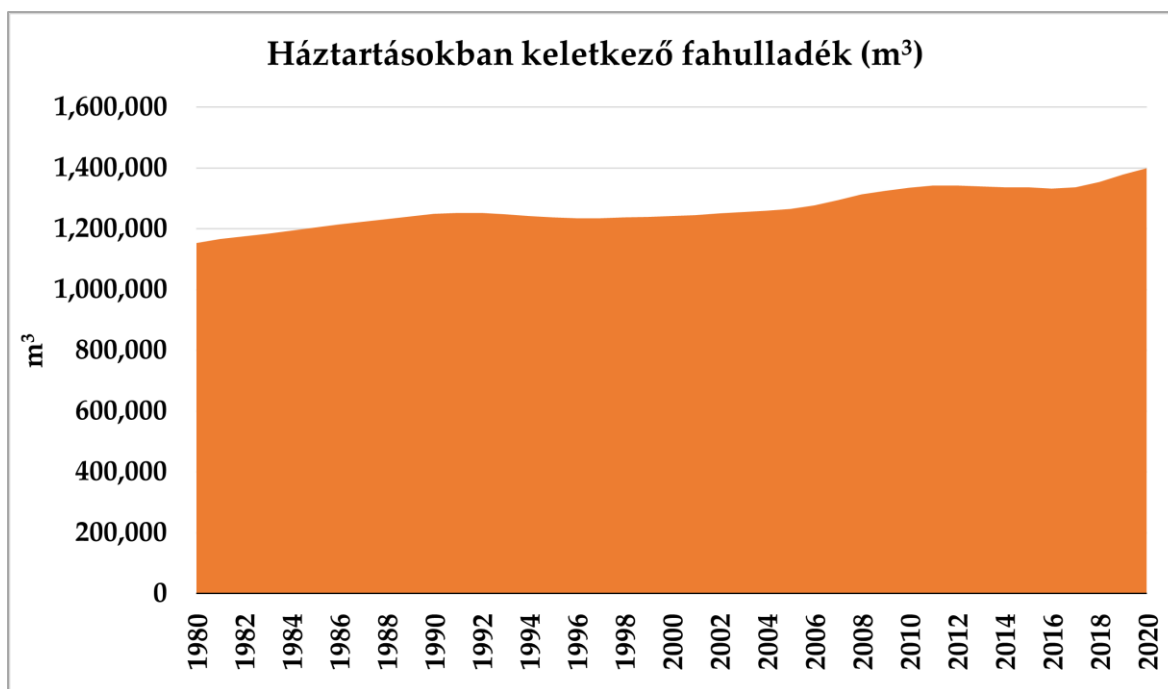
A modell a KSH faipari termelési statisztikáit és az IPCC által meghatározott fatermék-életidőket alapul véve számszerűsíti a hulladékká váló fatermék mennyiséget (outflow). A HWP modell segítségével számított outflow értékeket m^3 és tonna mértékegységekben adtuk meg. Az outflow értékéből az OKIR és az ÜHG leltár adatai alapján becsültük a

hulladéklerakással ártalmatlanított mennyiséget. Mivel az OKIR adatai szerint a háztartási fahulladék nem kerül égetéssel ártalmatlanításra, feltételezhető, hogy a fennmaradó mennyiség a háztartásokban felhalmozódik vagy elégetik a háztartási tüzelőberendezésekben. A hulladéklerakással csökkentett outflow hulladékmennyiség energiatartalmának kiszámítását is elvégeztük, amihez 15 GJ/tonna fűtőértéket használtunk.

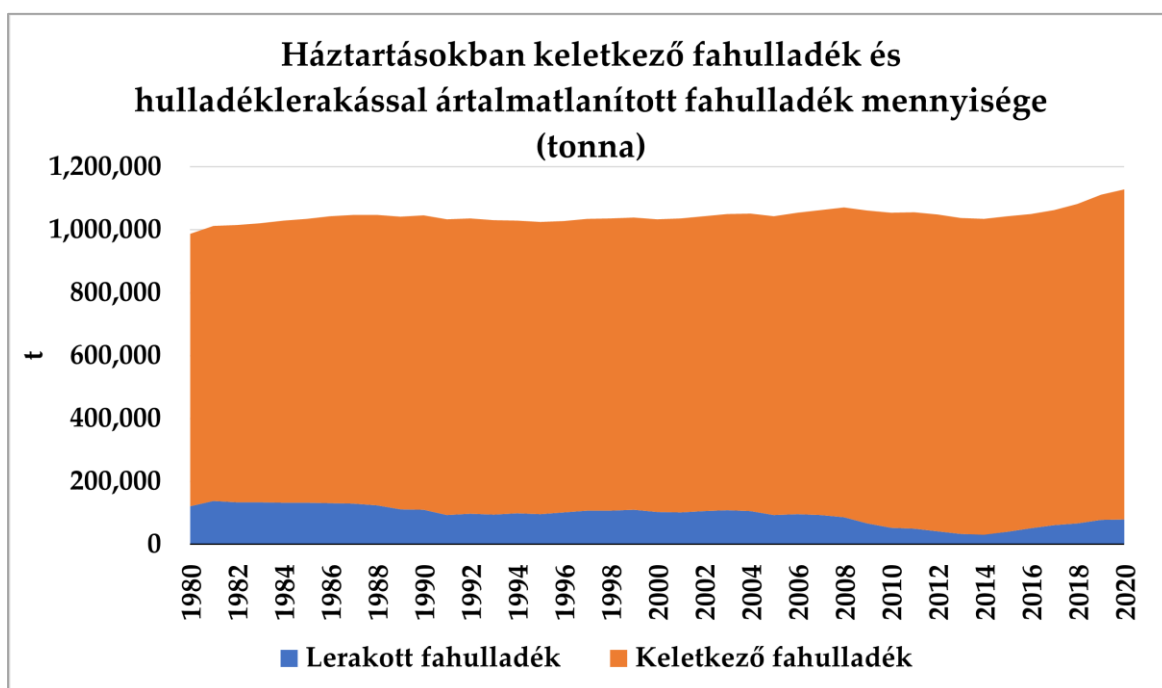
4.4.5 Eredmények és megvitatásuk

Eredményeink szerint a háztartásokban keletkező fahulladék mennyisége 1,1 és 1,4 millió m³ között mozgott az 1980-2020 időszakban, a 2019-es évben pedig 1.378.126 m³ értékű (38. ábra). A vizsgált időszakban a keletkezett háztartási fahulladéknak átlagosan 10%-a került hulladéklerakókra (39. ábra). A 2019-es évben a lerakott mennyiség a keletkezett mennyiség 8%-át tette ki. A fennmaradó 92% sorsáról nincs regisztrált információ, ugyanis ez a mennyiség az OKIR nyilvántartásában nem jelenik meg. Az FICM modell HWP modulja úgy számol, hogy ezt a hulladékmennyiséget elégetik, ami szén-dioxid kibocsátást eredményez. Ennek jelentősége az ÜHG leltár szénmérlege szempontjából sem elhanyagolható, hiszen e mennyiség jelentős emisszió forrása. Így a konzervatív becslés IPCC szerinti követelménye mindenképp megkívánja ennek az emissziónak a kiszámítását és elszámolását.

Ezzel együtt elképzelhető, hogy e hulladékmennyiség nem teljes egészében kerül elégetésre a háztartásokban, hiszen a fahulladékot udvarokban, pincékben akár hosszabb távon is tárolhatják. Emellett elméletileg az is lehetséges, hogy hazánkban a fatermékek életideje jóval magasabb az IPCC által megadott alapértelmezett értékeknél. Ellenben, ha a fentiek közül egyik sem igaz, akkor azt kell feltételeznünk, hogy e fahulladék mennyiséget a háztartásokban eltüzelik.



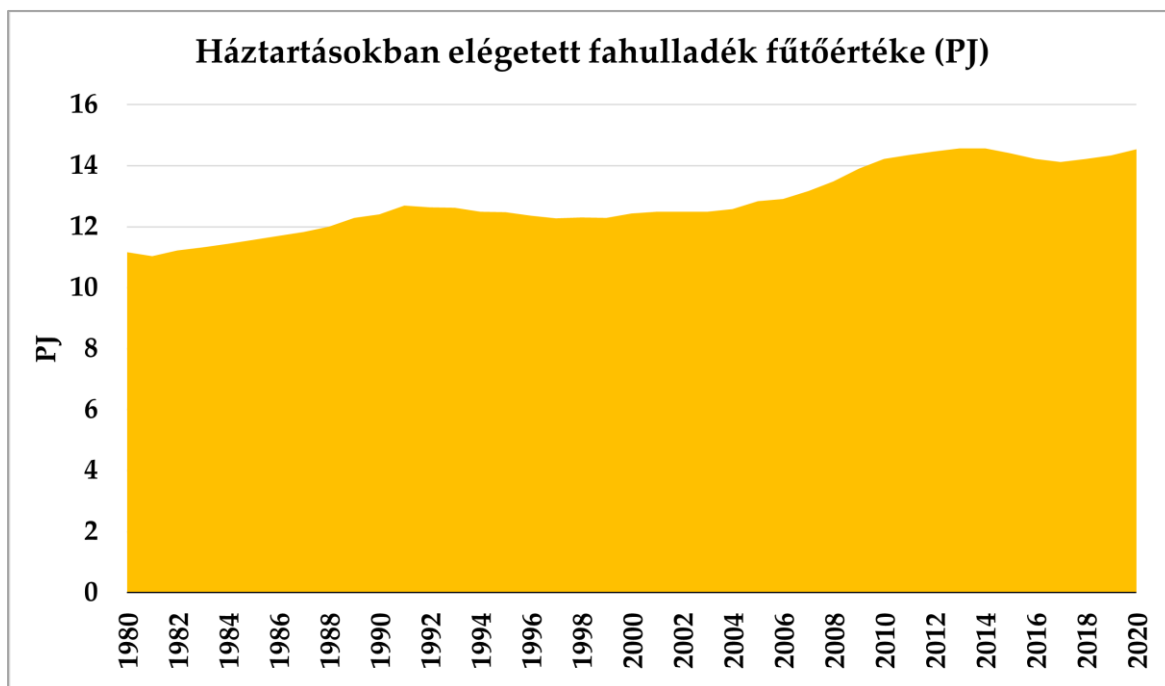
38. ábra: A háztartásokban keletkező fahulladék évenkénti mennyisége köbméterben kifejezve.



39. ábra: A keletkező és a lerakással ártalmatlanított fahulladék évenkénti mennyisége tonnában kifejezve.

A lerakással nem ártalmatlanított hulladékmennyiség PJ mértékegységben kifejezett energiatartalmát a 40. ábra mutatja be. A vizsgált időszakban a háztartásokban feltételezhetően

elégetett fahulladék fűtőértéke átlagosan évi 13 PJ értékre tehető. A fűtőérték 11 és 15 PJ értékek között mozog, a 2019-es évben számításunk szerint 14 PJ, míg 2020-ban pedig 15 PJ volt.



40. ábra: A háztartásokban évente elégetett fahulladék energiatartalma PJ mértékegységben kifejezve.

Eredményeink szerint a Bio Screen CCE Projekt 2021-es jelentésében (Bódis et al. 2021) kimutatott, 2019-re vonatkozó 37,2 PJ-os hiány 39%-a háztartási fahulladék égetéséből eredhet. Ez azt jelenti, hogy a Bio Screen CCE Projekt jelentésben kimutatott hiány értékéből így már csak 23 PJ (azaz a teljes keresleti oldali szilárd biomassa felhasználás 26%-a) szorul további magyarázatra. Ugyanakkor tekintettel arra, hogy mind a kereslet oldali biomassa felhasználás becslése jelentős bizonytalansággal terhelt, mind pedig az általunk az FICM HWP modellel számított outflow érték is, így ez a 26%-os hiány már akár a hibahatáron belül is lehet. Emellett fontos hangsúlyozni, hogy amennyiben valóban ilyen nagy arányú a hazai háztartásokban a fahulladék égetése, akkor feltételezhetjük, hogy más nem fa-alapú hulladékok is nagy mennyiségben kerülhetnek elégetésre.

Hoffer et al. (2024) PM10 minták elemzése alapján becsülte a Magyarországon és Romániában elégetett háztartási hulladékok típusát és mennyiségét. Eredményeik szerint a polietilén-

tereftalát (PET) tartalmú csomagolóanyagok és ruhaneműk elégetése volt a legjellemzőbb a vizsgált területeken. Becslésük szerint Magyarországon a teljes keletkező háztartási hulladék mennyiségének 8-13%-át, azaz a KSH (2024) adatai alapján számítva körülbelül évi fél millió tonna hulladékot éget el a lakosság háztartási tüzelőberendezésben. Hoffer et al. (2024) kiemelik, hogy ez a magas hulladékégetési szint a PM10 koncentráció jelentős mennyiségéért felel, ami súlyos környezetvédelmi és népegészségügyi kockázatot jelent.

Fentiek alapján tehát arra következtethetünk, hogy a szilárd biomassza mérleg keresleti és kínálati oldala közötti eltérések nem illegális fakitermelésből következnek. Becslésünk szerint több mint 1,2 millió m³ fahulladék kerül évente eltüzelésre a magyar háztartásokban. Ez a mennyiség egyenlő a 2017-2021-es évek átlagos nettó tűzifa kihozatalának 38%-ával, azaz igen jelentős mennyiségű.

4.4.6 Következtetések

A fa a körkörös biogazdaság fontos nyersanyaga, mely jelentős klímamitigációs potenciállal bír mind a szén hosszú távú tárolása, mind pedig a fosszilis energiahordozókból származó kibocsátások energiahelyettesítés útján történő elkerülése által (Borovics et al. 2023). Emiatt különösen fontos a fafelhasználás különböző útvonalai közötti optimális egyensúly megtalálása és fenntartása (Verkerk et al. 2022). A fahulladék kezelésének legkedvezőtlenebb módja a hulladéklerakás, ugyanis ezesetben a fahulladék jelentős metánemisszió forrásává válik, mely a globális felmelegedés szempontjából még sokkal károsabb, mint a szén-dioxid (Király et al. 2023).

A körkörös biogazdaság szellemében a fahulladékok kezelésének legjobb módja az újrahasználatuk, illetve az anyagukban történő újrahasznosításuk. A szennyeződések, mint a bevonatok, kezelőanyagok, kötőanyagok és lángálló szerek határozzák meg az újrahasznosítási technológiák alkalmazhatóságát (Kharazipour & Kües 2007, Harms & Flamme 1999). A kezeletlen tömörfa termékek, illetve a szerves halogénvegyületektől és egyéb káros anyagoktól mentes anyagokkal kezelt fatermékek és kompozitok alkalmasak forgácsolás után fa kompozitgyártásra (Kharazipour & Kües 2007). A halogénezett szerves vegyületekkel bevont és festett bútorok anyagukban történő újrahasznosításra csak a bevonatok és lakkok eltávolítása után használhatóak (Kharazipour & Kües 2007). Az ártalmas vegyi anyagokkal kezelt és magas szennyezőanyag tartalmú fatermékek csak energetikai hasznosításra alkalmasak. A veszélyes

PCB tartalmú fahulladékokat pedig elkülönítetten szükséges kezelni és ártalmatlanítani (Kharazipour & Kües 2007).

E szempontok figyelembevételével javasolt lenne hazánkban a fahulladékok visszagyűjtésének, újrahasznosításának és energetikai felhasználásának kaszkád rendszerű megvalósítása. A háztartási tüzelőberendezésekben történő égetésük környezetvédelmi szempontból aggályos. Ugyanakkor fontos biztosítani, hogy minden háztartás elegendő téli tüzelőhöz jusson, így a fahulladékok kiterjedtebb visszagyűjtése és újrahasznosítása esetén tűzifa program keretében lenne szükséges a háztartások kieső tüzelőanyagát pótolni. Ez megnövekedett tűzifa kitermeléshez is vezethetne, illetve e célra rövid vágásfordulójú energetikai ültetvényeket is létesíthetők lennének.

4.5 Mezővédő erdősávok telepítésére vonatkozó szénforgalmi prognózis

4.5.1 Kivonat

Az éghajlatváltozás megnövekvő kedvezőtlen hatásai és a nettó nulla kibocsátási célok egyre inkább ráirányítják a figyelmet a földhasználati szektor klímamitigációs szerepére. Az agrárerdészeti rendszereket fenntartható földhasználati gyakorlatként ismerik el, amely elősegíti környezetünk egészségesebbé tételét, illetve a globális változásokra adott adaptív válaszokat. A fák és a mezőgazdasági kultúrák közötti szinergiák kihasználásával az agrárerdészeti rendszerek számos előnyt biztosítanak, beleértve a szénmegkötést, a talajjavítást és a biológiai sokféleség megőrzését. A mezővédő erdősávok a magyar mezőgazdasági táj szerves részét képezik. A megújított agrárerdészeti támogatási keretrendszer kedvezően hathat a kiterjedésük növelésére, ami egyre fontosabbá teszi klímamitigációs potenciáljuk értékelését. Ebben a fejezetben értékeljük a magyarországi mezővédő erdősávok kiterjedése megduplázásának hatásait a teljes szénmegkötés és az éves átlagos klímamitigációs potenciál kiszámításával 2050-ig. A modellezéshez az FICM modell agrárerdészeti modulját használjuk. Előrejelzésünk szerint az újonnan létesített mezővédő erdősávok, amelyek prognosztizált területe 14 256 hektár, 2050-ig összesen 913 kt szenet kötnének meg. Az újonnan telepített erdősávok átlagos éves klímamitigációs potenciálját pedig 144 kt CO₂ egyenértékre becsüljük. Előrejelzésünk szerint a szénmegkötés legjelentősebb része a biomassa széntárolóban valósulna meg. Ez a klímamitigációs potenciál érték a hazai ÜHG leltár szerint megegyezik a földhasználati szektor (LULUCF) átlagos éves szénmegkötésének 2%-ával.

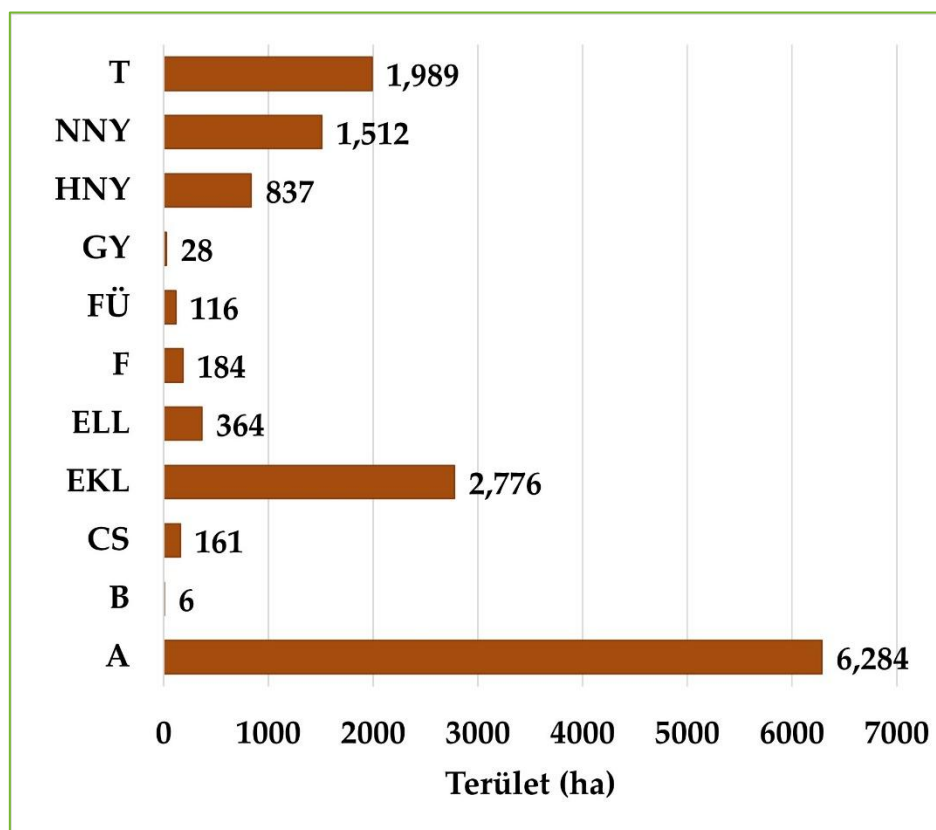
4.5.2 Célkitűzés

Elemzésünk célja annak felmérése, hogy a magyarországi mezővédő erdősávok területének megkétszerezése milyen klímamitigációs hatással járna a teljes megkötött szén mennyisége, valamint az éves mitigációs potenciál tekintetében 2050-ig. A modellezéshez az FICM modell agrárerdészeti modulját használtuk.

4.5.3 Input adatok és paraméterezés

Király et al. (2024a) megbecsülte a magyarországi mezővédő erdősávok teljes területét és átlagos éves szénmegkötését a 2010-2020 időszakban. Ebben a vizsgálatban azt feltételeztük, hogy a már meglévő mezővédő erdősávok kiterjedését megduplázzuk ugyanannyi erdősáv telepítésével, mint amennyi Király et al. (2024) szerint jelenleg létezik. Így azt feltételezték,

hogy összesen 14 256 hektár erdősávot telepítünk (**41. ábra**) öt év alatt, 2025-től 2029-ig, és a telepített terület évenként egyenletesen oszlik meg az öt évben.

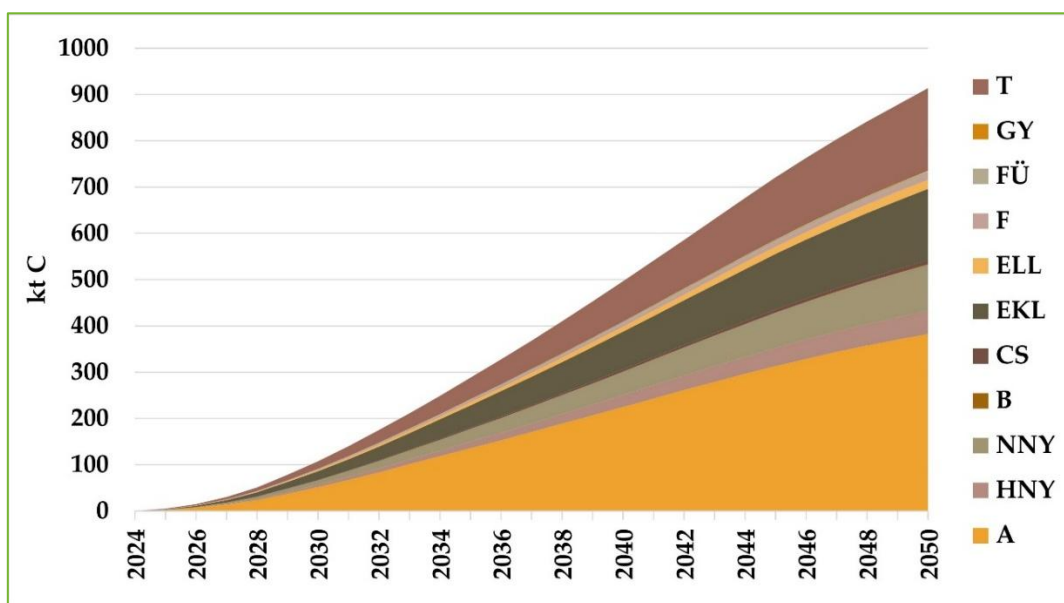


41. ábra: a 2025 és 2029 között telepítendő mezővédő erdősávok területének megoszlása fajokcsoportok szerint.

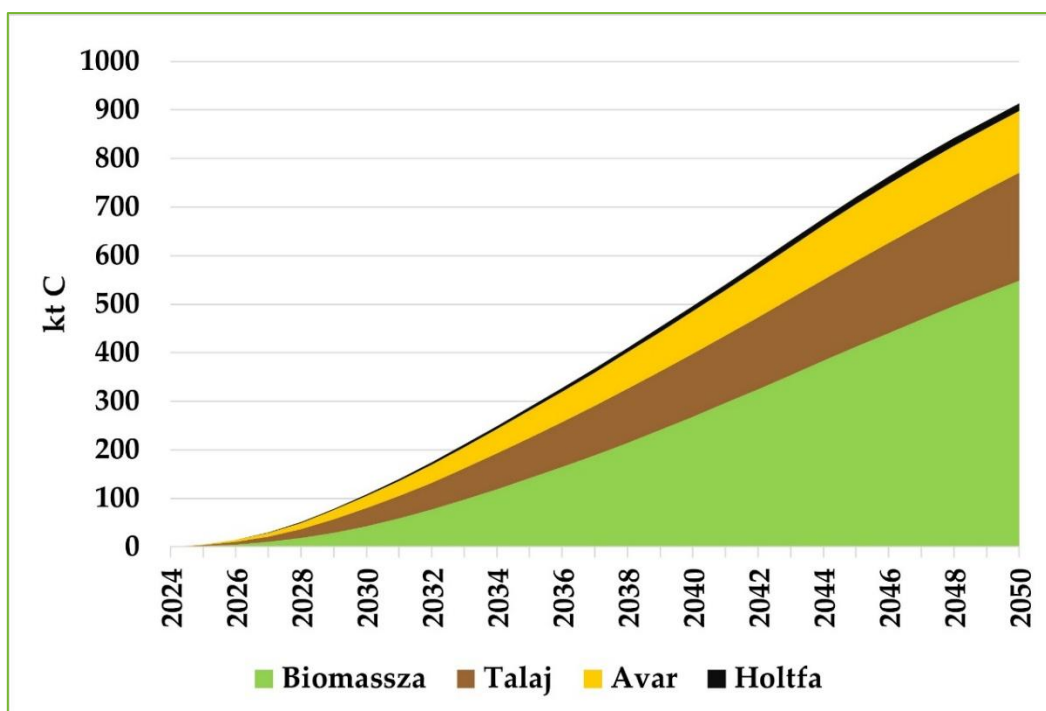
Az újonnan telepített ültetvények szénmegkötését az FICM agrárerdészeti moduljával modelleztük. A modellezés során azt feltételeztük, hogy az ültetvényekről 2025 és 2050 között kitermelt összes faanyagot tűzifaként használják fel. A HWP széntároló szénmérlegét és a szubsztitúciós hatásokat ennek a feltételezésnek megfelelően modelleztük.

4.5.4 Eredmények és megvitatásuk

Eredményeink szerint a 14 256 hektáros összterületen létesített mezővédő erdősávok összesen 913 kt szenet kötnek meg a projekció időszakában (**42. ábra** és **43. ábra**). Az akác (*Robinia pseudoacacia*) fafajú erdősávok adják a teljes szénmegkötés 42%-át, a tölgyek (*Quercus*), az egyéb keménylomb és a nemes nyár pedig rendre a szénmegkötés 19%-át, 17%-át és 11%-át (**42. ábra**). A modellezési eredmények azt mutatják, hogy 2050-re a megkötött szén 60%-a a biomassa széntárolóban, 24%-a a talajban, 16%-a pedig a holt szerves anyag (avar plusz holtfa) tárolóban lesz megkötve (**43. ábra**).



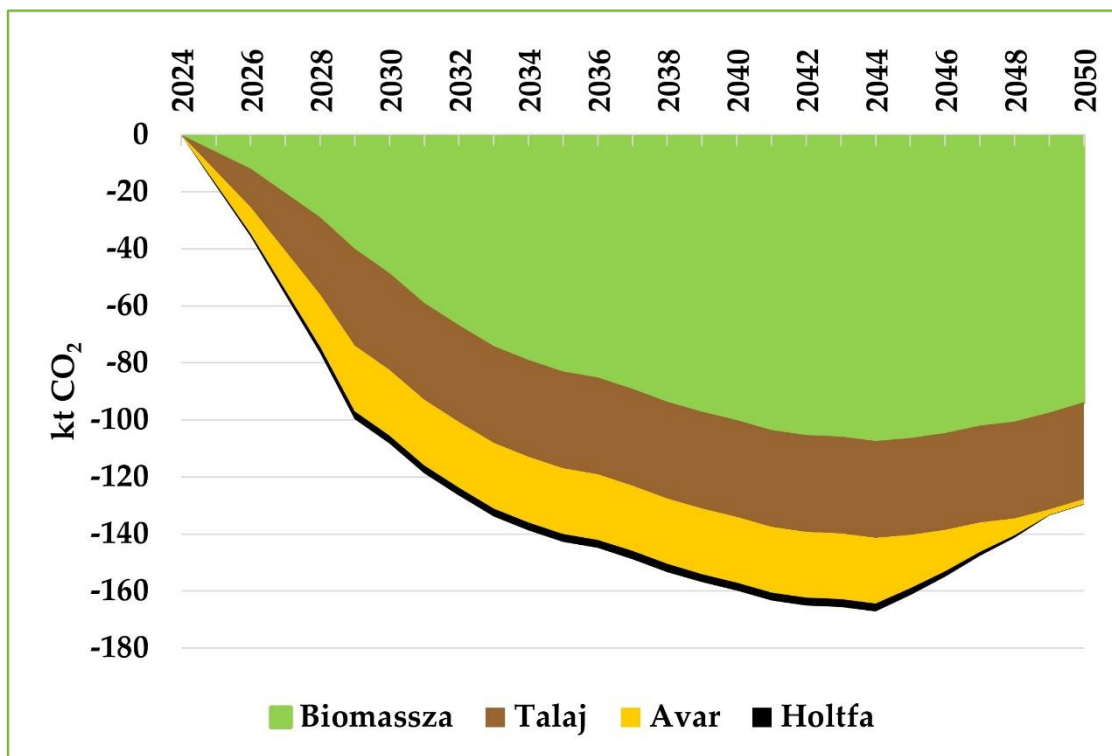
42. ábra: teljes szénmegkötés az újonnan telepített mezővédő erdősávokban fafajcsoportok szerint.



43. ábra: szénfelhalmozódás a biomassza, avar, holtfa és talaj széntárolókban.

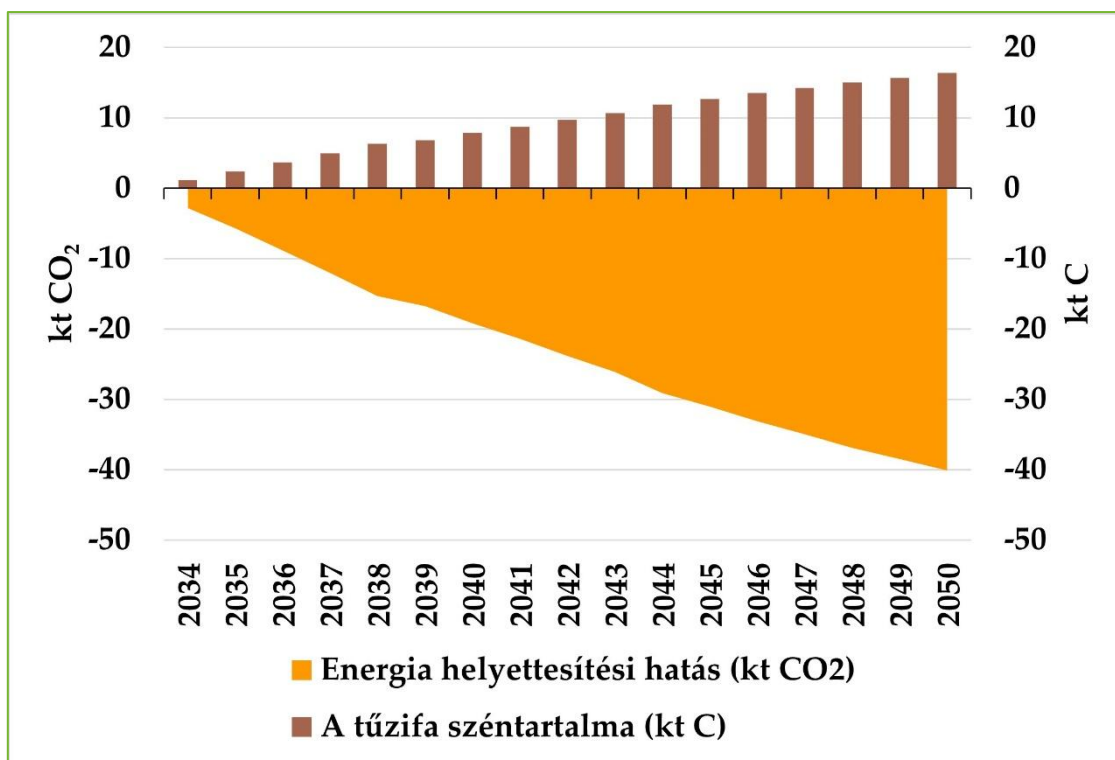
A mezővédő erdősávok prognosztizált éves szénmegkötése becslésünk szerint -18 és -167 kt CO₂ eq között mozog (44. ábra). A modell szerint az alom és holtfa felhalmozódásának nagy

része a kezdeti 20 éven belül következik be, mialatt a széntároló kapacitásuk fokozatosan eléri a telítettségét.



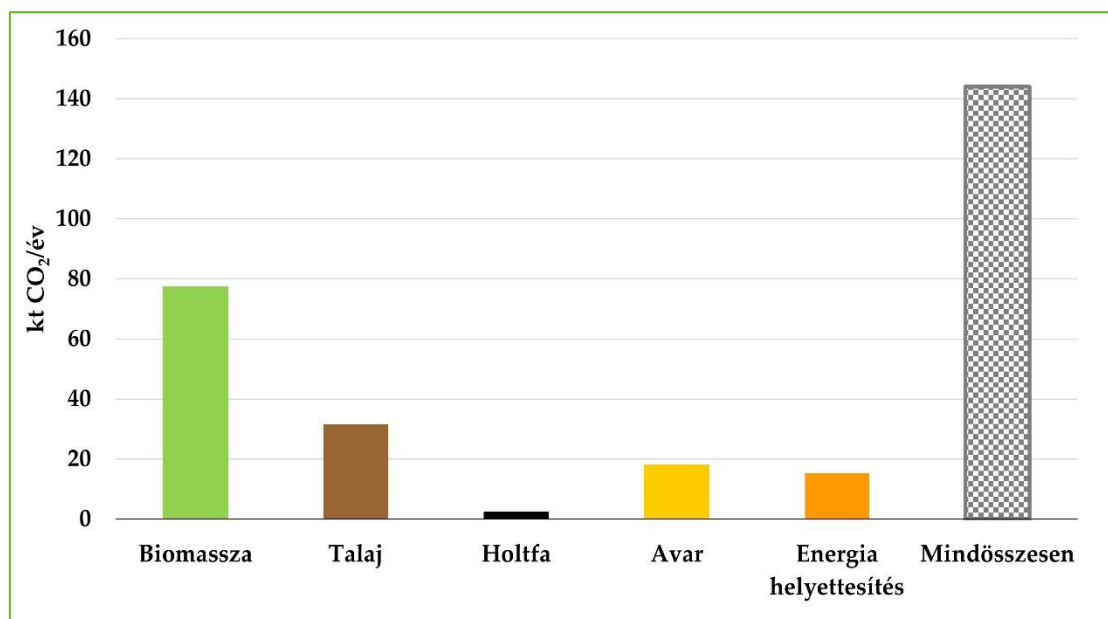
44. ábra: az újonnan telepített mezővédő erdősávok éves szénmérlege széntárolók szerinti bontásban (A negatív értékek szénmegkötést jelölnek kt CO₂ egyenértékben kifejezve.)

Feltételezésünk szerint a mezővédő erdősávok gyérítése során kizárólag csak tűzifa keletkezik. Ez azt jelenti, hogy a HWP tárolóban nem halmozódik fel szénkészlet, mivel a tűzifát a kitermelést követő évben elégetik. A 45. ábra a tűzifa szénttartalmát és a hőtermelési folyamathoz kapcsolódó energiahelyettesítő hatást szemlélteti.



45. ábra: a mezővédő erdősávokról kitermelt tűzifa széntartalma, illetve az energiahelyettesítő hatás mértéke. (A negatív számok az energiahelyettesítés mértékét jelölik kt CO₂ mértékegységben kifejezve, míg a pozitív számok a tűzifa széntartalmát szemléltetik kt C mértékegységben kifejezve.)

Figyelembe véve az új mezővédő erdősáv létesítést, mint klímavédelmi intézkedést, a 2025-2050 közötti időszak vonatkozásában megbecsülhetjük az intézkedéshez kapcsolódó átlagos éves klímamitigációs potenciál értékét. A 46. ábra szemlélteti az átlagos éves klímamitigációs potenciál értékeket széntárolónkénti megbontásban, kt CO₂ egyenértékben kifejezve, ahol a pozitív számok többlet szénmegkötést jelentenek az intézkedés nélküli (BAU) forgatókönyvhöz képest. A modellezés szerint az újonnan telepített erdősávok éves klímamitigációs potenciálja összesen 144 kt CO₂ eq, és a szénmegkötés nagy része a biomassza tárolóban valósul meg.



46. ábra: az újonnan telepített mezővédő erdősávok éves átlagos klímamitigációs potenciálja a 2025-2050 időszakban széntárolók szerinti bontásban.

Az új mezővédő erdősávok létesítésének 144 kt CO₂ eq értékű éves átlagos klímamitigációs potenciálja megegyezik az ÜHG leltárban a földhasználati szektorra jelentett 2021-es évi teljes szénmegkötés 2%-ával. (NIR 2023). Az ÜHG leltár szerint a LULUCF szektor alszektoraik közül egyedül az erdők és a HWP nettó szénmegkötők. A szántóföldek esetében a LULUCF szektorban 2021-ben összesen +119 kt CO₂ egyenérték kibocsátást jelentett hazánk. Ez a kibocsátás a talajból származik, és a földhasználat változásoknak tulajdonítható. Becslésünk szerint 14 256 hektár mezővédő erdősáv telepítése ellensúlyozni tudná ezt a kibocsátást. Meg kell azonban jegyezni, hogy a termőföldekkel kapcsolatos kibocsátások nagy része nem a LULUCF szektorban szerepel az ÜHG leltárban, hanem a mezőgazdasági szektorban. Ezeket a kibocsátásokat az általunk vizsgált agrárerdészeti intézkedés nem tudná ellensúlyozni.

Eredményeink azt mutatják, hogy az akác a legfontosabb fafaj a mezővédő erdősávok szénmegkötése szempontjából, ugyanis a teljes prognosztizált szénmegkötés több mint 40%-át adja. Ez a feltételezett ültetési terület nagyságának, valamint az akác gyors növekedésének tudható be. Magyarországon az akác a legjelentősebb nem őshonos fafaj (Rédei et al. 2023), mely szárazságtűrése miatt megfelelő választás az erózió elleni védekezésre, a meliorációra, illetve a bolygatott területek helyreállítására is. Az újonnan telepített erdőterületek mintegy 35%-a akác (Rédei 2020), és a mezővédő erdősávok teljes területének jelenleg 44%-át teszi ki hazánkban (Király et al. 2024a).

Becslésünk szerint a biomasz széntárolóban történő szénmegkötés mellett a talaj szerves szén (SOC) felvétele és tárolása is jelentős hatású, míg a holt szerves anyagokban történő szénfelhalmozódás egy növekvő periódus után telítettségi szintet ér el. Az talaj szénmegkötésének jelentőségét egyre inkább elismerik a nemzetközi szakirodalomban (European Commission 2021, Wenzel et al. 2023), hangsúlyozva, hogy a talajszén megkötést fokozó gyakorlatok kulcsszerepet fognak játszani az éghajlatváltozás mérséklésében és az ahhoz való alkalmazkodásban (European Commission 2021, Minasny et al. 2017). Tekintettel a mezőgazdasági termelés kiterjedt térbeli lefedettségére, az agroökoszisztémák jelentős potenciállal rendelkeznek a szerves szén talajban történő megkötésében és a biodiverzitás növelésében egyaránt (Wenzel et al. 2023). Ezért a biodiverzitást és a talaj szerves szénmegkötését elősegítő stratégiák végrehajtása elengedhetetlen ahhoz, hogy a mezőgazdaság hozzájáruljon a fenntartható fejlődéshez (Wenzel et al. 2023). A mezővédő erdősávok létesítése jó példája a kedvező hatású intézkedéseknek.

Eredményeink azt mutatják, hogy az energiahelyettesítő hatás a 2025-2050 közötti időszakra prognosztizált teljes éves mitigációs potenciál 11%-át adja. Ez a mennyiség azt az elkerült fosszilis kibocsátást jelenti, amit a tűzifa felhasználás útján takarítunk meg (Király et al. 2024b). A klímitigációs potenciált és a kedvező helyettesítési hatások arányát úgy lehetne növelni, ha a mezővédő erdősávokból kitermelt faanyag egy részét hosszú élettartamú fatermékekben tudnánk felhasználni, melyek több évtizeden át raktároznák a szenet, miközben más karbon-intenzív anyagokat is helyettesítenének.

4.5.5 Következtetések

Az elvégzett modellezés azt mutatja, hogy az FICM modell agrárerdészeti modulja alkalmas agrárerdészeti rendszerek szénegyenlegének középtávú előrejelzésére. A modell azonban jelenlegi formájában csak a fa biomasz szénmegkötését képes előrejelezni, míg a lágyszárúak szénmegkötését nem veszi figyelembe. További fejlesztésekre lesz szükség a köztes termesztési rendszerek modellezéséhez, ahol a köztes növények dinamikáját is figyelembe kell venni. Emellett a modellparaméterezés javítható lenne agrárerdészeti rendszerekben végzett országspecifikus talajszén mérések adatainak integrálásával.

A fák és a mezőgazdasági tevékenységek közötti szinergiák kihasználásával az agrárerdészeti rendszerek számos előnnyel járnak, beleértve a szénmegkötést, a talajmegőrzést és a biológiai sokféleség növelését. Eredményeink azt mutatják, hogy Magyarországon jelentős

klímamitigációs potenciál rejlik az új mezővédő erdősávok létesítésében a mezőgazdasági táblahatárokon. Így az agrárerdészeti gyakorlatok elősegíthetik az ellenálló és termékeny mezőgazdasági tájak kialakítását, miközben hozzájárulnak az éghajlatváltozás elleni küzdelemhez és a fenntartható fejlődés elősegítéséhez is.

5 ÖSSZEFOGLALÁS

Doktori kutatásom az ErdőLab projekt keretében valósult meg, melynek során a Soproni Egyetem több karának bevonásával, külső szakértők segítségét is igénybe véve létrehoztuk az FICM szénforgalmi modellt, mely képes a teljes hazai fagazdasági szektor szénmérlegének előrejelzésére és ezáltal különféle mitigációs intézkedések, illetve szakpolitikai elképzelések szénegyenlegre gyakorolt hatásainak vizsgálatára.

A modell fejlesztése során önálló tudományos eredményeket a modell HWP és agrárerdészeti moduljainak fejlesztése kapcsán értem el, melyeket az alábbi téziseimben foglalom össze.

5.1 Tézisek

Az egyes tézispontok után szürkített mezőben találhatóak az adott tézist megalapozó tudományos közlemények.

1. AZ FICM HWP részmodelljének létrehozása

Megalkottam az FICM HWP részmodelljét a fatermékek széntárolásának és szénegyenlegének prognosztizálására. A modell konzisztens a Nemzeti Üvegházhatású Gázleltár jelentéssel, illetve az IPCC módszertanával. A modellel számszerűsíthető a fatermékekben megkötött- és tárolt szén mennyisége, illetve az életidő végén a fahulladékok kezelése során felszabaduló szén-dioxid- és metán kibocsátások nagyságrendje. A modell számol a fatermékek újrahasznosításával is. Termékhelyettesítési modulja segítségével pedig becsülhető a fatermékek termék- és energiahelyettesítési hatása útján elkerült kibocsátások mértéke.

Király É. et al. (2024). *Climate change mitigation potentials of wood industry related measures in Hungary. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(6).
<http://doi.org/10.1007/s11027-024-10161-1>

Király É. et al. (2024). *Climate Change Mitigation Through Carbon Storage and Product Substitution in the Hungarian Wood Industry. Wood Research*, 69(1), 72–86.
<http://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.1.7286>

Király É. et al. (2023). *Modelling Carbon Storage Dynamics of Wood Products with the HWP-RIAL Model—Projection of Particleboard End-of-Life Emissions under Different*

2. Üzemi szintű szénforgalmi modellezés

Az FICM HWP modellt alkalmazva vizsgáltam különböző klímamitigációs intézkedések hatásait 200 000 m³ forgácslap széntárolására, valamint a hulladékká válását követő széndioxid- és metán kibocsátásaira. Megállapítottam, hogy az egyes mitigációs intézkedések közül a megnövelt újrahasznosítási aránynak volt a legnagyobb mitigációs hatása. A forgácslap élettartamának meghosszabbítása kiegészítő intézkedés lehet az éghajlatváltozás mérséklésére, valamint a kaszkád-rendszerű újrahasználatra és újrahasznosításra, illetve a körkörös biogazdaság koncepciójának támogatására. Megállapítottam továbbá, hogy a lerakott fahulladék hosszú távon jelentős metán kibocsátás forrása, így a fahulladék égetéssel történő ártalmatlanítása előnyösebb a lerakásnál.

Király É. et al. (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).
<http://doi.org/10.3390/su15076322>

3. Az erdészeti és faipari szektor historikus mitigációs szerepének elemzése

Az FICM HWP modell termékhelyettesítési moduljának alkalmazásával és az Üvegházhatású Gázleltár jelentés adatainak értékelésével megállapítottam, hogy az 1985-2021 közötti historikus időszakban az erdészeti és faipari szektorhoz kapcsolódó klímamitigációs hatás 49%-a az erdőkben történő széntárolás révén valósult meg, míg 4%-a a fatermékek széntárolása, 47%-a pedig a termék- és energiahelyettesítési hatások útján realizálódott.

Király É. et al. (2024). Climate Change Mitigation Through Carbon Storage and Product Substitution in the Hungarian Wood Industry. Wood Research, 69(1), 72–86.
<http://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.1.7286>

4. A fatermékek országos szintű szénegyenlegére vonatkozó BAU prognózis

Az FICM HWP részmodellt alkalmazva egy Business as Usual scenárióra beállított országos szintű prognózis alapján megállapítottam, hogy további klímamitigációs intézkedések nélkül a magyarországi fatermékek 2047-re szén-dioxid nyeléből kibocsátóvá válnak. A szénmegkötés folyamatos fenntartása érdekében elengedhetetlen további klímavédelmi intézkedések bevezetése, beleértve a kaszkád termékértékláncokat és a körkörös biogazdaság elveinek alkalmazását.

Király É. et al. (2024). *Climate change mitigation potentials of wood industry related measures in Hungary. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(6). <http://doi.org/10.1007/s11027-024-10161-1>

5. Különböző klímamitigációs intézkedések hatásai az országos HWP szénegyenleg alakulására

Az FICM HWP modellt alkalmazva országos szintű előrejelzést végeztem a hazai HWP széntároló szénegyenlegére vonatkozóan 11 különböző scenárióban. Ennek során megállapítottam, hogy a leghatékonyabb egyedi mitigációs 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 Mt szén-dioxid egyenérték klímamitigációs potenciál érhető el. Ez az érték tovább lenne növelhető azáltal, ha a kitermelt faanyagot teljes egészében hazánkban dolgoznánk fel.

Király É. et al. (2024). *Climate change mitigation potentials of wood industry related measures in Hungary. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 29(6). <http://doi.org/10.1007/s11027-024-10161-1>

Király É. et al. (2024). *Climate Change Mitigation Through Carbon Storage and Product Substitution in the Hungarian Wood Industry. Wood Research*, 69(1), 72–86. <http://doi.org/10.37763/wr.1336-4561/69.1.7286>

6. A háztartásokban elégetett fahulladék mennyiségi becslése

Az FICM HWP részmodell alkalmazásával megbecsültem a háztartásokban elégetett fahulladék évenkénti mennyiségét és fűtőértékét. Számításaim szerint a hulladékká váló fatermékek közül évente több mint 1,2 millió m³ kerülhet elégetésre háztartási tüzelő-

berendezésekben, amelynek fűtőértéke 14 PJ. Az eredmények arra utalnak, hogy a Bio Screen CCE projekt által kimutatott biomassa-forráshiány jelentős része (39%-a) nem illegális fakitermelésből, hanem háztartási fahulladékégetésből ered.

Király É. et al. (2025). *Estimating the amount and heating value of wood waste burned in households based on FICM HWP model output data. Acta Agraria Debreceniensis*, 1, 79-84. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/15104>

7. Az FICM Agrárerdészeti részmodelljének létrehozása

Megalkottam az FICM agrárerdészeti részmodelljét, melyet az Országos Erdőállomány Adattár mezővédő erdősávokra vonatkozó adatai, valamint nemzetközi szakirodalmi adatok segítségével paramétereztem. A részmodell alkalmas mezővédő erdősávok biomassa, holtfa, avar és talaj széntárolóira vonatkozó szénforgalmi prognózisok készítésére.

Király É. et al. (2024). *Carbon Sequestration in the Aboveground Living Biomass of Windbreaks—Climate Change Mitigation by Means of Agroforestry in Hungary. Forests*, 15(1). <http://doi.org/10.3390/f15010063>

Király É. & Borovics A. (2024). *Preparatory Study for Carbon Sequestration Modelling of Agroforestry in Hungary – The Assessment of the Average Canopy Closure of Windbreaks. Hungarian Agricultural Research: Environmental Management Land Use Biodiversity*, 2024(I.), 4–8.

Király É., & Borovics A. (2024). *Preparatory study for carbon sequestration modelling of agroforestry systems in Hungary: The assessment of the yield class distribution of windbreaks. Acta Agraria Debreceniensis*, (1), 73–78. <http://doi.org/10.34101/actaagrar/1/13673>

Király É. et al. (2024). *Climate Benefit Assessment of Doubling the Extent of Windbreak Plantations in Hungary. Earth*, 5(4), 654–669. <http://doi.org/10.3390/earth504003>

8. Mezővédő erdősávok területének megduplázására vonatkozó modellszámítás

Az FICM agrárerdészeti részmodelljének alkalmazásával megvizsgáltam a hazai mezővédő erdősávok területe megkétszerezésének klímamitigációs hatásait. Megállapítottam, hogy az újonnan létesített mezővédő erdősávok a 2050-ig terjedő időszakban összesen 913 kt szenet kötnének meg. Az újonnan telepített erdősávok átlagos éves klímamitigációs potenciálját

pedig 144 kt szén-dioxid egyenértékre becsültem. Megállapítottam, hogy ez a klímamitigációs potenciál érték megegyezik a földhasználati- és erdészeti szektor (LULUCF) átlagos éves szénmegkötésének 2%-ával. Előrejelzésem szerint a szénmegkötés legjelentősebb része a biomassza széntárolóban valósulna meg.

Király É. et al. (2024). Climate Benefit Assessment of Doubling the Extent of Windbreak Plantations in Hungary. Earth, 5(4), 654–669. <http://doi.org/10.3390/earth504003>

6 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom:

Dr. Borovics Attilának

amiért elvállalta doktori kutatásom témavezetését, mindvégig irányt mutatott, minden kérdésemmel és problémámmal fordulhattam hozzá, és sosem maradtam tanács vagy megoldás nélkül. Külön köszönöm zseniális előadásait, melyeket nem csak tanulságos hallgatni, hanem örömteli és lelkesítő is.

Dr. Bidló Andrásnak

amiért másodéves környezetmérnök hallgató koromban megismertetett a szénmegkötés, a klímamitigáció és az Üvegházhatású Gázleltár világával. Bátorításának és példájának köszönhetem, hogy ezzel a szakterülettel foglalkozom immáron közel másfél évtizede.

Dr. Somogyi Zoltánnak

amiért bevezetett az Üvegházhatású Gázleltár mélységeibe és magasságaiba. A módszertani ismeretek átadásán túl köszönöm azt is, hogy elleshettem tőle a nemzetközi szintű angol tudományos szaknyelv használatának fortélyait. Legmeghatározóbb olvasmányaim között tartom számon angol nyelven írott műveit. Emellett köszönöm tudományetikai tanítását is.

Dr. Kottek Péternek

amiért már 2013-ban ráirányította a figyelmemet a fatermékek szénforgalmi modellezésének fontosságára. Emellett köszönöm a közös munkálkodást, mely az élet minden területére kiterjedt.

Szepesi Andrásnak

amiért megismertetett a LULUCF szektor szakpolitikai rejtelseivel és bevezetett az Agrárminisztérium fellegvárába.

Wisnovszky Károlynak

aki első munkaadóm és jóindulatú pártfogóm volt szárnyaim bontogatásának időszakában.

Kis-Kovács Gábornak

amiért megismertetett az Üvegházhatású Gázleltár Hulladék szektorának számításaival. A tőle tanultak képezték alapját a fatermék modell hulladék modulja megalkotásának.

Dr. Schiberna Endrének

aki osztályvezetőmként támogató szakmai közeget teremtett, és lehetőséget adott arra, hogy kutatásaim mellett fokozatosan bekapcsolódhassak az egyetemi oktatásba és a hallgatók témavezetésébe.

Dr. Illés Gábornak

a közös cikkeink szakmai színvonalát emelő, értékes meglátásaiért, valamint a reménybeli együttműködés jegyében, ami a klímaváltozás hatásait is integráló erdőállomány prognózis kidolgozását illeti.

Dr. Csépanyi Péternek

amiért szívesen fogadott az Örökerdő Szakosztály tagjai közé, és mindazért, amit az örökerdő üzemmód és a klímavédelem kapcsolatáról tanultam tőle.

Az Agrárminisztérium munkatársainak

a mindenkor támogató közös munkáért, és azért, hogy az Országos Erdőállomány Adattár adatait kutatási célokra a rendelkezésünkre bocsátották.

Az Erdészeti Tudományos Intézet összes munkatársának

amiért befogadtak maguk közé és támogató közeget biztosítottak a kutatásomhoz és a mindennapi munkavégzéshez.

A Soproni Egyetem összes munkatársának

a sok-sok tudásért, melyet környezetmérnök szakos hallgató koromban átadtak nekem, és amely megalapozta későbbi pályafutásomat és így a jelen kutatást is. Emellett köszönöm, hogy az utóbbi években immár kollégaként támogattak és segítettek a munkámban.

7 HIVATKOZÁSOK

- Ábri, T., & Csajbók, J. (2023). Comparative study of newly-bred black locust clones with regard to photosynthetic rate and water use efficiency: Early evaluation. *Acta Agraria Debreceniensis*, (1), 5–10. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/12256>
- Alavalapati, J. R. R., & Nair, P. K. R. (2001). Socioeconomics and institutional perspectives of agroforestry. In M. Palo & J. Uusivuori (Eds.), *World forests, society and environment: Markets and policies* (pp. 71–84). Kluwer.
- Aleinikovas, M., Jasinevičius, G., Škėma, M., Beniušienė, L., Šilinskas, B., & Varnagirytė-Kabašinskienė, I. (2018). Assessing the effects of accounting methods for carbon storage in harvested wood products on the national carbon budget of Lithuania. *Forests*, 9(12), 737. <https://doi.org/10.3390/f9120737>
- Association for Temperate Agroforestry (AFTA). (1997). *The status, opportunities and needs for agroforestry in the United States*. AFTA.
- Auer, V., & Rauch, P. (2020). Assessing hardwood flows from resource to production through Material Flow Analysis. In R. Nemeth et al. (Eds.), *9th Hardwood Proceedings, Vol 9 - pt I: An Underutilized Resource: Hardwood Oriented Research* (pp. 13–20).
- Aumann, C. A. (2007). A methodology for developing simulation models of complex systems. *Ecological Modelling*, 202, 385–396.
- BioReg. (2018). *European wood waste statistics report for recipient and model regions*. https://web.archive.org/web/20221221000000*/Attachment_0.pdf
- Bódis, P., Gálhidy, L., Harmat, Á., Szajkó, G., & Varga, K. (2021). Van-e elég fenntartható biomassza Magyarországon? – Országjelentés a szilárd biomassza keresleti és kínálati oldaláról. Bio Screen CEE projekt, 79 p. https://rekk.hu/downloads/projects/Country_report_Hungary_HU_FINAL.pdf
- Bondor, A. (1988). 25 éves a magyar szervezett, hosszú lejáratú fatermési kutatás. *Erdészeti Lapok*, 37(10), 446–453.
- Boonstra, M. (2008). *A two-stage thermal modification of wood* [PhD thesis, Henry Poincaré University-Nancy].
- Boote, K. J., Jones, J. W., & Hoogenboom, G. (1998). Simulation of crop growth CROPGRO model. In R. Peart & R. Cury (Eds.), *Agricultural System Modeling and Simulation* (pp. 651–693). CRC Press.
- Borovics, A. (2022). ErdőLab: a Soproni Egyetem erdészeti és faipari projektje: Fókuszban az éghajlatváltozás mérséklése. *Erdészeti Lapok*, 157(4), 114–115.
- Borovics, A., & Király, É. (2022). Az erdőgazdálkodás szerepe a klímavédelemben az IPCC értékelő jelentése szerint. *Erdészeti Lapok*, 157(7–8), 265–268.
- Borovics, A., & Király, É. (2023). Klímitigáció és alkalmazkodás a magyar erdőiparban. *Erdészeti Lapok*, 158(1), 5–9.
- Borovics, A., & Király, É. (2023). The challenge of mobilizing the unused wood stock reserve to foster a sustainable and prosperous Hungarian forest industry. *Chemical Engineering Transactions*, 107, 637–642.
- 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., Kottek, P., & Király, É. (2023). Az erdészeti bioenergia hozzájárul a karbonsemlegességhez: Klímavédelmi szempontból valóban jobb gázzal vagy szénnel fűteni, mint fával? *Erdészeti Lapok*, 158(6), 223–226.
- 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., Somogyi, N., Honfy, V., Keserű, Zs., & Gyuricza, Cs.** (2017). Agrárerdészet, a klímatudatos, természetközeli termelési mód. *Erdészeti Lapok*, 6, 178–182.
- Börcsök, Z., Németh, G., & Kocsis, Z.** (2023). Expert judgement on the future assortment composition of harvested wood in Hungary. *University of Sopron*. Manuscript (in Hungarian).
- Börcsök, Z., Schöberl, M., Molnár, S., Lakatos, Á., Ábrahám, J., & Molnár, A.** (2011). A faipari termékekben tárolt szén szerepe a klímavédelemben. <http://www.fataj.hu/2011/01/123/1tema.pdf>
- Böttcher, H., Freibauer, A., Obersteiner, M., & Schulze, E. D.** (2008). Uncertainty analysis of climate change mitigation options in the forestry sector using a generic carbon budget model. *Forest Ecology and Management*, 213, 45–62.
- Böttcher, H., Kurz, W. A., & Freibauer, A.** (2008). Accounting of forest carbon sinks and sources under future climate protocol—Factoring out past disturbance and management effects on age-class structure. *Environmental Science & Policy*, 11, 669–686.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M. H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., et al.** (1998). STICS: A generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, 311–346.
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., & Muys, B.** (2016). Modelling carbon stocks and fluxes in the wood product sector: A comparative review. *Global Change Biology*, 22, 2555–2569.
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., & Muys, B.** (2017). The effect of increasing lifespan and recycling rate on carbon storage in wood products: From theoretical model to application for the European wood sector. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9722-z>
- 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., Kroihner, 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 X*, 6, 100034. <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100034>
- Cahyo, A. N., Babel, M. S., Datta, A., Prasad, K. C., & Clemente, R.** (2016). Evaluation of land and water management options to enhance productivity of rubber plantation using WaNuLCas model. *Agrivita Journal of Agricultural Science*, 38, 93–103.
- Cannell, M. G. R., Mobbs, D. C., & Lawson, G. J.** (1998). Complementarity of light and water use in tropical agroforests II. Modelled theoretical tree production and potential crop yield in arid to humid climates. *Forest Ecology and Management*, 102, 275–282.
- Cardinael, R., Hoeffner, K., Chenu, C., Chevallier, T., Béral, C., Dewisme, A., & Cluzeau, D.** (2019). Spatial variation of earthworm communities and soil organic carbon in temperate agroforestry. *Biology and Fertility of Soils*, 55, 171–183. <https://doi.org/10.1007/s00374-018-1332-3>
- 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.
- Chatterjee, N., Nair, P. R., Chakraborty, S., & Nair, V. D.** (2018). Changes in soil carbon stocks across the forest-agroforest-agriculture/pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 55–67. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.014>
- Cherubini, F., Peters, G. P., Berntsen, T., Strömman, A. H., & Hertwich, E. G.** (2011). CO₂ emissions from biomass combustion for bioenergy: Atmospheric decay and contribution to global warming. *GCB Bioenergy*, 3, 413–426.

- 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>
- De Angelis, D. L., & Mooij, W. M. (2003). In praise of mechanistically rich models. In C. D. Canham, J. Cole, & W. Lauenroth (Eds.), *Models in Ecosystem Science* (pp. 61–82). Princeton University Press.
- De Stefano, A., & Jacobson, M. G. (2018). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: A meta-analysis. *Agroforestry Systems*, 92, 285–299. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>
- Deilmann, C., Reichenbach, J., Krauß, N., & Gruhler, K. (2017). *Materialströme im Hochbau: Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ZukunftBauenFP/2017/band-06-dl.pdf>
- Djomo, S. N., El Kasmoui, O., & Ceulemans, R. (2011). Energy and greenhouse gas balance of bioenergy production from poplar and willow: A review. *GCB Bioenergy*, 3, 181–197. <https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01073.x>
- Dmuchowski, W., Baczeńska-Dąbrowska, A. H., & Gworek, B. (2024). The role of temperate agroforestry in mitigating climate change: A review. *Forest Policy and Economics*, 159, 103136. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103136>
- Dufour, L., Metay, A., Talbot, G., & Dupraz, C. (2013). Assessing light competition for cereal production in temperate agroforestry systems using experimentation and crop modelling. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 199, 217–227.
- Dupraz, C., Burgess, P., Gavaland, A., Graves, A., Herzog, F., Incoll, L. D., Jackson, N., Keesman, K., Lawson, G., Lecomte, I., et al. (2005). *Synthesis of the Silvoarable Agroforestry For Europe (SAFE) Project*. INRA-UMR System.
- Dupraz, C., Wolz, K. J., Lecomte, I., Talbot, G., Vincent, G., Mulia, R., Bussière, F., Ozier-Lafontaine, H., Andrianarisoa, S., Jackson, N., et al. (2019). Hi-sAFe: A 3D agroforestry model for integrating dynamic tree–crop interactions. *Sustainability*, 11(8), 2293. <https://doi.org/10.3390/su11082293>
- Easterling, W. (1997). Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: An application of the EPIC model. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 61, 163–176.
- EC. (1999). *Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31999L0031>
- EC. (2008). *Directive 2008/98/EC on waste and repealing certain Directives*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>
- EC. (2014). *Towards a circular economy: A zero waste programme for Europe*. COM/2014/0398 final. <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/circular-economy-communication.pdf>
- EC. (2015). *Closing the loop: An EU action plan for the circular economy*. COM/2015/0614 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52015DC0614>
- EC. (2016). *Circular Economy Action Plan*. http://ec.europa.eu/environment/circular-economy/index_en.htm
- EC. (2018a). *Directive (EU) 2018/850 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0850>
- EC. (2018b). *Directive (EU) 2018/851 amending Directive 2008/98/EC on waste*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32018L0851>
- EC. (2020). *A new circular economy plan for a cleaner and more competitive Europe*. COM(2020) 98 final.
- Ellen MacArthur Foundation. (2014). *Towards the Circular Economy 3: Accelerating the Scale-up across Global Supply Chains*. http://www3.weforum.org/docs/WEF_ENV_TowardsCircularEconomy_Report_2014.pdf
- Essel, R., Breitmayer, E., Carus, M., Fehrenbach, H., Geibler, J., Bienge, K., & Baur, F. (2014). *Defining Cascading Use of Biomass*. nova-Institut GmbH.

- 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>
- European Commission. (2021). *EU Soil Strategy for 2030: Towards healthy soils for people and the planet*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/02668>
- Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J., & Nayak, D. R. (2018). Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 117–129. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.032>
- Fernández-Núñez, E., Rigueiro-Rodríguez, A., & Mosquera-Losada, M. R. (2010). Carbon allocation dynamics one decade after afforestation with *Pinus radiata* and *Betula alba* under two stand densities in NW Spain. *Ecological Engineering*, 36, 876–890.
- 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>
- Friend, A. D., Stevens, A. K., Knox, R. G., & Cannell, M. G. R. (1997). A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v3.0). *Ecological Modelling*, 95, 249–287.
- Geng, A., Yang, H., Chen, J., & Hong, Y. (2017). Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution in greenhouse gas mitigation. *Forest Policy and Economics*, 85, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2017.08.007>
- Graves, A. R., Burgess, P. J., Palma, J. H. N., Herzog, F., Moreno, G., Bertomeu, M., Dupraz, C., Liagre, F., Keesman, K., van der Werf, W., et al. (2007). Development and application of bio-economic modelling to compare silvoarable, arable, and forestry systems in three European countries. *Ecological Engineering*, 29, 434–449.
- Graves, A. R., Burgess, P. J., Palma, J., Keesman, K. J., van der Werf, W., Dupraz, C., Van Keulen, H., Herzog, F., & Mayus, M. (2010). Implementation and calibration of the parameter-sparse Yield-SAFE model to predict production and land equivalent ratio in mixed tree and crop systems under two contrasting production situations in Europe. *Ecological Modelling*, 221, 1744–1756.
- Harms, S., & Flamme, S. (1999). Wood waste recycling in Germany. In R'99 Congress (Recovery, Recycling, Re-integration), February 1999. <https://www.environmental-expert.com/articles/article434/article434.htm>
- Härtl, F. H., Höllerl, S., & Knoke, T. (2017). A new way of carbon accounting emphasises the crucial role of sustainable timber use for successful carbon mitigation strategies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(8), 1163–1192. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9720-1>
- Helin, T., Sokka, L., Soimakallio, S., Pingoud, K., & Pajula, T. (2013). Approaches for inclusion of forest carbon cycle in life cycle assessment – A review. *GCB Bioenergy*, 5(5), 475–486. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12016>
- Hoffer, A., Meiramova, A., Tóth, Á., Jancsek-Turóczi, B., Kiss, G., Rostási, Á., Levei, E. A., Marmureanu, L., Machon, A., & Gelencsér, A. (2024). Assessment of the contribution of residential waste burning to ambient PM10 concentrations in Hungary and Romania. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 1659–1671. <https://doi.org/10.5194/acp-24-1659-2024>
- Honfy, V., Pödör, Z., Keserű, Z., Rásó, J., Ábri, T., & Borovics, A. (2023). The effect of tree spacing on yields of alley cropping systems—A case study from Hungary. *Plants*, 12(3), 595. <https://doi.org/10.3390/plants12030595>
- Husgafvel, R., Linkosalmi, L., Hughes, M., Kanerva, J., & Dahl, O. (2018). Forest sector circular economy development in Finland: A regional study on sustainability driven competitive advantage and an assessment of the potential for cascading recovered solid wood. *Journal of Cleaner Production*, 181, 483–497. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.176>

- Huth, N. I., Carberry, P. S., Poulton, P. L., Brennan, L. E., & Keating, B. A. (2002). A framework for simulating agroforestry options for the low rainfall areas of Australia using APSIM. *European Journal of Agronomy*, 18, 171–185.
- 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). <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>
- Innovációs és Technológiai Minisztérium (ITM). (2021). Országos hulladékgazdálkodási terv (2021–2027). <https://kormany.hu/dokumentumtar/orszagos-hulladeggazdalkodasi-terv-2021-2027>
- IPCC. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Eggleston, H. S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., & Tanabe, K. (Eds.). IGES.
- 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., & Troxler, T. G. (Eds.). IPCC.
- IPCC. (2014). *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., & Troxler, T. G. (Eds.). IPCC.
- 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.
- IPCC. (2022). *AR6 WG3 Chapter 7: Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU)*. Nabuurs, G.-J., Mrabet, R., Abu Hatab, A., Bustamante, M., Clark, H., Havlík, P., House, J., Mbow, C., Ninan, K. N., Popp, A., Roe, S., Sohngen, B., & Towprayoon, S. https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_FinalDraft_Chapter7.pdf
- Ivezić, V., Yu, Y., & van der Werf, W. (2021). Crop yields in European agroforestry systems: A meta-analysis. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 606631. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.606631>
- Jančíková, V., & Jablonský, M. (2025). Thermal Modification of Wood—A Review. *Sustainable Chemistry*, 6(3), 19. <https://doi.org/10.3390/suschem6030019>
- Jasinevičius, G., Lindner, M., Verkerk, P. J., & Aleinikovas, M. (2017). Assessing impacts of wood utilisation scenarios for a Lithuanian bioeconomy: Impacts on carbon in forests and harvested wood products and on the socio-economic performance of the forest-based sector. *Forests*, 8, 133. <https://doi.org/10.3390/f8040133>
- Joffre, R., Vacher, J., de los Llanos, C., & Long, G. (1988). The dehesa: An agrosilvopastoral system of the Mediterranean region with special reference to the Sierra Morena area of Spain. *Agroforestry Systems*, 6, 25–52.
- 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*, 116, 14526–14531. <https://doi.org/10.1073/pnas.1904231116>
- Jørgensen, S. V., Hauschild, M. Z., & Nielsen, P. H. (2015). The potential contribution to climate change mitigation from temporary carbon storage in biomaterials. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(4), 451–462. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0845-3>
- Kharazipour, A., & Kües, U. (2007). Recycling of wood composites and solid wood products. In U. Kües (Ed.), *Wood production, wood technology, and biotechnological impacts* (pp. 509–533). Universitätsverlag Göttingen.
- Király, É., & Borovics, A. (2024). Preparatory study for carbon sequestration modelling of agroforestry systems in Hungary: The assessment of the yield class distribution of windbreaks. *Acta Agraria Debreceniensis*, 1, 73–78.

- Király, É., & Borovics, A. (2024). Preparatory study for carbon sequestration modelling of agroforestry in Hungary: The assessment of the average canopy closure of windbreaks. *Hungarian Agricultural Research*, 2024/I, 4–8.
- Király, É., & Kottek, P. (2014). A hazai faipari termékekben tárolt szén mennyiségének és készletváltozásának becslése a 2013 IPCC Supplementary Guidance módszertana alapján. *Erdészettudományi Közlemények*, 4(1), 95–107.
- 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. (2023b). A new model for predicting carbon storage dynamics and emissions related to the waste management of wood products: Introduction of the HWP-RIAL model. *Acta Agraria Debreceniensis*, 1, 75–81. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/12495>
- Király, É., Börcsök, Z., Kocsis, Z., Németh, G., Polgár, A., & Borovics, A. (2023). A new model for predicting carbon storage dynamics and emissions related to the waste management of wood products: Introduction of the HWP-RIAL model. *Acta Agraria Debreceniensis*, 1, 75–81. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/11683>
- 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.
- Király, É., Keserű, Z., Molnár, T., Szabó, O., & Borovics, A. (2024). Carbon sequestration in the aboveground living biomass of windbreaks—Climate change mitigation by means of agroforestry in Hungary. *Forests*, 15, 63. <https://doi.org/10.3390/f15010063>
- Király, É., Kis-Kovács, G., Börcsök, Z., Kocsis, Z., Németh, G., Polgár, A., & Borovics, A. (2023a). 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>
- Klein, D., Höllerl, S., Blaschke, M., & Schulz, C. (2013). The contribution of managed and unmanaged forests to climate change mitigation: A model approach at stand level for the main tree species in Bavaria. *Forests*, 4, 43–69.
- Knauf, M., Joosten, R., & Frühwald, A. (2016). Assessing fossil fuel substitution through wood use based on long-term simulations. *Carbon Management*, 7(1–2), 67–77. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1166427>
- Knauf, M., Köhl, M., Mues, V., Olschofsky, K., & Frühwald, A. (2015). Modeling the CO₂ effects of forest management and wood usage on a regional basis. *Carbon Balance and Management*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0024-7>
- Kohlmaier, G., Kohlmaier, L., Fries, E., & Jaeschke, W. (2007). Application of the stock change and the production approach to harvested wood products in the EU-15 countries: A comparative analysis. *European Journal of Forest Research*, 126, 209–223.
- Kollár, T., & Borovics, A. (2021). A magyarországi hosszú lejáratú erdészeti tartamkísérleti hálózat fenntartásának korszerű irányelvei, adatfeldolgozási módszerei és legfontosabb eredményei. *Erdészettudományi Közlemények*, 11(1–2), 95–114.
- Kottek, P. (2017). National Forest Projection–2050. In A. Bidló & F. Facskó (Eds.), *VI. Faculty Scientific Conference Book of Abstracts* (p. 59). University of 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-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.
- Központi Statisztikai Hivatal (KSH). (2024). Az egyes hulladékfajták mennyisége a kezelés módja szerint. https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0029.html
- 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 B. Foster, M. Knizek, & W. Grodzki (Eds.), *Methodology of Forest Insect and Disease Survey in Central Europe* (pp. 248–249).
- Lal, R. (2010). Managing soils and ecosystems for mitigating anthropogenic carbon emissions and advancing global food security. *BioScience*, 60, 708–721.
- Landsberg, J. J., & Waring, R. H. (1997). A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95, 209–228.
- 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. <https://doi.org/10.36333/fs07>
- Li, L., Wei, X. Y., Zhao, J. H., Hayes, D., Daigneault, A., Weiskittel, A., & Kizha, A. R. (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>
- Li, N., & Toppinen, A. (2011). Corporate responsibility and sustainable competitive advantage in forest-based industry: Complementary or conflicting goals? *Forest Policy and Economics*, 13(2), 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2010.06.002>
- Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., Ong, C. K., Mulia, R., Lusiana, B., & Muthuri, C. (2016). Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142, 51–69.
- Ma, Z., Chen, H. Y., Bork, E. W., Carlyle, C. N., & Chang, S. X. (2020). Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: A global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 29, 1817–1828. <https://doi.org/10.1111/geb.13145>
- Malézieux, E., Crozat, Y., Dupraz, C., & Laurans, M. (2009). Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29, 43–62.
- Martin, F. S., & van Noordwijk, M. (2009). Trade-offs analysis for possible timber-based agroforestry scenarios using native trees in the Philippines. *Agroforestry Systems*, 76, 555–567.
- Masera, O. R., Garza-Caligaris, J. F., Kanninen, M., Karjalainen, T., Liski, J., Nabuurs, G. J., Pussinen, A., de Jong, B. H. J., & Mohren, G. M. J. (2003). Modelling carbon sequestration in afforestation, agroforestry and forest management projects: The CO2FIX V.2 approach. *Ecological Modelling*, 164, 177–199.
- Mátyás, Cs., Berki, I., Bidló, A., Csóka, GY., Czimer, K., Führer, E., Gálos, B., Gribovski, 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.
- Mayer, S., Wiesmeier, M., Sakamoto, E., Hübner, R., Cardinael, R., Kühnel, A., & Kögel-Knabner, I. (2022). Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems—A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107689. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>
- Mayus, M., van Keulen, H., & Stroosnijder, L. (1999). A model of tree–crop competition for windbreak systems in the Sahel: Description and evaluation. *Agroforestry Systems*, 43, 183–201.

- McGuire, A. D., Wirth, C., Apps, M., Beringer, J., Klein, J., Epstein, H., Kicklighter, D. W., Bhatti, J., Chapin III, F. S., de Groot, B., et al. (2002). Environmental variation, vegetation distribution, carbon dynamics and water/energy exchange at high latitudes. *Journal of Vegetation Science*, 13, 301–314.
- Metherall, A. K., Harding, L. A., Cole, C. V., & Parton, W. J. (1993). *CENTURY Soil Organic Matter Model Environment Technical Documentation*. USDA-ARS, Great Plains System Research Unit.
- Minasny, B., Malone, B. P., McBratney, A. B., Angers, D. A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B. S., et al. (2017). Soil carbon 4 per mille. *Geoderma*, 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>
- Mobbs, D. C., Cannell, M. G. R., Crout, N. M. J., Lawson, G. J., Friend, A. D., & Arah, J. (1998). Complementarity of light and water use in tropical agroforests I. Theoretical model outline, performance and sensitivity. *Forest Ecology and Management*, 102, 259–274.
- Mosquera-Losada, M. R., McAdam, J. H., Romero-Franco, R., Santiago-Freijanes, J. J., & Rigueiro-Rodríguez, A. (2009). Definitions and components of agroforestry practices in Europe. In A. Rigueiro-Rodríguez, J. McAdam, & M. R. Mosquera-Losada (Eds.), *Agroforestry in Europe: Current Status and Future Prospects* (pp. 3–19). Springer.
- Mőcsényi, M. (2009). Vélemény a REKK illegális fakitermelést tagláló tanulmányáról. <https://rekk.hu/downloads/projects/fagosz-reakcio.pdf>
- Mupepele, A. C., Keller, M., & Dormann, C. F. (2021). European agroforestry has no unequivocal effect on biodiversity: A time-cumulative meta-analysis. *BMC Ecology and Evolution*, 21, 193. <https://doi.org/10.1186/s12862-021-01911-9>
- Myllyviita, T., Soimakallio, S., Judl, J., et al. (2021). Wood substitution potential in greenhouse gas emission reduction—Review on current state and application of displacement factors. *Forest Ecosystems*, 8, 42. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00326-8>
- Nabuurs, G. J., Schelhaas, M. J., & Pussinen, A. (2000). Validation of the European Forest Information Scenario Model (EFISCEN) and a projection of Finnish forests. *Silva Fennica*, 34(2), 167–179.
- Nair, P. K. R. (1993). *An introduction to agroforestry*. Kluwer Academic Publishers.
- Nair, P. K. R. (2011). Methodological challenges in estimating carbon sequestration potential of agroforestry systems. In B. M. Kumar & P. K. R. Nair (Eds.), *Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems: Opportunities and Challenges* (Advances in Agroforestry, Vol. 8, pp. 1–16). Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1630-8_1
- Nair, P. K. R., Nair, V. D., Kumar, B. M., & Showalter, J. M. (2010). Carbon sequestration in agroforestry systems. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 108, pp. 237–307). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)08005-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)08005-3)
- NAK. (2022). *Fától az Erdőig—új támogatási lehetőségek*. National Chamber of Agriculture. <https://www.nak.hu/tajekoztatasi-szolgalatas/erdogazdalkodas/104858-fatol-az-erdoig-uj-tamogatasi-lehetosegek>
- National Environmental Information System. (2022). <http://web.okir.hu/en/>
- National Waste Management Plan 2021–2027. (2021). Ministry of Innovation and Technology. <https://kormany.hu/dokumentumtar/orszagoshulladekgazdalkodasi-terv-2021-2027>
- Németh, G. (2012). *Fafeldolgozási hulladékok kezelése, felhasználhatósága*. University of West Hungary Press.
- NFK. (2023). *Summary data on forests in Hungary*. National Land Centre, Forestry Department. https://nfk.gov.hu/Magyarorszag_erdeivel_kapcsolatos_adatok_news_513
- NIR. (2022). *National Inventory Report for 1985–2020: Chapter: Land-Use, Land-Use Change and Forestry*. Somogyi, Z., Szakálas, J., & Tobisch, T. (Eds.).
- NIR. (2023). *National Inventory Report for 1985–2021: Chapter: Land-Use, Land-Use Change and Forestry*. Somogyi, Z., Tobisch, T., & Király, É. (Eds.). Hungarian Meteorological Service.

- OECD. (2009). *The bioeconomy to 2030: Designing a policy agenda. Main findings and policy conclusions*. OECD International Futures Project. <https://www.oecd.org/futures/long-termtechnologicalsocietalchallenges/thebioeconomyto2030designingapolicyagenda.htm>
- OKIR. (2023). *National Environmental Information System*. <http://web.okir.hu/en/>
- Oonk, H. (2012). Efficiency of landfill gas collection for methane emission reduction. *Greenhouse Gas Measurement and Management*, 2(2–3), 129–145. <https://doi.org/10.1080/20430779.2012.730798>
- Oreskes, N. (2003). The role of quantitative models in science. In C. D. Canham, J. Cole, & W. Lauenroth (Eds.), *Models in Ecosystem Science* (pp. 13–31). Princeton University Press.
- OSAP. (2022). *Erdőgazdálkodás*. <https://agrarstatisztika.kormany.hu/erdogazdalkodas2> (Accessed November 6, 2023)
- Panozzo, A., Reubens, B., Pardon, P., De Swaef, T., Coudron, W., Vamerali, T., & Verheyen, K. (2022). The effect of tree rows on yield of grain crops: A meta-analysis on agroforestry systems. In M. A. Dalla, C. Maucieri, & D. Ventrella (Eds.), *Temperate Climates. Proceedings of the 51st Conference of the Italian Society of Agronomy* (pp. 9–10). Padova, Italy.
- Pansak, W., Hilger, T., Lusiana, B., Kongkaew, T., Marohn, C., & Cadisch, G. (2010). Assessing soil conservation strategies for upland cropping in Northeast Thailand with the WaNuLCAS model. *Agroforestry Systems*, 79, 123–144.
- Parobek, J., Paluš, H., Moravčík, M., Kovalčík, M., Dzian, M., Murgaš, V., & Šimo-Svrček, S. (2019). Changes in carbon balance of harvested wood products resulting from different wood utilization scenarios. *Forests*, 10(7), 590. <https://doi.org/10.3390/f10070590>
- Pent, G. J. (2020). Over-yielding in temperate silvopastures: A meta-analysis. *Agroforestry Systems*, 94, 1741–1758. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00494-6>
- Peszlen, R. J. (2015). Statikus fatermési modellek kialakulása és fejlődése [Emergence and evolution of the static forest crop models]. In *Tanulmánykötet Mészáros Károly tiszteletére* (pp. 5–14). Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó.
- Pilli, R., Grassi, G., Kurz, W. A., Abad Viñas, R., & Guerrero, N. (2016). Modelling forest carbon stock changes as affected by harvest and natural disturbances: I. Comparison with countries' estimates for forest management. *Carbon Balance and Management*, 11, 5. <https://doi.org/10.1186/s13021-016-0048-2>
- Pilli, R., Grassi, G., Kurz, W. A., Fiorese, G., & Cescatti, A. (2017). The European forest sector: Past and future carbon budget and fluxes under different management scenarios. *Biogeosciences*, 14, 2387–2405.
- Pilli, R., Grassi, G., Kurz, W. A., Smyth, C. E., & Blujdea, V. (2013). Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995 to 2020. *Ecological Modelling*, 266, 144–171. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.07.003>
- Plieninger, T., Hui, C., Gaertner, M., & Huntsinger, L. (2014). The impact of land abandonment on species richness and abundance in the Mediterranean Basin: A meta-analysis. *PLoS ONE*, 9(5), e98355. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098355>
- Profft, I., Mund, M., Weber, G. E., Weller, E., & Schulze, E.-D. (2009). Forest management and carbon sequestration in wood products. *European Journal of Forest Research*, 128, 399–413. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0283-5>
- Qi, X., Mize, C. W., Batchelor, W. D., Takle, E. S., & Litvina, I. V. (2001). SBELTS: A model of soybean production under tree shelter. *Agroforestry Systems*, 52, 53–61.
- Rédei, K. (2020). *Bevezetés az ültetvényeszerű fatermesztés gyakorlatába* (2nd ed.). MED-KÖR Bt.
- Rédei, K., Szabó, F., Honfy, V., & Ábri, T. (2023). Growth and yield patterns of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) sample trees affected by site conditions: Case studies. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2, 125–128. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/2/13293>
- Regionális Energiagazdasági Kutatóközpont (REKK). (2009). Erdészeti és ültetvény eredetű fás szárú energetikai biomassa Magyarországon. https://rekk.hu/downloads/projects/wp2009_5.pdf

- REKK. (2024). *Karbon megkötés modellezése*. <https://rekk.hu/modellezes/karbon-megkotes-modellezese>
- Rigueiro-Rodríguez, A., McAdam, J. H., & Mosquera-Losada, M. R. (Eds.). (2009). *Agroforestry in Europe: Current status and future prospects*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8272-6>
- Rotz, C. A., Corson, M. S., Chianese, D. S., Montes, F., Hafner, S. D., Bonifacio, H. F., & Coiner, C. U. (2022). *The Integrated Farm System Model: Reference Manual* (Version 4.7, pp. 253). Pasture Systems and Watershed Management Research Unit, USDA Agricultural Research Service.
- Running, S. W., & Gower, S. T. (1991). FOREST-BGC: A general model of forest ecosystem processes for regional applications. II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 9(1–2), 147–160. <https://doi.org/10.1093/treephys/9.1-2.147>
- Rüter, S. (2011). Projection of net-emissions from harvested wood products in European countries. In *Johann Heinrich von Thünen-Institute (vTI)* (p. 63). Hamburg, Germany.
- Rüter, S. (2016). *Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz: Das Modell WoodCarbonMonitor*. Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Holzforschung München.
- Sánchez López, J., Grassi, G., Vizzarri, M., Fiorese, G., Pilli, R., Jonsson, R., Viorel, B., Korosuo, A., Jasinevičius, G., & Avraamides, M. (2021). *Brief on the role of the forest-based bioeconomy in mitigating climate change through carbon storage and material substitution* (JRC124374). European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/23400>
- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M. H., & Parrish, D. J. (2006). Potential soil carbon sequestration and CO₂ offset by dedicated energy crops in the USA. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25(5), 441–472. <https://doi.org/10.1080/07352680600961021>
- Sathaye, J., Makundi, W., & Andrasko, K. (1995). A comprehensive mitigation assessment process (COMAP) for the evaluation of forestry mitigation options. *Biomass and Bioenergy*, 8(5), 345–356. [https://doi.org/10.1016/0961-9534\(95\)00027-5](https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00027-5)
- Schelhaas, M. J., Esch, P. W., Groen, T. A., de Jong, B. H. J., Kanninen, M., Liski, J., Masera, O., Mohren, G. M. J., Nabuurs, G. J., Palosuo, T., Pedroni, L., Vallejo, A., & Vilen, T. (2004). *CO2FIX V 3.1: A modelling framework for quantifying carbon sequestration in forest ecosystems*. Alterra, Wageningen, Netherlands. ISBN 1566-7197.
- Schweinle, J., Köthke, M., Englert, H., & Dieter, M. (2018). Simulation of forest-based carbon balances for Germany: A contribution to the ‘carbon debt’ debate. *WIREs Energy and Environment*, 7(1), e260. <https://doi.org/10.1002/wene.260>
- 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(5867), 1238–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1151861>
- Shi, L., Feng, W., Xu, J., & Kuzyakov, Y. (2018). Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degradation & Development*, 29(12), 3886–3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>
- 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, 104370. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104370>
- Sokka, L., Koponen, K., & Keränen, J. T. (2015). *Cascading use of wood in Finland, with comparison to selected EU countries* (p. 25). VTT Technical Research Centre of Finland.
- Somogyi, Z. (1997). Mitigation analysis in the forestry sector. In *Hungarian Climate Change Country Study* (pp. 85–112). Systemexpert Consulting Ltd.
- Somogyi, Z. (2020). Az erdők szénlekötésének új referenciaszintje. *Erdészeti Lapok*, 155(2), 38–41.
- Somogyi, Z. (2023). *CASMOFOR (verziószám: 7.0)*. Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézet. <http://www.scientia.hu/casmofoor>

- Somogyi, Z., Tobisch, T., & Szepesi, A. (2019). *National Forest Accounting Plan, Hungary*. Gödöllő, Hungary: Nemzeti Agrárkutatási és Innovációs Központ (NAIK). <http://cdr.eionet.europa.eu/hu/eu/mmr/lulucf/envxgc1ma>
- Stephens, W., & Hess, T. M. (1999). Modelling the benefits of soil water conservation using the PARCH model—A case study from a semi-arid region of Kenya. *Journal of Arid Environments*, 41(4), 335–344. <https://doi.org/10.1006/jare.1998.0484>
- Szomorad, F., & Timár, G. (2014). Az akáckérdésről, tényyszerűen [Facts about the black locust issue]. *Erdészeti Lapok*, 149, 114–117.
- Talbot, G. (2011). *L'intégration spatiale et temporelle du partage des ressources dans un système agroforestier noyers-céréales: Une clef pour en comprendre la productivité?* [Doctoral dissertation, Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc].
- Tian, H., Melillo, J. M., Kicklighter, D. W., McGuire, A. D., & Helfrich, J. (1999). The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO₂ in the United States. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51(2), 414–452. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0889.1999.t01-1-00010.x>
- Tobisch, T., & Kottek, P. (2013). Forestry-related databases of the Hungarian Forestry Directorate (Version 1.1). *National Food Chain Safety Office (NFC SO)*, Budapest.
- 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>
- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G., & Plieninger, T. (2016). Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- 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(2), 178. <https://doi.org/10.1515/aslh-2016-0001>
- UNFCCC. (2006). *Revised simplified baseline and monitoring methodologies for selected small-scale afforestation and reforestation project activities under the Clean Development Mechanism*. United Nations Framework Convention on Climate Change. http://cdm.unfccc.int/UserManagement/FileStorage/CDMWF_AM_A3II6AX6KGW5GBB7M6AI98UD3W59X4
- UNFCCC. (2007). *Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session*. Bali, Indonesia: United Nations Framework Convention on Climate Change.
- Van Noordwijk, M., & Lusiana, B. (1999). WaNuLCAS, a model of water, nutrient and light capture in agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 43, 217–242. <https://doi.org/10.1023/A:1026450408312>
- Verkerk, P. J., Delacote, P., Hurmekoski, E., Kunttu, J., Matthews, R., Mäkipää, R., Mosley, F., Perugini, L., Reyer, C. P. O., Roe, S., & Trømborg, E. (2022). *Forest-based climate change mitigation and adaptation in Europe* (From Science to Policy 14). European Forest Institute. <https://doi.org/10.36333/fs14>
- Vis, M., Mantau, U., & Allen, B. (2016). *Study on the optimised cascading use of wood* (p. 337). Brussels: European Commission.

- Walker, A. P., Mutuo, P. K., van Noordwijk, M., Albrecht, A., & Cadisch, G.** (2007). Modelling of planted legume fallows in Western Kenya using WaNuLCAS. (I) Model calibration and validation. *Agroforestry Systems*, 70, 197–209. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9037-4>
- Wenzel, W. W., Philipsen, F. N., Herold, L., Kingsland-Mengi, A., Laux, M., Golestanifard, A., Strobel, B. W., & Duboc, O.** (2023). Carbon sequestration potential and fractionation in soils after conversion of cultivated land to hedgerows. *Geoderma*, 435, 116501. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116501>
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Thürig, E., & Kaufmann, E.** (2010). National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios: A model-based assessment. *Environmental Science & Policy*, 13(1), 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.10.004>
- Williams, J. R., Jones, C. A., Kiniry, J. R., & Spanel, D. A.** (1989). The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*, 32(2), 497–511. <https://doi.org/10.13031/2013.31032>
- Wilson, J.** (2010). Life-cycle inventory of particleboard in terms of resources, emissions, energy and carbon. *Wood and Fiber Science*, 42(Special Issue), 90–106.
- Winrock International.** (2014). *AFOLU Carbon Calculator: The agroforestry tool – Underlying data and methods*. Prepared under Cooperative Agreement No. EEM-A-00-06-00024-00.
- Xie, S. H., Kurz, W. A., & McFarlane, P. N.** (2021). Inward- versus outward-focused bioeconomy strategies for British Columbia's forest products industry: A harvested wood products carbon storage and emission perspective. *Carbon Balance and Management*, 16, 19. <https://doi.org/10.1186/s13021-021-00193-4>
- Xu, Z., Smyth, C. E., Lemprière, T. C., Rampley, G. J., & Kurz, W. A.** (2018). Climate change mitigation strategies in the forest sector: Biophysical impacts and economic implications in British Columbia, Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 23, 279–299. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9735-7>
- Zamora, D. S., Jose, S., Jones, J. W., & Cropper, W. P.** (2009). Modeling cotton production response to shading in a pecan alleycropping system using CROPGRO. *Agroforestry Systems*, 76(2), 423–435. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9210-6>
- Zhao, J., Liu, D., Zhu, Y., Peng, H., & Xie, H.** (2022). A review of forest carbon cycle models on spatiotemporal scales. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130692. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130692>

8 ÁBRA- ÉS TÁBLÁZATJEGYZÉK

Ábrajegyzék

1. ábra: Az AFOLU szektorhoz kapcsolódó klímamitigációs intézkedések mitigációs potenciál értékei az IPCC Hatodik Értékelő Jelentése (IPCC 2022) szerint. 6
2. ábra: A CASMOFOR modell folyamatábrája. (Forrás: Somogyi 2023) 9
3. ábra: A DAS modell folyamatábrája (Forrás: Kottek 2023) 11
4. ábra: A fa hosszú távú beépítése az egyik legigéretesebb klímamitigációs lehetőség (fotó: Dr. Borovics Attila). 12
5. ábra: A mezővédő erdősávok a legjellegzetesebb hazai agrárerdészeti tájelemek (Magyarország, Üröm, fotó: Király Éva). 19
6. ábra: Az Erdőipari Szén Modell, azaz Forest Industry Carbon Modell (FICM) folyamatábrája. 28
7. ábra: A HWP részmodell folyamatábrája. 29
8. ábra: a mezővédő erdősávok területének megoszlása fafajcsoportok szerint az OEA 2020. évi statisztikai állapotában. 40
9. ábra: Balra: a mezővédő erdősávok klíma és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (A klíma kategóriák a következők: Bükkös, 2 Gyertyános tölgyes, 3 Kocsánytalan tölgyes - cseres, 4 erdősztepp. A fatermési osztály kódok a szokásos szerint 1 a legjobb, 6 a leggyengébb.)
Jobbra: a mezővédő erdősávok hidrológia és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (A hidrológiai kódok: 1 Többletvízhatástól független, 2 Változó vízellátású, 3 Szivárgóvízű, 4 Időszakos vízhatású, 5 Állandó vízhatású, 6 Felszínig nedves, 7 Vízzel borított.)
..... 41
10. ábra: Balra: a mezővédő erdősávok fizikai talajféleség és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Fizikai talajféleség kódok: 1 Törmelék, 2 Durva homok, 3 Homok, 4 Homokos vályog, 5 Vályog, 6 Agyagos vályog, 7 Agyag, 8 Agyagos homok, 9 Homokos agyag, 10 Nehéz agyag). Jobbra: a mezővédő erdősávok termőréteg mélység és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Termőréteg mélység kódok: 1 Igen sekély, 2 Sekély, 3 Közepes mélységű, 4 Mély, 5 Igen mély). 41
11. ábra: Balra: a mezővédő erdősávok nagyj és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Nagyfaják: 1 Nagyalföld, 2 Északi-középhegység, 3 Dunántúli-középhegység, 4 Kisalföld, 5 Nyugat-Dunántúl, 6 Dél-Dunántúl). Jobbra: a mezővédő erdősávok fafajcsoport és fatermési osztály szerinti kétváltozós hisztogramja. (Fafajcsoport kódok: 347 KST, 348 KTT, 349 vörös tölgy, 350 CS, 351 B, 352 GY, 353 A, 354 NNY, 355 HNY, 356 FÜ, 357 éger, 358 nyír, 359 EF, 360 FF, 361 LF.) 42
12. ábra: a mezővédő erdősávok fafajcsoport és záródás szerinti kétváltozós hisztogramja. (Fafajcsoport kódok: 347 KST, 348 KTT, 349 vörös tölgy, 350 CS, 351 B, 352 GY, 353 A, 354 NNY, 355 HNY, 356 FÜ, 357 éger, 358 nyír, 359 EF, 360 FF, 361 LF.) 45
13. ábra: a záródás értékek súlyozott átlaga fafajcsoportonként a mezővédő erdősávokban. (Fafajcsoport kódok: 347 KST, 348 KTT, 349 vörös tölgy, 350 CS, 351 B, 352 GY, 353 A, 354 NNY, 355 HNY, 356 FÜ, 357 éger, 358 nyír, 359 EF, 360 FF, 361 LF.) 46
14. ábra: a mezővédő erdősávok kor és záródás szerinti kétváltozós hisztogramja. 46
15. ábra: a vizsgált mezővédő erdősávok záródása a kor függvényében. 47
16. ábra: Wenzel et al. (2023) mezővédő erdősávok talajszéntartalmának változására vonatkozó hamis idősoros vizsgálatának mintaterületei. (Forrás Wenzel et al. 2023) 48
17. ábra: Széntárolás és kumulatív kibocsátás 2020-tól 2050-ig. 53
18. ábra: A teljes kumulatív kibocsátás és a mitigációs potenciál a paraméterek függvényében. 55

19. ábra: Az egyes scenáriók mitigációs potenciál értékei 2050-ig és 2130-ig a BAU forgatókönyvéhez képest.	56
20. ábra: Széntárolás és kumulált kibocsátások 2020-tól 2130-ig a BAU és a Kombinált scenáriókban.	57
21. ábra: a 2017-2021 közötti átlagos folyónövedék és fakitermelés (NFK, 2023) és a 2022-2050 időszakra prognosztizált évente átlagosan kitermelésre elérhetővé váló élőfakészlet mennyisége.	63
22. 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 oszlopok pedig a választékszerkezet becsült lehetséges átalakítását.	65
23. ábra: a faválasztékok 2017-2021 közötti átlagos mennyisége, valamint növelt iparifa választékkal, illetve megnövelt fakitermeléssel kalkuláló lehetséges forgatókönyvek alapján készített választék-előrejelzések.	66
24. ábra: a fatermékek 2017-2021 közötti átlagos termelése, illetve megnövelt fakitermeléssel kalkuláló lehetséges forgatókönyvek alapján készített előrejelzések.	67
25. ábra: a fatermékekben tárolt szén historikus értékei, illetve a BAU scenárió szerinti előre jelzett mennyiségek.	72
26. ábra: a fatermékekben realizálódó historikus és a BAU scenárió szerint előre jelzett szénmegkötés értékek, és a historikus és előre jelzett szén-dioxid- és metán kibocsátások értékei szén-dioxid egyenértékben kifejezve.	72
27. ábra: a vizsgált scenáriók teljes nettó szén-dioxid egyenértékben kifejezett emissziói 2050-ig előre vetítve (beleértve a metán, valamint a szén-dioxid emissziókat is). (A negatív értékek szén-dioxid megkötéseket jelölnek, míg a pozitív értékek kibocsátásokat.)	73
28. ábra: a használatban lévő fatermékek teljes szénkészlete 2050-ig előre vetítve a vizsgált scenáriók szerint.	74
29. ábra: a hulladéklerakókon akumulálódó fatermékek szénkészlete a különböző vizsgált scenáriók szerint előre vetítve 2050-ig.	75
30. ábra: a hazai fatermékek 2017-2021 közötti átlagos nettó szénmegkötése és a különböző scenáriók 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 scenáriókat. A negatív értékek szén-dioxid megkötéseket jelölnek.)	77
31. ábra: a vizsgált scenáriók átlagos éves klímamitigációs potenciálja a BAU scenárióhoz képest. (Az értékek azt mutatják, hogy mennyi addicionális szénmegkötést lehet évente elérni az egyes intézkedések és intézkedéskombinációk segítségével a BAU szintjéhez képest. A sötétzöld oszlopok jelölik a 2017-2021 időszak átlagához képest megnövelt fakitermeléssel jellemzett scenáriókat.)	78
32. ábra: Fakitermelési előrejelzések a két modellezett scenárióban (BAU és Intenzifikáció).	83
33. ábra: A hazai erdők historikus nettó szénegyenlege az ÜHG leltár szerint, illetve a modellezett nettó HWP szénegyenleg, valamint a termék- és energiahelyettesítés révén elkerült kibocsátások. (A negatív számok a szénmegkötést vagy elkerült, míg a pozitív számok a kibocsátást jelölnek.)	86
34. ábra: Historikus és prognosztizált szénkészletek a HWP széntárolóban és a hulladéklerakókon a BAU scenárió szerint.	87
35. ábra: Historikus és prognosztizált szénkészletek a HWP széntárolóban és a hulladéklerakókon az Intenzifikációs scenárió szerint.	87

36. ábra: Historikus és prognosztizált szénmérleg, illetve a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátások a BAU scenárió szerint. (A negatív számok szénmegkötést vagy elkerült kibocsátást, míg a pozitív számok kibocsátást jelölnek.)	89
37. ábra: Historikus és prognosztizált szénmérleg, illetve a termék- és energiahelyettesítés útján elkerült kibocsátások az Intenzifikációs scenárió szerint. (A negatív számok szénmegkötést vagy elkerült kibocsátást, míg a pozitív számok kibocsátást jelölnek.)	89
38. ábra: a 2025 és 2029 között telepítendő mezővédő erdősávok területének megoszlása fajtacsoporthoz szerint	100
39. ábra: teljes szénmegkötés az újonnan telepített mezővédő erdősávokban fajtacsoporthoz szerint.	101
40. ábra: szénfelhalmozódás a biomassza, avar, holtfa és talaj széntárolókban	101
41. ábra: az újonnan telepített mezővédő erdősávok éves szénmérlege széntárolók szerinti bontásban (A negatív értékek szénmegkötést jelölnek kt CO ₂ egyenértékben kifejezve.)	102
42. ábra: a mezővédő erdősávokról kitermelt tűzifa széntartalma, illetve az energiahelyettesítő hatás mértéke. (A negatív számok az energiahelyettesítés mértékét jelölik kt CO ₂ mértékegységben kifejezve, míg a pozitív számok a tűzifa szénttartalmát szemléltetik kt C mértékegységben kifejezve.)	103
43. ábra: az újonnan telepített mezővédő erdősávok éves átlagos klímamitigációs potenciálja a 2025-2050 időszakban széntárolók szerinti bontásban	104

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A mérsékelt övi agrárerdészeti rendszerek kedvező és kedvezőtlen hatásainak áttekintése Dmuchowski et al. (2024) meta-analízise alapján.	22
2. táblázat: alapértelmezett felezési idők és konverziós faktorok az IPCC (2019) szerint.	31
3. táblázat: a hulladék részmodell paraméterezése.	37
4. táblázat: A lombkoronazáródás értékek súlyozott átlaga fafajcsoportonként. (KST: kocsányos tölgy, KTT: kocsánytalan tölgy, VT: vörös tölgy, CS: cser, B: bükk, GY: gyertyán, A: akác, NNY: nemesnyár, HNY: hazai nyár, FÜ: fűz, É: éger, NYI: nyír, EF: erdeifenyő, FF: feketefenyő, LF: lucfenyő)	44
5. táblázat: A vizsgált scenáriók paraméterezése.	51
6. táblázat: A kidolgozott forgatókönyvek összesített kumulált kibocsátásai a BAU kibocsátás százalékában kifejezve.	54
7. táblázat: a scenáriók ismertetése.	68
8. táblázat: a scenáriók paraméterezése.	69
9. táblázat: Forgatókönyv-paraméterezés. (A 2022-es évre mindkét forgatókönyvben BAU paramétereket használtunk. Az Intenzifikációs forgatókönyvben a paraméterek fokozatosan változtak 2022 és 2050 között).	84
10. táblázat: Választékárányok a BAU (2017-2021 átlaga) és az Intenzifikációs (Borovics et al. 2024) scenárióban.	85