

ERDÉSZETI TECHNOLÓGIÁK SZÉNLÁBNYOMA ÉS ELŐREVETÍTETT KLÍMAKOCKÁZATA

Polgár András¹, Pécsinger Judit¹, Horváth Adrienn¹, Szakálosné Mátyás Katalin²,
Horváth Attila László², Rumpf János² és Kovács Zoltán³

¹Soproni Egyetem, Környezet- és Földtudományi Intézet

²Soproni Egyetem, Erdészeti-Műszaki és Környezettechnikai Intézet

³NAIK, Erdészeti Tudományos Intézet

Kivonat

Az erdőgazdálkodás az egyetlen olyan gazdasági tevékenység, amely jelentős mennyiségű atmoszférikus szén tartós kivonását is lehetővé teszi. Kutatásunk célja a nyersfa termékek teljes életciklusán belül rávilágítani, az erdei termelési modul hazai fahasználati szubmoduljának szénlábnomára. A fahasználatok technológiai vonatkozásainak környezeti vizsgálata fontos kiegészítést jelenthet az eddigi klímakutatásokhoz. A fahasználat rövidfás munkarendszereinek környezeti hatásmi-nősítését valósítottuk meg az életciklus-elemzés (LCA) módszerével. Közös funkcionális egységre vetítve az elő és vég-használatok összehasonlító környezeti LCA-ját végeztük el: bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokban. A jellemző technológiákat szénlábnomuk (GWP) alapján rangsoroltuk, fahasználati életút szakaszonként differenciáltan és a teljes fahasználati életciklusra vonatkozóan is. Területhasználati megközelítésben a hektáronként vett abszolút szénlábnom (együttesen a fosszilis és biotikus eredetű) vizsgálata szerint a legjelentősebb hatással a véghasználati életútszakasz járt. A szénlábnomhoz való hozzájárulás %-ában a véghasználatok esetén a „nemesnyár (8%) – bükk (9%) – luc (11%) – akác (35%) – tölgy (37%)” növekvő technológiai rangsort kaptuk. Az állományok rangsora az abszolút szénlábnom alapján a teljes technológiai életciklusban a „nemesnyár (77109,06) – luc (120868,7) – bükk (165050,7) – akác (354843,2) – tölgy (439544,1)” rangsort adta (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A technológiai folyamatok tisztán fosszilis eredetű szénlábnomát illetően azonban a teljes életciklusban a „bükk (2326,0) – tölgy (7679,89) – nemesnyár (9063,94) – luc (11109,85) – akác (11206,34)” rangsor adódott (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). Mivel megállapítottuk az egyes folyamatok klímaváltozáshoz való hozzájárulását, ökológiai kockázatbecslést kapcsoltunk hozzá. A szén-megkötési potenciál meghatározásával megállapítottuk, hogy a nyersfa termékek alacsony emissziójú nyersanyagként íté-
lhetők meg.

Kulcsszavak: környezeti életciklus-elemzés, szénlábnom, fahasználati technológiák, fahasználat.

CARBON FOOTPRINT AND PREDICTED CLIMATE RISK OF FOREST TECHNOLOGIES

Abstract

Forest management is the only economic activity which also permits the prolonged extraction of significant amounts of atmospheric carbon. The purpose of our research is to determine the carbon footprint of forest loggings during utilization within the entire life cycle of raw wood products. In addition, the environmental impact assessment of forest logging technologies also can be an important factor in climate change adaptation. Shortwood forestry work systems has been assessed by environmental impact assessment using the Life Cycle Analysis (LCA) method. Based on a common functional unit (1 ha), a comparative environmental LCA for intermediate and final cutting was performed in stands of beech, oak, spruce, acacia, hybrid poplar. Based on results, a carbon footprint order (GWP) were calculated for utilization life cycle phases and for the entire tree utilization life cycle. Final cutting had the most significant impact based on the analysis of the absolute carbon footprint (ABF) per hectare (considered fossile and biotic origin together). The distribution of ABF by final cutting showed the following order: hybrid poplar (8%) – beech (9%) – spruce (11%) – acacia (35%) – oak (37%). For the whole

technological life cycle, the ranking of ABF was "hybrid poplar (77109,06) - spruce (120868,7) - beech (165050,7) - acacia (354843,2) - oak (439544,1) (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.]). For the carbon footprint of fossil origin, the ranking was „beech (2326,0) – oak (7679,89) – hybrid poplar (9063,94) – spruce (11109,85) – acacia (11206,34) (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.]). Based on the contribution of each climate change process, an ecological risk assessment has been added. With regard to the determination of carbon storage potential, raw wood products can be considered as low-emission raw materials.

Keywords: environmental life cycle assessment, carbon footprint, forestry technologies, climate change impact assessment.

BEVEZETÉS

Széles körű az egyetértés abban, hogy az emberiségnek fel kell tárnia és ki kell fejleszteni olyan módszereket, amelyek alkalmazásával a gazdasági, ipari folyamatokhoz felhasznált erőforrások minimalizálhatók, valamint a kibocsátások és hulladékok környezeti hatása a környezeti rendszerre nézve nulla közelivé válik. A környezetbarát technológiák e hosszú távú cél elérésének eszközei (Heinimann 2012). Erkman (1997) szerint az ipari ökológia koncepciója átfogja ezen elemző módszereket. A környezeti elemek és rendszerek jellemzőiben az emberi tevékenység következtében bekövetkező változás a környezeti hatás (Pájer 1998). A földhasználatok során a művelési technológiákkal átalakított vegetációs viszonyok és a felszínborítás hatásai mellett, az egyes technológiák sajátos környezeti vonatkozásait is figyelembe kell venni. Álláspontunk szerint a fahasználatok technológiai vonatkozásainak környezeti vizsgálata fontos kiegészítést jelenthet az eddigi klímakutatásokhoz. A környezeti hatások értékelése a változás jelentőségének kifejezését célozza, és egyúttal fejlesztési intézkedéseket, döntéseket készít elő (Polgár 2012).

Mátyás (2006) és Rumpf et al. (2011) szerint a légköri szénmegkötés jelentőségének felismerése kedvező helyzetbe hozta az erdőgazdálkodást. Az erdőgazdálkodás az egyetlen olyan gazdasági tevékenység, amely azon túl, hogy szénszemleges, jelentős mennyiségű atmoszférikus szén tartós kivonását is lehetővé teszi.

A fa, mint nyersanyag szénszemlegessége napjainkban is igazolásra szorul, megannyi tényező figyelembe vételével (Klein et al. 2015).

Az életciklus-elemzés (LCA) kiváló eszköze a környezeti hatások megalapozott vizsgálatának, azonban az erdészeti alkalmazása máig kihívást jelent az LCA közösség számára. Az LCA erdészeti alkalmazásának elmúlt, több mint húsz éves időszakát Heinimann (2012) és Klein et al. (2015) tekintik át munkájukban részletesen.

Az ipari ökológia gondolata neves kutatókig nyúlik vissza. Rober Ayres (Ayres & Kneese 1969), Charles Hall (Hall et al. 1979), Howard T. Odum (Odum et al. 1977) munkássága ösztönözte Ulf Sundberg professzort, hogy az erdészeti műveletek témakörében előzetes energiaelemzéseket végezzen (Sundberg & Svanqvist 1987).

Sundberg (1982) tanulmányában az üzemanyag fogyasztásból adódó költségeket döntő tényezőnek javasolja az erdészeti gépi munkálatok megválasztásában. Az erdészet gépesítése forwarderek és vonszolók használatával teljesen átváltotta a lovas fakitermelést/köze-

lítést közúti tehergépkocsis szállításra. Berg (1995) megállapította, hogy az erdészeti tevékenységek környezeti hatásainak nagy része azon alapul, hogy az erdei műveletek olyan technikai megoldásokat sorakoztatnak fel, amelyek fosszilis eredetű üzemanyag igénye jelentős. A nagy távolságú szállítás és az erdei utak infrastruktúrája a teljes környezeti hatások közel kétharmadáért felelősek az erdei termelési rendszereket illetően (Heinimann & Maeda-Inaba 2004).

Frühwald (1995) szerint az erdészeti szektorban nincs ágazatspecifikusan kifejlesztett LCA és leltáradat gyűjtési (LCI) módszertan, melynek megalkotása a legnagyobb kihívások egyike. A helyzet Heinimann (2012) és Klein et al. (2015) megállapítása szerint napjainkban sem változott jelentősen. A szektor LCA alkalmazása mind a külső (összehasonlító), mind a belső (hatékonyságnövelő) előnyök elérése érdekében is prioritás Frühwald (1995).

Thoroe & Schweinle (1995) kialakították azt a standard erdészeti életciklus modell javaslatot, ami alapul szolgálhat az LCA erdészeti alkalmazásához. Klein et al. (2015) több LCA tanulmány vizsgálata alapján megállapította, hogy a módszertani feltevések között és a későbbi eredményeik között is nagy különbségek mutatkoztak. Elemzésük során fókuszba helyezték a globális felmelegedési potenciál (GWP) értékeket. A nyersfa termékek esetén gyakran használják a „szénsemleges” jelzőt, amelyet a szerzők a tapasztalt GWP értékek alapján inkább finomítani javasoltak „alacsony emissziójú nyersanyagra” (amennyiben a megváltozott erdőgazdálkodás vagy a közvetlen és közvetett földhasználat változás negatív hatása által okozott hosszú távú in situ szén veszteség kizárható).

Klein et al. (2015) az LCA módszertan erdészeti alkalmazásának fejlesztésére, a jövőbeli összehasonlíthatóság biztosítására, javaslatokat fogalmaztak meg az egységesítésre, melyek az ISO 14040-44:2006 szabványok (ISO 2006a, ISO 2006b) előírásai mellett nyújtanak kiegészítést. Modelljük bemutatja az erdei termelés életciklus-elemzésének alapjait. Javaslatot dolgoztak ki a „nyersfa” folyamat lánchoz. Sandin et al. (2016) az erdészeti termékek életciklus-elemzésének specifikumait írták le.

Heinimann (2012) nyomán kijelenthetjük, hogy az erdészet hagyományos, megújuló nyersanyagot, mint terméket szolgáltat különböző ipari és háztartási folyamatok számára.

A „nyersfa termék” rendszerint különböző más végtermékek alapja, és az erdei termelési rendszerben vett ökológiai hatásai csak a teljes hatások egy részét jelentik. Kim et al. (2016) vizsgálták a gyérítés hatását a holt szerves anyag széntárolására vörösfenyő és tölgy állományokban. Tellnes et al. (2017) vizsgálatokat végeztek az erdészeti termékeken alapuló fatermékek szénlábnym számítását illetően.

A korábbi LCA tanulmányok főbb tapasztalatai az alábbiak:

1. csaknem minden tanulmány foglalkozott az elő és véghasználatokkal, valamint a szállítási folyamatokkal (Klein et al. 2015), mely mutatja ezen életút szakaszok jelentőségét.
2. A tanulmányok idő dimenziója változatos, az egyszeri beavatkozásoktól (single moment approach) a teljes rotációs élettartamig (whole rotation approach) terjedt.
3. A térbeli kiterjedés az állomány szinttől a regionális/országos szintig is kiterjedt.

4. A „pillanatnyi megközelítés” leginkább pl. a GWP regionális vagy országos számítása esetén célravezető megoldás.
5. Az erdei rendszernek az erdőterület előkészítésével kell kezdődnie és legalább az erdei útnál kell végződnie, beleértve a teljes erdei termelési lánc releváns elsődleges és másodlagos folyamatait is („bölcsőtől az erdei útig”).
6. A rendszer kötelező részének folyamatcsoportjai: másodlagos folyamatok, erdőterület elő-készítése, erdőterület gondozása, erdészeti műveletek (Klein et al. 2015).

A szakirodalom elemzése rávilágít arra, hogy szükséges olyan hiánypótló, összehasonlító LCA kutatás végzése, mely az európai jelentőségű állományalkotó fafajok (Magyarországon: bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár) esetében lehetőséget nyújt az erdei termelési rendszer környezeti hatásainak mélyebb megértésére. A „nyersfa folyamat láncban” az erdei termelési rendszer és a nyersfa termékek feldolgozási rendszere közötti meghatározó, összekötő életút szakasz a fahasználat fázisa, ezért ennek elemzése kulcsfontosságú.

Kutatásunkban a hazai fahasználat összehasonlító életciklus-elemzésére és a módszer erdészeti adaptálására vállalkoztunk. A kutatás eredményei (GWP) rávilágítanak a fahasználati folyamatok szénlábnomára, mely ismerete nagyban befolyásolja a nyersfa termékek alacsony emissziójú nyersanyagként történő megítélését, valamint a szénmegkötési potenciál pontosabb meghatározását. Ezen információk ismerete segíti a klímakockázatok és a klímaváltozásban betöltött szerep helyesebb identifikálását is.

Kutatásunkban célul tűztük ki az életciklus-elemzés (LCA) módszerének első hazai erdészeti adaptálását, a fahasználati szubmodulra vonatkozóan. Az LCA módszerével – a fő hazai állományalkotó fafajok példáján - a fahasználatokhoz köthető technológiák környezeti hatásainak minősítését végeztük el. Célul tűztük ki az elő és véghasználati munkarendszerek összehasonlító környezeti életciklus-elemzését közös funkcionális egységre vetítve (területhasználati megközelítésben: 1 ha-ra és mennyiségi megközelítésben: 100 m³-re). Célul tűztük ki a kidöntött állófa szénmegkötési potenciáljának jellemzését, valamint a klímaváltozáshoz való hozzájárulás vizsgálatát is az abszolút, biotikus és technológiai szénlábnom (GWP) elemzésével, amely segíti a nyersfa termékek környezeti hatásainak jobb megértését. Az előrevetített klímakockázatok érzékeltetésére elkészítettük az ökológiai kockázati mátrixokat az egyes fafajok és technológiák bontásában.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Az életciklus-elemzés módszerének erdészeti tevékenységre adaptálása érdekében első lépésben a vizsgálati területen (Magyarország) jellemző erdészeti technológiák feltárására és kiválasztására volt szükség. A területen azonosítottuk a fatermesztés, fakitermelés, fahasználat és fafeldolgozás moduljait. Szakirodalmi elemzés alapján megállapítottuk, hogy a legjelentősebb környezeti hatással a fahasználati szubmodul jár. Kutatásunkban ezért a fa-

használati életszakaszokra, azon belül az elő- és véghasználati életút szakaszokra koncentráltunk. Klein et al. (2015) szerinti besorolásban így LCA tanulmányunk a „pillanatnyi megközelítésű” (single moment approach) kategóriába tartozik, mely a legalkalmasabb a GWP értékek meghatározására.

Ezután a kiválasztott fahasználati technológiák anyag és energia elvonásainak és kibocsátásainak környezeti szempontú feltárására volt szükség, melyeket a környezeti életciklus-elemzés (LCA) módszerével vizsgáltunk.

Az alkalmazott módszertan megfelel az ISO 14040:2006 és ISO 14044:2006 szabvány követelményeinek (cél és tárgykör meghatározása, leltárelemzés, hatásértékelés, hatásértelmezés). Az elemzést a GaBi 6.0 Professional (GaBi thinkstep) szoftverrel végeztük el. A hatásértékelés eredményei közül a kiemelten a szénlábnymra (GWP 100 years) koncentráltunk. A klímaváltozáshoz való hozzájárulás jellemzése az abszolút, biotikus és technológiai szénlábnym (GWP) elemzésével segíti a nyersfa termékek környezeti hatásainak megértését.

A kockázatok értékének meghatározásához a kockázatbecslés (Cseh 1999) segítségével juthatunk el. Az USA-EPA definíciója: az ökológiai kockázatbecslés annak a valószínűségét méri fel, hogy egy vagy több stresszor az expozíció révén milyen káros ökológiai hatást (hatásokat) okoz (USEPA 1998). Segítségével értékelni lehet annak valószínűségét, hogy a különféle környezeti stresszorok, mint például a vegyi anyagok, az invazív fajok, az éghajlatváltozás stb. milyen környezetterhelő hatással járnak az egyes ökológiai rendszerekben. A kutatásunkban is felhasznált algoritmus (USEPA, 1998) három fázisból épül fel: problémafelvetés, analízis és kockázatjellemezés. A három fázis egymást időrendi sorrendben követi, ugyanakkor van lehetőség visszacsatolásra. Így például az analízis során kapott eredmények, következtetések alapján van lehetőség a problémafelvetés módosítására, vagy szükség lehet újabb adatok gyűjtésére.

Az LCA erdészeti alkalmazásának lépései a fahasználatokra

Cél és tárgykör meghatározása

Hazai viszonylatban a rövidfás munkarendszerek felső felkészítőhelyi változatait azonosítottuk a főbb állományalkotó fafajok esetén: bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár.

Cél: a vizsgált technológiák összehasonlító környezeti életciklus-elemzése, mely rangsorolást tesz köztük lehetővé, szénlábnymuk (CF-carbon footprint/carbon profile) alapján. Az LCA módszerével a vizsgált technológiák környezeti hatáselemzését valósítottuk meg. A fahasználati technológiák során a rendszerhatárok: vágásterületi munkák – felső felkészítőhelyi munkák – erdei és közúti szállítás ipari/lakossági felhasználásra – vastagfa és vékonyfa tüzelése (energetikai cél) - vágástakarítás. Modellünkben számoltunk az üzemanyag és keőnőolaj előállítás környezeti hatásaival is. A faanyag további tartós felhasználását már nem

vontuk be a vizsgálatokba. Az elemzésbe nem vontuk be a technológiákhoz szükséges gépek és eszközök előállításának környezeti paramétereit, az erdei utak építésének hatásait, és a földhasználat változását.

Figyelembe vett folyamatok: A technológiai sor az elő- és véghasználatok folyamata során általában a következő műveleti lépésekből tevődik össze bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokban: döntés motorfűrészsel/harveszterrel; gallyazás motorfűrészsel/harveszterrel; elődarabolás motorfűrészsel/harveszterrel; közelítés forwarderrel/csörlős vonszolóval; végdarabolás motorfűrészsel; hasítás kézzel; máglyázás forwarderrel/markolós vonszolóval; sarangolás kézzel; felterhelés + szállítás + leterhelés darus; vastagfa és vékonyfa tüzelése (absz. száraz, energetikai cél); apadék égetése (félnedves) és biológiai lebomlása. Szállítás esetén egységesen 40 tkm-rel számoltunk (darus tehergépkocsi). *Funkcióegység:* Területhasználati megközelítésben funkcióegységnek 1 ha erdőállományt, mennyiségi megközelítésben 100 m³ faanyagot tekintettünk, melyet a fahasználati technológiákkal érintünk életút szakaszonként: 1. életszakasz: tisztító vágás (TI), 2. életszakasz: törzskiválasztó gyérités (TKGY), 3. életszakasz: növedékfokozó gyérités (NFGY), 4. életszakasz: véghasználat (VH). *Referenciaáram:* életút szakaszonként változó. Területhasználati megközelítésben a jellemző kidöntendő állófa (m³/ha) mennyisége különböző, amit az állomány kora (év) is befolyásol. Mennyiségi megközelítésben 100 m³ kidöntött állófára vonatkoztatva különböző nagyságú területek jellemzik az egyes életút szakaszokat (ha/100 m³). *Jellemző választékok:* vastagfa, tűzifa, vékonyfa tűzifa, egyéb apadék, apríték. Az elégetett vastagfa/vékonyfa tűzifa és apadék arányát életszakaszonként az 1. táblázatban mutatjuk be, mely jól jelzi az ebből keletkező neutrális CO₂ nagyságrendjét.

Szénlábnyom értelmezése: Vizsgálataink során a fahasználati technológiák kimutatott szénlábnyoma abszolút értékben értelmezendő (továbbiakban: szénlábnyom), mivel a fosszilis eredetű CO₂ kibocsátások mellett tartalmazza az életszakaszokra jellemző mennyiségű tűzifa (absz. száraz) és apadék (félnedves) elégetéséből származó biotikus eredetű (neutrális) CO₂ emisszió mennyiségét is. A különböző piaci ár befolyásolta feltételezések a nyersfa termék magas minőségű faanyagként vagy tűzifaként történő felhasználására érdekes összehasonlítást hozhatnak.

A szénlábnyom ily értelmezését indokolja, hogy a Kiotói Jegyzőkönyv első vállalási időszakában még nem volt lehetőség az ipari felhasználású fakitermelés szénelnyelésként történő elszámolására, hanem egységesen minden fakitermelést szénkibocsátásként kellett számításba venni (Führer & Mátyás 2005). Azonban a második vállalási időszakban előrelépés történt ezen a téren, ugyanis a második vállalási időszakban már elszámolható a fapari termékek széntároló funkciója (Frieden et al. 2012).

1. táblázat: Az életszakaszokban jellemző állomány kora (év), a kidöntött állófa (m^3/ha), valamint a tűzifa (vékonyfa, vastagfa) és apadék megoszlása (%) (1 ha hazai erdőállományban).

Table 1: The age (year), felling tree (m^3/ha) and firewood (branchwood, thickwood) and harvesting losses (%) (/1 ha).

Állomány	Választék	Előhasználat						Véghasználat	
		1. sz.		2. sz.		3. sz.		4. sz.	
		TI		TKGY		NFGY		VH	
Bükk	vékonyfa %	18 év	37,50	45 év	13,55	75 év	9,50	100 év	8,45
	egyéb apadék %	20 m^3	5,00	35 m^3	2,80	60 m^3	1,60	110 m^3	1,50
	vastagfából tűzifa %		82,87		93,85		86,60		55,00
Tölgy	vékonyfa %	19 év	37,50	35 év	16,00	70 év	10,50	105 év	8,00
	egyéb apadék %	15 m^3	5,00	63 m^3	2,80	135 m^3	1,60	450 m^3	1,50
	vastagfából tűzifa %		82,87		74,85		72,50		57,25
Luc	vékonyfa %	15 év	11,00	29 év	9,50	61 év	9,00	90 év	8,00
	egyéb apadék %	15 m^3	5,00	60 m^3	2,80	90 m^3	1,60	450 m^3	1,50
	vastagfából tűzifa %		26,00		25,00		24,00		23,00
Akác	vékonyfa %	6 év	28,00	15 év	17,00	22 év	11,00	35 év	8,00
	egyéb apadék %	10 m^3	1,50	50 m^3	1,50	64 m^3	1,50	341 m^3	1,50
	vastagfából tűzifa %		82,87		50,97		81,36		70,02
Nemesnyár	vékonyfa %		-		-	9 év	14,50	20 év	8,00
	egyéb apadék %	- m^3	-	- m^3	-	96 m^3	1,50	434 m^3	1,50
	vastagfából tűzifa %		-		-		7,30		4,38

Rövidítések: TI-tisztító vágás, TKGY-törzskiválasztó gyérítés, NFGY-növedékfokozó gyérítés, VH- véghasználat

Leltárelemzés

A vizsgált technológiák művelési lépéseiről környezeti leltáradatbázist (input-output, elemi áramok) hoztunk létre, területhasználati megközelítésben 1 ha erdőállományra, mennyiségi megközelítésben 100 m^3 faanyagra vetítve. Az adatok vonatkoztatási időszaka: 2015/2016 tele. Földrajzi érvényességét tekintve az adatok hazaiak. Az adatok forrásai: saját adatok, szakértői becslés, publikált adatok. Előhasználatokra és véghasználatra vonatkozóan előállítottuk az egyes állományokra jellemző öko-mérleget. Ezután felépítettük a vizsgált technológiák szoftveres életciklus-modelljeit.

Hatásértékelés, hatásértelmezés

A hatásértékelés módszertani lépéseit az ISO 14044:2006 szabvány írja le. Simon (2012) nyomán megállapítottuk, hogy a CML 2001 módszer „GWP 100 years” értéket meghatározó főbb emissziókhöz tartozó karakterizációs faktora jól illeszkedik az IPCC 2007 tanulmányhoz. A módszer tehát alkalmas a szénlábnyom (carbon footprint - CF) számítására.

Az LCA utolsó fázisában a leltár- és hatáselemzési eredmények ellenőrzése történt meg, következtetéseket fogalmaztunk meg. Az eredmények közül a szénlábnyomra koncentráltunk. Feltártuk hatáskategóriánként az életciklus hozzájárulásuk %-os értékeit. A kapott értékekre alapozva felállítottuk a technológiák növekvő környezeti rangsorát. Ezáltal megkaptuk a technológiákra vonatkozó környezeti hatások szénlábnyom alapú hatásminősítését fahasználati életút szakaszonként differenciáltan és a teljes fahasználati technológiai rotációra is. A szénlábnyom értékeinek a faanyag szénmegkötéséhez normalizálása érdekében állományokra jellemző viszonyszámokat képeztünk: a teljes technológiai rotációra jellemző ki-döntött állófa mennyiségét alapul véve, e famennyiség fafajonként jellemző széntárolása esetén (Vadász 1924, Ákos 1964) a légkörből megkötött szén-dioxid szükséglethez [kg CO₂/ha] (Buzás 2005 nyomán) viszonyítottuk a kiszámított szénlábnyom értékeket [kg CO₂-Equiv.]. Ezzel a viszony számmal a szénmegkötési potenciált határoztuk meg. Minden értéket megvizsgáltunk területhasználati (1 ha erdőállomány) és mennyiségi (100 m³ faanyag) megközelítésben is. A mennyiségi megközelítés értékeire alapozottan a NÉBIH fakitermelési adatközlését (2016) felhasználva országosan kiterjesztett értékeket is számítottunk.

EREDMÉNYEK

Leltárelemzés

A környezeti tényezők közül jelentős volt bementi oldalon az üzemanyag és kenőolaj felhasználás, kimeneti oldalon a CO₂, valamint a fáradt olaj (reciklált) kibocsátás.

Területhasználati megközelítésben a bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokra vonatkozó technológiai adatokból jól látszott, hogy az egyes életút szakaszokat különböző mennyiségű állófa kitermelése jellemzi, amely a véghasználatok esetén a legnagyobb. Az eredmények elemzésekor tanulmányunkban ezért főként a véghasználati életút szakaszra összpontosítottunk. Az 1 ha területre és 100 m³ faanyagra vetített adatok alakulása jól tükrözte a technológiák részben eltérő művelési lépéseit. A két megközelítésben a leltáradatok között csupán csak a tisztító vágás és a véghasználat életszakaszok esetén volt számottevő (kb. ötszörös) különbség, melyet indokol az életszakaszokban az ipari és tűzifa változó aránya. A 2. táblázatban a tölgy állományra jellemző fahasználati munkarendszer összesített leltáradatait mutatjuk be 1 ha erdőállományra és 100 m³ faanyagra vonatkoztatva.

2. táblázat: A munkarendszer összesített bemeneti és kimeneti környezeti leltáradatbázisa tölgy állományban (Magyarország, Zala megye).

Table 2: Total input and output environmental inventory data of work system in an oak forest stand (Hungary, Zala County).

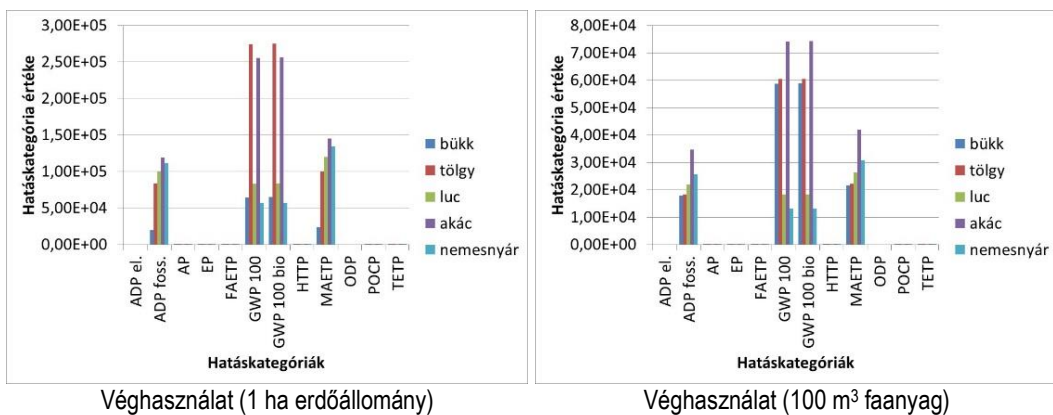
Paraméter	Me	Tölgy							
Funkcióegység		1 ha				100 m ³			
		EH		VH		EH		VH	
		TI	TKGY	NFGY	VH(TRV)	TI	TKGY	NFGY	VH(TRV)
Állomány kora	év	19	35	70	105	19	35	70	105
Kidöntendő állófa (bruttó)	m ³	15	63	135	450	100	100	100	100
Input									
Üzemanyag	kg	6,9	183,7	375,0	1576,3	46,0	291,6	277,8	350,3
Kenőolaj	kg	1,6	35,4	53,9	170,6	10,7	56,1	39,9	37,9
Output									
CO ₂ kibocsátás üzemanyagból	kg	22,1	583,8	1188,9	4986,4	147,3	926,7	880,7	1108,1
CO ₂ kibocsátás tűzifa és apadék elégetéséből	kg	14163,9	49033,4	100118,8	268547,6	94426,0	77830,8	74162,1	59677,2
Teljes CO ₂ kibocsátás	kg	14185,9	49617,7	101307,6	273533,9	94572,7	78758,3	75042,7	60785,3
Fáradt olaj (reciklált)	kg	0,2	15,8	27,5	106,4	1,3	25,1	20,4	23,6

Rövidítések: Me-mértékegység, EH-előhasználat, VH-véghasználat, TI-tisztító vágás; TKGY-törzskiválasztó gyérítés; NFGY-növedékfokozó gyérítés; VH (TRV)-véghasználat tarvágás

Hatásértékelés

Az alábbiakban a CML 2001 (2015. áprilisi) módszer eredményeire összpontosítunk.

A munkarendszerek teljes életciklusuk során a legnagyobb hatással a globális felmelegedésre (GWP 100 years) voltak. Ez a technológiák üzemanyag felhasználásából légkörbe jutó szén-dioxidok mennyiségével magyarázható. Jelentős hataskategóriaként merült fel az abiotikus erőforrás kimerülés (ADP foss.) és a tengervízi ökotoxicitás (MAETP) is. E hataskategóriák az üzemanyag és kenőolaj inputok hozzájárulásával magyarázhatók. Megállapítottuk, hogy az egységesen 1 ha területről a nagyobb mennyiségű faanyag kihozatala nagyobb környezeti hatásokkal jár és ezt jól tükrözik a hataskategóriákban tapasztalt eredmények.



Rövidítések: CML2001 (Ápril 2015) hataskategóriák: Abiotic Depletion (ADP elements) [kg Sb-Equiv.], Abiotic Depletion (ADP fossil) [MJ]; Acidification Potential (AP) [kg SO₂-Equiv.]; Eutrophication Potential (EP) [kg Phosphate-Equiv.]; Freshwater Aquatic Ecotoxicity Pot. (FAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]; Global Warming Potential, excl biogenic carbon (GWP 100 years) [kg CO₂-Equiv.]; Global Warming Potential, incl biogenic carbon (GWP 100 years) [kg CO₂-Equiv.]; Human Toxicity Potential (HTP inf.) [kg DCB-Equiv.]; Marine Aquatic Ecotoxicity Pot. (MAETP inf.) [kg DCB-Equiv.]; Ozone Layer Depletion Potential (ODP, steady state) [kg R11-Equiv.]; Photochem. Ozone Creation Potential (POCP) [kg Ethene-Equiv.]; Terrestrial Ecotoxicity Potential (TETP inf.) [kg DCB-Equiv.].

1-2. ábra: A véghasználati munkarendszerek környezeti hatásai az egyes CML 2001 hataskategóriákban.
Figure 1-2: The environmental impacts of final harvesting work systems in each CML 2001 category.

A környezeti hatások mértéke a tisztító vágás életút szakaszban volt a legkisebb a többi életút szakaszhoz képest. Törzskiválasztó gyérités és növedékfokozó gyérités életszakaszok esetén az abiotikus erőforrás kimerülés (ADP foss.) és a tengervízi ökotoxicitás (MAETP) hataskategóriákban megközelítőleg azonos nagyságrendű környezeti hatásokat tapasztaltunk. Ellentétben a globális felmelegedés (GWP 100 years) értékeknél, ahol már nagyságrendi növekedés volt tapasztalható NFGY esetén. A legjelentősebb hatással a véghasználati életútszakasz járt, minden hataskategória (kivéve GWP) tekintetében még egy nagyságrenddel magasabb értékek voltak jellemzők az előző életszakaszokhoz képest.

Hatásértelmezés

Szénlábnym számítás, technológiai rangsorok felállítása, a technológiák környezeti hatásminősítése

Szénlábnym hatáskategóriánként az életciklus hozzájárulás %-os értékek alapján technológiai rangsort állítottunk fel. Ezáltal megkaptuk a technológiák abszolút szénlábnym alapú környezeti hatásminősítését. A rangsort területhasználati és mennyiségi megközelítésben táblázatos formában mutatjuk be (3. táblázat).

A területhasználati megközelítés eredményei közül kiemelve, a véghasználat életszakaszban a nemesnyár állományok esetében a legkisebb a technológia hozzájárulása (8%) a többi állományhoz képest. Ezt követi kis különbséggel a bükk (9%), majd a luc (11%) szénlábnyma. A luc állományok életszakaszait megvizsgálva megállapítható, hogy azok közül csak a véghasználatban zajlanak olyan munkafolyamatok, amik jelentősebb szénlábnymmal bírnak. A tölgy állomány az, ami a már jelentősebb fakitermeléssel járó technológiai életszakaszokban (TKGY és NFGY) is, és a véghasználat során is a legnagyobb szénlábnymmal jár (37%), a véghasználati életszakaszú akác állományhoz hasonlóan (35%).

Mennyiségi megközelítésben a munkarendszerek rangsora részben változik csupán. Véghasználati életszakaszban a nemesnyár (6%) és luc (8%) állományok szénlábnyma a legkisebb, míg a bükk (26%), tölgy (27%) és akác (33%) állományok továbbra is jelentős hozzájárulást mutatnak. Hasonló értékeket tapasztalunk NFGY életszakaszban is.

A vizsgált rendszerhatárok között a teljes életútra, vagyis a teljes fahasználati technológiai rotációra vonatkozó szénlábnym alakulását a CML2001 módszer szerint vizsgáltuk.

Hektárra vetítve az állományok rangsora az összesített abszolút szénlábnym alapján a „nemesnyár (77109,06) – luc (120868,7) – bükk (165050,7) – akác (354843,2) – tölgy (439544,1)” rangsort adta (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A teljes technológiai rotáció rangsora a véghasználati életszakasz rangsorától csupán a bükk és luc állományok sorrendjében különbözik. Ennek oka, hogy bükk esetében jelentősebb szénlábnymmal kell számolni az NFGY életszakaszban.

Mennyiségi megközelítésben 100 m³ kidöntött állófára nézve a rangsor: „nemesnyár (68404,0) – luc (98847,0) – tölgy (309009,0) – bükk (323600,0) – akác (337651,0)” (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

A NÉBIH fakitermelési adatközlés (2016) alapján a vizsgált állományokban országosan kiterjesztve mindez a „nemesnyár (122138751) – luc (196313384) – tölgy (364095882) – bükk (372903672) – akác (1053723566)” szénlábnym rangsort jelenti (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

Megvizsgálva a tűzifa (absz. száraz), apadék (félnedves) elégetéséből és biológiai égéséből adódó CO₂ kibocsátási értékeket, árnyaltabb képet kaphatunk a technológiai folyamatok hozzájárulásáról.



3. táblázat: Az egyes technológiák életciklus részesedése és rangsora állományonként fahasználati életút szakaszonként a szénlábnyom (abszolút, incl. biotikus CO₂) tekintetében.

Table 3: The ratio and ranking of the contribution of the life cycle impact of technologies by the carbon footprint of utilization (absolute, including biotic CO₂).

CF	EH						VH					
	TI	TKGY		NFGY		VH		1 ha	100 m ³	1 ha	100 m ³	
		1 ha	100 m ³	1 ha	100 m ³	1 ha	100 m ³					1 ha
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
CML 2001	luc	11	11	luc	11	9	luc	7	7	nemesnyár	8	6
	akác	23	33	bükk	25	36	nemesnyár	8	7	bükk	9	26
	tölgy	29	29	akác	26	25	bükk	21	30	luc	11	8
	bükk	37	27	tölgy	38	30	akác	23	30	akác	35	33
							tölgy	41	26	tölgy	37	27

Rövidítések: CF-szénlábnyom, EH-előhasználat, VH-véghasználat, TI-tisztító vágás, TKGY-törzskiválasztó gyérités, NFGY-növedékfokozó gyérités

A teljes életciklus szénlábnymát a tüzelésből származó biotikus eredetű CO₂ kibocsátás nagymértékben befolyásolja (88-98%), az állományok egyező rangsora figyelhető meg mindkét esetben.

Hektárra vetítve a technológiai folyamatok fosszilis eredetű szénlábnymát illetően a teljes életciklusban a „bükk (2326,0) – tölgy (7679,89) – nemesnyár (9063,94) – luc (11109,85) – akác (11206,34)” rangsor adódott (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A legkisebb kibocsátás bükk esetén nagyságrendileg kisebb, mint a többi állományban. A tölgy állományban alkalmazott technológia közepes értéket mutat. A különbségek a technológiai, gépesítési megoldásokból (gépesítettség foka) és az 1 ha-ra eső állományok biológiai, fizikai jellemzőiből (pl. hektáronkénti állománysűrűség, kidöntendő állófa mennyisége, tömege, faanyag sűrűsége, nedvességtartalma) adódnak.

Az állományokon belül tekintve - a biotikus eredetű szénlábnymához képest - a bükk, tölgy, akác esetén legkisebb (1-3% közötti) a technológiai folyamatok fosszilis eredetű szénlábnymának részesedése, míg luc, nemesnyár állományokban már nagyobb (9-12%).

Mennyiségi megközelítésben 100 m³ kidöntött állófára nézve a rangsor: „tölgy (2912,89) – bükk (3763,53) – luc (4403,01) – nemesnyár (7449,54) – akác (8041,48)” (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

A NÉBIH fakitermelési adatközlés (2016) alapján a vizsgált állományokban országosan kiterjesztve mindez a „tölgy (4070675,69) – bükk (6760703,69) – luc (13406635,16) – nemesnyár (14629341,83) – akác (22586567,7)” szénlábnym rangsort jelenti (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint).

Megállapítottuk, hogy hektáronként a vágásterületi munkák a fosszilis eredetű CO₂ kibocsátás 30-40%-áért, míg a faanyag felterhelése, szállítása, leterhelése a 60-70%-áért felelős.

Szénlábnym vs. szénmegkötés

A szénlábnym értékeinek faanyag szénmegkötéséhez normalizálása érdekében állományokra jellemző viszonyszámokat képeztünk (4. táblázat) területhasználati, mennyiségi megközelítésben és országos kiterjesztésben is.

A teljes technológiára (abszolút szénlábnym) jellemző, valamint a tűzifa, apadék égetése és biológiai égése (biotikus dimenzió) szénlábnym esetén a viszonyszám alakulása 1,54-7,08 közötti. A technológiai folyamatok (fosszilis dimenzió) szénlábnyma esetén: 44,97-177,49 közötti. A viszonyszám értékei jól mutatják, a fahasználati életút szakasz rendszerhatárain belül, az abszolút értékben és dimenzióként tapasztalt pozitív szénmegkötési potenciált és a nagyságrendet.

A fahasználati szubmodul eredményeire alapozva megállapítottuk, hogy a nyersfa folyamat lánc erdei termelés életszakaszában helytálló Klein et al. (2015) megállapítása, miszerint a faanyag alacsony emissziójú nyersanyag. Alapul véve a fahasználati életszakasz vizsgált környezeti hatásait, az erdei termelési szakasz pozitív szénmegkötési potenciálja előre bocsátható a viszonyszámok tükrében.

4. táblázat: Szénlábnyom vs. szénmegkötés viszonysszámai.
Table 4: Carbon footprint vs. carbon sequestration ratios.

Megközelítés	Állomány	Kidöntött állófa a teljes technológiai rotációban [bruttó m ³]	Állományra (kidöntött állófa) jellemző CO ₂ szükséglet / Teljes technológiai rotáció [kg CO ₂ -Equiv.]	Állományra (kidöntött állófa) jellemző CO ₂ szükséglet / Tűzifa és apadék égetése és biológiai égése [kg CO ₂ -Equiv.]	Állományra (kidöntött állófa) jellemző CO ₂ szükséglet / Technológiai folyamatok [kg CO ₂ -Equiv.]
Területhasználati (1 ha)	nemesnyár	530	5,76	6,52	48,97
	luc	615	3,93	4,25	52,11
	bükk	225	1,76	1,79	125,03
	akác	465	1,77	1,83	56,05
	tölgy	663	1,96	2,00	112,21
Mennyiségi (400 m ³)	nemesnyár	400	4,90	5,50	44,97
	luc	400	3,12	3,27	70,12
	tölgy	400	1,67	1,69	177,49
	bükk	400	1,67	1,69	143,57
	akác	400	1,54	1,58	64,66
Országos (NÉBIH 2016)	nemesnyár	908733	6,23	7,08	52,02
	luc	994015	3,91	4,19	57,23
	tölgy	505244	1,79	1,81	160,43
	bükk	557642	2,02	2,06	111,42
	akác	1391860	1,72	1,75	80,10

Előrevetített klímakockázat

A globális felmelegedési potenciál (GWP 100 év) alapján rangsorolt technológiákat életút szakaszonként kockázati mátrixokban helyeztük el az éghajlatváltozási forgatókönyvek átlagos hőmérsékletváltozásaival összefüggésben. Ezzel a technológiák környezeti kockázatát a jelenlegi (1980-2010), a 2025-ben (2010-2040), a 2055-ben (2040-2070) és 2085-ben (2070-2100) időszakban lehetett meghatározni.

A környezeti kockázatok osztályozása a következőképp történt: I. osztály: magas kockázati értékek; II-III. osztály: közepes kockázati értékek; IV. osztály: alacsony kockázati értékek.

A mátrixokat elkészítettük tisztító vágás, törzskiválasztó gyérités, növedékfokozó gyérités és véghasználatok esetére is. Az állományokban 1 hektáron jelentkező környezeti hatásokat egyértelműen a fakitermelés volumene határozza meg, mely életszakaszonként egyre növekszik. A véghasználati életszakaszban jelentkeznek a legnagyobb környezeti hatások, ekkor jellemző a legjelentősebb volumenű faanyag kivétel, ezért az alábbiakban csak ezt mutatjuk be. A mátrixokban megjelenített eredményeket az értelmezés során árnyalni kell.

Az egyes életszakaszok összehasonlítása nem kívánatos, mivel a megadott kockázati osztályok életszakaszonként más-más jelentéssel bírnak, ennek feloldása egy kiterjedt táblázatban bővített kockázati osztályokkal lenne lehetséges.

Kiemelve, a véghasználat életszakaszban - a szénlábnymához való hozzájárulás %-ában - a nyár állományok esetében a legkevésbé kockázatos (8%) a technológiai folyamat a többi állományhoz képest, ezt követi a bükk (9%), majd a luc (11%) kockázata. Az akác állományok életszakaszait megvizsgálva megállapítható, hogy azok közül a véghasználatban zajlanak olyan munkafolyamatok (35%), amik jelentősebb környezeti kockázatot jelenthetnek. A mátrixok alapján megállapítottuk, hogy a tölgy állomány az, ami minden egyes technológiai életszakaszban, így a véghasználat során is a legkockázatosabb (37%). Az ezekben végzett műveletek hordozzák magukban a legtöbb környezeti veszélyt, kockázatot már egy gyenge emelkedésű átlaghőmérséklet esetében is.

Ha a kérdést a klímaszcenáriók oldaláról közelítjük meg, akkor egyértelműen láthattuk a mátrixokból, hogy már minimális átlaghőmérséklet emelkedés is jelentős kockázat növekedést eredményez.

5. táblázat: Véghasználat kockázati mátrixa.

Table 5: Risk matrix of final harvesting.

Klíma	Változó	Jelen (1980-2010)	2025 (2010-2040)	2055 (2040-2070)	2085 (2070-2100)
		mérsékelt	meleg	melegebb	melegebb, szárazabb
Hőmérséklet	Átlagos változás [d°C]	mérsékelt	gyenge emelkedés	emelkedés	erős emelkedés
		0	0,9	2,1	3,2
Technológia (CF hozzájárulás [%])	Jellemző	Kockázati osztály			
Nemes nyár (8%)	Technológia környezeti kockázata a GWP 100 years [kg CO ₂ equivalent] érték alapján	IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály
Bükk (9%)		IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály
Luc (11%)		IV. osztály	IV. osztály	IV. osztály	III. osztály
Akác (35%)		IV. osztály	III. osztály	II. osztály	II. osztály
Tölgy (37%)		II. osztály	I. osztály	I. osztály	I. osztály

A kapott kockázati mátrixok előre vetítik, hogy az egyes erdészeti céllal termesztett fajok és a hozzájuk kapcsolódó adott életszakaszt érintő munkafolyamatok, adott szcenáriókban milyen kockázati értéket képviselhetnek. Így a fahasználati munkarendszerek környezeti tervezési fázisaiban segítségként használhatók fel.

DISZKUSSZIÓ - KÖRNYEZETI KOCKÁZAT A KLÍMAVÁLTOZÁS TEKINTETÉBEN

A bemutatott technológiai folyamatok szénlábnyom alapján történő rangsorolása szám-szerűsíti, hogy milyen mértékben járulnak hozzá a felmelegedés fokozásához.

Azonban a további vizsgálatok során azt is figyelembe kell venni, hogy a 21. század vége felé egyre erőteljesebbé váló melegedés és nyári csapadékcsökkenés (Gálos et al. 2015) hatására a luc és a bükk elterjedési területe Magyarországon drasztikusan csökkenhet (Móricz et al. 2013). Jelentős változás következhet be a talajban, illetve a biomasszában tárolt szén mennyiségében (Horváth et al. 2017). Jelenleg egy erdészeti döntéstámogató rendszer van fejlesztés alatt (Czimer and Gálos 2016), mely javaslatot tesz a klímaváltozáshoz alkalmazkodni képes fafajokra. Ha ennek alapján változik a fafajpolitika és a jelenlegi lucosok, bükkösök területén más fafajok (pl. tölgyesek) telepítése kerül előtérbe, akkor az ezekhez kapcsolódó technológiai folyamatokon keresztül megváltozik az erdészeti technológiák hazai összesített környezeti kockázata, vagyis a hozzájárulása a légköri üvegház hatású gázok koncentrációjának növeléséhez.

ÖSSZEFOGLALÁS

Kutatásunkban célul tűztük ki az életciklus-elemzés (LCA) módszerének első hazai erdészeti adaptálását, a fahasználatokra vonatkozóan.

Tanulmányunkban az elő és véghasználati munkarendszerek életciklus-elemzését végeztük el: hazai bükk, tölgy, luc, akác, nemesnyár állományokban. A jellemző technológiákat szénlábnyomuk alapján környezeti szempontból összehasonlítottuk és rangsoroltuk. Életút szakaszonként (tisztító vágás, törzskiválasztó gyérítés, növedékfokozó gyérítés, véghasználat) előállítottuk az állományokra jellemző környezeti leltáradatbázist. Felépítettük a technológiák szoftveres életciklus modelljeit (GaBi 6.0 Professional), majd hatásértékelést végeztünk többféle módszerrel.

A technológiák legnagyobb mértékben a globális felmelegedés hatáskategóriájához járultak hozzá. Legnagyobb hatással a véghasználati életút szakasz járt. A jellemző technológiákat szénlábnyomuk (GWP) alapján összehasonlítottuk és rangsoroltuk, fahasználati életút szakaszonként differenciáltan és a teljes fahasználati életciklusra vonatkozóan is. Területhasználati megközelítésben az abszolút szénlábnyom (együttesen a fosszilis és biotikus eredetű) vizsgálata szerint a legjelentősebb hatással a véghasználati életútszakasz járt. A szénlábnyomhoz való hozzájárulás %-ában a véghasználatok esetén a „nemesnyár (8%) – bükk (9%) – luc (11%) – akác (35%) – tölgy (37%)” növekvő technológiai rangsort kaptuk. Az állományok rangsora az abszolút szénlábnyom alapján a teljes technológiai életciklusban a „nemesnyár (77109,06) – luc (120868,7) – bükk (165050,7) – akác (354843,2) – tölgy (439544,1)” rangsort adta (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A technológiai folyamatok tisztán fosszilis eredetű szénlábnyomát illetően azonban a teljes életciklusban a „bükk (2326,0) – tölgy (7679,89) – nemesnyár (9063,94) – luc (11109,85) – akác (11206,34)”

rangsor adódott (GWP 100 years: [kg CO₂-Equiv.] értékek szerint). A szénlábnym értékeket mennyiségi megközelítésben és országos kiterjesztésben is megvizsgáltuk.

A szénlábnym nagyságának érzékeltetésére az állományok becsült szénmegkötését használtuk fel, a szénmegkötési potenciált viszony számmal mutattuk be. A viszony szám egyes értékei (1,54-7,08) jól mutatják, a fahasználati szubmodul rendszerhatárain belül tapasztalt pozitív szénmegkötési potenciált és a nagyságrendet. A kutatás eredményei (GWP) rávilágítanak a fahasználati folyamatok szénlábnymára, mely ismerete nagyban befolyásolja a nyersfa termékek alacsony emissziójú nyersanyagként történő megítélését, valamint a szénmegkötési potenciál pontosabb meghatározását.

A globális felmelegedési potenciál (GWP 100 év) alapján rangsorolt technológiákat életút szakaszonként kockázati mátrixokban helyeztük el az éghajlatváltozási forgatókönyvek átlagos hőmérsékletváltozásaival összefüggésben. Az előrevetített klímakockázati eredmények a fahasználati munkarendszerek környezeti tervezési fázisaiban segítségként használhatók fel. Ezen információk ismerete segíti a klímakockázatok és a klímaváltozásban betöltött szerep helyesebb megítélését is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetünket fejezzük ki az „AGRARKLÍMA.2 VKSZ_12-1-2013-0034” projekt támogatásáért. Kutatásunkat az FSA projekt támogatta. Dr. Horváth Adrienn kutatása az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-17-4-I kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült. A munka a „Fenntartható Nyersanyag-gazdálkodási Tematikus Hálózat – RING 2017” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00010 jelű projekt részeként a Szechenyi2020 program keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- Ákos L. 1964: Erdészeti, vadászati, faipari lexikon. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest.
- Ayres R.U. & Kneese A.V. 1969: Production, consumption and externalities. *The American Economic Review* 59(3): 282–297.
- Berg S. 1995: The Environmental Loads of Fossil Fuels in Swedish Forestry – an Inventory for a LCA. In: Frühwald A. & Solberg B. (eds): *Life-Cycle Analysis – a Challenge for Forestry and Forest Industry*, EFI Proceedings 8, European Forest Institute, 57–68.
- CML 2001: Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., Kleijn R., Koning A. et al. 2002: *Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards*. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Czímber K. & Gálos B. 2016: A new decision support system to analyse the impacts of climate change on the Hungarian forestry and agricultural sectors. *Scandinavian Journal of Forest Research* 34(7): 664–673. DOI: [10.1080/02827581.2016.1212088](https://doi.org/10.1080/02827581.2016.1212088)
- Erkman S. 1997: Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner production* 5(1-2): 1–10. DOI: [10.1016/s0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/s0959-6526(97)00003-6)



- Frieden D., Pena N. & Bird D.N. 2012: Incentives for the use of forest biomass: A comparative analysis of Kyoto Protocol accounting pre- and post- 2012. *Smart Forests* 4: 84–92. DOI: [10.1080/20430779.2012.723513](https://doi.org/10.1080/20430779.2012.723513)
- Frühwald A. 1995: LCA – a Challenge for Forestry and Forest Product Industry. In: Frühwald, A. & Solberg B. (eds): *Life-Cycle Analysis – a Challenge for Forestry and Forest Industry*, EFI Proceedings 8, European Forest Institute, 10–11.
- Führer E. & Mátyás Cs. 2005: Erdőgazdálkodás és klímabizonytalanság. *AGRO-21 füzetek* 41: 124–128.
- Gálos B., Führer E., Czímber K., Gulyás K., Bidló A., Häsler A., et al. 2015: Climatic threats determining future adaptive forest management – a case study of Zala County. *Időjárás* 119(4): 425–441.
- Guinée J.B., Heijungs R., Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., et al. 2010: Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science & Technology* 45(1): 90–96.
- Hall C., Lavine M. & Sloane J. 1979: Efficiency of energy delivery systems: I. An economic and energy analysis. *Environmental Management* 3(6): 493–504. DOI: [10.1007/bf01866318](https://doi.org/10.1007/bf01866318)
- Heinimann H.R. 2012: Life Cycle Assessment (LCA) in Forestry – State and Perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering* 33(2): 357–372.
- Heinimann H.R. & Maeda-Inaba S. 2004: Environmental Performance Indicators EPIs for Forest Roads Network Systems. In: Heidín I.D. & Krag R. (eds): 2004 International Mountain Logging Conference. A Joint FERIC, UBC and IUFRO d3 conference, published on CD. Forest Engineering Research Institute of Canada, Vancouver, BC, Canada, 1–13.
- Horváth A., Bene Zs. & Bidló A. 2017: Talaj szerves szénkészletének felmérése néhány cser-, kocsánytalan tölgyes és bükkös állományban. In: Bidló A. & Facskó F. (eds): *Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar V. Kari Tudományos Konferencia*. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron, 16–20.
- Kim S., Han S.H., Lee J., Kim C., Lee S-T. & Son Y. 2016: Impact of thinning on carbon storage of dead organic matter across larch and oak stands in South Korea. *iForest Biogeosciences and Forestry* 9: 593–598. DOI: [10.3832/ifer1776-008](https://doi.org/10.3832/ifer1776-008)
- Klein D., Wolf C., Schulz C. & Weber-Blaschke G. 2015: 20 years of life cycle assessment (LCA) in the forestry sector: state of the art and a methodical proposal for the LCA of forest production. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20(4): 556–575. DOI: [10.1007/s11367-015-0847-1](https://doi.org/10.1007/s11367-015-0847-1)
- Mátyás Cs. 2006: Erdők a globális és hazai szénforgalomban. In: Szulcsán G. (ed): *Alföldi Erdőkért Egyesület*, Szeged, 5–13.
- Móricz N., Rasztovits E., Gálos B., Berki I., Eredics A. & Loibl W. 2013: Modeling the Potential Distribution of Three Climate Zonal Tree Species for Present and Future Climate in Hungary. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica* 9: 85–96. DOI: [10.2478/aslh-2013-0007](https://doi.org/10.2478/aslh-2013-0007)
- ISO (2006a). ISO 14040:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework (ISO 14040:2006), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO (2006b). ISO 14044:2006. Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines (ISO 14044:2006), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- Nakicenovic N. & Swart R. 2000: Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, New York, NY, USA.
- Odum H.T., Kemp W., Sell M., Boynton W. & Lehman M. 1977: Energy analysis and the coupling of man and estuaries. *Environmental Management* 1(4): 297–315.
- Pájer J. 1998: *Környezeti hatásvizsgálatok*. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron.
- Polgár A. 2012: *Környezeti hatásértékelés a környezetirányítási rendszerekben*. Doktori disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron.
- Rumpf J., Horváth A.L., Major T. & Szakálosné Mátyás K. 2016: *Erdőhasználat*. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Sandin G., Peters G.M. & Svanström M. 2016: Life Cycle Assessment of Forest Products: Challenges and Solutions. *Life Cycle Assessment of Forest Products*. In: *Life Cycle Assessment of Forest Products*. SpringerBriefs in Molecular Science. Springer, Cham, 25–67. DOI: [10.1007/978-3-319-44027-9_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-44027-9_4)
- Simon B. 2012: A rendszerhatárok és a hatásvizsgálati módszer megválasztásának szerepe az LCA eredményében – az elektromos-energia előállítás példáján keresztül. *Eco-matrix* 2012(1-2): 11–24.

- Sundberg U. 1982: A study on cost of machine use in forestry – Proposing fuel consumption as cost determinant. The Swedish University of Agricultural Sciences. Department of Operational Efficiency. Report No. 142.
- Sundberg U. & Svanqvist N. 1987: Fuel consumption as indicator of the economics of mechanization. Scandinavian Journal of Forest Research 2(1-4): 389–398. DOI: [10.1080/02827588709382477](https://doi.org/10.1080/02827588709382477)
- Tellnes L.G.F., Ganne-Chedeville C., Dias A., Dolezal F., Hill C. & Zea Escamilla E. 2017: Comparative assessment for biogenic carbon accounting methods in carbon footprint of products: a review study for construction materials based on forest products. iForest Biogeosciences and Forestry 10: 815–823. DOI: [10.3832/for2386-010](https://doi.org/10.3832/for2386-010)
- Thoree C. & Schweinle J. 1995: Life Cycle Analysis in Forestry. In Frühwald A., Solberg B. (eds): Life-Cycle Analysis – a Challenge for Forestry and Forest Industry. EFI Proceedings 8, European Forest Institute, 15–16.
- USEPA 1998: Guidelines for Ecological Risk Assessment U.S. Environmental Protection Agency. Risk Assessment Forum, Washington D.C. 2–19.
- Vadász E. 1924: A szén és petróleum múltja és jövője. Athenaeum Kiadó, Budapest.

On-line és digitális források

- Buzás Z. 2005: Buzás Zoltán számítása az Sz. közelében lévő Mátrakeresztes erdőtag CO₂ lekötésének évi értékére. (letöltve: 2017. december 27.)
URL: http://www.fagosz.hu/fataj/FATAJ_online/2006/08_02200226/Kyoto/Buzas_SZ-xx-erdotag-szamitasa.pdf
- Cseh G. 1999: Az ipari kockázatok értékelésének és hatósági szabályozásának elvei és terminológiája. www.mbf.hu [Átdolgozott változat: CD Cégbiztonság, 2004. II. n.év, KJK-KERSZÖV Jogi és Üzleti Kiadó, Budapest, 2004.]
- NÉBIH fakitermelési adatközlés 2016: A 288/2009. (XII. 15.) Korm. rendelettel elrendelt 2016. évi Országos Statisztikai Adatgyűjtési Program 1254 számú adatgyűjtése. Beszámoló az erdősitésekről és a fakitermelésekről a 2016. évben (országos összesítő): 15. (letöltve: 2018. május 9.)
URL: <http://portal.nebih.gov.hu/documents/10182/206281/M%C3%A9rleg-2016.pdf/a723b1fd-c5b2-497c-8049-4f149fb99bd0>

Érkezett: 2018. május 5.

Közlésre elfogadva: 2018. június 1.