

FOSSZILIS ENERGIAFORRÁSOKBÓL SZÁRMAZÓ SZÉN-DIOXID KIBOCSÁTÁS CSÖKKENTÉSE FATÜZELÉSSSEL TÖRTÉNŐ HELYETTESÍTÉSSEL

FAFELHASZNÁLÁS SZEREPE A SZÉNFORGALOMBAN

Szerkesztő: Börcsök Zoltán

Soproni Egyetem
Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

AZ NKFI ALAPBÓL
MEGVALÓSULÓ PROGRAM

Dr. Borovics Attila főigazgató, c. egyetemi tanár (ERTI)
Dr. Börcsök Zoltán tudományos munkatárs (FMK)
Dr. habil. Polgár András egyetemi docens (EMK)
Dr. Horváth Attila László egyetemi adjunktus (EMK)
Dr. Kocsis Zoltán egyetemi docens (FMK)
Dr. Kovács Zoltán tudományos főmunkatárs (ERTI)
Király Éva Ilona kutatómérnök (ERTI)
Dr. Németh Gábor egyetemi docens (FMK)
Dr. Vágvölgyi Andrea egyetemi adjunktus (EMK)
Dr. Vityi Andrea egyetemi docens (EMK)
Elekné dr. Fodor Veronika egyetemi adjunktus (EMK)
Szakálosné dr. Mátyás Katalin egyetemi adjunktus (EMK)

FOSSZILIS ENERGIAFORRÁSOKBÓL SZÁRMAZÓ SZÉN-DIOXID KIBOCSÁTÁS CSÖKKENTÉSE FATÜZELÉSSSEL TÖR- TÉNŐ HELYETTESÍTÉSSEL

FAFELHASZNÁLÁS SZEREPE A SZÉNFORGALOMBAN

Szerkesztő: Börcsök Zoltán



SOPRONI EGYETEM KIADÓ

SOPRON, 2025

Közreadó: Faipari Mérnöki és Kreatívipari Kar

Felelős kiadó: Prof. Dr. Fábíán Attila
a Soproni Egyetem rektora

Szerkesztő: Börcsök Zoltán

Lektorálta: Prof. Dr. Alpár Tibor

ISBN 978-963-334-506-1

DOI: <https://doi.org/10.35511/978-963-334-506-1>

Jelen kiadvány a TKP2021-NKTA-43 számú projekt keretében
a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Creative Commons license: CC BY-NC-SA 4.0 DEED



Nevezd meg! - Ne add el! - Így add tovább! 4.0 Nemzetközi
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Tartalomjegyzék

A szerkesztő előszava	4
A tanulmánykötet eredményeinek rövid összefoglalója	5
A fatüzelés értékelése	8
Helyzetértékelés	8
<i>Lakossági és ipari szinten felhasznált éves tűzifamennyiség</i>	10
<i>Környezetszennyező-e a fatüzelés?</i>	13
<i>Földgáz kontra fatüzelés</i>	14
A fa égési folyamata és az égés során keletkező kibocsátások	16
<i>A környezetbarát fatüzelés feltételei</i>	23
<i>A fatüzelésből származó emissziók csökkentésének lehetőségei a lakossági és az ipari szektorban</i>	25
<i>A tüzelés során keletkező hamu és pernye jelentősége és kezelési lehetőségei</i>	29
<i>A fahamu és pernye mezőgazdasági felhasználásának jogi háttere</i>	36
<i>Szennyvízkezelés</i>	37
A fatüzelés jogi szabályozása	38
A fatüzelésű-rendszerek környezeti elemzése esettanulmányok segítségével	42
1. <i>Esettanulmány: A tűzifa nedvességtartalmának hatása a fűtőértékre és a károsanyag-kibocsátásra</i>	42
2. <i>Esettanulmány: A lakossági fatüzelő berendezések emisszióinak összehasonlító vizsgálata</i>	44
3. <i>Esettanulmány: Dendromassza alapú falufűtőmű kibocsátásának összehasonlítása korszerű, automatizált lakossági fatüzelő berendezésekkel</i>	47
4. <i>Esettanulmány: Lakossági pelletkazán és dendromassza alapú fűtőmű emissziós értékeinek összehasonlítása</i>	49
5. <i>Esettanulmány: Lakossági fosszilis- és fatüzelő berendezések, valamint dendromassza alapú erő- és fűtőmű kibocsátásának összehasonlító teljes életciklus (LCA) elemzése</i>	52
A fatüzelésű-rendszerek környezeti terheléséhez kapcsolódó szakmai elemzések	56
<i>Az elemzés alapvető forrásai, megfontolások, legfőbb paraméterek felvétele, átláthatóság</i>	56
<i>A vizsgálati eredményeink, azaz a tüzeléstechnikai eljárások során figyelembe vett kibocsátások</i>	60
Összefoglalás az eddigiekhez	65
Summary	66
Cser tűzifa - fosszilis (földgáz) tüzelőanyagok összehasonlító CO ₂ kibocsátás elemzése	67
Bevezetés	67
<i>Az LCA</i>	67
<i>Életciklus elemzés erdészeti alkalmazása</i>	71
Életciklus elemzés: tűzifa-fosszilis tüzelőanyagok összehasonlító CO ₂ kibocsátás elemzése	73
<i>Energia nyelésére hasznosítható faanyag</i>	73
<i>Célkitűzés és vizsgálat tárgya, keretei</i>	77
<i>Leíráselemzés szakasza</i>	81
<i>Termékrendszerek és folyamatábrák</i>	81
<i>Életciklus hatásértékelési szakasz</i>	88
<i>Hatásértelmezés szakasza és következtetések</i>	93
<i>Zárszó</i>	98
Összefoglalva az LCA elemzés eredményeit	99
Summary	101
Rövidítések, szómagyarázatok	103
Felhasznált és ajánlott irodalom	104

A szerkesztő előszava

Az olvasó a Soproni Egyetem ERDŐLAB kutatási programjának eredményei közül az egyik vékonyka szeletet tartja a kezében. A kutatási programon belül a faipari alprogramok – kapcsolódva az erdészeti kutatásokhoz – az erdőkben felnevelt faanyag minél jobb felhasználását tűzték ki. Tisztában vagyunk azzal, hogy ez nem egyszerű feladat, hiszen a társadalom különböző részei felől sokféle, egymásnak gyakran ellentmondó felvetések, kérések, óhajok érkeznek mind az erdészet, mind a faipar felé.

A sok megosztó téma közül talán az egyik legérzékenyebb a faanyag eltüzelése. Sok érv szól ellene, de találhatunk olyat is, ami emellé teszi a szavazatot, és előfordulhat, hogy nincs is más választásunk. Ebben a kis kiadványban a fával történő fűtés, tüzelés környezeti hatásaival foglalkozunk, alaposan körül járva egy-egy témát.

A kiadvány végén megtalálhatók azok a legfontosabb művek adatai, melyekből idéztünk, és azok is, melyeket ezeken felül olvasásra ajánlunk. Szómagyarázataink (csillaggal jelölt szavak) a legfontosabb, esetleg nem mindenkinek egyértelmű kifejezéseket, rövidítéseket fejtik ki.

Hasznos olvasást kívánok!

A szerkesztő

A tanulmánykötet eredményeinek rövid összefoglalója

Magyarországon a megújuló energiaforrások közül a biomassa (azon belül is a dendromassza) rendelkezik olyan potenciállal, amely lehetőséget ad a fosszilis energia részleges kiváltására. Egyre több példa bizonyítja, hogy a jól megtervezett és megfelelő szakértelemmel üzemeltetett dendromassza bázison alapuló korszerű lakossági és ipar energiaellátó rendszerek gazdaságos és környezetbarát energiatermelésre adnak módot. A nagyobb teljesítményű rendszerek a vidéki települések nagyobb fogyasztóinak (pl.: falufűtés, közintézmények, ipari és mezőgazdasági létesítmények) a korszerű fatüzelésű, vagy energetikai tömörítvényekkel (pellet, brikett) üzemelő rendszerek pedig a kisebb fogyasztóknak, háztartásoknak kínálnak a környezetet legkevésbé terhelő alternatívát.

A légszennyező anyagok legnagyobb kibocsátói az ipar, a mezőgazdaság, a közlekedés és a *háztartások*.

Reálisan nézve a fatüzelés közel szén-dioxid semleges, a fosszilis energiahordozókhoz képest lényegesen kisebb terhelést jelent a környezetre. Bár azt a szén juttatjuk vissza a légkörbe, amit korábban a fa megkötött, amíg a tűzifa eljut a kályháig, számos olyan „művelet” esik át, mely kibocsátással jár. Az égés minőségét erősen befolyásolja a felhasznált tüzelőanyag minősége, a berendezés típusa és kora, valamint a felhasználónak a berendezés használatára vonatkozó ismerete. Amint a tüzelés minősége bármely paraméter miatt romlik, a légkörbe kibocsátott légszennyező anyagok mennyisége is megnő. Ezt súlyosbítja az a tény, hogy a legtöbb esetben a szilárd tüzelőberendezéssel rendelkező háztartásokban (illegálisan) háztartási hulladékot is égetnek. A füstgázból és a maradék hamuból a hulladék elégetését a hatóságok nem tudják egyértelműen bizonyítani, ezért ez ellen a hatóságok nem tudnak hatékonyan fellépni.

Ha a faanyag égése tökéletes, akkor is vannak emissziók: főként vízgőz és szén-dioxid, de kisebb mennyiségben más anyagok is keletkezhetnek: por, kén-dioxid, különböző nitrogén-oxidok stb. Tökéletlen égés esetén pedig további szennyezőanyagok keletkezhetnek: szén-monoxid, metán, ammónia, ózon, policiklusos aromás szénhidrogének, poliklórozott dioxinok és furánok, melyek mennyisége megfelelő tüzeléstechnikával, korszerű berendezésekkel alacsony szinten tartható. A fatüzelésből származó hamu és más égéstermékek határértékeit, illetve lehetséges további sorsát jogszabályok határozzák meg. Megfelelő körülménnyel a fahamu talajok tápanyag-utánpótlására alkalmazható. Leginkább Ca, Mg, K, P található benne, de a nitrogén gázok formájában távozik az égetés során.

A fatüzelésen alapuló fűtőművi hőenergia-termelés hazai környezetben való alkalmazásának komplex értékelése során bebizonyosodott, hogy a kisebb léptékű, megfelelő-en átgondolt és működtetett decentralizált energiaellátó rendszerek hazai körülmények között is alkalmasak a jelen kor követelményeinek megfelelő energiatermelésre.

Elvégeztük a dendromassza (azon belül a tűzifa/faapríték) energetikai célú hasznosításának összehasonlító karbonlábnyom kalkulációját életciklus-elemzéssel támogatva (comparative LCA). Jelen tanulmány szempontjából a módszertani kereteket az LCA nemzetközi szabványain (ISO 14040-44) alapuló ÜHG leltározással, az IPCC AR5 emissziós faktorok alapján kalkulált, ISO 14067:2018 nemzetközi szabvány szerinti karbonlábnyom kalkuláció adja.

Az összehasonlítás alapja a hőenergia előállítás és a különböző tűzifa bázisú (pl. kályhakész tűzifa vagy faapríték) tüzelőberendezések voltak, illetve bizonyos rendszerhatárok között a földgáz alapú hőenergia termelést is bevontuk az elemzésbe. Funkcióegységnek a különböző tüzelőberendezésekben egységesen előállított 1 MJ hasznos hőenergiát választottuk. A tanulmányban akác, cser (csertölgy) és tölgy (kocsánytalan és kocsányos tölgy) fafajok kitermelési rendszereivel foglalkoztunk, mivel ezek a meghatározóak a hazai tűzifatermelés szempontjából. Itt az eredményeket **cser** (tarvágás) tűzifa input példáján mutatjuk be, mivel akác és tölgy esetén hasonló trendek voltak megfigyelhetők. Az elsődleges cél rendszer szinten a hazai helyzetértékelés volt. A tanulmány nem terjed ki bármely más szempontú, különböző forgatókönyvek analízisére. Jelen célzott kutatás nem terjed ki a további környezeti hatáskategóriák (mint pl. a savasodás, eutrofizáció, humántoxicitás, ózonréteg vékonyodás, fotokémiai ózonképződés stb.) indikátor eredményeinek vizsgálatára. Az életciklus szemlélet alkalmazása révén a hasznos hő előállításához szükséges életút szakaszokat vizsgáltuk meg tűzifa (mesterséges vagy természetes erdőfelújítás, fakitermelés, égetés tüzelőberendezésben) és földgáz (hazai földgáz mix, égetés tüzelőberendezésben) tüzelőanyagok esetében.

Amennyiben faanyag esetében *kizárólag* a fakitermelés és az elégetés során a faanyaghoz tapadó fosszilis eredetű CO₂-t vesszük figyelembe, illetve a fa elégetését teljes mértékben karbonsemlegesnek tekintjük, megállapíthatjuk, hogy

- az 1 MJ hasznos hőenergia megtermelése dendromassza alapon lakossági és fűtőművi szinteken is töredék mértékű karbonlábnyommal jár, mint az ugyanilyen földgáz alternatívák vonatkozásában.
- Vagyis az egységnyi energiatartalom megtermelése fenntartható módon történhet meg a fatüzelés előnyben részesítésével a földgázzal szemben:
 - lakossági esetben két nagyságrenddel kisebb,
 - míg fűtőművi szinten egy nagyságrenddel kisebb a dendromassza tüzelés karbonlábnyoma.

A továbbiakban a fakitermelés segédfolyamatait, logisztikai rendszereit is figyelembe vettük. Szükséges volt látni azt, hogy az eddigi rendszerhatárokat szélesítő segédfolyamatok miként befolyásolják a dendromassza alapú energiatermelés karbonlábnyomát (kizárólag a tűzifa mennyiségéhez tapadó további karbonlábnyom értékekkel). A figyelembe vett segédfolyamatok a következők:

- erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel (terepi műveletek) (legrosszabb forgatókönyvként szerepeltettük a tuskókiemelést – a legtöbb esetben nincs tuskóeltávolítás, főleg cser felújítás esetében!!!)
- munkagépek közötti közlekedése az erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel műveletekhez
- fakitermeléshez szükséges munkagépek helyszínre szállítása (50 tkm)
- faanyag szállítása (500 tkm)

A fenti segédfolyamatok közül a rendszerhatárok kibővítését:

- természetes és mesterséges erdőfelújítási eseteket feltételezve végeztük el, valamint

- természetes felújítás esetén az erdősítés tuskókiemeléssel és teljes talajelőkészítéssel folyamatai nem jelentkeznék.

Földgázzal működő tüzelőberendezések karbonlábnyomával az összehasonlítás nem lehetséges, mivel a rendszerhatárok hasonló kibővítése (földgáz elosztás leltáradatainak feltárásával) további kutatási irányokat jelöl ki.

Megállapítottuk, hogy mesterséges felújítás alternatívája szerint a szénegyenleg a vastagfa tűzifa be-
menetet használó rendszereknél kis mértékben karbon deficit, kivéve egy szubfícites esetet: hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű égéslevegő ventilátor nélküli tüzelőberendezést (4% szabad karbon kapacitással). Vékonyfa inputtal működő rendszerek szénegyenlege egységesen 32% szabad karbon kapacitással jellemezhető.

Természetes felújítás alternatívája esetében 31-42% szabad karbon kapacitású szénegyenlegekkel találkozunk. A vastagfával szemben a vékonyfa inputot használó rendszerek az előző alternatívában tapasztalt jelentős előnye kiegyenlítődik.

A fatüzelés értékelése

Helyzetértékelés

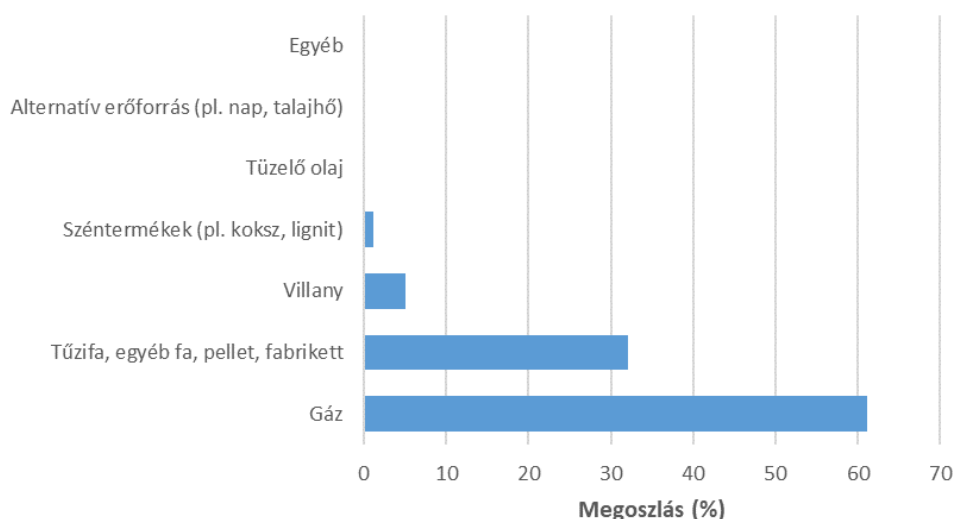
Az energiaellátás és a környezetvédelem számos országban, így Magyarországon is központi témává vált. A megújuló energiaforrások térnyerését a fosszilis energiahordozók hasznosítása által kiváltott gazdasági és környezeti problémák, valamint a nemzetközi vállalások is sürgetik. Hazánkban egyre több háztartásban, településen merül fel az energiatakarékosság és energiahatékonyság kérdése. Jelentős törekvések indultak a környezeti adottságokhoz igazodó, kisebb hálózatokba szervezett helyi, autonóm energiatermelésre. A helyi forrásokra való nagyobb támaszkodás még inkább felértékeli a vidéki térségek szerepét. Magyarországon a megújuló energiaforrások közül a biomassa (azon belül is a dendromassza*) [A *-gal jelölt szavak, rövidítések magyarázatát a szöveg végén olvashatják] rendelkezik olyan potenciállal, amely lehetőséget ad a fosszilis energiák részleges kiváltására. Egyre több példa bizonyítja, hogy a jól megtervezett és megfelelő szakértelemmel üzemeltetett dendromassza bázison alapuló korszerű, decentralizált energiaellátó rendszerek gazdaságos és környezetbarát energiatermelésre adnak módot.

Az energiaár-emelkedések, a földgázellátás bizonytalanságai és a földgáz drasztikus drágulása, miatt számos önkormányzat, vállalat és háztartás keresi az új lehetőségeket energiaigényének fedezésére. A biomassa-hasznosítás terén, hazánkban is lehetőségként kínálkozik a szilárd dendromassza-tüzelésen alapuló ún. decentralizált (kisebb méretekben, több helyen, a felhasználókhoz közel megvalósuló) energiaellátás. A nagyobb teljesítményű rendszerek a vidéki települések nagyobb fogyasztóinak (pl.: falufűtés, közintézmények, ipari és mezőgazdasági létesítmények) a korszerű fatüzelésű, vagy energetikai tömörítvényekkel (pellet) üzemelő rendszerek pedig a kisebb fogyasztóknak, háztartásoknak kínálnak a környezetet legkevésbé terhelő alternatívát. Ugyanakkor Magyarországon a légszennyező anyagok emissziójának jelentős részét a háztartásokban használt szilárd tüzelőberendezések okozzák. Sok háztartásban alkalmaznak régi, korszerűtlen tüzelőberendezést, továbbá az is előfordul, hogy a használt kazán teljesítménye nagyobb, mint amekkorára szükség lenne a lakás méreteihez, hőigényéhez képest.

Napjainkban 10% (~56 EJ*) körüli az az arány, ami a jelenlegi globális energiaellátás (~560 EJ) erdők fáiból származó része (URL1). A Bioenergia Világszövetség előrejelzései szerint (URL1) 2035-ben 13-15%-át adja majd a fa a globális energiaellátásnak, ami kb. 73–84 EJ energiatartalmat tesz ki. A levegőszennyezés egészségre és környezetre gyakorolt hatása annyira jelentős, hogy az éghajlatváltozás után a második legtöbb környezetvédelemmel kapcsolatos aggodalmat ez okozza. Az energia-megtakarításon túl az EU a megújuló energiákra, a biomasszára és ezen belül különösen a fára (dendromasszára) összpontosít. Az EU 2030-ra azt szeretné elérni, hogy a megújuló energia a bruttó energiafogyasztás legalább 30%-át tegye ki (URL2).

A távfűtést figyelmen kívül hagyva, Magyarországon a leggyakrabban használt tüzelőanyag a gáz és a fa, ezt követi, de sokkal kisebb arányban a villamosenergia és a szén (főként lignit), mint fűtésre használt energiaforrás (1. ábra). A tüzelő olaj és az egyéb, alternatív források nem számottevők. A

fával fűtött lakások aránya egy-egy régióban szorosan összefügg az adott terület társadalmi-gazdasági, infrastrukturális fejlettségével, így a hátrányos helyzetű településeken magasabb a fával fűtők száma. További probléma, hogy a szegényebb háztartásokban a tüzelő- illetve fűtési berendezés elavult, és a ház szigetelése sem megfelelő. A helyzetet még fokozza, hogy a lakosság a rossz minőségű tüzelőanyag mellett hulladékot is éget, ami tovább növeli a károsanyag-kibocsátást.



1. ábra: A lakások megoszlása fűtéshez használt energiahordozóként (távfűtés kivételével) Magyarországon 2021-ben (saját szerkesztés KSH adatok alapján – URL3)

A Levegő Munkacsoport és a Magyar Szegénységellenes Hálózat megrendelésére készített országos reprezentatív közvélemény-kutatás (URL4 és URL5) azt mutatta, hogy a magyar lakosság 1/3-a éget valamilyen gyakorisággal hulladékot (pl. gumi, műanyag, bontott nyílászárók, felületkezelt faanyagok, elhasznált bútorok stb.). Becslések szerint az illegális égetők 1/3-a tartozik a mélyszegénység miatt a szabályszegők csoportjába. A kerti hulladék elégetését a megkérdezettek 22%-a vallotta be, illetve nyílt téren vagy a kályhákban, kazánokban 13% tüzel háztartási szemetet, 6% kezelt fát, ugyanennyien rongyot, ruhaneműt, lábbelit. Műanyagot szerencsére viszonylag kevesen (3%), viszont a megkérdezettek 1%-a még a gumi- illetve a fáradtolaj-égetést is bevallotta. A közvélemény-kutatás adatait megerősíti a hulladékszállítóknak az a megfigyelése, hogy télen a hulladék 1/3-a egyszerűen „eltűnik” a rendszerből. A műanyagok, háztartási hulladékok égésekor egészségre ártalmas, toxikus anyagok szabadulnak fel, mint például dioxinok, cianidok stb. A felületkezelt, illetve a laminált bevonatú faalapú anyagok (OSB lap, laminált forgácslap, fa ablakkeret, tömörfa bútorok stb.) égetésekor pedig izocianátok, formaldehid, formalin és policiklikus aromás szénhidrogének (PAH), melyek belélegzésének következménye a daganatos megbetegedések, máj- és vesekárosodás, légzési elégtelenség stb. kialakulási gyakoriságának növekedése. Emiatt **2021. január 1-től Magyarországon betiltották a nyílt színi égetést.**

Magyarország élőfakészlete a 2022-es hivatalos adatok alapján (URL6) 408 millió m³, az éves fanövekmény ~13 millió m³, ami magában foglalja a telepített és művelt erdők állományát, a nemzeti parkok (nagyon korlátozottan kitermelhető) állományát is. A *bruttó* fakitermelés 8,24 millió m³ körül alakult. A bruttó kitermelt faállomány 13%-a fenyő, 27%-a lágylombos és 60%-a fatüzelés szempontjából is fontos keményfa. A kitermelés leggyakoribb fafaja az akác (1,66 millió m³), ezt követi a tölgy és a cser (együttesen: 2,09 millió m³), a nemesnyár (1,38 millió m³), a fenyő (1,06 millió m³), a bükk (0,66 millió m³) és a többi lágylágylombos, illetve keménylombos fafaj (pl. gyertyán, fűz, éger, hazai nyár stb.) (együttesen: 1,38 millió m³). A *nettó* kitermelt mennyiség (iparifa és tűzifa) nagyjából 7,33 millió m³-t tett ki (az iparifán belül a fenyő-lombos részarány 25-75%). **A nettó kitermelt mennyiség 60%-a tűzifa** (lakossági és ipari: 4,4 millió m³) és 40%-a (2,9 millió m³) iparifa (fűrészipari rönk, lemezipari rönk, bányászati faanyag, papírfá, rostfa, egyéb fűrészipari alapanyag, egyéb iparifá). Molnár et al. (2013) szerint Magyarországon 9-10 millió m³ faanyag lenne kitermelhető az erdők állapota és korosztály viszonyai alapján (a teljes 13 millió m³ folyó növedék védelmi és egyéb okokból nem termelhető ki). A kitermelt bruttó mennyiség és a nettó fahasználat közötti különbség ún. erdei apadék (ágfa, gallyak, vékonyfa stb.) formájában a helyszínen marad; ez a bruttó fakitermelés mintegy ~10-15%-át teszi ki (0,7-1 millió m³) az elmúlt 10 éves átlag alapján. Az erdei apadékként nyilvántartott erdőn maradó faanyag jelentős mennyisége tehát begyűjthető energetikai célra, és egyre nagyobb részét be is gyűjtik, ahol ez gazdaságosan megoldható.

A fa tüzelőanyag általában kétféle választékban és sokféle feldolgozottsági állapotban kapható. A jellemző választék a kemény- és a puhafa. A kereskedelemben a tűzifát súlyra vagy térfogatra árulják. A kalodában, térfogatra árult tűzifa kapható a szokásos m³-ben, ekkor ez egy 1×1×1 m méretű kalodába rakható rönköt vagy fahasábot jelent, és kapható erdei köbméterben* is, ez 1,7 m³ térfogattal egyenlő. A tűzifa nedvességtartalma változó, általában 15-50% között van. Az 50% a frissen vágott élő fára, a 15-20% pedig a legalább 1,5-2 évig szellős, fedett helyen tárolt tűzifa nedvességtartalmára jellemző. A pellet (faipari, illetve mezőgazdasági melléktermékből előállított energetikai tömörítvény) és a brikett ezzel szemben szárított termékek, nedvességtartalmuk csupán 10% körüli.

A fatüzelést szénsemlegesnek szokták mondani, arra hivatkozva, hogy a fák ugyanannyi szén-dioxidot nyelnek el az életük során, mint amennyi a fa égetésekor felszabadul. Ez abban az esetben igaz, ha nem vesszük figyelembe az erdőgazdálkodás, a kitermelés, a feldolgozás, a szállítás és a kazánok működtetése során felhasznált energiát (üzemanyag, villamosenergia stb.), illetve annak a környezetre gyakorolt negatív hatását (pl. CO₂ kibocsátását). Reálisan nézve tehát maximum az mondható el, hogy **a fatüzelés közel szén-dioxid semleges**, a fosszilis energiahordozókhoz képest lényegesen kisebb terhelést jelent a környezetre. A háztartásban a fát általában csak a fűtési hőtermelés során hasznosítják energetikailag, főzésre és vízmelegítésre jellemzően más tüzelőanyagot – főként földgázt, vagy villamos energiát - használnak. A cserépkályha, a kandalló tüzeléstechnikai hatásfoka jóval kisebb (50-70%, sőt régebbi típusok esetén nem ritka a 30-40%-os hatásfokú berendezés sem), mint a korszerű fatüzelésű kazánoké (85-92%). A fatüzeléshez ma már nagyon jó minőségű, automatizált kazánok is rendelkezésre állnak, amelyek kevés emberi munkával és csak időszakos felügyelettel, kvázi automatikusan üzemelnek. Hatásfok és környezetvédelem szempont-

jából vizsgálva ma már nem mondható korszerűnek a fa- és széntüzelésre egyaránt alkalmas vegyestüzelésű kazán, ugyanakkor a jelenlegi energiaválság közepén semmiképpen nem állítható, hogy alkalmazásuk felesleges lenne, de mindenképpen szükséges esetükben a károsanyag kibocsátás minimalizálására törekedni.

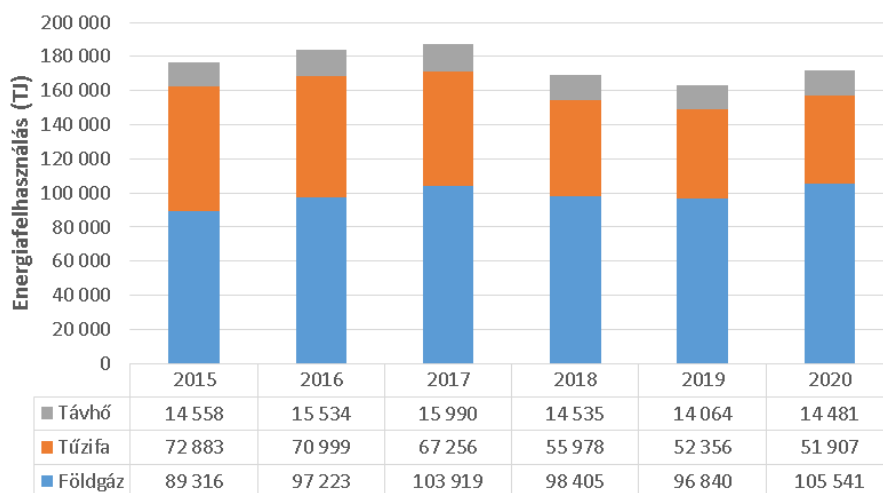


2. ábra: A lakossági tűzifa- és földgázfogyasztás, valamint a földgáz és a hasított tűzifa árának alakulása 2005 és 2021 között (forrás: URL7)

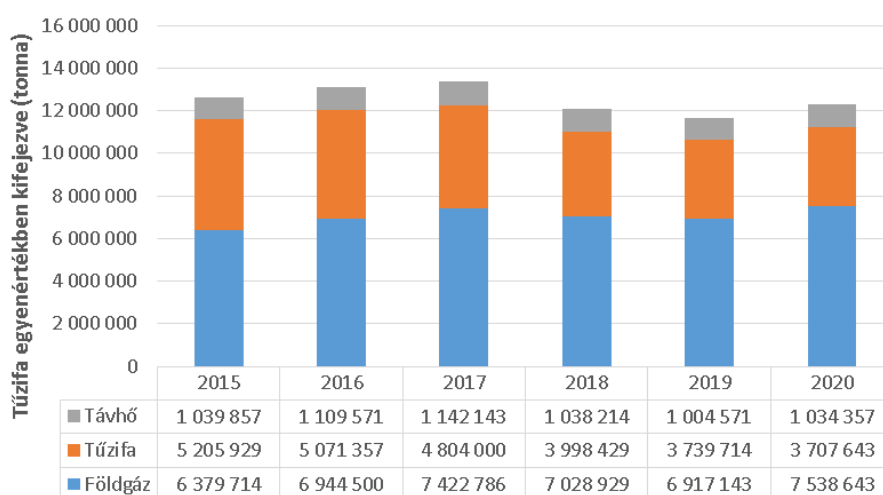
A rendszerváltozás után az energiaárak az inflációnál nagyobb mértékben emelkedtek, majd 2006 után a gázárak ugrásszerű növekedése miatt ez a különbség még nagyobb volt. Ennek hatására sok háztartás tért át részben vagy teljesen a gázzal szilárd tüzelésre (2. ábra). Az Eurostat adatai szerint 2013-ra a lakossági gáz- és tűzifaalapú energiafogyasztás hozzávetőlegesen egy szintre került. Ennek a tendenciának vetett véget a rezsicsökkentés bevezetése, melynek következtében a lakossági gázfogyasztás ismét emelkedni kezdett. A fatüzelés leginkább az alacsony jövedelmű, rossz állapotú lakásokban élő háztartásokra jellemző, azonban számos előnye miatt a társadalom minden szegmensében elterjedt fűtési mód. 2022 nyarán ez még erőteljesebben megmutatkozott, amikor a lakossági gázárak növekedésének hatására családok tízezrei akarták biztosítani a télre elegendő tűzifát, ami ugrásszerű kereslet-növekedést és ebből következően áremelkedést eredményezett (URL8).

Magyarországon több mint 700 ezer háztartásban fűtenek (legalább részben) fával. Jellemzően a kisvárosokban, községekben, tanyákon gyakoribb a fatüzelés, és elsősorban a családi házakban, de Budapest családi házas kerületeiben is rohamosan terjed a szén- és fatüzelés. A felhasznált tűzifa 80%-a keményfa (főként akác, tölgy és cser). A lakossági tűzifa-felhasználás a KSH adatai alapján 2016-ig emelkedett, utána mérséklődött, majd 2022 nyaratól a nem várt gazdasági események hatása

hirtelen ugrásszerű növekedési tendenciába kezdett. A lakossági gázfogyasztás ez időtől ugyan kissé mértékben emelkedni kezdett, de a 2006 előtti szintet még mindig nem érte el.



3. ábra: Fűtési célú lakossági energiafelhasználás (URL9 alapján saját szerkesztés)



4. ábra: Fűtési célú lakossági energiafelhasználás 20% nedvességtartalmú, 14 MJ/kg fűtőértékű tonna tűzifa egyenértékben kifejezve (a 3. ábra adatait felhasználva saját szerkesztés)

A Magyarországon felhasznált éves tűzifamennyiség vonatkozásában sajnos nagyon nehéz a valóságnak megfelelő, megbízható számokat mondani, ugyanis a hivatalos statisztikai adatokból (URL6) származó országosan kitermelt tűzifamennyiség sokszor nincs paritásban az egyes szakmai források ténylegesnek ítélt tűzifa-fogyasztási adataival. E területen kompetens szakemberek valószínűsítik, hogy jelentős lehet az a famennyiség, amely az erdőterületeken kívül termelődik az országban. További magyarázat lehet, hogy a tüzelésre hulladék faanyagot is használnak. Számításaink szerint a hiányzó energiamennyiség több, mint mintegy kétötöde lehet (Király et al. 2024).

KÖRNYEZETSZENNYEZŐ-E A FATÜZELÉS?

A földgáztüzelés tiszta, biztonságos, a jól beállított, karbantartott készülék szén-dioxidot (CO_2) és vízgőzt (H_2O) bocsát ki. A földgáz elégetésekor is keletkezik szén-monoxid (CO), korom és nitrogén-oxid (NO_x) is, de csak nyomokban. A földgáz elégetésével a légkörbe jutó szén-dioxid olyan többlet környezeti terhelés, aminek ellensúlyozására a növényzet nem képes. A fatüzelés égésterméke is alapvetően szén-dioxid és vízgőz. A fatüzeléssel együtt jár, hogy el nem égő szilárd összetevők is keletkeznek, melyek nagyobb része a hamuba, míg a legkisebb frakció az égéshez bejutatott levegővel a füstgázba kerül, így a légkört – mint szállópor – szennyezik. A fatüzeléssel főként szállópor (aeroszol) kerül a levegőbe, valamint megjelennek a füstgázban különböző mennyiségben egyéb elégetlen összetevők is (jellemzően szén-monoxid, nitrogén-oxidok, szénhidrogének, szilárd szennyezőanyagok, kisebb mennyiségben kén-dioxid stb., de ezekre a későbbiekben részletesen ki fogunk térni). A fatüzelés során az egyik legnagyobb problémát a fatüzelésnél a füstgázzal távozó por mennyisége okozza, hiszen ezek a PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ tartományban vannak (lásd alább), így jelentős egészségügyi kockázatot jelentenek. A városok és falvak téli szén és fa tüzelése során megfigyelhetjük a jelentős porkoncentráció növekedést a légkörben, mely így valós szmog veszélyt jelentenek helyileg. A füstgázzal távozó szilárd anyag mennyiségére többféle becslést végeztek már, ezen értékek a bevitt szárazanyag-tartalom kb. 1%-a körül is lehet. Ez természetesen nagymértékben függ a tüzeléstechnikai paraméterektől, a tüzelőanyag tulajdonságaitól, valamint az esetleges leválasztási megoldásoktól. Ez utóbbi nem jellemző a lakossági tüzelőberendezésekre, hiszen a kisebb kazán teljesítmények a beépítés mérete és kialakítása, valamint az anyag vonzatai ezt nem teszik lehetővé.

Tény tehát, hogy a városokban az egészséget veszélyeztető öt fő légszennyező anyag – kén-dioxid, ózon, nitrogén-oxidok, szén-monoxid és szállópor – közül a nitrogén-oxidok mellett a szállópor az, amelyik tekintetében Magyarországon (is) jelenleg kedvezőtlen a helyzet.

Egyes szakértői vélemények szerint célszerűbb a szállópor helyett légköri aeroszorról* beszélni. A szakirodalom két csoportra osztja őket. Ha egészen kisméretűek, 2,5 mikrométernél is kisebbek, akkor $\text{PM}_{2,5}$ a jelölésük. Az ennél nagyobb, de 10 mikrométernél kisebb csoport jelölése PM_{10} . A levegőtisztaság-védelmi előírások a PM_{10} -re és $\text{PM}_{2,5}$ -re írják elő határértékeket. A légköri aeroszol okozta veszély kettős: egyrészt, mint minden légutakba bejutó apró részecske, ingerlő hatású. Másrészt többféle – akár végzetes – módon is károsítja szervezetünket. Ebben kitüntetett szerepe van annak a sokféle vegyületnek, amelyek a részecskéket alkotják, vagy ahhoz kapcsolódnak. A tüzelőberendezésekből származó részecskék mintegy 90 százaléka a PM_{10} ($\text{PM}_{2,5}$) mérettartományba esik (Chiovini 2012). A részecskék több forrásból is származhatnak, mint pl. a közlekedésből, iparból, mezőgazdaságból, természetes forrásokból (szél, vulkánok stb.). Az elmúlt években elkészített országos légszennyezőanyag-leltárak adatai alapján (URL10) a kisméretű szállópor-kibocsátás közel 2/3-át a lakossági fűtés okozta, és lényegesen kisebb mértékben járult hozzá a korábban fő probléma-forrásnak tartott ipar (kb. 7%) és a közlekedés (kb. 10%). Az elmúlt 15 évben a háztartások hozzájárulása az ország kisméretű szállópor-kibocsátásához 50%-ról 70%-ra emelkedett. Ennek oka az, hogy az utóbbi években a lakossági gázfelhasználás csökkent, a tűzifa és szén felhasználás viszont növekedett, mely erőteljesen befolyásolja a települések levegőminőségét.

Aeroszokok keletkeznek a szilárd, folyékony és légnemű tüzelőanyagok elégetésekor is, és természetesen nem csak a hőelőállítás során, hanem például a közlekedés során is. A tüzeléstechnikában

pernyének nevezzük az égéstermék szilárd halmazállapotú összetevőit. Minden tüzelőanyag tartalmaz éghetetlen összetevőket is. A földgáz alig, a folyékony tüzelőanyagok valamivel többet, a szilárd tüzelőanyagokban viszont jelentős az éghetetlen rész. Ebből lesz a hamu, aminek egy része pernyeként távozik a kéményen keresztül. De keletkeznek szilárd és folyékony részecskék a tüzelőberendezésben is. A legismertebb a korom, mely a berendezésbe juttatott széntartalmú anyagok tökéletlen égés miatt nem oxidálódott származéka.

Az elmúlt évtizedben kifejlesztett tűzterekben több „szinten” bevezetett, előmelegített égéslevegő biztosítja a jelentős hatásfokemelést és a környezetet kímélő, sokkal kisebb károsanyag-kibocsátást a természetes huzat hatásával működő kályhákkal és kandallókkal szemben. Ugyanezen típusú hőtermelő egységeknél a katalitikus égető egységekkel történő kiegészítés is segíti a kibocsátás csökkentést. A többszintű égéslevegő-bevezetésű és megemelt hőmérsékletű tűztereket nevezzük manapság ún. öko-tűztereknek (környezetkímélő tűztér) (URL11). Az öko-tűztér lényege, hogy egy égéslevegő-elosztó dobozzal, és dupla fallal rendelkezik, amelyen több ponton légrések vannak kialakítva. Az égéshez szükséges oxigén a légréseken több szinten át áramlik be ezáltal megtörténik a fagázok tökéletes keveredése. Fatüzelésnél a fűtési energia (fűtőérték) körülbelül 70%-át a tűzifa 300°C alatti elbomlásakor keletkező fagázok (80-85%-ban) égése adja. A hőszigetelés növelését az egyre nagyobb felületű üveges ajtóknál dupla réteggel, a tűztér tetején és alján, illetve esetenként az oldalán hőszigetelő lapokkal lehet elérni. A környezetkímélő megoldást a jobb hatásfok miatt lecsökkent tűzifa-felhasználás, valamint a jobb égéssel elérhető alacsonyabb korom-, szén-monoxid, szerves szénvegyület és nitrogén-oxid-kibocsátás jelenti. Az öko-design elveknek megfelelő tüzelőberendezések hatásfoka legalább 80%, és a szállópor-kibocsátása legfeljebb 35 mg/MJ a kézi, illetve 25 mg/MJ az automatikus szabályzásúaknál (URL12). Az ilyen berendezések Svájc és Ausztria több tartományában szmogriadó esetén is működhetnek. A jelenleg hazánkban működő, 1 millió körüli szilárdtüzelésű fűtőberendezés túlnyomó része több évtizedes életkorú, és csak tízezres nagyságrend (1% körüli érték) felel meg a jelenlegi és még kevesebb a jövőbeli szabályzók előírt értékeinek (URL12).

FÖLDGÁZ KONTRA FATÜZELÉS

Tény, hogy a földgáz egy nagyon jól égethető tüzelőanyag, két okból is: az égés során viszonylag kevés káros anyag keletkezik, továbbá a tökéletes égés viszonylag egyszerű berendezésekben is jól megvalósítható. Korábban (a '90-es években) kétségtelen javulást jelentett a levegőtisztaság szempontjából a földgázellátó vezetékhálózat országos kiépítése, a földgázzal való fűtés lakossági szinten történő bevezetése és elterjedése. A tendencia azonban mára megfordult, aminek számos oka van. Közrejátszik ebben az a szemléletváltás is, hogy kíméljük a nem megújuló, nem megújítható természeti erőforrásainkat, de a legmeghatározóbb a jelenlegi földgázellátás bizonytalansága és a földgáz árának drasztikus növekedése. Számtalan kimutatás készült arról, hogy melyik a leggazdaságosabb hőtermelési mód, de egyrészt ezek a számítások a legkritikább esetben készülnek kellő objektivitással és alapossággal, másrészt a hőtermelési mód megválasztása nem csak gazdasági kérdés.

Azért fontos ezt szem előtt tartani, mert a ma tapasztalható tüzelőanyag-váltás (földgáz helyett fa) következményeire csak akkor tudunk eredményesen reagálni, ha a helyzetértékelésünk helyes.

Az elmúlt években Magyarországon, de más európai országokban is nőtt a levegőben a PM10-koncentráció, ahogy ezt már kifejtettük korábban. Ennek több oka is van, az egyik azonban kétségtelenül az, hogy különösen a lakosság körében terjed a szilárd tüzelőanyagok használata. Nem mindegy azonban, hogy milyen fát, milyen módon tüzelünk el. A levegőtisztaság szempontjából előnyös az automatizált tüzelőberendezések használata. A legrosszabb a nedves, szennyezett tűzifát, kézi adagolású, tüzeléstechnikai szempontból kezdetleges berendezésben elégetni. A két véglet között számtalan köztes megoldás létezik, amihez hozzá kell tennünk az emberi tényezőt és az ehhez kapcsolódó megfelelő szemlélet hiányának jelentőségét is.

A fatüzelésből származó, egészséget károsító részecskék éves mennyisége függ a tüzelőberendezések számától, üzemidejétől és az égéstermék összetételétől. Ez utóbbi nagyon különböző értékeket vehet fel. Befolyásolja a berendezés jellege, kialakítása, beépítése, műszaki állapota, az elégetett tüzelőanyag minősége, fajtája. Különböző kibocsátási értékeket mérhetünk aszerint, hogy az égés kezdeti szakaszban vagy állandósult állapotban van-e. Ha csak a lakosság által használt, fatüzelésű berendezéseket vesszük alapul, akkor is igen sokféle létezik (pl. tűzhelyek, különböző kályhák, kandallók, kazánok). Tüzelhetünk darabos tűzifával, aprítékkal, fabrikettel, fapellettel. A berendezés lehet kézi üzemű, de akár teljesen automatizált is. Működhet szakaszosan és folyamatosan, illetve hőtároló nélkül vagy puffertartállyal. Ahogy azt a későbbiekben is be fogjuk mutatni, a legjobb és legrosszabb emissziós értékek között 10-100 szoros különbség is adódhat.

Az 1. táblázat három forrásból származó adatokkal mutatja a lakossági tüzelőberendezések emissziós jellemzőit. Németországban az Umweltbundesamt (URL13) (UBA, Környezetvédelmi Hivatal) megbízásából a Stuttgarti Egyetem által készített tanulmány adatai a német háztartásokban működő, legfeljebb 25 kW névleges teljesítményű tüzelőberendezésekre vonatkoznak. Az osztrák Umweltbundesamt kiadványa hasonló, de részben eltérő számokat tartalmaz, melyek a Joanneum Research (JR) méréseiből származnak (URL12). Ide illik a svájci Bundesamt für Umwelt Wald und Landwirtschaft (BUWAL) tanulmánya is, mely ugyancsak ezt a kérdést vizsgálta (URL14). Ezek a számadatok az elmúlt 15 év műszaki színvonalát jellemzik. Figyelemre méltó az osztrák Bioenergy+ 2020 GmbH kutatási jelentése (URL15), ami a mai korszerűnek tekinthető berendezések mérési eredményeit tartalmazza. Ezek tükrözik a korábbi műszaki színvonalhoz képest mutatkozó javulást. Az eredmények alapján a berendezések hatásfoka, az égéstermék összetétele javult, a PM10 részecske-kibocsátás kisebb lett. A tényleges üzemi körülményeknek megfelelő, a fűtési időszak terhelési viszonyait szimuláló próbatermi mérések szerint a korszerű kazánok emissziós jellemzői kedvezőbbek. A legjobb eredményt egy 30 kW-os, darabos fával fűtött kazán érte el (13 kg/TJ). Majdnem egyezik ezzel egy 25 kW-os pelletkazán fajlagos részecske-emissziója (15 kg/TJ). Végül egy 30 kW-os faaprítékos kazánál 55 kg/TJ-t mértek.

1. táblázat: Maximum 25 kW névleges teljesítményű lakossági tüzelőberendezések emissziós értékeinek összehasonlítása (Chiovini 2012)

Tüzelőanyag	Mértékegység	Német (UBA)	Oszták (JR)	Svájci (BUWAL)
Földgáz, PB-Gáz	Részecske (PM10) [kg/TJ]	-	-	-
Fűtőolaj		0,03	0,5	0,1
Szén		0,87	3	0,11
Szénbrikett		-	42-230	-
Tűzifa, Faapríték		51-265	-	-
Fapellet		105	68-216	109-120

Jelenlegi gazdasági helyzetben várható a földgázzal való átállás folyamatossága, ezért olyan berendezésekre és olyan üzemeltetésre van szükség, melyek kisebb fajlagos károsanyag-kibocsátással járnak. A mai tüzelőberendezések zöme megfelel a kívánalmaknak, de szem előtt kell tartani, hogy a környezetre nézve kedvezőbb fatüzelés nagyobb beruházási költséggel jár, és szakszerűbb, felelősségteljesebb kezelést igényel.

A fa égési folyamata és az égés során keletkező kibocsátások

A fatüzelés során jelentős mennyiségű szerves mikro-szennyezőanyag keletkezik, amelyek között több mérgező vegyület található, például policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) és poliklórozott dibenzo-p-dioxinok és dibenzofuránok (PCDD/F-ek) (Wielgosinski et al. 2017). Sok esetben hangoztatják, hogy a szilárd szennyezőanyag kibocsátás a fa égetése során elsősorban a tökéletlen, vagy a kevésbé tökéletes égéshez köthető. Ez a megközelítés teljesen hibás, hiszen természetesen a tökéletlen égetés során a károsanyag kibocsátás növekszik (a szilárd szennyezőanyagokat is beleértve), de tökéletes égés során is van légszennyezés, ez sajnos a faalapú tüzeléstechnikának (is) a része. Szakirodalmak a biomassza égetéséből származó kibocsátásokat két nagy csoportra bontják. Egyik a teljes, tökéletes, míg a másik a tökéletlen égetésből származó kibocsátások. A kibocsátások kapcsán – az egyes összetevők részletes tulajdonságainak és keletkezésének ismertetése nélkül – az alábbi felbontást célszerű alkalmazni:

1. Teljes, azaz „tökéletes égés” során (is) megjelenő kibocsátások (vízgőz mellett)

- **Szén-dioxid (CO₂):** Közvetlen üvegházhatású gáz, mely a biomassza tüzelőanyagok fő égésterméke és a tüzelőanyag szénttartalmából származik. Égetés során az a CO₂ mennyiség távozik, amit az adott fatömeg – melyet a kazánba juttatunk – növekedése során felvett a légkörből. **De a teljes folyamatot vizsgálva nem mondható ki a teljes CO₂ semlegesség még a fa, vagy más biomassza anyagok kapcsán sem.**
- **Nitrogén-oxidok (NO_x, elsősorban: NO, NO₂):** Amelyek részben a tüzelőanyag teljes oxidációjának az eredményei, de a levegő nitrogén tartalma is hozzájárul a kibocsátáshoz. A nitrogén-monoxid esetében 1-es légszennyező esetén van maximuma a kibocsátásnak, mivel itt a legmelegebb a láng (a nitrogén és oxigén egyesülése nitrogén-oxidá

endotherm reakció, azaz hőigényes folyamat). 1-es légfeszültség tényező alatt és felett csökken az NO kibocsátás. Savas csapadék és szmogképződésben is szerepe van. Az NO₂ mérgező gáz. A légkörbe jutó NO_x koncentrációjának éves megoszlásában nyári minimum és téli maximum figyelhető meg. Nyáron a légkör átkeverő hatása miatt tapasztalható alacsonyabb koncentráció. Télen a fűtés miatt jelentős NO₂ és NO kibocsátás figyelhető meg.

Összehasonlításul: a tiszta fa 0,2-0,5%, a nem természetes állapotú használtfa 3-5% nitrogén-tartalommal bír. Tiszta fa égetésekor 100-200 mg/m³ NO_x-kibocsátásra számíthatunk (URL16 és URL17), fatermékek, használtfa (felületkezelő- és ragasztóanyagok jelenléte) égetése akár 1000 mg/m³ emissziót is eredményezhet, ellenintézkedések alkalmazása nélkül, mint pl. a fokozatos levegő-hozzávezetés (Széll 2009). A lehető leghatékonyabb csökkentési eljárás során a másodlagos (esetleg harmadlagos) levegőt relatíve későn adagolják az égéstérbe.

- **Dinitrogén-oxid** (N₂O): A tüzelőanyag teljes oxidációjának eredménye, de szerencsére nagyon alacsony mennyiségben jelenik meg a fa tüzelésekor, ugyanakkor nagy GWP*-je.
- **Kén-oxidok** (SO_x: SO₂, SO₃): A tüzelőanyag kén tartalmának teljes oxidációjakor keletkezik, elsősorban SO₂ formában, de némi SO₃ is képződhet. A tüzelőanyagban található kén jelentős része a hamuban marad. A fa kéntartalma több nagyságrenddel kisebb, mint a széné. A mátrai lignit kéntartalma hivatalosan 1,4-2,2%, de egyes mérések szerint a 7%-ot is meghaladhatja (URL18), míg a szintén nagyobb mennyiségben árusított putnoki szén (barnaszén) még ennél is magasabb, 4,88% kéntartalommal kerül a kályhába, kazánokba. Ezzel szemben a fa esetében 0,01-0,02%-ról beszélhetünk (URL16 és URL17). Savaseső, szmog és a légzőrendszerre gyakorolt hatása miatt más - nem tiszta faalapú – tüzelőanyagoknál jelentős problémákat okoz. A levegőbe került kén-dioxid 1/3-a a lakossági szektorból származik, azon belül is a fűtési időszakban a szilárd tüzelésből (URL19).
- **Hidrogén-klorid** (HCl): A tüzelőanyag klór tartalmának egy része sósav formájában szabadul fel, így a savas csapadék egyik forrása. A fa klór tartalma rendkívül alacsony, ami kevésbé mondható el a lágyszárú biomasszákról. A tiszta kezeletlen fa klór tartalma általában 0,01% alatti (URL16 és URL17).
- **Részecskék:** Pernye, mely a füstgázban megjelenő hamu eredménye, valamint a pernyénél kisebb méretű aeroszolok (sók, pl. KCl; NaCl; K₂SO₄) jelentik ezt a fajta kibocsátást, mely viszonylagosan könnyen csökkenthető leválasztókkal elsősorban nagyobb fűtőműveknél. „Háztartási” alkalmazása kevésbé releváns a tüzelőberendezések paramétereit, valamint helyigény és gazdasági beruházási igény miatt, így itt elsősorban az égéstér és az égetési paraméterek optimalizálása az elsődleges lehetőség. Jellemző, hogy az összes PM10-es tartomány nagyobb része a rövidnek tekinthető begyűjtés és a kiegésző szakaszában keletkezik, míg kisebb része a jóval hosszabb, kvázi állandósult, tökéletes égési fázisban.
- **Nehézfémek:** Minden „tiszta” tűzifa is tartalmaz viszonylag kis mennyiségben nehézfémeket (pl.: Cu, Pb, Cd, Hg), melyek elsősorban a hamuba kerülnek, vagy megtapadnak

a füstgázba kerülő részecskék felületén és a pernyeszemcsék belsejében. Különösen kritikusnak tekintendők a szennyezett (pl. festett, impregnált, faanyagvédőszerekkel kezelt) faanyagok, melyek már jóval nagyobb mennyiségben tartalmaznak nehézfémeket. Táplálékláncban felhalmozódhatnak és néhányuk rákkeltő, mérgező tulajdonságokkal bír.

2. Nem teljes, azaz „tökéletlen égés” során – a fentiekén túlmenően - megjelenő egyéb kibocsátások

- **Szén-monoxid (CO):** Közvetlen üvegházhatású gáz, mely az égésminőség egyik legfontosabb mutatószáma. Ha megfelelő mennyiségű oxigén van jelen, akkor CO₂ keletkezik, mely oxidáció sebessége elsősorban a hőmérséklettől függ (nagyobb hőmérsékleten csökken a CO mennyisége). Nagyméretű ipari berendezések az égési folyamatok optimalizálására jobb lehetőséget kínálnak, mint a „háztartási” méretű berendezések, így a CO kibocsátás is kedvezőbb általában a nagyobb berendezések esetében. Az egyik legnagyobb befolyásoló tényező a légfelesleg tényező* értéke. Egy-egy kazán esetében mindig van egy optimális légfelesleg tényező érték, amikor a legalacsonyabb a CO kibocsátási szint. Ennél az értéknél kisebb, illetve nagyobb érték esetén a kibocsátott CO mennyiségének emelkedése tapasztalható.

A szén-monoxid keletkezésének két útja van: A gyulladási szakaszban, amikor a szénhidrogének egy gyors exoterm folyamat során reakcióba lépnek az oxigénnel. Keletkezésének másik útja az első égési reakció után, ha nem pótoljuk a tüzeléshez szükséges oxigén mennyiséget, akkor a szén-dioxid redukálódni fog. Ekkor a hőmérséklet olyan szintre esik, ahol az égési reakció sebessége csökken, a CO-koncentráció szintje állandósul. Ez az állapot a megfelelő hőmérsékleti viszonyok megtartásával és a szükséges oxigén mennyiség biztosításával kerülhető el. A szén-monoxid légkörben való tartózkodási ideje kb. 100 nap (Mayer 1999).

Tapasztalatunk az, hogy az optimális légfelesleg tényező értéke általában 1,4-2 (2,5) körül alakul. Modern szabályozott (automata tüzelőanyag adagolás, szabályozott égési levegő) nagyobb ipari kazánoknál inkább 1,4-1,5; míg egyszerűbb kézi tüzelőanyag adagolási háztartási tüzelőberendezések esetén inkább 2, vagy efölötti tartomány a jellemző, sőt régi korszerűtlen kazánok esetén ez az érték akár 3 is lehet. Ezen értékek összecsengenek a későbbiekben bemutatott irodalmi értékekkel is. Ha a légfelesleg tényező értéke 1 alatti, akkor jelentős kibocsátás van a kevés oxigén miatt, míg 1-1,5 után enyhe növekedés tapasztalható a felesleges levegő láng hűtése és a rövid tartózkodási idő* miatt. Jellemző, hogy az összes kibocsátás nagyobb része (akár 90% is lehet) a rövidnek tekinthető begyújtás és a kiégés szakaszában keletkezik.

- **Metán (CH₄):** A szénhidrogénektől külön szokták kezelni, mivel közvetlen üvegházhatású gáz. Egyfajta köztes „termék” a tüzelőanyagból keletkező CO₂ és a H₂O mellett. Alapvetően a szénhidrogénekre általában igaz, hogy 1-es légfelesleg tényező esetén van a minimum. Ez alatt a kevés oxigén miatt jelentős szénhidrogén marad, míg 1 felett enyhébben, de szintén növekszik, mivel a felesleges levegő hűti a lángot, valamint csökken a tartózkodási idő, így nincs lehetőség a teljes oxidációra.

- **Nem metán illékony szerves komponensek (NMVOC*):** Szénhidrogének a metán és a PAH kivételével. Hasonlóan a metánhoz, ez is egy „közbenső termék” és keletkezésének oka is megegyezik a metánéval.
- **Policiklusos aromás szénhidrogének (PAH):** Hasonlóan a metánhoz, ez is egy „közbenső termék” és keletkezésének oka is megegyezik a metánéval. Legnagyobb mennyiségben a fatüzelés során a 600-800°C égési hőmérséklettartományban képződik (Nussbaumer 1994), de jó égési körülmények között kevésbé jelenik meg. Szmogképződést segítő, rákkeltő hatású komponens.
- **Részecskék:** Tökéletes égés során - a tökéletes égés során megjelenő pernye mellett - korom és kondenzált szénhidrogén (kátrány) is megjelenik. Korom elsősorban szénből áll és a tüzelési zónában rendelkezésre álló oxigén hiányára, vagy éppen a tűz/láng kioltására vezethető vissza. A kátrány nagyon sokszor a kisebb, háztartási méretű kazánok, kandallók, kályhák esetében keletkezik. Az alacsony égési hőmérséklet, a rövid tartózkodási idő és az oxigénhiány itt is jelentősen növeli a kibocsátást. Mivel a kibocsátott – emberi légzőrendszerre káros és rákkeltő hatású – összetevők sokfélék, ezért a mennyiségük csökkentése kissé nehezebb, mint a tökéletes égés során kibocsátott szilárd részecskék esetében.

Az IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) egyes tanulmányai (Kieseewetter et al. 2013, 2015) alapján az látható, hogy a finomrészecske- és koromkibocsátás lakossági tüzelésből (ez tehát nem csak a fatüzelést jelenti természetesen) származó aránya becslések alapján az EU-ban 50% körül mozog. A PM10 és PM2,5 részecskékkel korábban már foglalkoztunk. Szilárdtüzelés során keletkezhetnek PM0,1, vagyis 100 nanométernél kisebb ún. ultrafinom részecskék is, azonban ezekre vonatkozó nagyszámú hivatalos mérési adat, illetve ezzel kapcsolatos tanulmány nem áll rendelkezésre, így részletesebb mennyiségi becslésekbe nem bocsátkozunk.

- **Poliklórozott dioxinok és furánok (PCDD/PCDF = PCDD/F):** A 180-500°C közötti hőmérsékleti tartomány esetén jelenik meg elsősorban ezen erősen mérgezőnek számító füstgázösszetevő (Nussbaumer 1998). Nagyon kis mennyiségben képződhet minden klórt tartalmazó biomassza alapú tüzelőanyag esetében, melyhez a klóron kívül szén, valamint katalizátorok (Cu) és oxigén szükséges. Legnagyobb befolyásoló tényező a füstgázhűtés/hűlés körülménye, így nagyon nagy eltérések is tapasztalhatók a gyakorlatban. Dioxin gyakorlatilag minden tüzelés során megjelenhet az égés során, a 250-450°C hőmérséklet tartományban, ahol klór van jelen (pl. halogénezett szerves vegyületek). Keletkezhetnek mind a tűztérben, mind pedig a lehűlő füstgázban. Ugyanakkor még a nagyobb klór tartalmú biomassza anyagok esetében is alacsony marad a kibocsátás, mivel magas lúgtartalmuk miatt sók (KCl, NaCl) keletkeznek elsősorban. Legmagasabb dioxin- és furánkoncentráció nem teljes kiégetéskor 600-800°C között van, míg 800°C felett azonos tartózkodási idő mellett felgyorsul a termikus dioxin-lebontási folyamat.

A nagyobb klórtartalmú dioxinok a legveszélyesebb szerves vegyületek közé tartoznak, rákkeltőek, károsíthatják a hormonrendszert, a reprodukciós képességet és az immunrendszert. Általánosságban elmondható, hogy a tiszta tűzifa tüzelőanyag felhasználásakor a PCDD/F kibocsátási szint jóval az egészségügyi határérték alatt van (Schatowitz

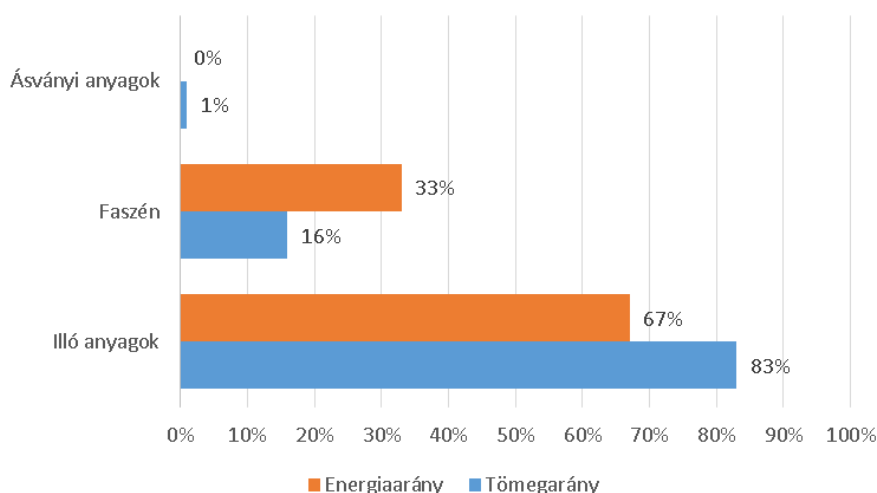
et al. 1994). Faégetés vonatkozásában tehát a dioxinok és furánok elsősorban favédőszerekkel kezelt használtfa égetése során keletkeznek, de kisebb mennyiségben közvetlenül is képződhetnek fából, klór jelenlétében.

- **Ammónia** (NH_3): Kis mennyiségű ammónia szabadulhat fel pirolízis/elgázosítás során, a nitrogén tartalmú komponensek nem teljes oxidációja esetén. Nagyon speciális esetekben fordul elő nagyon alacsony égési hőmérsékleten. Savas csapadék* és a légzőrendszerre gyakorolt negatív hatása miatt fontos figyelemmel kísérni az esetleges keletkezéseket.
- **Talajközeli ózon** (O_3): A talajközeli ózon keletkezése a nitrogén-monoxid (NO) kibocsátásához köthető. Közvetlen üvegházhatású gáz és a helyi környezetre, szmogképződésre is negatív hatással van, káros a növényzetre és az emberi egészségre is. Közvetett módon mennyisége csökkenthető elsősorban a NO_x csökkentési megoldásokkal. Nem keverendő a nagy magasságokban (20-25 km) található, a szárazföldi életet lehetővé tevő sztratoszférikus ózonnal, mely az élőlények DNS-ét károsító UV sugárzás jelentős részét kiszűri.

A tökéletlen égés okozta kibocsátások általában az alábbi okokkal magyarázhatók:

- Tüzelőanyag ideálistól eltérő tulajdonságai (pl. nedvességtartalom, szennyeződések).
- Az égéshez bevezetett levegő és a tüzelőanyag nem megfelelő keveredése az égéstérben, ami helyi tüzelőanyagban gazdag égési zónákat hoz létre. Primer/szekunder/(tercier) levegő rossz elosztása, reakciósebességre gyakorolt hatása.
- Az égéskor rendelkezésre álló oxigén hiánya.
- Alacsony égési hőmérséklet.
- Keletkező gázok rövid tartózkodási ideje.
- Kazán kialakítása, elavult rendszerek használata.
- Egyéb.

A fa tömegarány szerinti összetevőinek mintegy 83%-a ég el gáz alakban, így a fa a fűtőanyagok közül a gázokban leggazdagabb tüzelőanyagnak számít. A gázként elégő 83% adja a fa fűtőértékének közel 70%-át (5. ábra). A fa túlnyomórészt a fagáz nagy lángjával ég el. Ez tüzeléstechnikai szempontból azt jelenti, hogy célszerűen, az eltüzelendő anyaghoz alkalmazkodó tűzteret kell kialakítani. Ha nem így teszünk, akkor azzal a kibocsátások mértékét növeljük.



5. ábra: A fa összetevőinek tömeg- és energiaaránya (Ebert 2007 alapján saját szerkesztés)

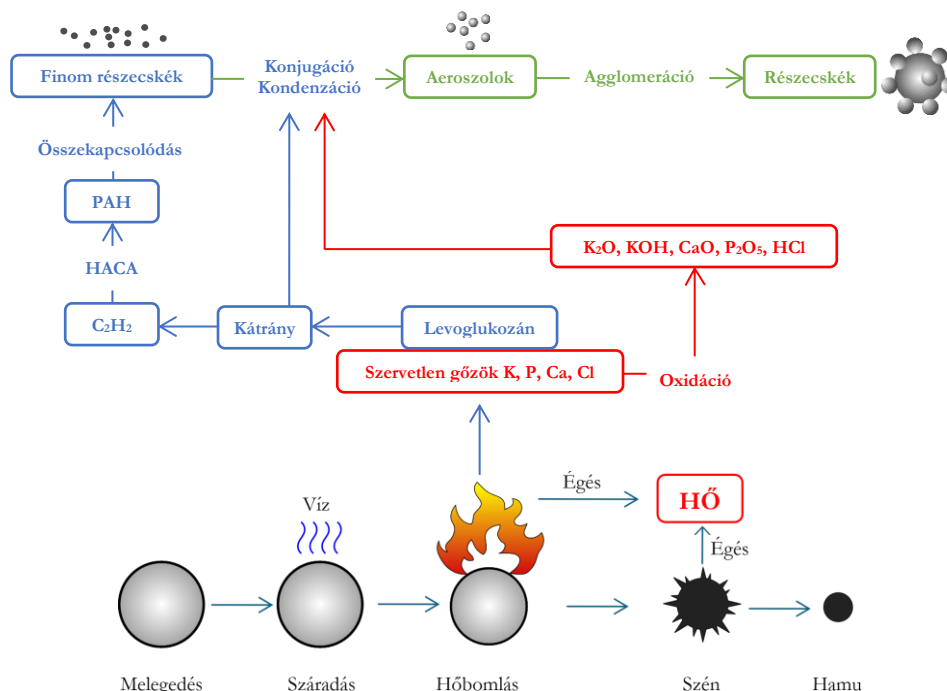
A faanyag égése tulajdonképpen egy termodinamikai transzformációs folyamat, melyben a fában lévő kémiai kötési energiákat szabadítjuk fel és alakítjuk át hővé. A fa égését befolyásoló legfontosabb, fához kötődő tényezőket a következőkben foglaljuk össze:

- Az égési jellemzőket befolyásolja a hőmérséklet, a hővezetési tényező nagysága és a faanyag anizotrópiája. A nagyobb hővezetési tényezőjű anyagok nehezebben égnek.
- A különböző fafajok az eltérő sűrűségi, szöveti és kémiai jellemzőik miatt másféle égési sajátosságokkal rendelkeznek. Az alaki tényezők szempontjából a fa felülete és térfogataránya is fontos. A fajlagosan nagyobb felületű szerkezetek könnyebben égnek, hiszen a nagyobb felületről az égéstermékek gyorsabban el tudnak távozni.
- A faanyag kémiai összetevőinek (hemicellulóz, cellulóz és lignin) nemcsak fűtőértéke eltérő, hanem égési tulajdonságaik is különböznek. A hőmérséklet növekedésével először a hemicellulóz bomlik le ((180)200-250°C), azt követi a cellulóz (250-350°C) és végül a lignin (300-500°C) (Németh 1998).
- A fa porozitása a sűrűség növekedésével csökken így jelentősen megnő a gyulladási idő és a gyulladáshoz szükséges energia.

Az égés főbb szakaszai:

1. **Szárítási fázis** során a fa kiszárad, csak az abszolút száraz fa képes égésre. 100°C-ig a fában lévő, vízzel kapcsolatos folyamatok játszódnak le (fagyás, olvadás, párolgás, szorpciós folyamatok). Ebben a hőmérséklet-tartományban található a hidrogénhidas (H-H) kötésben bekövetkező változásokhoz kapcsolható átalakulások, ill. az ezeket jelző másodlagos átalakulási hőmérsékletek (Németh 1998). A kiszáritáshoz a hőt a begyújtáskor külön forrásból kell biztosítani, amíg az égési folyamat beindulása után keletkező hő egy része erre a célra emésztődik fel. A kiszáritott fa a továbbiakban hő hatására bomlásnak indul.

2. A második szakasz a **termikus bomlás** (105°C -nál kezdődik, gyenge színváltozás jellemzi), amely kezdetben endoterm, ezt exoterm folyamat követi. A termikus bomlás végeredménye nagy mennyiségű energia, és égésgázok (szén-monoxid és különböző szén-hidrogének keverékei). Lánggal égéskor ezek gyulladnak meg $220\text{--}260^{\circ}\text{C}$ -on, majd $260\text{--}290^{\circ}\text{C}$ -on megindul a tartós égés.
3. A harmadik szakasz az **égés**, döntően a termikus bomlási folyamatban keletkező égésgázok minőségétől, mennyiségétől és az exoterm folyamat hőtermelésétől függ. A gyulladáspont hőmérséklete $330\text{--}470^{\circ}\text{C}$. A fából felszabadult gázok a levegő oxigénjében maguktól meggyulladnak. Hő hatására a fa szenet és hidrogént tartalmazó vegyületeinek hidrogéntartalmú összetevői lehasadnak és gáz formájában elégnak. A gyorsan távozó fagáz miatt nem jut elegendő oxigén a fadarab felületére, ezért faszénné alakul át. A gázok eltávózása után a faszén $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ hőmérsékleten elizzik. A tiszta faszén jóformán láng nélkül ég el (ekkor köztes oxidációs termékként ismét szén-monoxid kerül az égésgázokba). Folyamatos égetéskor a lánggal égés és az izzás együtt van jelen. Az égés kezdetekor a hőmérséklet csak lassan, fokozatosan emelkedik, de a fa tartós égésekor a hőmérséklet eléri a $800\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ -ot (az elméletileg elérhető maximális hőfok: 1550°C) (Ugolev 2014).
4. A **teljes kiégetés szakasza** az égésgázok teljes oxidációját eredményezheti. A fagázok tökéletes elégeésekor szén-dioxid és víz keletkezik. Ha az égetés ennek a szakaszának kifejlődése nem biztosított, akkor az égéstermékként jelentkező füstgázban tökéletlen égés miatt olyan légszennyező anyagok jelennek meg, amelyek elkerülhetők lennének (szén-monoxid, szén-hidrogének, füst). A keletkező fahamu főleg kalcium (Ca), kálium (K) és magnézium (Mg) tartalmú (kb. 50% CaO , 16% K_2O , 15% MgO , 7% P_2O_5 , 5% SiO_2 , 5% Na_2O , és egyéb anyagok) (Ebert 2007).



6. ábra: A faégetésből származó részecskék keletkezésének útja (forrás: Sitek et al. 2019)
(HACA: hidrogén absztrakció – acetilén addíciós mechanizmus; Levoglucosan (Levoglucosan, LVG): a cellulóz pirólízis főterméke)

A teljes oxidáció a fa égetése során önmagától nem következik be, megvannak a sajátos műszaki, tüzeléstechnikai követelményei. Az égéshez levegőre (oxigénre) van szükség, fontos, hogy ez szakaszosan, primer és szekunder (esetleg tercier) levegő bevezetés formájában történjen. Csak így érhető el, hogy az égetés egyes szakaszaiban az optimális égéslevegő/égésgáz arány (λ -légfelesleg tényező) biztosított legyen. Az égetés szakaszában a bevitt oxigénnek és az égésgázok kémiai reakció szerinti (sztöchiometriai) oxigénigényének az aránya $\lambda > 1$ legyen, ami levegőfelesleggel (elterjedtebb nevén légfelesleggel) biztosítható. A légfeleslegnek jól behatároltnak kell lenni, hogy a megfelelő égési hőmérséklet tartható legyen, miközben nem szabad a légfeleslegnek az égészónát lehűtenie, de biztosítani kell a levegő és az égésgázok jó összekeveredését, ezért az égészóna megfelelő geometriai kialakítása és méretezése elengedhetetlen.

Az égési levegő 80%-át elsődleges (primer) levegőként kell adagolni. A primer levegőt, amely az égést táplálja, rostélyos kazánok esetében, a rostély alatt vezetik be, ezzel hűtik a rostélyt, miközben a levegő felmelegszik. A primer levegő nélkülözhetetlen a fa összetevőinek bomlásához, a fagáz képződéshez és a faszén égéséhez. Az égési levegő 20%-át másodlagos (szekunder) levegőként kell a fagázlángok térségébe juttatni. A szekunder (és akár tercier) levegő az égést táplálja, bevezetése egyszerűbb esetben a rostély feletti térben, vagy a füstgázfordítók után külön az égés céljára kialakított zónában történik. A szekunder levegő a fagáz tökéletes elégéséhez szükséges. A szekunder levegő nem hűtheti le a lángot, mert akkor nem lesz tökéletes az égés, ezért lehetőleg magas hőmérsékleten (600-700°C körül) kell a fagázlángokhoz juttatni. A szekunder levegő összekeverése a forró fagázokkal viszont komoly műszaki problémát jelent. A forró gázok fizikai okok miatt rosszul keverednek. Jó tűzterekben örvényszakaszok vagy szűk fúvónyílások segítik a jobb keveredést, hogy a fagáz elegendő oxigénhez jutva, a hőcserélők elérése előtt tökéletesen elégjen. A fagázok gyakorlatilag nem keverhetők tökéletesen oxigénben gazdag levegővel, ezért több levegőt kell adagolni, mint amennyi számítások szerint a tökéletes égéshez kellene. Irodalmi adatok szerint a tényleges levegőszükséglet a számítottak mintegy 170%-a ($\lambda=1,7$; optimális tartomány: $1,5 < \lambda < 2,5$). Nemcsak a túl kevés levegő hátrányos, a túl sok is kedvezőtlen. Vegyünk például 10 kg fát, aminek az elégetéséhez elméletileg 40-50 m³ levegő szükséges ($\lambda=1$ esetében). Ha túl sok a levegő, akkor a többletet is fel kell melegíteni. A feleslegesen felhevített levegővel energia távozik a kéményen át anélkül, hogy hasznosulna. Ha a füstgázhőmérséklet 200°C körül van, minden feleslegesen adagolt és melegített köbméter levegő kb. 70 Wh hőveszteséget jelent (Richter és Rein 2020).

A KÖRNYEZETBARÁT FATÜZELÉS FELTÉTELEI

A vázoltak alapján érthető, hogy már a tiszta fa, illetve az égetésre szánt faipari melléktermék környezetbarát égetése is magas követelményeket támaszt a kazánok műszaki kialakításával és üzemvitelével szemben. A helyzetet bonyolítja, ha nem tiszta, hanem vegyi anyagokkal társított, szennyezett fa, használt fatermékek égetéséről van szó. Ezek legtöbbször olyan idegen anyagokat is tartalmaznak, amelyek az égetés folyamatát befolyásolják és járulékos légszennyezőanyag-kibocsátást okoznak.

Az alábbi általános főbb elvek betartása mellett lehet jó hatásfokú és környezetbarát a fatüzelés:

- Tüzelőanyag tulajdonságai (pl. 20% alatti nedvességtartalom tűzifa esetében, tüzelőberendezésnek megfelelő optimális méret, szennyeződésmérség stb.)
- A hőtermelő berendezés hatásfoka minimum 80%-os legyen. Ennek okán fontos a különböző veszteségek csökkentése, mint pl.: füstgázzal távozó hő, a tökéletlen égés, valamint a visszamaradó anyagok miatti veszteség csökkentése.
- Többszintű levegőbevezetés a hőtermelő berendezésben: elsődleges, másodlagos, és lehetőség szerint harmadlagos (negyedleges) levegő mennyiségeinek pontos meghatározása és bevezetése, valamint a füstgázvezetés méretezése. Égéslevegő megfelelő szabályozása és elzárhatósága a korszerű hőtermelő egységek alaptulajdonsága.
- A hőtermelő berendezés füstjáratainak megfelelő kialakítása, méretezése.
- Tűztér szigetelése.
- Helyes begyújtás: ha automatikus, akkor általában nem függ a felhasználtól, de kézi begyújtásnál (alkalmazott gyújtóanyag is jelentős forrás lehet) már ez is megjelenik. Saját kutatások alapján elmondható, hogy egy jó, korszerű automata berendezés esetében is három fő részre lehet bontani a kibocsátások tömegáramát. Első fázis a begyújtás, ahol jelentős károsanyag kibocsátás történik, hiszen a „tökéletes” égés feltételei még nem álltak össze. Ezt követi a „normál”, állandósult égési fázis, amikor kvázi tökéletes égés zajlik, majd a harmadik a „ki/leégés” szakasza, ahol tulajdonképpen az égési folyamat lezárása történik, mely szintén együtt jár azzal, hogy az égési folyamat megváltozik (hőmérséklet, égési levegő, tüzelőanyag hiánya stb. miatt), így itt is nagyobb kibocsátással számolhatunk. Feladat lehet tehát az is, hogy ezek a felfutó, lefutó (első és harmadik) szakaszok minél gyorsabban menjenek végbe, illetve olyan pufferes megoldásokat alkalmazzunk a háztartási berendezések esetében, ahol nem a hőleadó egységeket (radiátorok) látjuk el közvetlenül kazán hőjével, hanem a köztes puffert. Így elérhető, hogy adott időegység alatt kevesebb fel- és lefutási szakaszunk lesz, így kedvezőbb összesített kibocsátási értékeket kaphatunk napi, éves szinten.
- Füstgáz elvezető (kémény) és a kazánon belüli hőcserélő felületek megfelelő karbantartása, tisztítása.
- Sokszor a legfontosabb tényező, az emberi tényező. Magyarán az egyik legfontosabb az ügyfél betanítása, szakszerű tájékoztatása.

Mivel a fa környezetbarát égetésének szigorú követelményei vannak, ezért az ipari égető-berendezések esetében a fenti elvek tovább bővülnek például az alábbiakkal:

- A beérkező alapanyag tüzeléstechnikai jellemzőinek folyamatos vizsgálata és az állandó minőség biztosítása.
- Az égésgázok lehető legtökéletesebb égése, melyet az égetési folyamat automatizált irányításával segítenek.
- Megfelelő időszakos akkreditált mérések, saját mérések, vagy automata mérőrendszer biztosítása.
- Nagyobb ipari, falufűtőműves rendszerek esetében egyes károsanyag – de legfőképpen a szilárd – leválasztásának biztosítása.

- Adott esetben több kazánnal biztosított hőellátás, a jobb kihasználtság, és így jobb hatásfok elérése végett.
- Hőelosztó hálózat szigetelése.

Az égésgázok lehető legtökéletesebb égetésének célja, a termikus hatásfok növelése mellett, hogy csökkentse az előzőekben bemutatott kibocsátásokat és hatékonyan óvja a környezetet. Szabályozástechnika kapcsán a legfontosabb tehát, hogy az égés „irányítható” legyen. Ez történhet kézi vezérléssel, és automatikus mérő- és szabályozó technika segítségével. A kézi vezérlés amellett, hogy gyakori, szinte állandó felügyeletet igényel, nem hatékony módszere az égetési folyamatok irányításának, sem az emissziók csökkentésének, hiszen benne van az emberi tényező. Ezért csak kis teljesítményű kazánoknál jöhet szóba. Az égésfolyamat-szabályozás célja, hogy tökéletes égésre törekedve növelje a berendezés termikus hatásfokát, és csökkentse a szennyezőanyag-kibocsátást. Indirekt módszerrel az égetés hőmérsékletét, és a levegőfelesleget (λ -érték), direkt módszer alkalmazásakor a kilépő füstgázban levő elégetlen gázkomponensek (szén-monoxid) koncentrációját mérik. A mért adatok alapján a beavatkozás ismét csak a tüzelőanyag és a primer, szekunder, tercier égéslevegő beadagolás mennyiségi szabályozásával oldható meg. Kiegészítő beavatkozási módszer lehet például a füstgáz részleges visszavezetése.

A FATÜZELÉSBŐL SZÁRMAZÓ EMISSZIÓK CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI A LAKOSSÁGI ÉS AZ IPARI SZÉKTORBAN

A korábbi részben már elemeztük, hogy milyen jellegű kibocsátásokkal kell számolni fatüzelés esetén. Jelen fejezetben az általunk vizsgált lakossági és kisebb fűtőművi rendszerekhez reálisan kapcsolható kibocsátás csökkentési megoldásokból mutatunk be egy-két fontosabbat, melyet kiegészítettünk az egyes kibocsátások kicsit részletesebb jellemzésével és összehasonlításokkal.

A magas szintű műszaki-technológiai, égésméleti ismeretekkel szemben támasztott követelmények maradéktalan teljesülése a gyakorlatban nem lehetséges, ezért minden tüzelési folyamat során számolnunk kell nemkívánatos kibocsátások megjelenésével kisebb-nagyobb mértékben, ahogy ezt korábban már tárgyaltuk. Az USEPA (United States Environment Protection Agency) hatféle, mindenhol előforduló kritikus légszennyező anyagot határozott meg, melyeket folyamatosan monitorozni és kontrollálni kell: ózon (O_3), szén-monoxid (CO), nitrogén-dioxid (NO_2), nitrogén-oxidok (NO_x), ólom (Pb), kén-dioxid (SO_2), illékony szerves vegyületek (VOC), és a különböző méretű apró részecskék (PM₁₀, PM_{2,5}). A szén-dioxid (CO_2) és metán (CH_4) kibocsátást általában az előbb említett anyagokkal együtt szokták vizsgálni, mint üvegházhatást okozó gázokat (Saxena és Naik 2018).

Az irodalmak által az egyik legjobban elemzett területet a szilárd szennyezőanyagok jelentik. A fa égésekor keletkező szilárd légszennyező anyagok az alábbi elemi összetétellel jelennek meg. Az elemi összetevők közül jelentős mennyiségű kalcium (Ca) és kálium (K) tartalmat figyelhetünk meg a szálló fahamuban. A ciklonos leválasztás például jó megoldást nyújt a szilárd légszennyező anyagok mennyiségének csökkentésére.

2. táblázat: Fa égésekor keletkező szilárd légszennyező anyagok elemi összetétele

Elem	Szálló fahamu [tömeg%] (Kaufmann & Nussbaumer (1998))	Rostély hamu [mg/kg] (Hasler et al. 1998)	Átlagos koncentráció fahamuban [mg/kg] (Hasler et al. 1998)	Ciklonban leválasztott por (86% hatásfok) [mg/kg] (Hansen et al. 2001; Pedersen et al. 2004)
K	13,86	66 g/kg	-	60,4 g/kg
Cl	0,61	-	-	0,45 t%
Si	1,18	-	-	-
Ca	24,95	321 g/kg	-	235 g/kg
P	1,67	9,4 g/kg	-	-
Mg	2,94	27 g/kg	-	-
Fe	0,46	-	-	7 700
Al	0,65	-	-	-
Cu	0,029	210	190	-
Pb	-	18	47	100
Cd	-	2,2	0,8	28
Mo	-	4,5	5	-
Zn	-	380	480	-
Mn	-	7 850	-	-

Magyarországon a közelmúltban megjelent – nem reprezentatív – kutatásból kiderült, hogy a lakosság 2-10%-a rendszeresen kályhában égeti el hulladékát (Hoffer et al. 2020). Az égetett hulladék fő típusai a kezelt fa (bútorok, OSB, farostlemez, festett fa, rétegelt lemez), ruhák, műanyagok, gumik és a használt olaj voltak. Magasabb víztartalmú szemét égetése során sokkal nagyobb PM_{2,5} kibocsátási értéket figyeltek meg (szerves és szervetlen hulladékok együtt-égetése). A nedves környezet miatt a tüzelőanyag inkább parázslík és nem ég. Az PM_{2,5} kémiai összetétele, elsősorban fémtartalma alapján következtethetünk az elégetett hulladék fajtájára. Továbbá megfigyelték, hogy a PAH kibocsátás a műanyag szemét égetésekor a legnagyobb és a vegyes szemét eltüzelése esetén a legkisebb (Jayarathne et al. 2018).

Park és munkatársai által 2013-ban végzett vizsgálatok (Park et al. 2013) adatai alapján látható, hogy a PM₁₀ és a THM (total heavy metal - teljes nehézfém emisszió) kibocsátás jelentősen nagyobb a műanyag és a vegyes hulladék elégetése esetén. A PAH emisszió pedig a műanyag esetében a legnagyobb.

3. táblázat: PM és PAH kibocsátás különböző hulladékok elégetése során (Park et al. 2013)

Elégetett anyag/légszennyező anyag	PM ₁₀	PM _{2,5}	PAH (PM _{2,5})	THM
	[mg/kg]		[mg/g]	[mg/kg]
Papír	930	600	3,59	9,77
Fa	830	500	1,47	8,14
Műanyag	1 500	500	14,35	27,09
Vegyes hulladék	1 200	780	1,91	13,39

Alapvetően az elsődleges és másodlagos kibocsátáscsökkentő megoldásokkal lehet redukálni a károsanyagokat. Az elsődleges megoldásnak a képződés elkerülését tekintjük (pl.: égési folyamat paramétereinek módosítása, alapanyag tulajdonságai), míg a másodlagos esetben a füstgáz már elhagyta a hőtermelő egységet és magából a füstgázból próbáljuk meg eltávolítani a káros összetevőket (pl. ciklonos eljárással).

Elsődleges megoldások a teljes részletesség nélkül felsorolva (Sjaak és Koppejan 2008 alapján):

- a tüzelőanyag összetételének módosítása;
- a tüzelőanyag nedvességtartalmának módosítása;
- a tüzelőanyag „szemcse” méretének módosítása;
- a tüzelőberendezés típusának kiválasztása;
- a tüzelőberendezés jobb felépítése;
- égési folyamat szabályozásának optimalizálása;
- fokozatos levegős égés;
- fokozatos tüzelőanyag-égetés és újraégetés; valamint
- katalizátorok.

Másodlagos megoldások a teljes részletesség nélkül (Sjaak és Koppejan 2008 alapján):

- Részecskeleválasztás és csökkentés legjellemzőbb megoldásai;
 - **ülepítő kamrák:** egyszerű gravitációs megoldás, de alacsony nyomásvesztést okoz és egyszerű karbantartású. (A nyomásvesztés energiavesztést is generál, tehát minden ilyen folyamat esetében figyelembe lehet venni, hogy milyen plusz energiabefektetést jelent a leválasztás (pl. ciklon: 0,2 kWh/1000 m³ füstgáz).)
 - **ciklonok:** gravitációs elv kiegészül a centrifugális erővel, de szintén alacsonynak mondható nyomásvesztést generál, inkább a nagyobb szemcsetartományban hatásos.
 - **multiciklonok:** ciklon átmérőjének csökkentésével és párhuzamosan több összekötésével nő a hatásfok és a leválasztási részecsketartomány is csökkenhet, de a nyomásvesztés növekszik.
 - **elektrosztatikus szűrők:** kicsi nyomásvesztés jellemzi, de nagyon érzékeny az áramlási sebességre és csak bizonyos méret felett gazdaságos.
 - **zsákos leválasztók:** különböző hőmérséklet-tartományokban használható anyagokon (textil, polimerek, fémzál, üvegszál, kerámiaszál) keresztülhalad a füstgáz, páratartalomra, vegyi hatásokra érzékeny és az előző megoldásokhoz képest magasabb nyomásvesztéssel jellemezhető, ez utóbbi azonban nagyban függ a szűrőtisztítási beállításoktól és a fajlagos szűrőfelület optimális megválasztásától.
 - **nedves leválasztók:** előnye, hogy a folyadékkal egyes gázok (SO₂; NO₂; HCl) is elnyelethetők, a berendezésnél nincs tűz- és robbanásveszély. Gázmosókban

a vízcseppek magukkal viszik a részecskéket. A szennyvízkezelés és visszanyerés sok energiát igényelhet. Típustól függően akár magas hatékonyság is elérhető.

4. táblázat A különböző részecskeleválasztási technológiákkal eltávolított részecskék jellemző méreteinek összefoglalása (Sjaak és Koppejan 2008)

Részecskeleválasztási technológia	Részecskeméret [μm]	Leválasztási hatékonyság [%]
Gravitációs üleptítőkamrák	> 50	< 50
Ciklonok	> 5	< 80
Multiciklonok	> 5	< 90
Elektrosztatikus szűrők (elektrofilter)	> 1	> 99
Zsákos/szövet szűrők	> 1	> 99
Nedves leválasztók („permetezés”)	> 10	< 80
Nedves gázmosók ütközőlemezekkel	> 3	< 80
Ciklonos permetező kamrák	> 3	< 80
Venturi gázmosók	> 0,5	< 99

A fűtőművi rendszereknél a „porkibocsátás” csökkentésére tehát elkerülhetetlen a „csővégi technika”, vagyis a megfelelő porleválasztó alkalmazása, melyet nem csak a részecskeméret befolyásol, hanem például a füstgáz hőmérséklete is (5. táblázat).

5. táblázat: Fa- és fahulladékégető berendezéseknél leggyakrabban használt porleválasztók alkalmazási tartománya (Marutzky, R. (1997))

	Maradék por- koncentráció [mg/m ³]	Füstgázhőmérséklet max. [°C]
Ciklon	kb. 50	<1000
Elektrofilter	<20	<450
Szövetszűrő	<5	180-230
Nedvesmosó	<30	200-300

NO_x és SO_x szabályozás. A kettőt gyakran együtt kezelik mivel mindkettő a savas esők és a PM10 egyik fő tényezője, valamint hasonló légúti irritációt okoznak. Mindkettő alacsonyabb mennyiségben keletkezik biomassza tüzelés esetében, mint szén égetésekor. Fő különbség, hogy az SO_x optimalizálása a tüzeléstechnikai paraméterekkel gyakorlatilag nem lehetséges, ellentétben az NO_x-el. Ennek megfelelően speciális esetekben, például fluidágyas berendezéseknél mész, vagy mészkő hozzáadásával CaSO₄ (gipsz) fog keletkezni, mely ezt követően részecske formájában eltávolíthatók. A SO₂ vízzel savat képez, mely lúggal reakcióba lép.

Az NO_x összegyűjtése már nem ilyen „egyszerű”. NO_x esetében az SCR (szelektív katalitikus redukció, mely általában 80-90%-os NO_x csökkenést eredményez) az egyik lehetőség, ahol általában ammóniával vagy karbamiddal, platina-, titán- vagy vanádium-oxid katalizátor jelenlétében meghatározott hőmérsékleten (250) 400-450°C-on kémiai reakciók mennek végbe. A reakciót követően

csak nitrogén, víz és szén-dioxid (N_2 , H_2O és egy kis CO_2) marad. A SCNR (szelektív nem katalitikus redukció, mely általában 60-90%-os NO_x csökkenést eredményez) során 850-900°C körüli hőmérsékleten csupán ammóniát vagy karbamidot juttatnak a rendszerbe, így ebben az esetben nincs katalizátor a rendszerben. Látható, hogy az SCR és SCNR esetében is fontos a hőmérséklet, így ettől függ, hogy mely fázisban, hol juttatjuk be az amóniát, így a technológiák sokfélék lehetnek.

A korszerű lakossági és fűtőművi tüzelőberendezéseknek általában nem okoz gondot a kibocsátási határértékek által támasztott feltételek betartása, de a régebbi, elavult kazánok esetében ezek a paraméterek nem tarthatók folyamatosan állandó értéken, főként, ha különböző szemcseméretű, nedvességű és típusú tüzelőanyag kerül égetésre. Ekkor megoldást jelenthet a füstgáz-oldali csökkentés, adszorpciós vagy katalitikus eljárások alkalmazása, melyekre az előzőekben mutattunk néhány példát (Nussbaumer 2004). Egy a közelmúltban megjelent dán tapasztalatokra építő tanulmány alapján a légszennyezést akár 98%-kal is lehet mérsékelni az épületek energiahatékonysági felújításával, környezetkímélő fűtési módokkal, részecskeszűrőkkel, a régi kazánok és kályhák lecserélésével, korszerű automatizált tüzelő-berendezésekre (Danish Ecological Council 2017).

A TÜZELÉS SORÁN KELETKEZŐ HAMU ÉS PERNYE JELENTŐSÉGE ÉS KEZELÉSI LEHETŐSÉGEI

A fahamu több mint 80%-a 1 mm-nél kisebb részecskékből áll, a fennmaradó rész a nem elégetett fa. A talajrészecskék méretével összehasonlítva megállapítható, hogy a hamuban található részecskék szemcsenagysága megfelel a durva homoktól az agyagig terjedő talaj-frakciók méretének (Demeyer et al. 2001). Az égés során keletkező hamu sűrűsége 0,27 g/cm³-től 0,51 g/cm³-ig terjed (Muse és Mitchell 1995). A kisebb értéket tiszta fából származó, a nagyobb értéket papírpépből és papírhulladékból származó hamu esetén mérték. Az utóbbi nagyobb sűrűségét valószínűleg a papírgyártás során a cellulózhoz adagolt agyag és só okozza (Demeyer et al. 2001).

A fahamu elemtartalmát jelentősen meghatározza az elégetett fa kémiai összetétele. A kezeletlen faanyag széntartalma 48,5-50,4%, oxigéntartalma 43,4-44,5% és hidrogéntartalma 5,8-6,3% között mozog. A faanyag nitrogéntartalma alacsony, 0,04-0,26% közötti. A fában megtalálható szervesetlen összetevők jelentős része az életműködéshez szükséges makro- és mikrotápelemekből származik. A szervesetlen összetevők mennyisége 0,1-0,55%. A szervesetlen rész 80%-át alkáli- és alkáliföldfémek teszik ki (Molnár 2000). A kalcium mennyisége száraz fára számítva 800-1100 ppm értéket is elérhet, a káliumé 200-1000 ppm, a magnéziumé 100-200 ppm (Szendrey 1981). A többi elem koncentrációja 50 ppm alatt van, ezért ezeket nyomelemeknek is nevezik. A 12 legfontosabb nyomelem a Ba, Al, Fe, Zn, Cu, Ti, Pb, Ni, V, Co, Ag és Mo, melyeknek biokémiai folyamatokban van szerepe. Az előzők mellett még több mint 50 elem megtalálható a fában, nagyon alacsony koncentrációban (Németh 1997).

Más szilárd tüzelőanyagokhoz hasonlóan a fatüzelés során is jelentős mennyiségű szervesetlen anyagokat is tartalmazó szennyeződések jelennek meg. A kéregmentes faalapú tüzelőanyagok jellemzően 0,5-1%-nyi (m/m) hamutartalommal rendelkeznek, míg kéreg esetében ez az érték 3-10% közötti is lehet. Ez is azt mutatja, hogy a keletkező hamu mennyiségét erősen befolyásolja a faalapú tüzelőanyagok kéregtartalma, melynek oka egyrészt tehát a kéreg magasabb hamutartalma, másrészt

a kéregben, vagy éppen a kéregre tapadt ásványi szennyeződések (homok, föld, kövek) magasabb szintje. Jelenleg a „megtermelt” hamut vagy ártalmatlanítják, vagy újrahasznosítják mezőgazdasági területeken vagy erdőkben. A fenntartható biomassza hasznosítás érdekében elengedhetetlen az anyagáramok nyomonkövetése és a biomassza hamu természetes körforgásokba való integrálása. Ezért az ásványi anyagok körforgását a lehető legteljesebb mértékben segíteni kell.

Talaj/tápanyagok → gyökér/növény → égés → hamu → talaj

Korábbi kutatások kimutatták, hogy a biomasszából történő energiatermelés folyamatában az ásványok természetes körforgását megzavarják a környezetszennyezés okozta nehézfém-lerakódások az erdei ökoszisztémában. Ezért a legtöbb esetben nem lehetséges az égési folyamat során keletkező hamu teljes mennyiségének újrahasznosítása. A fenntartható hamuhasznosítás megköveteli azt is, hogy a fa- vagy kéregégésből származó hamut az erdőterületeken, míg a szalmából vagy az energianövényekből származó hamut a mezőgazdasági területeken hasznosítsák újra, ugyanakkor figyelembe kell venni a földrajzi és műszaki-gazdasági feltételeket (Sjaak és Koppejan 2008).

Tüzeléstechnika során is számos probléma kapcsolódik a hamuhoz.

- A kisebb részecskék nem a fenékhamuként jelennek meg, hanem a füstgázban szilárd szennyeződésként.
- A megolvadt hamuagglomerátumok és salaklerakódások a kazánon belül komoly műszaki problémákat okozhatnak magasabb hőmérséklettartomány estében. Fa esetében a hamu olvadáspontja szerencsére általában magasabb, mint a tűztérben uralkodó hőmérséklet, ezért itt ez probléma csak mérsékelten jelentkezik, ellentétben a lágyszárú biomasszák felhasználása során tapasztaltakkal. Ugyanakkor az alacsonyabb hőmérséklet sem jelenti a problémamentes tüzelést, mivel hamulerakódás ekkor is intenzívebb elsősorban a pernye „frakció” esetében a hőcserélő felületeken.
- Hamulerakódás az égőfejek esetében befolyásolja a begyújtási szakaszt.

A hamu és a pernye mennyiségét alapvetően tehát az alapanyag befolyásolja, de a tüzeléstechnikai paraméterek (pl.: égőtér típusa, hőmérséklet, tartózkodási idő magasabb hőmérsékleten) is hatással vannak a keletkezés folyamatára. Például egy fluidágyas erőművi szintű tüzelőberendezésnél nagyobb mennyiségű hamu képződik, mint pl. rostélyos egységeknél, mivel a biomassza hamu mellett ágyanyag is távozik a kemencéből. Nagymértékben függ a hamu és a pernye mennyisége a tüzelőanyag méretétől, azaz például felhasznált tüzelőanyag szemcseméretétől is, különösen igaz ez a nagymennyiségű porfrakciót tartalmazó faalapú anyagok égetésére. Általánosságban jellemző, hogy a fenékhamu mintegy 60-90%-ban jelenik meg, míg a pernye rész 10-40% (ettől jelentős eltérések is lehetnek). Pernye esetén figyelembe kell venni azt is, amit korábban is említettünk, hogy a leválasztási technológia végén természetesen a kibocsátott véggáz áramban a bemenő anyagáramnak csak töredéke fog megjelenni, jelentős része leválasztásra, majd ezt követően gyűjtésre és lehetőség szerint hasznosításra kerül.

A hamu széntartalma 7-49% között mozog közönséges kazánok esetén, átlagos értéke 26% (Someshwar 1996). Ez a nem elégetett szerves anyag mennyiségére utal. A magasabb C-tartalmat a viszonylag alacsony hőmérsékleten zajló, tökéletlen égés okozhatja (Santalla et al. 2011). Az égetés technológiájának fejlesztésével a korszerű üzemekben keletkező hamu C-tartalma 5% alatti. A hamu összetételét erősen befolyásolja a Si, Mn, Fe és Al jelenléte, melyek savas oxidot képezhetnek és ilyen formában az alkalikus alkotórészek (pl. Ca, K és Mg) oxidjaival vegyülve kerámiaszerű lerakódást alkothatnak. Ezek az elemek szinergikus hatásúak lehetnek egymásra, például 900°C égési hőmérséklet felett az olvadt kálium-karbonát és -szulfát rátapad a hűvösebb fémfelületekre, ami csapdába ejthet egyéb szilárd részecskéket, mint például a kalcium- és magnézium-oxidot. A fentiek miatt kb. 900°C égési hőmérséklet alatt a legnagyobb a hamu makroelem koncentrációja, így K-tartalma, valamint ezen a hőmérsékleten csekély mennyiségű fémvegyület képződik, ezáltal a kazánokban a lerakódás minimalizálható (Pitman 2006).

A hamu jelentős mennyiségű növényi tápanyagot is tartalmaz, ami gazdaságilag érdekessé teszi a hamuhasznosítást. A biomassza hamuból egyetlen hiányzó növényi tápanyag a nitrogén. A tüzelőanyag égése során a nitrogén gőzzé alakul, és a füstgázzal együtt szinte teljesen távozik. Ugyanakkor nehézfémek is jelen vannak mind a fenékhamuban, mind a pernyében. A nehézfémek közül a cink (Zn) és a mangán (Mn) koncentrációja a legmagasabb, átlagos értékük meghaladja a 300 mg/kg-ot. A tüzelőberendezés különböző részein képződő hamufrakciók összetétele jelentősen különbözhet. Az égéstér alján gyűlik össze a hamu fő tömege, ezzel szemben a pernye a hamutartalomnak az a finomszemcsés része, amely a füstjáratokon a füstgázokkal együtt távozik. A hamuban gyakran található nagyobb mennyiségű homok, kisebb kövek. Ezek részben származhatnak az elégetett tüzelőanyagból, különösen, ha az kérget is tartalmazott, valamint cirkulációs-fluid tüzelőberendezésből (Zevenhoven-Onderwater 2001). Az ökológiailag problémás, toxikus nehézfémek (Zn, Cd, Pb) koncentrációja a fenékhamutól a pernye irányába növekszik az illékonyság, kondenzáció és a pernyerészecskék felületén történő megkötődés miatt. A fa esetében például a kálium és nátrium, mint alkálifém, vagy éppen a foszfátok és nehézfémek égési hőmérsékleten illékonyak és a részecskék füst, vagy gőz formájában a gázokba kerülnek. A finom, mikron alatti részecskék képződését a kalcium és a szilícium vegyületei is elősegítik. Mindezeknek köszönhető, hogy a pernye bizonyos nehézfémek esetében jelentősen meghaladja a mezőgazdasági területeken vagy erdőkben a hamu hasznosítására vonatkozó határértékeket. Következésképpen sok esetben ezt a hamufrakciót ártalmatlanítani vagy kezelni kell. A biomassza hamuban található növényi tápanyagok (Ca, Mg, K, P) mintegy 85-95 százaléka a fenékhamu és ciklonhamu úgynevezett „hasznos hamu” keverékében található.

A vegyileg kezeletlen, tiszta faalapú tüzelőanyagok esetében a hamu PCDD/F és PAH koncentrációja általában alacsony és ökológiailag ártalmatlan. A pernye esetében ez már nem ilyen egyszerű, ezért a szakirodalmak úgynevezett ciklon pernyéről és szűrőpernyéről beszélnek, melyek között a különbség az, hogy a nagyobb részecskéket tartalmazó ciklon pernye tömegszázalékosan jóval alacsonyabb mértékben tartalmaz szerves szennyező anyagokat, ellentétben a jóval kisebb méretű szűrőpernyével. A szerves szennyeződések képződését a tökéletes égési fázis, a pernye/hamu jó „kiégetése”, valamint az alacsony klór tartalmú tüzelőanyagok használata gátolhatja meg elsősorban. A nehézfémek kioldódási viselkedését tekintve a fenékhamu és a ciklonpernye tehát ökológiailag

ártalmatlan a talaj trágyázó és lúgosító anyagaként. Ugyanakkor, ha a biomassa hamut ártalmatlanítják, figyelembe kell venni például a csurgalékvízben lévő nehézfémekre vonatkozó határértékeket is. A pernyét, mezőgazdasági szempontból előnytelenebb tulajdonságai miatt, a Skandináv országokban építkezéseken, útépitéseken hasznosítják. Hjaltmarsson et al. (1999) vizsgálatai alapján a hamu és a pernye mennyisége, valamint aránya jelentősen függ az égetés technológiájától és módszerétől.

6. táblázat: A hamu és a pernye aránya az égetés technológiájának függvényében (Hjaltmarsson et al. 1999)

Tüzelési eljárás	Hamu	Pernye
	[%]	[%]
Fluidágyas égetőberendezés	~10	~90
Rostélykazán	70-80	20-30
Szállítóhevederes kemence	40-50	50-60
Porégő	5-20	80-95

Adott esetben a pH érték is befolyásoló tényező lehet a felhasználás során. A fahamu oxidjainak egy része a talajban található vízzel érintkezve hidroxidokká alakul, az oldat pH-értéke általában 12 és 13 között van. A hamu talajon történő szétterülése után a hidroxidok gyorsan karbonáttá alakulnak és ezzel a hamu pH-ja semlegesre vagy közel semlegesre csökken. A biomassa hamu kijuttatásának a talajra vagy a növényekre gyakorolt pH-sokkok miatti negatív hatásait eddig nem észlelték (Sjaak és Koppejan 2008).

A következő általános intézkedésekkel meg lehet akadályozni, hogy a nehézfémek felhalmozódjanak a hamu körforgásában (Sjaak és Koppejan 2008).

- A biomassa tüzelőberendezésekben keletkező hamufrakciókból (fenékhamu, ciklonpernye és szűrőpernye) általában másodlagos nyersanyagként használható a fenékhamu és a ciklonpernye növény-specifikus arányú keveréke (=felhasználható hamu). A trágyázó és lúgosító („meszező”) hatású anyag a mező- és erdőgazdaság számára alkalmas lehet.
- A szűrőpernye a legkisebb hamufrakció, mely nehézfémekkel dúsított. Az égetés során, különösen magas hőmérsékleten a fémek elpárolognak, majd azt követően a hideg szűrőrendszeren lecsapódnak, ezért a pernye nehézfém-koncentrációja jelentős. A vizsgálatok szerint különösen magas a Cd, As, Mn, Cr, és Pb koncentrációja a pernyében, ezzel szemben a Zn koncentrációja a hamuban magasabb (Niederberger 2002). Ezért az ásványi anyagok természetes körforgásának stabilizálása érdekében külön kell gyűjteni és ártalmatlanítani.
- Annak érdekében, hogy a nehézfémeket a hamukörforgásból az ásványok kizárása nélkül távolítsuk el, erőművi rendszereknél ajánlatos multiciklont telepíteni a szűrő pernyeleválasztó elé. A multiciklon hamufrakciójában lévő ásványok így újrahasznosíthatók, míg a pernyeleválasztóban lévő nehézfémek ártalmatlanításra kerülnek.

- Csak a vegyileg kezeletlen biomassza tüzelőanyagok elégetéséből származó hamut szabad felhasználni.
- Erőművi rendszereknél a rendszeres hamuelemzés a fenti folyamatok alapja kell, hogy legyen.

Korábban megállapították már például, hogy a fahamu Nyugat-Magyarországon jó hatással alkalmazható a mezőgazdaságban meszezés helyett a talajok savanyodásának mérséklésére, valamint savanyú talajok javítására. Kalcium- és mésztartalma révén a szabadföldi kísérlet mészhiányos talajának szénsavas mésztartalma a 10 t/ha kezelés hatására 0,8 tömegszázalékra növekszik. Ugyanezen kutatás azt is kifejti, hogy a fahamu a mezőgazdaságban tápanyagutánpótlás céljából hasznosítható. A hamut a vetés előtt kell kiszórni, és egyenletesen bekeverni a talaj felső rétegébe. Javasolt dózisa 1-5 t/ha, mert e fölötti mennyiségben már a növények kelésében, növekedésében jelentkezhetnek a káros hatásai. Nagyobb dózis esetén a talajban mért P_2O_5 és K_2O értékek jóval magasabbak az optimális értékeknél, emiatt a kijuttatott tápanyagok – megfelelő kolloid tartalom nélkül – kimosódhatnak a termőrétegből. A fahamu mezőgazdasági hasznosítása gazdasági szempontból is jelentős. A szántóföldre történő kijuttatással csökkenthetők a hulladékként történő lerakás költségei. A nagy tömegben rendelkezésre álló fahamu mezőgazdasági hasznosításával részben kiválthatók a költséges talajjavító anyagok és műtrágyák. 1 tonna fahamu tápanyagszolgáltató-képessége kb. 25 kg P_2O_5 hatóanyagú műtrágyával és 48 kg K_2O hatóanyagú műtrágyával egyenértékű (Füzesi 2015).

Fahamu formák, hozamok, ásványtani tulajdonságok

A környezetre gyakorolt hatás szempontjából fontos szerepe van a fahamu alkalmazási formájának. A hamunak 3 fő formáját lehet elkülöníteni:

- laza,
- stabilizált és
- granulált hamu.

A laza fahamu ömlesztett szerkezetű, a legtöbb környezetvédelmi probléma ehhez a változathoz tartozik. Kockázatot jelenthet az emberi egészségre, hiszen a nagy mennyiségű, finom szemcsés por bekerülhet a légutakba, és szilikózist okozhat. Nehézkes az egyenletes kijuttatása. Ez a forma könnyen oldódik. A kijuttatást követően az erdőkben a mohákat, aljnövényzetet, cserjéket károsíthatja (Kellner és Weibull 1998).

A stabilizált fahamu a laza forma konszolidációjával képződik. Az égéstérből kikerült hamu nedvességtartalmát 30-40%-ra növelik, amely így természetes körülmények között néhány hét alatt megkeményedik. A nedvesség hatására a hamuban számos kémiai reakció indul el, melyek eredményeként keletkező vegyületek oldhatósága alacsonyabb. A konszolidáció során kapott megszilárdult hamut zúzással, szitálással 5 mm-nél kisebb szemcsékké alakítják (Steenari et al. 1998). A stabilizált fahamu sűrűsége 700-800 kg/m³ között változik, nedvességtartalma körülbelül 25%. Az így kezelt hamunak szintén lehet portartalma, ezért a kezeletlen hamuhoz hasonló problémákat okozhat a

kijuttatása. Nagy mennyiségű hamu ilyen módon való stabilizálása lassú folyamat. A hamu halom felületén kialakuló záró karbonátréteg akadályozhatja a szén-dioxid és a víz bejutását a halom belsőjébe, ezáltal a stabilizáció befejezetlen maradhat. Megfelelő eredmény eléréséhez szükség lehet a hamu és a víz mechanikus elkeverésére (Lindkvist 2000).

A granulált hamu esetén a laza formát nedvesítik, miközben lejátszódik a természetes karbonizáció, 4-20 mm átmérőjű gömb alakú szemcséket formáznak egy speciális gép segítségével, majd ezt követően a víztartalmat szárítással 5% alá csökken. A granuláció során segédanyagokat (pl. cement, dolomit, kalcium-lignoszulfát) adagolhatnak a hamuhoz, hogy növeljék a granulátum szilárdságát. A granulált hamu sűrűsége 900-1000 kg/m³ (Korpilahti et al. 1999). A hamuformák közül ennek a típusnak az előállítása a technikailag a legbonyolultabb és legköltségesebb.

A fahamu a fa ásványi anyagaiból képződik az égetés és az elgázosítás során. A hamu hozama a mérsékelt övezetben nőtt fákknak 0,1-1,0%, míg a trópusi fáknál elérheti az 5%-ot. A fakéreg 3-8% hamut képez (Fengel és Wegener 1984). Relatívén legnagyobb tömegű hamu a fák leveleiből, tűleveleiből képződik. A hamutartalom százalékos értéke függ a fajától és egy fafajon belül a geszt és szíjács arányától. A fahamu víztartó képessége egy viszonylag ritkán elemzett fizikai paraméter. Közismert, hogy a hamu alkalmazása hatással van a talaj vízmegtartó képességére, valamint a növények számára a talajból felvehető víz mennyiségére. A fahamu oldékonysága csekély, viszont még kis mennyiségben is oldódva jelentősen lúgos a vizes oldata (Tóth et al. 2012). A fahamu pH-ja 8-13 között változik, a medián érték körülbelül 12 (Augusto et al. 2008).

A hamu kijuttatásával elsősorban a talaj kémiai tulajdonságait befolyásolhatjuk, javíthatjuk. Emellett a hamu hatással van a talaj fizikai tulajdonságaira is, mivel módosítja a talaj textúráját, levegőzöttségét, víztartó képességét és sótartalmát, pl. a Ca-tartalma befolyásolhatja a talaj morzsalékosságát. A fahamu alkalmazásának egyik nagy előnye, hogy jelentős savsemlegesítő kapacitással rendelkezik a Ca-, Mg-, K-hidroxid és -karbonát-tartalmának köszönhetően. Ohno (1992) vizsgálta a fahamu savsemlegesítő képességét rövidtávú laboratóriumi kísérletekben. A vizsgálatai alapján a pH-növekedés alacsony talaj pH és alacsony szervesanyag-tartalom esetén volt jelentős. A hamu talaj pH-ra gyakorolt hatását befolyásolhatja a hamu formája is. A granulált hamuból a kalcium több éven keresztül, lassan szabadul fel, viszont a kezeletlen hamuból nagyon gyorsan. Ezzel magyarázható utóbbinál a talaj átmeneti, nagymértékű, hirtelen pH emelkedése. A stabilizált és a granulált hamunál a pH-növekedés mérsékeltebb. Számos tanulmány kimutatta, hogy a fahamu hatására a talajban a pH növekedés gyorsabb és erőteljesebb, de rövidebb ideig tart, mint a meszezést követően. Ennek oka, hogy a hamut alkotó nátrium-, kálium-hidroxidok és -karbonátok, amelyek savsemlegesítő kapacitása jelentős, jól oldódnak és könnyen kimosódnak. Ezzel szemben a kalcium-karbonát kevésbé oldódik, és ezért a felső rétegben akár 3 évig is tartja az enyhén lúgos kémhatást (Ohno 1992). A hamu semlegesítő képessége függ a szemcsemérettől is. A finomszemcsés hamu sokkal gyorsabban és erőteljesebben reagál, mint a durva.

A pH növekedésével nő a talaj biológiai aktivitása, így fokozódik a mineralizáció és a nitrifikáció, ami a talajban C, N és egyéb tápanyagok veszteségét idézheti elő, miközben csökken a savas puffelés. Másrészt, ez a folyamat lehet pozitív is, ha elsősorban a szerves rétegre korlátozódik, és a növények számára felvehető ásványi nitrogén és egyéb tápanyagok felvételét biztosítja (Meiwe

1995). A pH növekedés előnyös hatása a szennyező anyagok immobilizációja, ennek hatására csökken a kimosódásuk a talajból a befogadó vizekbe. Viszont, ha a talaj kémhatása már nem a semleges (lúgos tartományban lesz) akkor szennyező anyagok, így nehézfémek kerülhetnek a talajba, amely folyamatot a természetes vagy antropogén eredetű savasodás tovább gyorsíthat (Williams et al. 1996).

A biomassza égetéséből származó hamu a legrégebbi műtrágya. A fahamu gyakorlatilag nitrogénmentes, viszont tartalmaz foszfort és más a növények számára szükséges tápanyagokat. Naylor és Schmidt (1989) a fahamu trágyázó hatását a műtrágyák N, P (P_2O_5) és K (K_2O) koncentrációjával hasonlította össze. Fatüzelésű kazánok hamujának az összetétele megfelel a 0:1:3 összetételű műtrágyának*. Fatüzelésű kályhákban alacsonyabb az égési hőmérséklet, ezért a hamu káliumtartalma magasabb, a hamu összetétele 0:3:14 műtrágyának felel meg. A fahamunak általában alacsony a nitrogéntartalma és ezért egy relatív nitrogénhiányt okozhat az alkalmazása. Nitrogén szegény talajokban a fahamut N-műtrágyázással együtt célszerű alkalmazni, ezáltal ellensúlyozva a N immobilizációt. Amennyiben a kiszórt hamu faszenet is tartalmaz, az ideiglenesen csökkentheti a N és a P rendelkezésre állását (Santalla et al. 2011).

A fahamu alkalmazásának lehetőségei a mezőgazdaságban

A fahamu növényzetre gyakorolt hatásait leginkább a skandináv országokban vizsgálták. Széleskörűen tanulmányozták a hamu hatását a növények, különösen a fák növekedésére, mivel a hamu felhasználása elsősorban az erdőgazdálkodásban jelentős. Hazai alkalmazásra az erdőgazdálkodásban és a mezőgazdaságban elsősorban kísérleti jelleggel került sor. Pagonyék már 1969-ben többek között fahamuval növelték erdei fenyő csemeték talajának táperezjét. A kezelések hatására javult a csemeték egészségi állapota és nőtt az ellenálló képességük a tűkarcgomba fertőzésével szemben.

A mezőgazdasági alkalmazása napjainkban még kevésbé elterjedt, de a felhasználás lehetőségeit már a 19. században elemezték hazánkban. Bencze (1893) akácfa hamujának trágyaértékét vizsgálta. Megállapította, hogy a hamunak különösen magas a foszfor- és káliumtartalma, ezáltal pedig alkalmas lehet mezőgazdasági és kertészeti felhasználásra, mint trágyázószer. A fahamu növényekre gyakorolt hatásának elemzése céljából a talajvizsgálatok mellett elengedhetetlen a növényvizsgálatok elvégzése is. A növényvizsgálatokkal lehetőség van a talaj tápanyagszolgáltató képességének meghatározására, a kiadott tápanyag hatásainak megállapítására, a tesztnövény tápláltsági állapota és produktivitása közötti kölcsönhatás tanulmányozása, valamint az esetleges tápelemhiány meghatározására. A növényvizsgálatok eredményeinek értelmezéséhez szükséges a tápanyag-ellátottsági szintek ismerete. Mind szabadföldi, mind üvegházi körülmények között a zöltség- és gyümölcstermesztésben évszázadok óta ismert a fahamu hozamnövekedésre gyakorolt előnyös hatása. A fahamu értékes trágyaként vagy műtrágya kiegészítőként használható, mivel benne a létfontosságú mikroelemek koncentrációja optimumhoz közeli (Knapp és Insam 2011). A hagyományos meszezés emeli a talaj pH-ját, de a hatása korlátozott, ezzel szemben a fahamu jelentős tápanyag-utánpótlást is biztosít. Ez teszi lehetővé, hogy mész helyett, vagy mikroelem trágyaként is alkalmazzák. Amerikai kutatók széles körben vizsgálták az egyes növények reakcióit a hamukezelésre. Vance

(1996) szerint a mezőgazdaságban a hamu különösen azon növényeknél alkalmas trágyázásra, melyek a viszonylag magas pH-jú talajt kedvelik: fűfélék, köztük a gabonafajok (búza, kukorica), lucerna, zöldségek.

Nkana et al. (1998) angol perje teszt növényrel vizsgálták a fahamu hatását trópusi talajokon. A hamuval kezelt talajoknál nagyobb biomassza produkciót lehetett mérni a kontrollhoz képest. A hamu hatására nőtt a talaj Ca- és K-tartalma, valamint csökkent az Al és Mn toxicitása. Górecka et al. (2006) toxicitási teszttel vizsgálták a fahamu retek csírázására kifejtett hatását. Megfigyelték, hogy a hamu mennyiségének a növelése hatással van a csírázási százalékra. Alacsony dózis esetén, 1-5%-ban alkalmazott fahamunál nem figyeltek meg kedvezőtlen hatást, a csírázási százalék 90% feletti volt. Magasabb, 6-8%-os dózis alkalmazásakor a csírázási százalék jelentősen, 20%-ra csökkent. Hasonló tapasztalatokról számoltak be Tóth et al. (2012), a fahamu közvetlen adagolása 22%-ra csökkentette a retek teszt növények kelésszámát. Lévai et al. (2007) laboratóriumi körülmények között vizsgálták a fahamu hatását a kukorica és az uborka teszt növényekre. A kezelés hatására bekövetkező pH stressz fokozta az uborka gyökereinek szerves savkiválasztását. Az uborka csíranövények növekedését serkentette a talajukba kevert fahamu. A kukorica csíranövények gyökérképzését elősegítette, ha a tápoldatukhoz fahamu kiegészítést adtak. A kezelés hatására a gyökér szárazanyag tömege megduplázódott, és ennek következtében a hajtások növekedése is intenzívebb lett. Patterson et al. (2004) 12,5 és 25 t/ha dózisban fahamut alkalmaztak árpa és repce talajának műtrágyázására. A kezelést N műtrágyával kombinálták. A fahamu hatására jelentősen nőtt a repce olajtartalma, viszont a minősége kissé gyengült, mivel a glükozinolátok mennyisége nőtt az olajban. A kísérleti területen korábban erdőművelés folyt, ezért a talaj pH-ja 6, vagy annál kisebb volt.

A hamu komposztadalékként is hasznosítható. Szerves hulladékhoz 8-16%-os tömegarányban keverve pozitív hatással van a komposztálási eljárásra (hőmérséklet, mikrobiális tevékenység), valamint javítja a végtermék tápanyag-egyensúlyát, és csökkenti annak nehézfém-koncentrációját. A hamu fokozta a komposztálandó szerves anyagokban a mikrobiális életet, mivel a mikrobák számára tápelemeket biztosít. A keményfák hamujának alkalmazása előnyösebb volt a komposztokra, mivel az több káliumot tartalmazott, mint a puhafák hamuja. Amennyiben a biomassza hamu alacsony nehézfém és egyéb mérgező anyag tartalmú, akkor értékes trágyázószerként hasznosítható a mezőgazdaságban. A fahamu nem csak az egyéves és többéves növénytermesztési ágazatokban, hanem az ültetvényes ágazatokban is jól hasznosítható. Energetikai ültetvények esetén a nagy tömegben hozzáférhető fahamut, mint káliumtrágyát lehet hasznosítani.

A FAHAMU ÉS PERNYE MEZŐGAZDASÁGI FELHASZNÁLÁSÁNAK JOGI HÁTTERE

A biomassza tüzelőberendezésekből származó fenékhamu, ciklonpernye és szűrőpernye jogilag ipari hulladéknak minősül, és nem veszélyes hulladéknak. A hulladékok hasznosítása másodnyersanyaggá teszi azokat feltéve, hogy az eljárás környezetbarát és értelmes, valamint a fentiekben vázolt elveknek megfelelnek. **Fontos azt is kiemelni, hogy a lakosságnál keletkező hamu nem kommunális hulladék, így azzal együtt nem kezelhető!**

Szabályozó elemek a tiszta fa tüzeléséhez kötődő hamu és pernye hulladék vonatkozásában:

- 72/2013. (VIII. 27.) VM rendelet a hulladékjegyzékről:
 - EWC 10 01 01: hamu, salak és kazánpor
 - EWC 10 01 03: tőzegpernye és kezeletlen fa eltüzeléséből származó pernye

Füzesi, I. (2015) is beszámolt arról, hogy a fahamu (mint nem mezőgazdasági eredetű, nem veszélyes hulladék) termőföldön történő felhasználásához jelenleg a termőföld védelméről szóló 2007. évi CXXIX. törvény alapján a talajvédelmi hatóság engedélye szükséges, amelyet a területileg illetékes Növény és Talajvédelmi Igazgatóság bocsát ki. Az engedélyeztetéshez a talajvédelmi terv készítésének részletes szabályairól szóló 90/2008. (VII. 18.) FVM rendelet (URL20) előírásai alapján az akkreditált laborban elvégzett ellenőrző vizsgálatokat tartalmazó talajvédelmi terv elkészítése szükséges. A rendelet 2. mellékletének 2.11. pontja részletesen foglalkozik a nem mezőgazdasági eredetű nem veszélyes hulladékok termőföldön történő felhasználásához szükséges talajvédelmi terv elkészítésével. Eszerint az ilyen anyagok termőföldön történő felhasználása csak abban az esetben lehetséges, ha a termőföld minőségében negatív változás ezek kijuttatásának hatására nem következik be. Az engedélyezésnél ezen kívül ágazati jogszabályokat is figyelembe kell venni, mint például a 481/2013. (XII. 17.) Korm. rendeletet (URL21) a környezetvédelmi, természetvédelmi, vízvédelmi hatósági és igazgatási feladatokat ellátó szervek kijelöléséről és az NNK (Nemzeti Népegészségügyi Központ, korábban ÁNTSZ) 50/2001. (IV.3.) Korm. rendeletet (URL22) a szennyvizek és szennyvíziszapok mezőgazdasági felhasználásának és kezelésének szabályairól.

A hamu az aktuális hazai jogszabályok szerint a keletkezés helyén a keletkezést követően csak egy évig tárolható. Hulladéklerakón történő elhelyezését a hulladéklerakással, valamint a hulladéklerakóval kapcsolatos egyes szabályokról és feltételekről szóló 20/2006 (IV.5) KVM rendelet (URL23), valamint ennek módosítása [92/2007. (XI. 28.) KvVM rendelet (URL24)] szabályozza.

SZENNYVÍZKEZELÉS

Az erőművi rendszereknél a füstgáz-kondenzáció egy hővisszanyerési folyamat, amellyel az üzem általános hatékonysága nő. A kondenzációs folyamat magában foglalja a pernye kiválását is. A pernye, a füstgáz és a víz érintkezése a hamuban lévő szilárd vegyületek részleges feloldódását és a kondenzátumban lévő gáznemű komponensek felszívódását jelenti. A pernye fennmaradó része kondenzátum-iszapként csapódik ki. A folyamatból származó kondenzátum számos káros elemet tartalmaz, amelyek közül a nehézfémek különösen veszélyeztetik a környezetet. A legtöbb nehézfém azonban a kondenzátum iszapjában található (az iszap részecskéihez kötődik), amely az alkalmazott módszertől függően többé-kevésbé hatékonyan elválasztható a kondenzátumtól. Az iszapot ártalmatlanítani kell, vagy ipari célokra kell felhasználni. Magas nehézfém, különösen Zn, Cd és Pb tartalma miatt nem vihető vissza a talajba (Sjaak és Koppejan 2008).

A fatüzelés jogi szabályozása

Az illegális égetések ellenőrzése, korlátozása és szabályozása nehezen megoldható ezért az Európai Unió az egyedi helyiségfűtő berendezések kialakításának szabályozása által igyekszik ellenőrizhetővé tenni a lakossági kibocsátásokat. 2022. január 1-től a Bizottság (EU) 2015/1185 rendelete szerint (URL25) az újonnan vásárolt szilárd tüzelésű egyedi helyiségfűtő berendezéseknek meg kell felelni az alábbi táblázatban (7. táblázat) foglalt kibocsátási határértékeknek. Azonban ezek a kibocsátási értékek csak az újonnan üzembe helyezett kazánokra érvényesek.

7. táblázat: Szilárd tüzelésű egyedi helyiségfűtő berendezések megengedett kibocsátási paraméterei 2022. január 1-től (13% O₂ mellett) (URL25)

	Szezonális helyiségfűtési hatásfok (min) [%]	Szennyezőanyag kibocsátás (max)			
		PM [mg/m ³]	Gáznemű szerves vegyületek (OGC) [mg/m ³]	CO [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]
Nyitott égésű szilárd tüzelésű egyedi helyiségfűtő berendezések	30	50	120	2 000	200
Pelleté préselt faanyagból különböző szilárd tüzelőanyaggal működő zárt égésterű egyedi helyiségfűtő berendezések	65	40	120	1 500	200
Pelleté préselt faanyaggal működő zárt égésterű egyedi helyiségfűtő berendezések	79	20	60	300	200

A táblázat adatai alapján látható, hogy a szén-monoxid tekintetében kandallók esetében a legnagyobb a megengedett érték (2000 mg/m³) ugyanis kandallók kialakítása miatt a tüzelőanyag és az égési levegő keveredésének minősége gyenge, ezáltal az égés nagyobb mennyiségű CO kibocsátáshoz vezet. A pellet kazánok (300 mg/m³) esetében a CO érték a legkisebb, mivel automatizálhatóságuk és korszerűségük miatt az égés közelít a tökéleteshez. Légszennyezés és hatásfok szempontjából is a megfelelőbb az automatizált kazánok alkalmazása.

A fa tüzelőanyagok termikus hasznosítása esetében a légszennyező anyagok kibocsátási határértékeit a berendezés hőteljesítményétől függően két rendelet írja elő:

- Helyhez kötött 140 kW_{th} – 50 MW_{th} hőteljesítmény tartomány esetén: 53/2017. (X. 18.) FM rendelet (URL26).
- 50 MW_{th}-nál nagyobb hőteljesítmény esetén: 110/2013. (XII. 4.) VM rendelet (URL27).

Jelen tanulmány esetében az 53/2017. (X. 18.) FM rendelet a releváns, hiszen fűtőművi, falufűtőművi szinteken Magyarországra jellemzően a néhány MW_{th}, illetve maximum 10 MW_{th} rendszerek a jellemzőek.

8. táblázat: Biomassza tüzelésű tüzelőberendezések megengedett kibocsátási értékei (140 kW_{th} – 50 MW_{th}) (53/2017 FM rendelet alapján)

Légszennyező anyag	I. kategóriájú tüzelőberendezés ^a	II. kategóriájú tüzelőberendezés ^a	
	1 MW _{th} -nál kisebb 1-5 MW _{th} között 2029-ig 5 MW _{th} felett 2024-ig) névleges bemenő hőteljesítmény	1 MW _{th} -nál kisebb névleges bemenő hőteljesítmény	1 MW _{th} -nál nagyobb névleges bemenő hőteljesítmény
	mg/m ³ (vonatkoztatási oxigéntartalom: 6 tf%)		
CO	1 500 1-5 MW _{th} között és 5 MW _{th} felett: 375	1 500	375
NO_x	975 Fluid tüzelés esetén: 300	650 Fluid tüzelés esetén: 300	300 1-5 MW _{th} : 500 (de fluid tüzelés esetén: 300)
SO₂	1 500	200 (nem kell alkalmazni a kizárólag fa és fahulladék típusú szilárd biomasszával üzemelő berendezésekre)	200 (nem kell alkalmazni a kizárólag fa és fahulladék típusú szilárd biomasszával üzemelő berendezésekre)
Szilárd anyag	225	100	20 1-5 MW _{th} : 50 5-20 MW _{th} : 30
TOC^b	75	75	75

^a **I. kat:** az a tüzelőberendezés, amelyet 2018. december 20-ig üzembe helyeztek, vagy az a tüzelőberendezés, amely 2017. december 19. előtt kapott először létesítési engedélyt és a tüzelőberendezést legkésőbb 2018. december 20-ig üzembe helyezték; **II. kat:** az I. kategóriájú tüzelőberendezéstől eltérő tüzelőberendezés;

^b **TOC** (Összes szerves vegyület C-ben (szénben) kifejezve, lángionizációs detektorral mérve)

Meg kell jegyezni, hogy a 140 kW_{th} alatti névleges hőteljesítményű kazánok kibocsátását üzembe helyezés után nem szabályozza más rendelet, azonban a megelőzés elvén a háztartási és kisebb közüzemi szinteken előforduló tüzelőberendezésekre vonatkozó határértékeket az MSZ EN 303-5:2021 szabvány tartalmazza, mely egyben a kazánok három osztályba sorolásáról is rendelkezik.

9. táblázat: Károsanyag-kibocsátási határértékek az MSZ EN 303-5:2021 alapján

Tü- zelés	Tüzelő- anyag	Névleges hőteljesít- mény [kW]	Kibocsátási határértékek								
			CO			OGC			Portartalom		
			[mg/m ³ 10 % O ₂ -nél] ^a								
			3. osz- tály	4. osz- tály	5. osz- tály	3. osz- tály	4. osz- tály	5. osz- tály	3. osz- tály	4. osz- tály	5. osz- tály
Kézi	Biomasz- sza	≤ 50	5000			150			150		
		> 50 ≤ 150	2500			100			150		
		> 150 ≤ 500	1200			100			150		
	Fosszilis	≤ 50	5000	1200	700	150	50	30	125	75	60
		> 50 ≤ 150	2500			100			125		
		> 150 ≤ 500	1200			100			125		
Automatikus	Biomasz- sza	≤ 50	3000			100			150		
		> 50 ≤ 150	2500			80			150		
		> 150 ≤ 500	1200			80			150		
	Fosszilis	≤ 50	3000	1000	500	100	30	20	125	60	40
		> 50 ≤ 150	2500			80			125		
		> 150 ≤ 500	1200			80			125		

^a Száraz füstgázra vonatkoztatva, 0°C-on, 1013 mbar nyomás mellett

Összefoglalva a következő megállapításokat tehetjük.

Reálisan nézve a fatüzelés közel szén-dioxid semleges, a fosszilis energiahordozókhoz képest lényegesen kisebb terhelést jelent a környezetre. Bár azt a szenet juttatjuk vissza a légkörbe, amit korábban a fa megkötött, amíg a tűzifa eljut a kályháig, számos olyan „művelet” esik át, mely kibocsátással jár. Ha a faanyag égése tökéletes, akkor is vannak emissziók: főként vízgőz és szén-dioxid, de kisebb mennyiségben más anyagok is keletkezhetnek: kén-dioxid, különböző nitrogén-oxidok stb. Tökéletlen égés esetén pedig további szennyezőanyagok keletkezhetnek: szén-monoxid, metán, ammónia, ózon, policiklusos aromás szénhidrogének, poliklórozott dioxinok és furánok, melyek mennyisége megfelelő tüzeléstechnikával, korszerű berendezésekkel alacsony szinten tartható. A fatüzelésből származó hamu és más égéstermékek határértékeit, illetve lehetséges további sorsát jogszabályok határozzák meg. Megfelelő körtekintéssel a fahamu talajok tápanyag-utánpótlására alkalmazható. Leginkább Ca, Mg, K, P található benne, de a nitrogén gázok formájában távozik az égetés során.

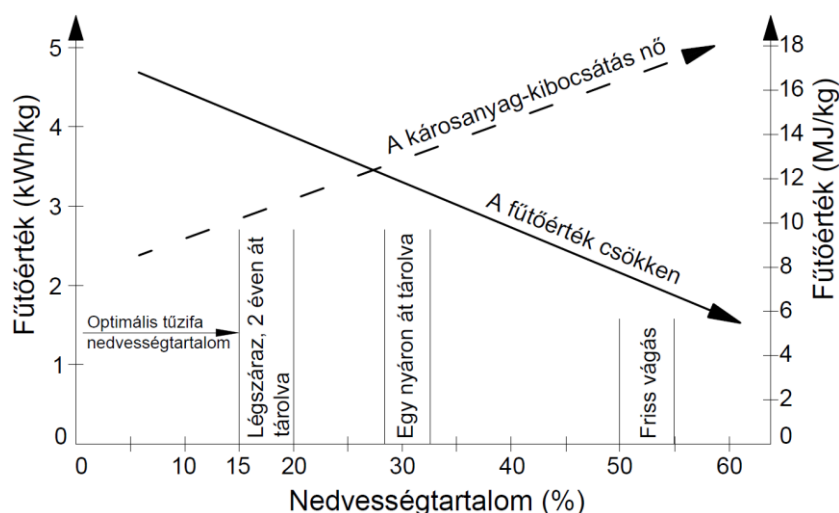
A fa égése szakaszokra osztható. A *szárítási fázis* során a fa kiszárad, csak az abszolút száraz fa képes égésre. A második szakasz a *termikus bomlás* melynek végeredménye nagy mennyiségű energia, és égésgázok. Lánggal égéskor ezek gyulladnak meg 220-260°C-on, majd 260-290°C-on megindul a tartós égés. Ezt követi az *égés*, döntően a termikus bomlási folyamatban keletkező égésgázok minőségétől, mennyiségétől és az exoterm folyamat hőtermelésétől függ. A fából felszabadult gázok a levegő oxigénjében meggyulladnak. Hő hatására a faanyag szenet és hidrogént tartalmazó vegyületeinek hidrogéntartalmú összetevői lehasadnak és gáz formájában elégnak. A gázok eltávozása után a faszén elizzik. Folyamatos égetéskor a lánggal égés és az izzás együtt van jelen. A teljes *kiégetés szakasza* az égésgázok teljes oxidációját eredményezheti. A fagázok tökéletes elégeésekor szén-dioxid és víz keletkezik.

A fatüzelésű-rendszerek környezeti elemzése esettanulmányok segítségével

Az esettanulmányokkal kapcsolatban megjegyezzük, hogy a bennük közölt eredmények csak egy adott esetre, egy konkrét vizsgálati körülményre vonatkoznak, vagyis nem tekinthetők általános megállapításnak, ezért az adatok csupán tájékoztató jellegűek és egyes esetekben bizonyos fenntartásokkal kell azokat kezelni.

1. ESETTANULMÁNY: A TŰZIFA NEDVESSÉGTARTALMÁNAK HATÁSA A FŰTŐÉRTÉKRE ÉS A KÁROSANYAG-KIBOCSÁTÁSRA

Nedves fát eltüzelni gazdaságtalan és környezetkárosító. Az optimális tűzifa fűtőértéke 14 MJ/kg, a frissen vágotté 7 MJ/kg körüli, mely korántsem nevezhető már optimálisnak. Nedves fa égetésekor a fában rejlő energia jelentős része a fában lévő víz elpárologtatására fordítódik. A fele annyi hőt termelő nedves tűzifa égetése pazarló, és légszennyezése is jóval nagyobb. A nagy nedvességtartalom miatt az égési hőmérséklet alacsonyabb, emiatt az égés során növekszik a korom és más káros anyagok kibocsátás (pl. kátrány, PAH, PM10, PM2.5, CO, NO_x). A tűzifa optimális nedvességtartalma tehát 15-20%, ami a kivágást követő 1,5-2 évig fedett helyen történő száradással érhető el. Csak ezzel a tűzifával tudjuk gazdaságosan és környezetkímélő módon üzemeltetni berendezésünket.

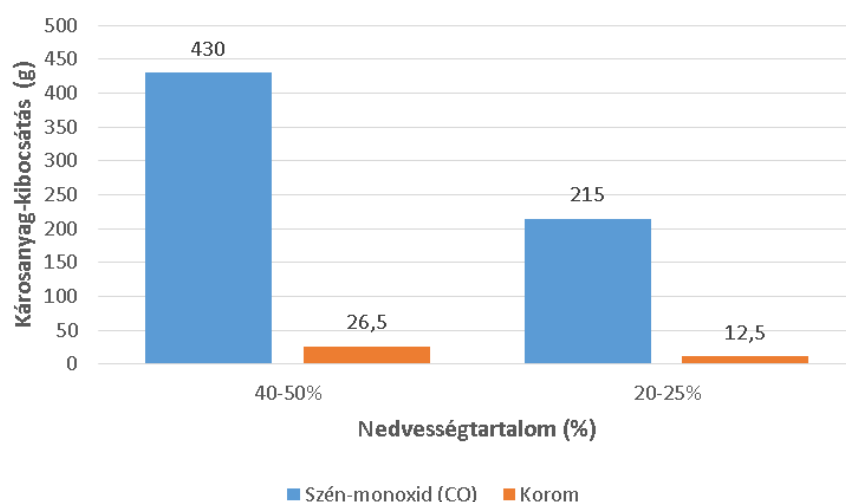


7. ábra: A tűzifa nedvességtartalmának hatása a fűtőértékre és a károsanyag-kibocsátásra. Hiba! A könyvjelző nem létezik.

(Agrárminisztérium 2021 alapján saját szerkesztés)

A környezetkímélő üzemeltetés egyik fontos feltétele a megfelelő minőségű tüzelőanyag. A tüzelőanyag jellemző tulajdonságait az MSZ EN ISO 17225-5:2021 jelzetű szabvány tartalmazza. A tűzifát a szabvány osztályokba sorolja és ezekre az osztályokra megadja többek között az előírt nedvességtartalmat, amely fontos tényezője a tüzelőanyag károsanyag-kibocsátásának.

A tűzifa nedvességtartalmának hatását a CO-kibocsátásra a Magyarországi Cserépkályhások, Kandallóépítők és gyártók Országos Ipartestülete egy demonstrációs célú vizsgálattal szemléltette (Agrárminisztérium 2021). A vizsgálat során egy M-boksz AERO 20 típusú légfűtéses, 20 kW névleges teljesítményű kandallóbetétben, amelynek akkreditált vizsgálati eredmények szerint a hatásfoka 83,86%, kétféle nedvességtartalmú akác keményfa 1 órás anyagmennyiséget égettek el. Az egyik minta nedvességtartalma 20-25 tömeg%, a másik minta nedvességtartalma 40-50 tömeg% volt. A két érték közel megfelel az egy évig száradó tűzifa és a frissen vágott fa tulajdonságainak. A mérés kiértékelése után az 1 órás ciklusra közelítő számítással 40-50% nedvességtartalomnál 430 g szén-monoxid (CO) kibocsátást kaptak és az ehhez tartozó korom mennyisége 26,5 g volt; 20-25% nedvességtartalomnál a CO- és a korom kibocsátás az előbbi értékek felére adódtak (CO: 215 g; korom: 12,5 g) 1 óra alatt. Az eredmények jól alátámasztják az előírtnál nagyobb nedvességtartalom kedvezőtlen légszennyező hatását.



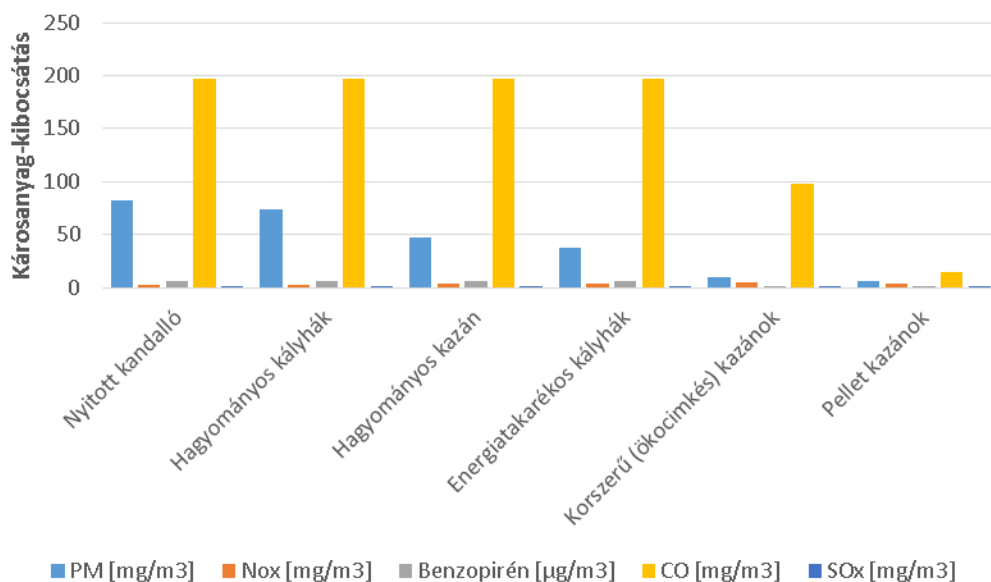
8. ábra: A tűzifa nedvességtartalmának hatása a károsanyag-kibocsátásra (Agrárminisztérium 2021 alapján saját szerkesztés)

2. ESETTANULMÁNY: A LAKOSSÁGI FATÜZELŐ BERENDEZÉSEK EMISSZIÓINAK ÖSSZEHASONLÍTÓ VIZSGÁLATA

Tamás (2021) kutatása alapján megállapíthatjuk, hogy a korszerű kazánok esetében a tölgy tűzifa égetése során keletkezett károsanyag-kibocsátás (PM, PAH–benzopirén, CO) egy nagyságrenddel kisebb, mint a régebbi típusú kandallók és kályhák esetében. A korszerűbb technológiák alkalmazása tehát jelentősen képes csökkenteni a szállópor (PM), a szén-monoxid (CO) és a PAH (benzopirén) kibocsátási értékeket.

10. táblázat: Emissziós faktor fával működő különböző tüzelőberendezések esetén (U.S. Department of Health and Human Services - Public Health Service 1995)

Tüzelőberendezés	Szennyező anyag				
	PM [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	Benzopirén [μg/m ³]	CO [mg/m ³]	SO _x [mg/m ³]
Nyitott kandalló	81,75	2,46	5,96	196,99	0,54
Hagyományos kályhák	73,87	2,46	5,96	196,99	0,54
Hagyományos kazán	46,79	3,94	5,96	196,99	0,54
Energiatakarékos kályhák	36,94	3,94	5,96	196,99	0,54
Korszerű (ökocímkés) kazánok	9,26	4,68	0,49	98,50	0,54
Pellet kazánok	5,91	3,94	0,49	14,77	0,54



9. ábra: Emissziós faktor fával működő különböző tüzelőberendezések esetén (U.S. Department of Health and Human Services - Public Health Service 1995 alapján saját szerkesztés)

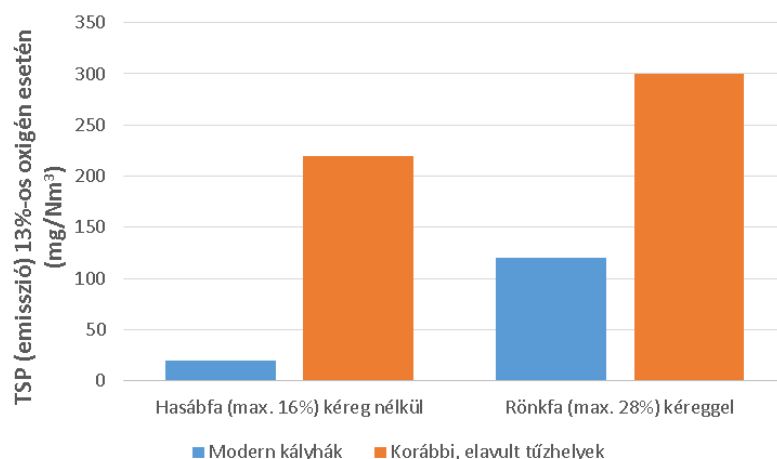
A tüzelési paraméterek hatását összefoglaló táblázat (11. táblázat) adatai alapján a következő következtetések vonhatók le: a nagyobb mennyiségű égési levegő beáramlása megnöveli a CO kibocsátást. Ez azzal magyarázható, hogy a nagy mennyiségű levegő csökkenti a tüztér hőmérsékletét. A fokozott CO kibocsátás mellett megnő az oxidálatlan komponensek mennyisége, beleértve teljes szerves szén (TOC), metán (CH₄), a nem metán illékony szerves vegyületek (NMVOC) és policiklusos aromás szénhidrogének (PAH) kibocsátását is.

11. táblázat: Tüzelési paraméterek hatása az emissziós faktorokra (Tamás 2021)

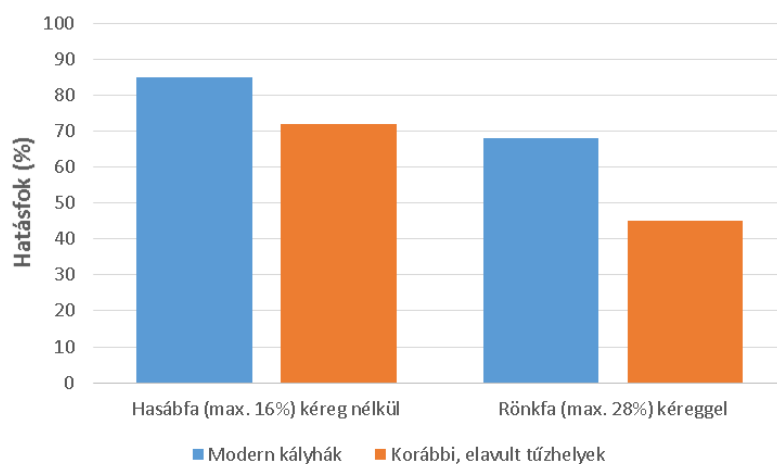
Berendezés és a tüzelés jellemzői		Tüzelő- anyag	Tüzelő- anyag nedves- ségtar- talma [t%]	PM [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	PAH [mg/m ³]	CO [mg/m ³]
Régi típusú kazán (Johansson et al. 2004)	Felügyelet nélküli ka- zánüzem	Tűzifa	15	17,24	3,55	-	256,09
		Tűzifa	15	108,35	1,38	3,15	807,67
Modern kazán (Johansson et al. 2004)	Füstgáz alul távozik	Tűzifa	15	1,21	6,16	0,01	24,53
		Tűzifa	26	1,33	5,37	0,01	34,82
		Tűzifa	38	4,18	4,75	0,14	177,77
50 kW-os adagolórendszeres dendromassza kazán (Bignal et al. 2008)	Teljes láng	Tölgy	25	37,70	212,85 ^a	0,03	749,67
	Füstölgő égés	Tölgy	25	34,20	145,92 ^a	0,30	2 698,80
	Teljes láng	Tölgy	40	400	170,01 ^a	0,31	2 573,85
	Füstölgő égés	Tölgy	40	70,80	166 ^a	0,37	2 418,92
Régi típusú cserépkályha (Maasikmets et al. 2016)	Tüztér ajtó 10%-kal volt nyitva a ma- ximumtól	Éger és te- lepülési szí- lárd hulla- dék	14-18	160,34	386,2	0,87 µg	4 640

^a NO kibocsátási érték

A PAH kibocsátás minimalizálása érdekében alacsony nedvességtartalommal (~15%) rendelkező tüzelőanyagot kell használni, illetve törekedni kell arra, hogy az égés hatékonyságát maximalizáljuk, vagyis a kazánt teljes láng üzemmódban kell minél hosszabb ideig működtetni. A részecskék (PM) tömegkoncentrációja egy nagyságrenddel nagyobb a régi típusú kazánok esetében a legmodernebb kazánokhoz képest. Az oxidálatlan gáz halmazállapotú vegyületek koncentrációjával növekszik a kibocsátott részecskék koncentrációja. Az ultrafinom részecskék kibocsátását a rosszabb égési viszonyok erőteljesebben fokozzák (Johansson et al. 2004). A legmagasabb károsanyag kibocsátás szén-monoxid és nitrogén-oxidok esetében a régi típusú cserépkályháknál figyelhető meg.



10. ábra: TPS emissziós értékek alakulása modern és elavult fatüzelő berendezések esetében a nedvességtartalom és a kéreghányad függvényében (saját szerkesztés)



11. ábra: Modern és elavult fatüzelő berendezések hatásfokának változása az alapanyag nedvességtartalmának és kéreghányadának a függvényében (saját szerkesztés)

3. ESETTANULMÁNY: DENDROMASSZA ALAPÚ FALUFÜTŐMŰ KIBOCSÁTÁSÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÁSA KORSZERŰ, AUTOMATIZÁLT LAKOSSÁGI FATÜZELŐ BERENDEZÉSEKKEL

Kornél (2011) a szilárd biotüzelőanyagokat hasznosító hőenergia-termelő berendezések működését és az egyes tüzelőanyagok jellemző tüzeléstechnikai tulajdonságait vizsgálta és elemezte. Konkrétan meghatározta egy faaprítékkal üzemelő 1,2 MW-os falufűtőmű működésének gazdasági, környezeti hatásait. Összehasonlította továbbá a pellet- és brikett-tüzelő rendszerek tüzeléstechnikai jellemzőit és kibocsátási értékeit.

12. táblázat: A különféle tüzelőanyagok felhasználási területei (Barótfi I. 2000)

Tüzelőanyag	Alkalmazási terület	Tüzelőberendezés	Teljesítménytartomány
Szalma, fahulladék, tűzifa, faapríték	Nagyerőművek	Nagyteljesítményű kazán	1,5 MW felett
Faapríték	Egyedi, központi és távfűtés	Kályha, kandalló, kazán	40 kW - 1,5 MW
Tűzifa, brikett, szalma	Egyedi fűtés	Kályha, kandalló, kazán	40 kW alatt
Pellet	Egyedi és központi fűtés	Kályha, kandalló, kazán	40 kW alatt

A 1,5 MW feletti teljesítménytartományban a szalma, fahulladék, tűzifa, faapríték felhasználása jellemző a fűtő- és/vagy villamos erőművekben, illetve a környezetvédelmi előírások miatt a követelményeknek megfelelni kívánó dendromassza alapú tüzelésre átalált fűtőművekben. 40 kW és 1,5 MW közötti teljesítménytartomány jellemző alapanyaga a faapríték. A helyi fűtőművek, önkormányzatok, kis- és közepes vállalkozások, mezőgazdasági vállalkozások hőigényének ilyen módon való ellátása főleg saját alapanyag eltüzelésével, esetenként piacon beszerezett alapanyag felhasználásával valósul meg. A 40 kW alatti teljesítménytartományban felhasznált tűzifa, pellet, brikett és szalma elsősorban a lakosság, és a kis- és közepes vállalkozások hőigényét elégíti ki (Barótfi I. 2000). Faapríték-tüzelés során az apríték tárolása kis teljesítményű berendezések esetén a tüzelőberendezések mellett több napra elegendő mennyiségben, nagyobb teljesítmény esetén aprítéktároló helyiségekben általában az egész fűtési időszakra való mennyiségben történik. Az aprítéktüzelésű kazánok automatikus gyújtással és hamueltávolítással is felszerelhetők, de a kazán alkalmankénti tisztítása a magas hatásfok és az emissziók alacsony szinten tartás érdekében mindenképpen szükséges.

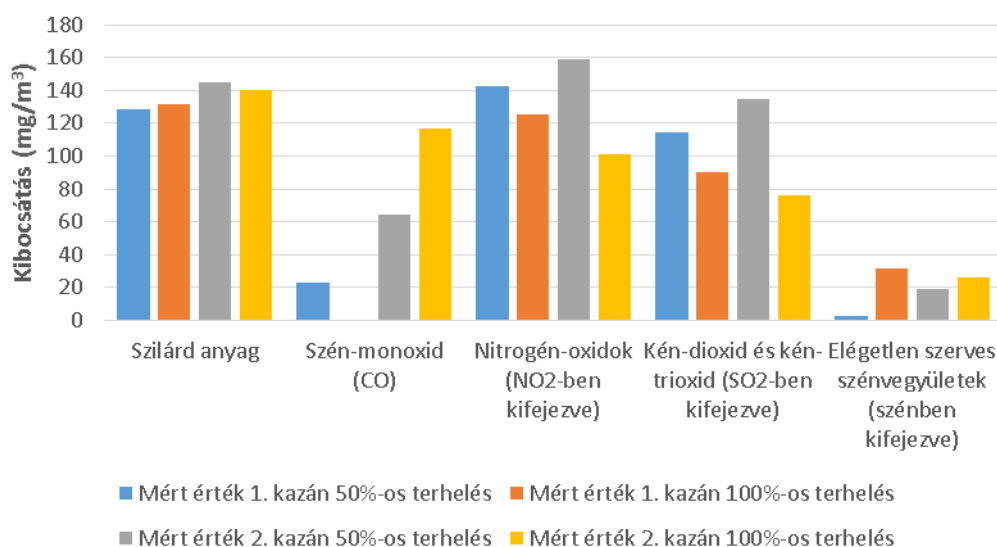
A 140 kW és 50 MW közötti névleges bemenő hőteljesítményű tüzelőberendezések légszennyező anyagainak kibocsátási határértékeit a 23/2001 (XI.13.) KöM rendelet szabályozta a hivatkozott publikáció időpontjában. Pornóapátiban mért tényleges kibocsátásokat a 13. táblázat foglalja össze.

A mg/m³-ben kifejezett koncentrációk (a rendeletben foglaltak szerint) 11%-os oxigéntartalmú füstgázra vonatkoztak. A mért értékek 50%-os és 100%-os terhelésnél sem haladták meg a rendeletben foglalt határértékeket. A fűtőműben tökéletes égésből adódó minimális károsanyag-emisszió és a beépített rendszerelemek (füstgáz-eltávolító, multiciklonos porleválasztó) biztosítják a rendeletben foglalt határértékek betartását. *Ennek érdekében tüzelésre kizárólag ragasztástól, vegyszeres kezeléstől mentes faanyag hasznosítható.* A fűtőműben végzett konkrét mérési eredmények alapján 3 év átlagában az alábbi eredmények adódtak: alapanyag (faapríték) nedvességtartalom: 25%, fűtőérték 13,64 MJ/kg; fűtési időszak (üzemidő): 183 nap (4392 óra); átlagos apríték mennyiség: 377,32 tonna; bevitt hőmennyiség: 5146,67 GJ; megtermelt hőmennyiség: 4407,33 GJ; kazán hatásfok: 85,63%;

fogyasztókhoz eljuttatott hőmennyiség: 2741,93 GJ; rendszer összhatófok: 53,28%. 1 GJ fogyasztói hő előállításához szükséges apríték mennyiség: 137,61 kg.

13. táblázat: A légszennyező anyagok kibocsátási határértékei és a Pornóapáti 1,2 MW-os falufűtőműben mért értékek (Kornék 2011)

Légszennyező anyag	Kibocsátási határérték a publikálás időpontjában [mg/m ³]	Mért érték 1. kazán 0,6 MW [mg/m ³]		Mért érték 2. kazán 0,6 MW [mg/m ³]	
		50%-os terhelés	100%-os terhelés	50%-os terhelés	100%-os terhelés
Szilárd anyag	150	128,9	131,6	145	140,2
Szén-monoxid (CO)	250	23,1	119,4	64,4	116,9
Nitrogén-oxidok (NO ₂ -ben kifejezve)	650	142,3	125,2	158,9	100,8
Kén-dioxid és kén-trioxid (SO ₂ -ben kifejezve)	1000	114,1	90,3	135	76,3
Elégetlen szerves szénvegyületek (szénben kifejezve)	50	2,6	31,9	19,5	26,2



12. ábra: A kibocsátási értékek grafikus ábrázolása (saját szerkesztés)

4. ESETTANULMÁNY: LAKOSSÁGI PELLETKAZÁN ÉS DENDROMASSZA ALAPÚ FŰTŐMŰ EMISSZIÓS ÉRTÉKEINEK ÖSSZEHOSONLÍTÁSA

Németh, G. egy modern, automatizált apríték és pellet tüzelésére alkalmas (átlagos méretű családi ház hőigényének megfelelő) 26 kW névleges teljesítményű kazán (Buderus LOGANO SH 25) károsanyag-kibocsátását hasonlította össze egy decentralizált 1100 lakás (ez kb. 500 közepesen szigetelt családi ház hőszükségletével azonos) hőellátását biztosító dendromassza alapú fűtőművel. A vizsgált pelletkazán esetében nem található rendeletben meghatározott kibocsátási határérték, ezért a kisteljesítményű kazánok minősítésére alkalmazott szabvány (MSZ EN 303-5:2021) határértékeit vette figyelembe 10% oxigéntartalomra vonatkoztatva.

Mérésekkel igazolta, hogy a kazán normál üzemmódban a 4. osztályba sorolható be, míg a leállítást követő üzemben pedig csak a kedvezőtlenebb 3. osztályba. A füstgáz összetevők kibocsátási értékeit a kazán bekapcsolásától egészen a kikapcsolás utáni állapotig folyamatosan vizsgálta. A pellet égési folyamata alatt a tűztérben 1000°C feletti hőmérséklet uralkodott, amely az irodalmak alapján az elvárható értéknek megfelelt. A mérési eredmények az alábbi táblázatokban láthatók.

14. táblázat: 3 MW-os dendromassza alapú fűtőmű emissziós értékei

Szennyező anyag	Más forrásból származó mérési adatok (Nagy 2011) ^a	Mért érték	Határérték (a publikálás idején aktuális 23/2001. XI. 13.) KöM rendelet alapján)	Számított emisszió	Egy házra vonatkozó emisszió
	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[kg/h]	[kg/h]
Szén-monoxid (CO)	33,19	240	250	1,4	0,0028
Nitrogén-oxidok (NO _x)	376,91	290	650	1,7	0,0034
Kén-dioxid (SO ₂)	4,69	6	1000	0,035	0,00007
Szerves anyag	1,33	4	50	0,028	0,000056
Szilárd anyag	82,54	13	150	0,073	0,000146

^a Az értékek 11%-os O₂ tartalmú füstgázra vonatkoznak

Az eredményekből jól látszik, hogy fűtőművi szinten fajlagosan kedvezőbb károsanyag-kibocsátási értékek adódtak (esetenként nagyságrendileg is) a korszerű, automatizált lakossági pelletkazánhoz képest. Továbbá az is megállapítható, hogy a hagyományos, régi fatüzelő berendezések károsanyag-kibocsátása (elsősorban a szén-monoxid, de sok esetben a szilárd anyagok és a szerves anyagok (PAH) is ide sorolhatók) nagyságrenddel nagyobb a mai modern automatizált fatüzelő rendszerekhez képest.

15. táblázat: 3 MW-os általános dendromassza alapú fűtőmű, egy - saját mérési eredményeken alapuló - háztartási méretű automata pelletkazán, valamint az általunk vizsgált teljesítményű tüzelőberendezéshez hasonló, de régebbi, elavultabb berendezések irodalmi értékei

Szennyező anyag	Egy házra a vonatkozó átlagos kibocsátás távhő esetén	Saját mérések alapján megadott kibocsátás egy családi ház méretű automatikus adagolású, vezérlésű pelletkazán esetén	Irodalmi értékek egy családi ház méretű nem automatikus '80-'90-es évekbeli kazán kibocsátására Hiba! A könyvjelző nem létezik.
	[kg/h]	[kg/h]	[kg/h]
Szén-monoxid (CO)	0,0028	0,0057	0,09-0,45
Nitrogén-oxidok (NO _x)	0,0034	0,0218	0,018-0,027
Kén-dioxid (SO ₂)	0,00007	0,00052 (maximális érték, alsó mérési határ figyelembevételével)	n.a. (Kezeletlen fa tüze- lése esetén az irodalmak nem mindig veszik fi- gyelembbe)
Szerves anyag	0,00006	n.a.	0,009-0,054
Szilárd anyag	0,00015	0,0065	0,009-0,045
A légfelesleg té- nyező (λ) értéke	~1,7	~1,6	2-4!

16. táblázat: 3 MW-os általános dendromassza alapú fűtőmű és egy háztartási méretű automata pelletkazán saját mérési eredményeken alapuló éves emissziós értékei

Szennyező anyag	Egy házra a vonatkozó éves emisszió távhő esetén (üzemidő: 4320 óra, nyári melegvíz ellátással együtt)	Saját mérések alapján megadott emisszió egy családi ház méretű automata pelletkazán esetén (üzemidő 2160 óra, nyári melegvíz ellátás nélkül)
	[kg]	[kg]
Szén-monoxid (CO)	12,096	12,312
Nitrogén-oxidok (NO _x)	14,688	47,088
Kén-dioxid (SO ₂)	0,302	1,123 (maximális érték, alsó mérési határ figyelembevételével)
Szerves anyag	0,242	n.a.
Szilárd anyag	0,631	14,040

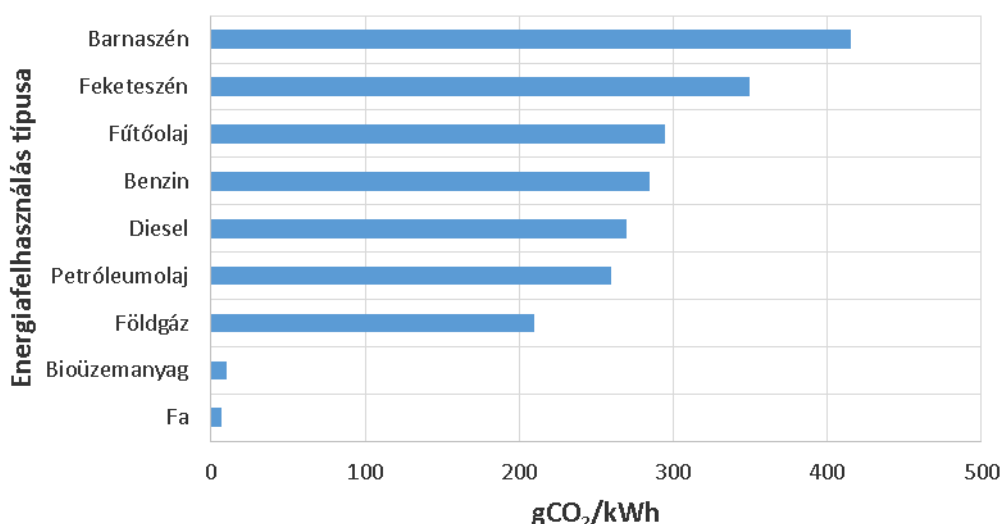
Fontos kihangsúlyozni, hogy a tüzeléstechnikai paramétereket (levegőszükséglet, kialakuló tűztéri hőmérséklet stb.) és a károsanyag-kibocsátást az alapanyag tulajdonságai jelentősen befolyásolják. Ez általánosságban a fatüzelésű kazánokra is igaz, nem csak a vizsgált korszerű pelletkazánra, mely Magyarországon jelenleg nem a legelterjedtebb fatüzelő berendezés. Manapság lakossági szinten

sajnos nagyon sok, több évtizedes, rossz hatásfokú, szabályozatlan fatüzelésű kazánkat használnak, melyek a fenti károsanyag-kibocsátási értékek több tízszeresét is elérhetik. Azt is meg kell jegyezni, hogy egy ilyen decentralizált rendszer kialakításával – amennyiben olyan környezetbe szolgáltatjuk a hőt, ahol korábban faalapon egyedileg végezték a tüzelést – nem termelünk ki több fát, hiszen mindkét változatnál közel azonos mennyiségű energiaforrásra van szükség (jelenlegi általánosan használt energiatermelő rendszerek hatásfokát is figyelembe véve).

5. ESETTANULMÁNY: LAKOSSÁGI FOSSZILIS- ÉS FATÜZELŐ BERENDEZÉSEK, VALAMINT DENDROMASSZA ALAPÚ ERŐ- ÉS FŰTŐMŰ KIBOCSÁTÁSÁNAK ÖSSZEHASONLÍTÓ TELJES ÉLETCIKLUS (LCA) ELEMZÉSE

Caserini et al. (2010) a dendromassza alapú égetés környezeti hatásait elemezte és hasonlította össze háztartási tüzelőberendezések (nyitott kandallók és kályhák), valamint kétféle centralizált (közpon-tosított) kapcsolt hő- és villamos energiát előállító (CHP) dendromassza alapú erőművekkel. Az elemzés ISO 14040 szerinti teljes életciklus (LCA) értékelési módszerrel történt „bölcsőtől a sírig” megközelítés szerint. Az LCA elemzés magában foglalta a nyersanyagok kitermelésének, a gyártási folyamatoknak, a szállításnak és elosztásnak, a felhasználásnak, az újrahasznosításnak és a végső hulladékártalmatlanítás hatásainak értékelését. Az eredmények nettó ÜHG-kibocsátás megtakarí-tást mutattak – ha biomasszát használnak a hagyományos fosszilis tüzelőanyagok (földgáz, szén, olaj) helyett –, 0,08 és 1,08 tCO₂eq között egy tonna száraz biomasszára – mint funkcionális egy-ségre – vonatkoztatva.

A tűzifa fajlagos CO₂ kibocsátása összehasonlítva más alternatív energiahordozókéval az egyik leg-alacsonyabb értéket mutatja (13. ábra).



13. ábra: A különféle energiahordozók fajlagos CO₂ emissziója (URL28 alapján saját szerkesztés)

A tanulmányban elemzett háztartási tüzelőberendezések nincsenek kibocsátáscsökkentő berende-zéssel ellátva. A közepes méretű CHP-erőmű füstgáz-szabályozási rendszere egy többciklonos le-választóból, egy elektrosztatikus porleválasztóból, valamint egy szóda hozzáadásával ellátott mosó-ból áll. A nagyüzemi CHP-erőművek esetében a hulladék-energiát hasznosító üzemekre jellemző szennyezés-csökkentő eszközöket használtak, mint például zsákos szűrők a por eltávolítására; sze-lektív, nem katalitikus redukciós (SNCR) rendszer, amelyet ammóniával táplálnak az égéstérben a NO_x szabályozására; mész hozzáadása a savas gázok eltávolítására és aktív szén a mikroszennyező-anyagok, például nehézfémek és nyomokban lévő szerves anyagok adszorpciójához.

17. táblázat: A tanulmányban elemzett dendromassza alapú tüzelőrendszerek jellemzői (Caserini et al. 2010)

Tüzelőberendezés	Hatásfok [%]	Tüzelőanyag típus	Nedves-ség-tartalom	Fűtőérték [GJ/tonna]	Ellátási távolság [km]
			[t%]		
Nyitott kandalló	18	Farönk/erdei maradványok	20	14,1	425
Hagyományos fatüzelésű kályha	55	Erdei maradványok/farönk	20	14,1	425
Alacsony emissziójú fatüzelésű kályha	68	Erdei maradványok/farönk	20	14,1	425
Pellet kályha (BAT ^a)	82	Pellet/faipari melléktermékek	7,4	16,7	50
CHP erőmű - 8 MW	52	Erdészeti és faipari maradványok, aprítékok	30	12,1	65
CHP erőmű - 100 MW	26	Erdészeti és faipari maradványok, aprítékok	35	11,3	100

^a BAT: Best Available Technologies (legjobb elérhető technológia)

18. táblázat: Átlagos kibocsátási tényezők a dendromassza alapú és a fosszilis tüzelőanyagok elégetésekor 1 GJ funkcionális egységre vonatkoztatva (Caserini et al. 2010)

Tüzelőberendezés	PM10	NO _x	VOC	SO ₂	CO	PAH
	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[mg/GJ]
Nyitott kandalló	500	70	5650	13	5650	280
Hagyományos fatüzelésű kályha	250	70	1130	13	5650	280
Alacsony emissziójú fatüzelésű kályha	150	60	560	13	2260	280
Pellet kályha	30	60	60	13	620	0,1
CHP erőmű - 8 MW	2,2	57	2,7	2,2	8	0,003
CHP erőmű - 100 MW	0,2	34	-	7,2	12	0,003
Fűtőmű ^a – 5 MW (Nagy 2011)	37,6 PM*	53,7*	-	2,1*	25,9*	-
Háztartási földgáz kazán (Nagy 2011)	0,2	50	5	0,5	25	-
Háztartási olaj kazán (Nagy 2011)	40	150	10	150	16	-
Háztartási dízel kazán (Nagy 2011)	5	50	3	100	20	-

* A fűtőművi adatok a jelölt irodalmi forrásból származnak. Az összehasonlítást lehetővé teszi, hogy az adatok – hasonlóan a többihez – LCA elemzésből származnak és a vizsgált folyamatok megegyeznek.

^a Technikai paraméterek: hatásfok: 83%; üzemidő: 166 nap (3984 óra); megtermelt hő: 35 869 GJ; tüzelőanyag mennyiség: 3676 kg/h; a fűtési időben 4,7176 millió kg faaprítékot éget el.

Az LCA elemzés bemenetei 1 GJ hő előállításához (Nagy 2011): 131,523 kg faapríték; 1,99 liter gázolaj; 3,07 kWh villamos energia; (kimenetek a táblázatban + 1,41 kg hamu + 85,45 kg CO₂).

A táblázat eredményei tartalmazzák a hamu végső ártalmatlanítását (fűtőmű esetében a hamu elszállításáig terjed a rendszerhatár) és a különböző folyamatokból (logisztika, erdészeti műveletek, kitermelés, aprítás, égetés, pellet előállítás stb.) származó közvetett kibocsátásokat is. A fatüzelésű rendszereknél a szállópor (PM10), a VOC, a CO és a PAH emissziós értékek mutatták a legnagyobb (sok esetben több nagyságrendbeli) különbségeket. Megállapítható, hogy erőművi és fűtőművi szinten a legkedvezőbbek a károsanyag-kibocsátási értékek, mind a gáz mind pedig a szilárd frakciók

tekintetében. Ezt követi a lakossági szinten a pellet kályha, illetve idesorolhatjuk természetesen a mai korszerű és automatizált pellet kazánokat is. A földgáztüzelés környezeti terhelését dendromassza alapú erőművi és fűtőművi szinten lehet a legjobban megközelíteni. A lakossági szektorban erre az automatizált kazánok (pl. apríték és pellet tüzelésű) a legmegfelelőbbek. A hőtermelési módok környezetterhelésének összehasonlítására alkalmas egyik módszer az ún. életciklus elemzés vagy életciklus hatásvizsgálat (Life Cycle Assessment, LCA). A környezeti hatások tekintetében az alábbi indikátorokat használták (CML 2001 mutatók):

- **Globális felmelegedési potenciál:** globális hatás, a globális felmelegedéshez való hozzájárulás mértékét mutatja meg, szén-dioxidra-egyenértékben (CO₂eq) normálva*.
- **Humán toxicitási potenciál:** helyi hatás, az emberre gyakorolt mérgezőséget mutatja meg, diklór-benzolra (DCBeq) normálva.
- **Savasodási potenciál:** regionális környezeti hatás, a környezet pH-jának változásához való hozzájárulást mutatja meg, kén-dioxidra (SO₂eq) normálva.
- **Fotokémiai ózonképző potenciál:** az alacsony légköri ózonképződéséhez való hozzájárulást mutatja meg, etilénre (C₂H₄eq) normálva.

Az elemzés során kapott LCA eredményeket a következő táblázatban láthatjuk.

19. táblázat: LCA eredmények a kibocsátás (Caserini, et al. 2010)

Tüzelőberendezés	Fosszilis CO ₂	PM10	CH ₄	N ₂ O	VOC	NH ₃	SO ₂	NO _x
	[kg/tonna száraz dendromasszában kifejezve] ^a							
Nyitott kandalló	-71,1	9,03	-0,51	2,68	100	0,81	0,35	2,68
Hagyományos fatüzelésű kályha	-650	4,03	-2,12	2	20	0,81	-0,03	2
Alacsony emissziójú fatüzelésű kályha	-869	3,03	-2,72	1,44	9,89	0,41	-0,17	1,44
Pellet kályha	-998	0,53	-3,09	2,79	0,91	0,11	0,08	2,79
CHP erőmű - 8 MW	-962	0,0002	-2,4	-1,3	-0,36	-0,006	-1,35	-1,3
CHP erőmű - 100 MW	-896	0,003	-1,69	-0,8	-0,15	0,34	-2,41	-0,8

^a A negatív értékek a fosszilis tüzelőanyagok biomasszával történő helyettesítése során keletkezett kibocsátások (megtakarítás); a pozitív értékek további kibocsátást jelentenek.

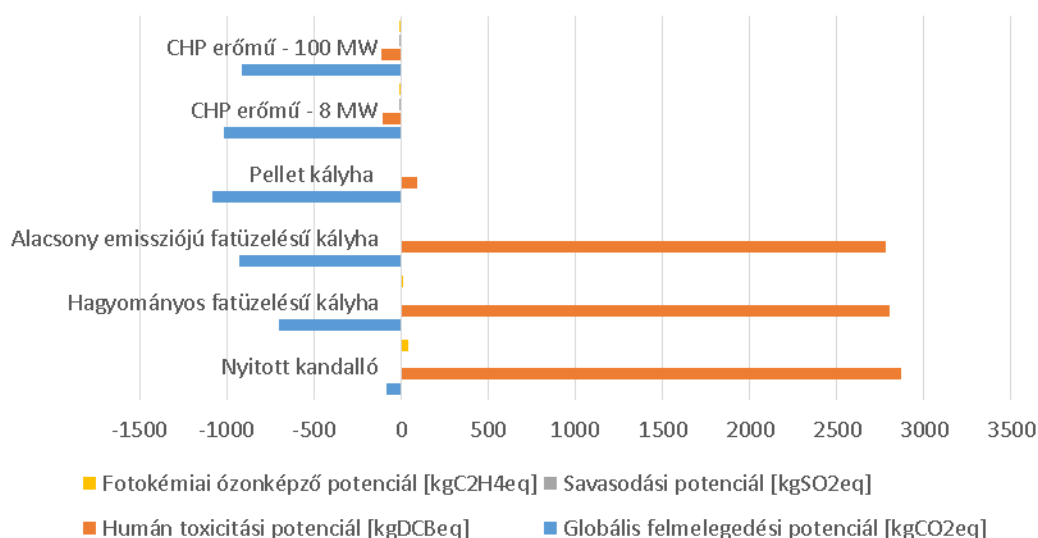
A fosszilis tüzelőanyagok biomasszával való helyettesítése a fosszilis szén-dioxid- és metánkibocsátás megtakarítását jelenti. Valójában az LCA eredmények negatív CO₂ és CH₄ mennyiséget mutatnak minden forgatókönyv esetében. A CO₂, a szállópor (PM10), a CH₄ és a VOC kibocsátások terén mutatkozott a legnagyobb (1-2 nagyságrendbeli) különbség. A leginkább környezetszennyező rendszerek a kandallók és a kályhák. A pellet kályha (ide sorolhatjuk a pellet kazánt is) mutatta a legkisebb károsanyag-kibocsátási értékeket a lakossági szektorban. Kétségtelen, hogy a dendromassza alapú CHP erőművek – azok között is a nagyobb teljesítményű rendszerek – a legmegfelelőbbek a kibocsátások terén.

Valamennyi tüzelési mód (kandalló, hagyományos- és modern kályha, dendromassza alapú CHP erőmű) LCA elemzése azt mutatta, hogy első helyen a *humán toxicitási potenciál indikátora a legdominánsabb* majd ezt követi a globális felmelegedés potenciál. Mindkét indikátor esetében a *hagyományos*

kályhák és kandallók mutatták a legnagyobb (legkedvezőtlenebb) hatást. A CHP erőművek adták a legkedvezőbb értékeket megelőzve ezzel a korszerű lakossági automatizált tüzelőberendezéseket.

20. táblázat: LCA eredmények hatáskategóriákban kifejezve, száraz dendromassza tonnájára vonatkoztatva (Caserini, et al. 2010)

Tüzelőberendezés	Globális felmelegedési potenciál	Humán toxicitási potenciál	Savasodási potenciál	Fotokémiai ózonképző potenciál
	[kgCO ₂ eq]	[kgDCBeq]	[kgSO ₂ eq]	[kgC ₂ H ₄ eq]
Nyitott kandalló	-80,4	2870	3,05	44,5
Hagyományos fatüzelésű kályha	-698	2801	2,26	11
Alacsony emissziójú fatüzelésű kályha	-932	2782	1,17	5,17
Pellet kályha	-1080	96,3	1,63	0,762
CHP erőmű - 8 MW	-1020	-106	-2,28	-0,305
CHP erőmű - 100 MW	-914	-116	-2,68	-0,227



14. ábra: LCA hatáskategóriák grafikus ábrázolása (Caserini, et al. 2010 alapján saját szerkesztés)

Az ózonképző potenciál és a savasodási potenciál a környezetterhelés szempontjából elhanyagolható eredményt adott. A környezeti hatásuk szempontjából legkedvezőbb hőtermelési módok a dendromassza alapú fűtőművek és erőművek, a lakossági szektorban pedig az automata apríték és pellettüzelő berendezések. A környezetbiztonsági szempontokat is figyelembe vevő energiapolitikának tehát ezen termelési módokat célszerű előnyben részesítenie. A szállítási távolságnak az LCA eredményekre gyakorolt hatását egy másik tanulmány is megvizsgálta, amely szerint a faapríték esetében az 1850 km-nél nagyobb szállítási távolságok primer energiafelhasználással járnak, amely magasabb, mint a fogyasztóhoz ténylegesen szállított energia.

A fatüzelésű-rendszerek környezeti terheléséhez kapcsolódó szakmai elemzések

AZ ELEMZÉS ALAPVETŐ FORRÁSAI, MEGFONTOLÁSOK, LEGFŐBB PARAMÉTEREK FELVÉTELE, ÁTLÁTHATÓSÁG

A konkrét vizsgálatok és elemzések során irodalmi, gyártói, jogszabályi, EU-s rendeleti és szabványügyi adatokból dolgoztunk. A számított adatok értelmezéséhez néhány **fontosabb megjegyzést** az alábbiakban foglaljuk össze:

- Kizárólag lakossági és fűtőművi szinteket vizsgáltunk a 21, 22, 23 és 24. táblázatban található felbontásban.
- A számítások/mérnöki becslések során felhasznált adatoknál előnyben részesítettük a hazai értékeket, de az európai értékek is relevánsak, mivel a jelenleg támogatandó korszerű tüzeléstechnikában és a tűzifa elemi összetételének vonatkozásában nagy különbségek nincsenek.
- A számítások csupán közelítőnek tekintendők, hiszen például az éves kihasználtságból fakadó ingadozások kapcsán a tüzelőberendezések részleges terheltsége alapvetően befolyásolja a kibocsátásokat és a hatásfokot. Munkánk során irodalmi adatokat, gyártói leírásokat, rendeleteket, szabványokat vettünk alapul, melyet több esetben mérnöki becsléssel kellett kiegészíteni. Mérnöki becslésünk háttérét a korábbi hasonló méréseink, kutatási eredményeink és szakmai tapasztalataink biztosították.
- Tiszta, nem szennyezett, erdőről kitermelt tűzifát, illetve aprítékot vettünk figyelembe. Egy, az irodalmak által átlagosnak mondható elemi összetételű faalapú tüzelőanyagot vettünk figyelembe olyan helyeken, ahol számításra volt szükség. Ennek összetétele és értékei (nedves tüzelőanyagra vonatkoztatva):
 - C tartalom - 0,3975 kg/kg
 - H tartalom – 0,0486 kg/kg
 - S tartalom – 0,0004 kg/kg
 - O tartalom – 0,3415 kg/kg
 - N tartalom – 0,0017 kg/kg
 - hamu – 0,0103 kg/kg
 - nedvesség – 0,2000 kg/kg
 - Fűtőérték (NCV) – 14 MJ/kg
- A feltüntetett értékektől eltérés természetesen lehetséges, hiszen a tüzeléstechnika ilyen jellegű becslése több tényezőtől függ, melyek nem minden esetben ismertek, illetve nem pontosan számíthatók. *Tényleges adatok csakis konkrét mérések után adhatók egyes kazánokra, tüzelőanyagokra, de azok is csak az adott mérés idejére érvényesek.* Az egyes, szélsőséges adatokat tartalmazó forrásokat a feldolgozás során nem vettük figyelembe, ezzel a bizonytalanságból eredő kockázatokat a lehető legkisebbre csökkentve. A későbbiekben meghatározott, bemutatott adatok – amennyiben azt külön nem jelöljük – átlagos értékeknek tekintendők.
- Az úgynevezett átszámítás/kibocsátási tényező értékét (mely a mg/Nm^3 -ról $\text{mg}/\text{MJ}_{\text{NCV}}$ -re történő átszámítást jelenti) 1,7-re vettük fel, azonban meg kell jegyezni, hogy ez jelentősen

változhat például a fűtőérték függvényében is, így ez esetben is adódhatnak különbözőségek, szélsőséges esetben 1,2-2,2 között is változhat. Alaphelyzetben, ha minden adat ismert, akkor lehetőség van a mg/MJ alapú emissziós faktor konkrét (EF) meghatározására. Erre az alábbi képlet alkalmas (AEA 2012):

$$EF = [Conc] \cdot [SDFGV]$$

ahol

[Conc]: az adott szennyezőanyag koncentrációja mg/Nm³-ben (száraz füstgáz 0°C-on, 101,3 kPa és meghatározott oxigénkoncentráció mellett)

[SDFGV = Specific dry flue gas volume]: fajlagos száraz füstgáztérfogat Nm³/MJ-ban (száraz füstgáz 0°C-on, 101,3 kPa és meghatározott oxigénkoncentráció mellett). Ez a fajlagos száraz füstgáz térfogat (Nm³/kg tűz.a.) és a fűtőérték (MJ_{NCV}/kg tűz. a.)

Az ausztriai Burgenland esetében 2019-ig volt érvényben egy irányadó jogszabály (URL29), mely a 3. mellékletében az EF értéket tűzifa esetében 1,57-re, míg apríték esetében 1,5-re adta meg. Saját adataink alapján mi is végeztünk számításokat. **Ezek alapján 14 MJ/kg fűtőértékű (NCV) tűzifához és aprítékhoz az összehasonlíthatóság miatt egyformán 1,7-es EF értéket vettünk fel**, tehát a mg/Nm³-es értéket 1,7 elosztva kapjuk meg a mg/MJ_{NVC} értékét.

- **Az egyes hőellátó rendszerek összesített hatásfokát figyelembe véve 1 MJ hasznos hőre vonatkoztatott fajlagos értékeket határoztunk meg (mg/MJ_{felhasznált hő}).**

A hőelőállítási rendszer teljes hatásfokának meghatározása a nagyszámú és egyben nagy szórással rendelkező adatok miatt pontosan nem lehetséges, ezért műszaki becsléseket kellett alkalmaznunk. A meghatározáskor figyelembe vettük a hazai és EU-s rendeleteket, valamint a gyártók által mért, vagy feltételezett névleges és szezonális hatásfokokat. Ha a rendszer teljes hatásfokát szeretnénk meghatározni, akkor a kazánnál a közvetlenül hőelőállítás-kor keletkező veszteségeken túl (melynek mérőszáma a kazánhatásfok) más veszteségeket is figyelembe kell venni. Ebből a szempontból elsősorban a dominánsnak mondható veszteségeket vettük figyelembe, melyek a hőelosztási/szállítási veszteséget, a hőtárolási veszteséget (ha hőtároló tartály/puffer is van a rendszerben), készenléti veszteséget jelentik. Más, kisebb súllyal számító veszteségeket (pl. teljesítmény és a hőigény illesztésének pontatlansága miatti veszteség) a nagy bizonytalanság és a kisebb jelentőségük miatt nem vettük figyelembe.

A hatásfokokat – többek közt – az alábbiak szerint vettük fel:

- **Lakossági és közületi tüzelés esetén** a kazán és hőleadó egységig vizsgáltuk a folyamatot (melybe beletartozik például adott esetben a korszerű, szabályozott rendszereknél a közbeépített puffer tároló is).
- **Kisebbségi közületek (központi hőellátó) esetében** automatizált, teljesen szabályozott, aprítékos rendszereket vettünk figyelembe.

- **(Táv)Fűtőművek esetében,** a hálózati veszteségen belül a hőszállítás módja, és azok egy-égeinek szigetelése, valamint a hőátvitel/hőátadás módja alapjaiban nagy befolyásoló tényező, így az összesített veszteség elég tág határok között mozog. Táv hő rendszerek esetében némi anomáliába is ütköztünk, hiszen jónéhány táv hő szolgáltatónál találhatók adatok a „h”, mint hálózati veszteség értékére, azonban a legtöbb esetben a 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet alapján $h=0,15$ -ös értéket vesznek figyelembe (ha mérhető, akkor „h” értéke az értékesített hő és a hálózatra adott hőből számítható), ezért mi is ezt alkalmazzuk. Az International Energy Agency (IEA) adatai alapján egyébként elmondható, hogy sok hálózat 80°C feletti előremenő hőmérsékleten működik, melyhez $\sim 10\%$ és 30% közötti hőveszteség adódik csővezetéken (URL30). A meglévő hálózatok alacsonyabb üzemi hőmérséklet felé történő felújítása, a csővezetékek szigetelésének javítása és a digitalizálási technikák integrálása jelentősen csökkentheti a hőveszteségeket, amelyek így 10% alatt maradhatnak.

Számításunkban átlagosan 15%-os veszteséget vettünk figyelembe (természetesen a fenti hatásfokoktól való egyedi eltérések mindenhol előfordulhatnak). A hatásfok meghatározásakor több száz irodalmi/gyártói/hőtermelői hatásfok értéket vettünk figyelembe. Az így rendelkezésre álló értékek rendszerezése utáni kiindulási alapok - melyek az általunk figyelembe vett hatásfok értéket mutatják - a 21. és 22. táblázatban találhatók.

21. táblázat: Lakossági és közüzemi méretű faalapú tüzelőberendezések: hatásfokok meghatározása irodalmi, gyártói és rendeleti értékek alapján részben műszaki becsléssel meghatározva

[táblázatban található érték $\cdot 100 = \%$]

		Kazán hatásfok ^a	7/2006. (V. 24.) TNM rendelet: Szezonális hatásfok	813/2013/EU rendelet: Szezonális hatásfok (GCV-re vonatkoztatva!)	Szezonális hatásfok gyártók adatainak átlag értéke alapján	Számításban figyelembe vett összesített hatásfok a hőtechnikai veszteségekkel együtt ^b
Irodalmi, gyártói és saját adatok alapján számított átlagos érték	Hagyományos kandalló/kályha	0,60	0,56	0,75	-	0,50
	Korszerű kandalló	0,70	0,56	0,75	-	0,55
	Korszerű, de hagyományos fatüzelésű kazánok, égéslevegő szabályozó ventilátor nélkül	0,85	0,57	0,75/0,86	0,70	0,64
	Faellgázosító kazán	0,90	0,83	0,75/0,86	0,75	0,70

^a (névleges terhelésen a bevitt és a termelt hőmennyiség) irodalmi és gyártói adatok alapján

^b (gyártók és a rendelet értékeinek átlaga, valamint a hőtechnikai veszteségek alapján műszaki becsléssel a legjobb és legrosszabb scenáriót átlagolva)

Általános határértékek MSZ EN 303-5:2021 alapján, a legrosszabb, azaz a 3. osztályra vonatkoztatva $\leq 50 \text{ kW}_{\text{th}}$ és $50 < x \leq 150 \text{ kW}_{\text{th}}$ (EF átszámítás: 1,7) esetén: 0,70, vagyis a faelgázosító kazánéval egyenlő.

22. táblázat: Közüzemi (központi) és fűtőművi méretű faalapú hőtermelés: hatásfokok meghatározása irodalmi, gyártói, rendeleti értékek alapján részben műszaki becsléssel meghatározva

[táblázatban található érték · 100 = %]

		Kazán hatásfok (névleges terhelésen a bevitt és a termelt hőmennyiség) irodalmi és gyártói adatok alapján	7/2006. (V. 24.) TNM rendelet: A távhőhálózatra kiadott hőmennyiségre vetített (fajlagos) hálózati hőveszteség [kWh/kWh]	Számításban figyelembe vett összesített hatásfok a hőtechnikai veszteségekkel együtt, a szezonális hatásfok csökkentést is figyelembe véve (műszaki becsléssel a legjobb és legrosszabb szcenáriót átlagolva)
Irodalmi, gyártói és saját adatok alapján számított átlagos érték	Közüzemi/központi tüzelőberendezések, rendszerint: $> 140 \leq 1000 \text{ kW}_{\text{th}}$	0,85	--	0,68
	Fűtőmű 1 MW _{th} felett (közepes méretű erőmű kategória)	0,85	0,15	0,65
Általános határértékek MSZ EN 303-5:2021 alapján, a legrosszabb, azaz a 3. osztályra vonatkoztatva $\leq 50 \text{ kW}_{\text{th}}$ (EF átszámítás: 1,7)		0,85	0,15	0,68
Általános határértékek MSZ EN 303-5:2021 alapján, a legrosszabb, azaz a 3. osztályra vonatkoztatva $> 50 \leq 150 \text{ kW}_{\text{th}}$ (EF átszámítás: 1,7)		0,85	0,15	0,65

- Technológia szerinti felbontást a közösségi és falufűtőműves rendszereknél nem alkalmaztunk, mivel számos megoldás létezik a hőtermelésre és a leválasztási technológiára egyaránt. Ennek megfelelően átlagos értékekkel kalkuláltunk.
- **A segédenergia:** Ma már lakossági kazánok működtetését is sok esetben ventilátorok segítik a szükséges égéslevegő bejuttatásával. Ugyanakkor nagyobb berendezések esetén ez már korábban is teljesen természetes volt. Ennek megfelelően az egyik legnagyobb villamosenergia bevitel itt történik meg. Ehhez kapcsolódhat – automatikusan működő hőtermelőkhöz esetében – az alapanyag behordásához tartozó villamosenergia felhasználás is. A természetes tüzelés és hőleadás elvén működő és többnyire szobák fűtésére használt kályhák/kandallók kivételével gyakorlatilag mindenhol megjelenik a hőelosztást/tárolás végző szabályozó elemekhez kapcsolódó villamosenergia felhasználás. A hatásfok meghatározáshoz hasonló adatgyűjtést követően részben műszaki becslésekkel határoztuk meg az átlagos jellemző értéket a villamos segédenergia felhasználás tekintetében. Lakossági tüzelőberendezések esetében 100 m² lakóterületre vonatkozó rendeleti fajlagos értékeket alkalmaztuk a számítás háttér adataként.

Lakossági egyedi rendszerek esetében rendszerektől függően 0 és 0,0056 kWh_{villamos energia}/MJ_{felhasznált hő} közötti érték vehető figyelembe. Kisebb közüzemi és központi fűtőegységeknél a felvett érték: 0,0025 kWh_{villamos energia}/MJ_{felhasznált hő}.

A távhő rendszereknél a termeléséhez és keringtetéséhez a hőtermelő által felhasznált villamosenergia aránya az adott távhőrendszerben távhőhálózatra kiadott hőmennyiségre vetítve szintén nem elhanyagolható. Ennek értéke az előzőekben is említett 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet alapján 0,006-0,011 kWh/kWh között változik a kiadott hőmennyiség függvényében. **Számításunkban 0,011 kWh/kWh, azaz 0,0031 kWh_{villamos energia}/MJ_{felhasznált hő} értéket vettünk figyelembe.**

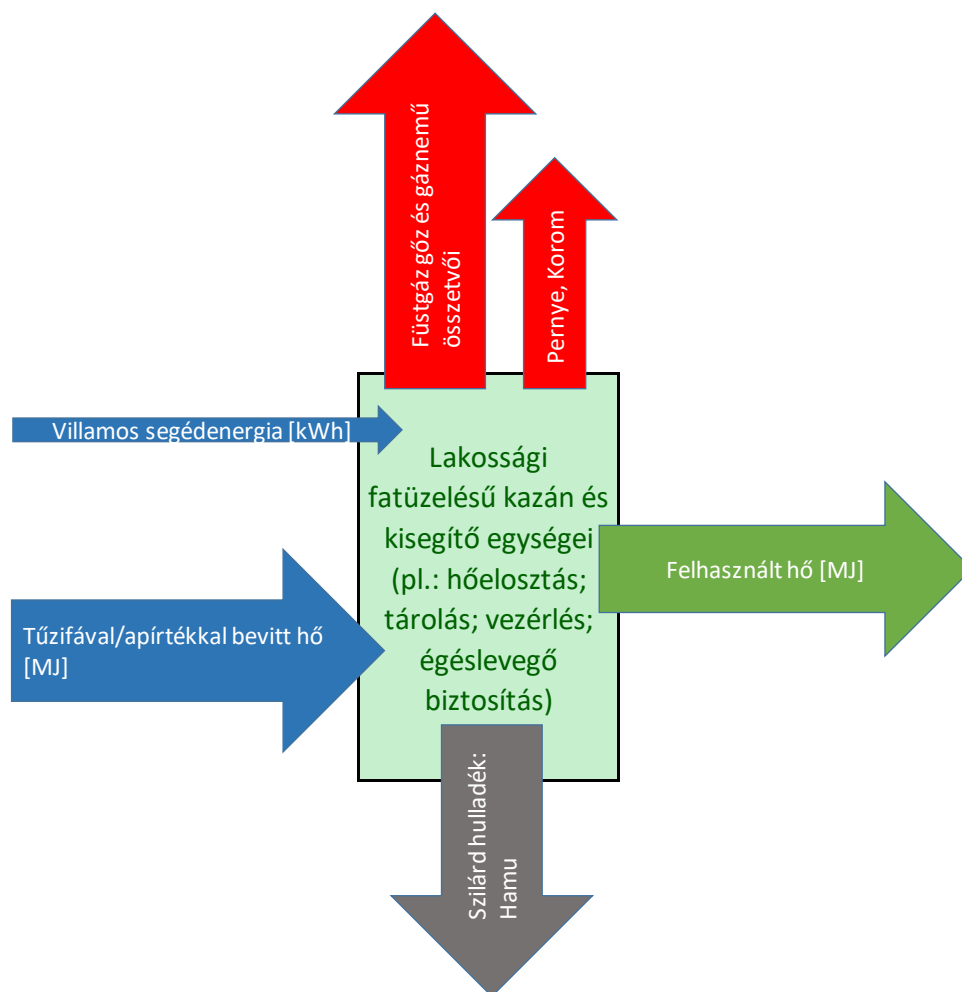
A VIZSGÁLATI EREDMÉNYEINK, AZAZ A TÜZELÉSTECHNIKAI ELJÁRÁSOK SORÁN FIGYELEMBE VETT KIBOCSÁTÁSOK

A tüzeléstechnikához kapcsolódó, általunk figyelembe vett anyagáramlások az alábbi összesítő 15. ábrával jellemezhetők. Természetesen a fűtőműves rendszerek esetében a technológiától függően más jellegű hulladékok is megjelenhetnek. Ilyen például a szennyvíz, vagy éppen a fluid rendszerű technológiához kapcsolódó hulladék homokágy, melyet a korábban említett 72/2013 (VIII. 27.) VM rendelet is külön kezel. Ezen anyagáramokról viszont nagyon kevés és sokszor egymásnak is ellentmondó adatok látnak napvilágot. Így a nagymértékű bizonytalanságok miatt ezeket nem vettük figyelembe. Véleményünk, melyet a hasonló külföldi elemzések is alátámasztanak, hogy a kapott végső értékeket számottevően nem befolyásolja ezek figyelmen kívül hagyása, mivel egyrészt rendszerint az általunk vizsgált rendszerméreteket jellemzően nem ezzel a technológiával dolgoznak, másrészt nagyságrendbeli különbségek vannak az általunk figyelembe vett anyagáramokhoz képest.

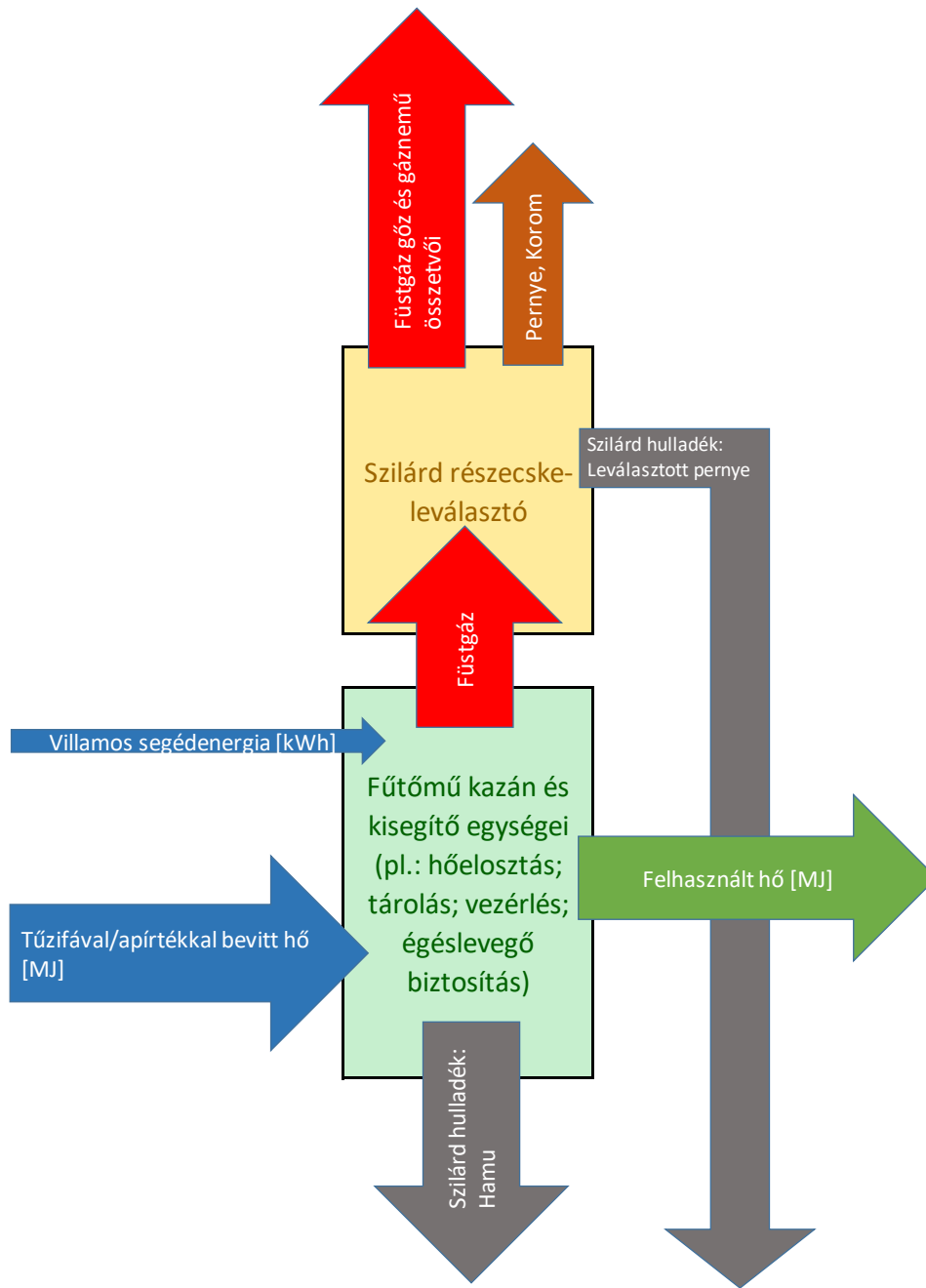
A lakossági tűzifa felhasználáshoz kapcsolódóan 4+2 esetet vizsgáltunk meg a következő, 23. táblázatnak megfelelően. A hagyományos kandallót/kályhát, korszerű kandallót, hagyományosnak mondható, de égéslevegőt nem ventilátorral szabályozott módon biztosító kazánt, valamint egy korszerű faelgázosító kazánt vizsgáltunk, melyet kiegészítettünk egy újfajta megközelítéssel. Nevezetesen két további kategóriaként jelenik meg a vonatkozó, a teljesítménytartományra jellemző, szabványokban / jogszabályban rögzített maximális kibocsátási értékeket figyelembe vevő besorolás. A lakossági tüzelőberendezések esetében például a szabványban rendelkezésre álló 3 lehetőség-ből is a legrosszabb scenáriót, azaz a 3. kategóriát képviselő kazánok határértékeit vettük figyelembe. *Felhívjuk a figyelmet arra, hogy a táblázatból kiolvasható értékek nem egyeznek meg a joganyag/ szabvány értékeivel, mivel azok mg/Nm³-ben tüntetik fel a határértékeket.* Nekünk ezt át kellett váltani – az EF segítségével – az LCA elemzéshez szükséges mg/MJ funkcionális egységre.

A 21-24. táblázatokból a kiemelt cellák adatait használtuk a további elemzésekhez. A táblázatok azon sorait, melyek „től-ig” értékeket tartalmaznak, az úgynevezett jellemző tartományok, határok bemutatására tüntettük fel. Egy-egy hőtermelő egység sem jellemezhető egy-egy számmal a valóságban, hiszen, ahogy láttuk a kibocsátásokat sok minden befolyásolja. Ismét ki kell hangsúlyoznunk, hogy természetesen ezen határokon kívül is találhatunk értékeket, azonban ezek jellemzően valamilyen

extrém tüzeléstechnikai problémára, a tüzelőberendezés, illetve a tüzelőanyag minőségére vezethetőek vissza.



15. ábra A lakossági fatüzelés egyszerűsített anyagáram modellje



16. ábra A fűtőművi fatüzelés egyszerűsített anyagáram modellje

23. táblázat: Lakossági egyedi és részben társasházi faalapú tüzelőberendezésekhez társított kibocsátások
(az 5.1 fejezet mutatja be az adatok begyűjtésének, felvételének metodikáját, valamint az adatok/jelölések értelmezését)

		Emissziós faktorok (EF _{NCV}) háztartásokban üzemelő hőtermelő berendezések esetében [mg/MJ _{NCV} (= g/GJ _{NCV} = kg/TJ _{NCV})]									Emissziós faktorok (EF _(felhasznált hő)) háztartásokban üzemelő hőtermelő berendezések esetében a rendszer teljes hatásfokának figyelembevételével [mg/MJ _(felhasznált hő) (= g/GJ _(felhasznált hő) = kg/TJ _(felhasznált hő))]									
		CO	NO _x	SO ₂	Szilárd anyag (PM) Leválasztó nélkül (Pernye)	VOC (OGC)	PAH	Számított elméleti CO ₂ érték tüzelőanyag elemi összetétele alapján változó	"Fenék" hamu (elméleti, számított érték, valamint irodalmi értékek alapján), mint hulladék	Leválasztóban maradó pernye, mint hulladék	CO	NO _x	SO ₂	Szilárd anyag (PM) Leválasztó nélkül (Pernye)	VOC (OGC)	PAH	Számított elméleti CO ₂ érték tüzelőanyag elemi összetétele alapján változó	"Fenék" hamu (elméleti, számított érték, valamint irodalmi értékek alapján), mint hulladék	Leválasztóban maradó pernye, mint hulladék	
Irodalmi, gyártói és saját adatok alapján számított átlagos érték	Hagyományos kandalló/kályha	4000	110	15	500	1000	0,60	104037	2104	nem releváns	8000	220	30	1000	2000	1,20	208074	4209	nem releváns	
	Korszerű kandalló	2500	95	15	300	560	0,25	104037	1789	nem releváns	4545	173	27	545	1018	0,45	189158	3253	nem releváns	
	Korszerű, de hagyományos fatüzelésű kazánok, égéslevegő szabályozó ventilátor nélkül	2000	80	15	120	150	0,15	104037	1457	nem releváns	3125	125	23	188	234	0,23	162558	2277	nem releváns	
	Faelgázosító kazán	1200	75	15	50	43	0,08	104037	734	nem releváns	1720	108	22	72	62	0,11	149157	1052	nem releváns	
Irodalmi, gyártói és saját adatok minimum és maximum értékei (csak tájékoztató adatok, a számításban nem vettük figyelembe	Hagyományos kandalló/kályha	500-10000	30-150	8-40	250-1000	100-2000	0,035-3,45	104037	--	nem releváns	1000-2000	60-300	16-80	500-2000	200-40000	0,07-6,9	208074	--	nem releváns	
	Korszerű kandalló	500-5000	30-150	8-40	50-500	20-500	0,017-3,45	104037	--	nem releváns	909-9091	55-273	15-73	91-909	36-909	0,03-6,27	189158	--	nem releváns	
	Korszerű, de hagyományos fatüzelésű kazánok	500-10000	30-150	8-40	60-300	20-200	0,035-3,45	104037	--	nem releváns	781-15625	47-234	13-63	94-469	31-313	0,05-5,39	162558	--	nem releváns	
	Faelgázosító kazán	150-2000	10-150	8-40	10-150	10-100	0,05-0,5	104037	--	nem releváns	215-2867	14-215	11-57	14-215	14-143	0,07-0,72	149157	--	nem releváns	
Általános határértékek MSZ EN 303-5:2021 alapján, a legrosszabb, azaz a 3. osztályra vonatkoztatva ≤ 50 kW _{th} (EF átszámítás: 1,7)		2941	75**	15**	88	88	0,08**	104037**	731**	nem releváns	4217	108**	22**	127	127	0,11**	149157**	1048**	nem releváns	
Általános határértékek MSZ EN 303-5:2021 alapján, a legrosszabb, azaz a 3. osztályra vonatkoztatva > 50 ≤ 150 kW _{th} (EF átszámítás: 1,7)		1471	75**	15**	88	59	0,08**	104037**	731**	nem releváns	2108	108**	22**	127	84	0,11**	149157**	1048**	nem releváns	
**Rendeletben nem szereplő, de a számítások elvégezhetősége miatt az előző sorokból felvett/számított adat																				

		Emissziós faktorok (EF _{NCV}) kisüzemi, közüzemi és fűtőművi szinten üzemelő hőtermelő berendezések esetében [mg/MJ _{NCV} (= g/GJ _{NCV} = kg/TJ _{NCV})]									Emissziós faktorok (EF _(felhasznált hő)) kisüzemi, közüzemi és fűtőművi szinten üzemelő hőtermelő berendezések esetében a rendszer teljes hatásfokának figyelembevételével [mg/MJ _(felhasznált hő) (= g/GJ _(felhasznált hő) = kg/TJ _(felhasznált hő))]								
		CO	NOx	SO2	Szilárd anyag (PM) Leválasztót feltételezve (nem leválasztott pernye)	TOC* (Összes szerves vegyület C-ben (szénben) kifejezve, lángionizációs detektorral mérve)	PAH	Számított elméleti CO ₂ érték tüzelőanyag elemi összetétele alapján változó	Fenek hamu (elméleti, számított érték) Nem fluidágyas berendezést feltételezve	Leválasztóban maradó pernye Nem fluidágyas berendezést feltételezve, leválasztó előtt	CO	NOx	SO2	Szilárd anyag (PM)	TOC* (Összes szerves vegyület C-ben (szénben) kifejezve, lángionizációs detektorral mérve)	PAH	Számított elméleti CO ₂ érték tüzelőanyag elemi összetétele alapján változó	Fenek hamu (elméleti, számított érték) Nem fluidágyas berendezést feltételezve	Leválasztóban maradó pernye Nem fluidágyas berendezést feltételezve, leválasztó előtt
Irodalmi, gyártói és saját adatok alapján számított átlagos érték	Közüemi központi tüzelőberendezések, rendszerint: > 140 ≤ 1000 kW _{th}	300	94	60	80	30	0,012	104037	1179	720	441	138	88	118	44	0,018	152996	1734	1059
	Nagyobb fűtőmű 1 MW _{th} felett (közepes méretű erőmű kategória)	400	190	15	60	20	0,008	104037	885	540	615	292	23	92	31	0,012	160057	1361	831
Irodalmi, gyártói és saját adatok minimum és maximum értékei	Közüemi központi tüzelőberendezések, rendszerint: > 140 ≤ 1000 kW _{th}	20-1300	20-130	8-90	35-270	10-120	0,008-0,07	--	--	--	29-1912	29-191	12-132	51-397	15-176	0,012-0,1	--	--	--
	Nagyobb fűtőmű 1 MW _{th} felett (közepes méretű erőmű kategória)	50-400	50-300	8-40	10-220	3-200	0,004-0,06	--	--	--	50-615	77-462	12-62	15-338	5-308	0,006-0,09	--	--	--
Általános határértékek 53/2017 X. 18 FM rendelet alapján a határérték II. kategóriájú tüzelőberendezés esetén <1 MW _{th} (EF átszámítás: 1,7)		882	382 (fluid tüzelés: 176)	118*	59	50	--	104037**	1179**	531**	1298	562 (fluid tüzelés: 259)	174*	87	74	--	152996**	1734**	781**
Általános határértékek 53/2017 X. 18 FM rendelet alapján a határérték II. kategóriájú tüzelőberendezés esetén ≥ 1 < 5 MW _{th} (EF átszámítás: 1,7)		221	176	118*	29	50	--	104037**	885**	261**	339	271	182*	45	77	--	160057**	1361**	402**
*nem kell alkalmazni a kizárólag fa és fahulladék típusú szilárd biomasszával üzemelő berendezésekre																			
**Rendeletben nem szereplő, de a számítások elvégezhetősége miatt az előző sorokból felvett/számított adat																			

Összefoglalás az eddigiekhez

Magyarországon a megújuló energiaforrások közül a biomassa (azon belül is a dendromassa) rendelkezik olyan potenciállal, amely lehetőséget ad a fosszilis energia részleges kiváltására. Egyre több példa bizonyítja, hogy a jól megtervezett és megfelelő szakértelemmel üzemeltetett dendromassa bázison alapuló korszerű lakossági és ipar energiaellátó rendszerek gazdaságos és környezetbarát energiatermelésre adnak módot. A nagyobb teljesítményű rendszerek a vidéki települések nagyobb fogyasztóinak (pl.: falufűtés, közintézmények, ipari és mezőgazdasági létesítmények) a korszerű fatüzelésű, vagy energetikai tömörítvényekkel (pellet, brikett) üzemelő rendszerek pedig a kisebb fogyasztóknak, háztartásoknak kínálnak a környezetet legkevésbé terhelő alternatívát.

A légszennyező anyagok legnagyobb kibocsátói az ipar, a mezőgazdaság, a közlekedés és a háztartások. Az égési folyamat minőségétől függetlenül a háztartási szilárd tüzelés során többek között szilárd por és egészségre ártalmas szénhidrogének (PAH) keletkeznek. Az égés minőségét erősen befolyásolja a felhasznált tüzelőanyag minősége, a berendezés típusa és kora, valamint a felhasználónak a berendezés használatára vonatkozó ismerete. Amint a tüzelés minősége bármely paraméter miatt romlik, a légkörbe kibocsátott légszennyező anyagok mennyisége is megnő. Ezt súlyosítja az a tény, hogy a legtöbb esetben a szilárd tüzelőberendezéssel rendelkező háztartásokban (illegálisan) háztartási hulladékot is égetnek. A füstgázból és a maradék hamuból a hulladék elégetését a hatóságok nem tudják egyértelműen bizonyítani, ezért ez ellen a hatóságok nem tudnak hatékonyan fellépni.

Az energiapiazarló lakóépületek jelentős korszerűsítésre szorulnak, hogy a modern energetikai követelményeket teljesíteni tudják és országos szinten elérjük a kitűzött klímacélokat. Ehhez jelentős állami ösztönző támogatásokra, energiahatékonysági programokra van szükség. A megtakarításokkal nem rendelkező, alacsony jövedelmű háztartások ezirányú támogatását fokozottabban támogatni kell és az elavult tüzelőberendezések korszerűsítésre, cseréjére is programot kell indítani. Erre kiemelten szükség van, mivel 2022-ben az EU-s öko-dizájn szabályozás keretében a leginkább légszennyező tüzelőberendezéseket elkezdték kivonni a piacról. Az energia csak akkor lesz hosszútávon megfizethető az alacsony jövedelmű háztartások számára, ha külső segítséget kapnak otthonaik energetikai korszerűsítéséhez.

A fatüzelésen alapuló fűtőművi hőenergia-termelés hazai környezetben való alkalmazásának komplex értékelése során bebizonyosodott, hogy a kisebb léptékű, megfelelően átgon-dolt és működtetett decentralizált energiaellátó rendszerek hazai körülmények között is alkalmasak a jelen kor követelményeinek megfelelő energiatermelésre.

Summary

In Hungary, among renewable energy sources, biomass (especially dendromass) has the potential to partially replace fossil energy. Increasing examples demonstrate that well-designed and expertly operated modern residential and industrial energy supply systems based on dendromass offer an economical and environmentally friendly means of energy production. Higher-capacity systems serve the larger consumers in rural areas (e.g., village heating, public institutions, industrial and agricultural facilities), while systems operating on modern wood combustion or energy-dense products (pellets, briquettes) provide the least environmentally burdensome alternative for smaller consumers and households.

The major emitters of air pollutants are industry, agriculture, transportation, and households. Regardless of the combustion process quality, solid particles and health-damaging polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) are produced during household solid fuel combustion. The quality of combustion is strongly influenced by the fuel's quality, the type and age of the equipment, and the user's knowledge of equipment operation. As the quality of combustion deteriorates due to any parameter, the quantity of air pollutants emitted into the atmosphere increases. This is exacerbated by the fact that, in most cases, households with solid fuel-burning devices also burn household waste (illegally). Authorities cannot definitively prove the burning of waste from the smoke and residual ash, making it difficult for them to effectively intervene.

Energy-wasteful residential buildings require significant upgrades to meet modern energy requirements and achieve the set climate goals at the national level. This necessitates substantial government incentives and support for energy efficiency programs. Support for households with no savings and low incomes in this direction should be increased, and programs for the modernization and replacement of outdated heating equipment should be initiated. This is particularly crucial since, in 2022, the EU's eco-design regulations started phasing out the most air-polluting heating devices from the market. Energy will only be sustainably affordable for low-income households if they receive external assistance for the energy modernization of their homes.

The comprehensive assessment of heat energy production based on wood combustion in a domestic environment has proven that smaller-scale, well-conceived, and operated decentralized energy supply systems are suitable for energy production in accordance with contemporary requirements in the domestic context as well.

Cser tűzifa - fosszilis (földgáz) tüzelőanyagok összehasonlító CO₂ kibocsátás elemzése

Bevezetés

Ebben a fejezetben a fő célunk a tűzifa tüzelőanyag környezeti lábnyomának elemzése volt, de úgy hisszük, hogy az emberek többsége nem ismeri az életciklus elemzést, annak összetettségét, ezért a fejezet elején egy rövid áttekintést adunk erről is.

Az LCA

Az életciklus-elemzés (az angol Life Cycle Assessment, rövidítése LCA) a környezeti szempontokat és a potenciális hatásokat vizsgálja egy termék, folyamat vagy szolgáltatás teljes életútja során (Tamaska et al. 2001). Alapelve, hogy a környezeti hatásokat a „bölcsőtől a sírig”, azaz a termékek és szolgáltatások összes életszakaszában figyelembe szükséges venni, és azokat környezeti hatáskategóriákhoz rendelve lehet számszerűsíteni (Tóthné 2008).

Az életciklus elemzés módszertani keretei

Az életút egy termék, csomagolás vagy folyamat teljes életciklusát tartalmazza, nevezhető „bölcsőtől a sírig”, sőt „bölcsőtől a bölcsőig” megközelítésnek is. A teljes életút a nyersanyagok kitermelését és feldolgozását, a gyártást, a szállítási és terjesztési tevékenységeket, a használatot, újrafelhasználást/újrahasznosítást, valamint a hulladék-elhelyezést foglalja magában (Tóthné 2008).

Környezeti hatásoknál a források felhasználását, az emberi egészséget és az ökoszisztéma állapotát egyaránt figyelembe kell venni. Az életciklus-elemzés tárgya rendszerint olyan termék, folyamat vagy szolgáltatás, amelynél választási lehetőségünk van az azonos funkciójú, de a környezetre eltérő mértékben ható rendszerek közt (Tamaska et al. 2001). A Nemzetközi Szabványügyi Szervezet (International Organization for Standardization – ISO) bevezette az ISO 14000-es környezetvédelmi irányítási szabványsorozatot, amelynek az életciklus-elemzéssel foglalkozó része az ISO 14040, ami az általános irányelveket foglalja magában. Az elemzés részletes előírásait az ISO 14041-49 szabványok tartalmazzák (Tamaska et al. 2001). Magyarországon az előbb említett szabványok honosítása csak részben valósult meg, ráadásul ezek érvényességét is visszavonták vagy a magyar nyelvű fordításra nem került sor.

ISO 14040-49 szabványok tartalma és érvényessége:

MSZ EN ISO 14040:2006 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Alapelvek és keretek (angol nyelvű) (MSzT);

MSZ EN ISO 14041:2001 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. A cél és a tárgy meghatározása és leltárelemzés (visszavont) (MSzT);

MSZ EN ISO 14042:2001 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Az életciklus alatti hatások értékelése (visszavont) (MSzT);

MSZ EN ISO 14043: 2001 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Az életciklus értelmezése (visszavont) (MSzT);

MSZ EN ISO 14044:2006 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Követelmények és útmutatók (angol nyelvű) (MSzT);

MSZ EN ISO 14045:2012 Környezetközpontú irányítás. Termékrendszerek ökológiai hatékonyságának értékelése. Alapelvek, követelmények és útmutató (angol nyelvű) (MSzT);

ISO 14046:2014 Környezetközpontú irányítás. Vízlábnyom. Elvek, követelmények és irányelvek (ISO);

ISO/TR 14047:2012 Környezetközpontú irányítás. Életciklus értelmezés. Szemléltető példák az ISO 14044 hatásbecslésre (ISO);

ISO/TR 14048:2002 Környezetközpontú irányítás. Életciklus értelmezés. Adatok dokumentációs formátuma (ISO);

ISO/TR 14049:2012 Környezetközpontú irányítás. Életciklus értelmezés. Szemléltető példák az ISO 14044 alkalmazására (ISO).

Életciklus-elemzés alkalmazása

Az LCA egy *döntéstámogató eszköz, amely a termékek, szolgáltatások között környezeti szempontból tesz különbséget*. Ezen felül alkalmazható a belső ipari felhasználásban a vállalati politikai döntéstámogatáshoz és stratégiai tervezéshez, a külső ipari használat során kommunikációs és marketing célokhoz, valamint a kormánypolitika meghatározásához az ökocímke és a hulladékgazdálkodás területén (Tamaska et al. 2001). Az életciklus értékelés *célja* az, hogy megmutassa, melyek azok a termékek, technológiák és szervezetek, amelyek adott szükséglet kielégítésére az adott feltételek között egységnyi időtartam alatt a lehető legkisebb környezeti terhelést adják. A környezeti hatások ismeretében lehetővé válik a kritikus pontok meghatározása, ezek lehetnek a korszerűsítés, fejlesztés kiindulópontjai, ill. rámutathatnak új technológia bevezetésének szükségére is. A vállalat az előbbi intézkedések foganatosításával eredményesen csökkentheti környezeti terhelését, így pénzt takaríthat meg, hosszú távon pedig, piaci versenyelőnyhöz juthat (Tóthné 2011). Az LCA folyamat az életciklus-értékelés alkalmazási területe, beleértve a rendszer határait és a részletességét, függ az alanytól és a tanulmány felhasználásától. Az LCA mélységét és kiterjedését jelentősen megkülönböztetheti egy egyedi LCA célja.

A különböző LCA vagy LCI tanulmányok eredményeinek összehasonlítása csak akkor lehetséges, ha minden egyes tanulmány előfeltétele és felépítése egyforma, ami csak akkor lehetséges, ha biztosított az eredmények átláthatósága. A szabvány meghatározza az életciklus-értékeléshez szükséges követelményeket és előírásokat, magában foglalva:

- az életciklus-értékelés célját és alkalmazási területét;
- az életciklus leltárelemzési szakaszát;
- az életciklus hatásának értékelő szakaszát;
- az életciklus értelmezési szakaszát;
- az életciklus bemutatását és kritikai áttekintését;
- az életciklus-értékelés korlátait;

- az életciklus-értékelés szakaszai közötti kapcsolatokat és
- az értékválasztás használatának feltételeit és lehetséges elemeit.

Mint minden módszernek, az életciklus-elemzésnek is megvannak a saját korlátjai. Ezek a következők:

- a feltételezések és az alkalmazott választások szubjektivitása (pl. a határok kijelölésének rendszere, adatforrások kiválasztása);
- a leltár adatok térbeli és időbeli dimenziójának hiánya a hatás eredményét bizonytalanná teheti;
- a potenciális hatások értékeléséhez használt modellek nem mindig állnak rendelkezésre, a bennük használt egyszerűsítések következtében nem mindig pontosak;
- az LCA globális és regionális viszonylatban jól használható, míg lokálisan kevésbé hasznos;
- az LCA hitelességét nagyban befolyásolja az adatok minősége, és hozzáférhetősége.

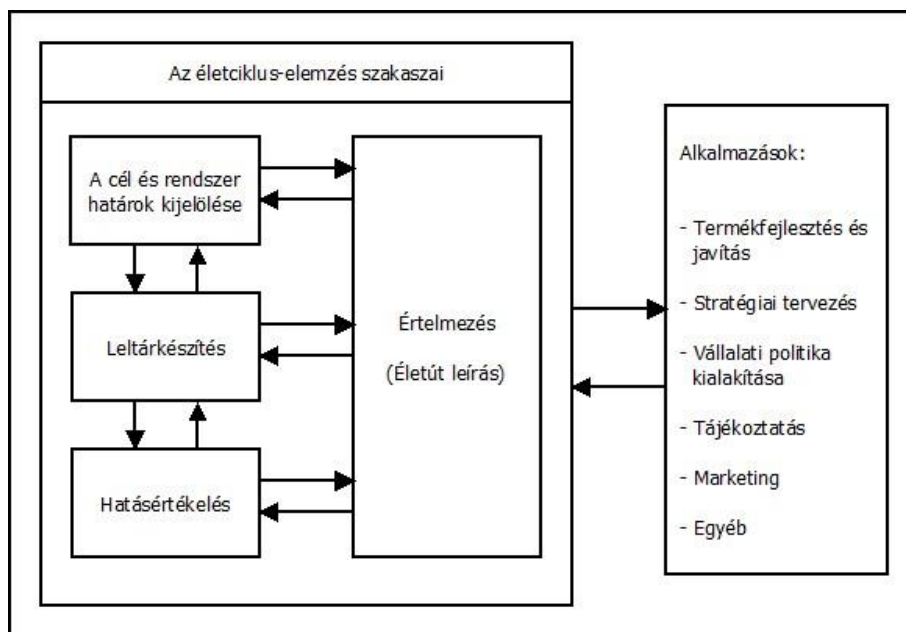
A tanulmány tárgyköre és részletessége a témától és a szándékolt felhasználástól függően változik. A különböző életciklus elemző tanulmányok nagyon különbözők lehetnek, de ennek ellenére célszerű mindig a szabványban meghatározott alapelveket követni (MSZ EN ISO 14040:2006). Az életciklus értékelés szerepe annál erősebb lesz, minél erőteljesebbé válik a társadalom környezeti érzékenysége. Azok a cégek, amelyek nem fenntartható termékeket gyártanak, 10-20 éven belül kiszorulhatnak a piacról (Tamaska et al. 2001). Nem elég azonban az életciklus-elemzést elvégezni, hanem megfelelő módon azt érthetővé is kell tenni a vállalati vezetőség, szakemberek, ill. a nyilvánosság számára, azonban sokszor még a szakemberek is hibáznak a kommunikáció során (Heijungs 2014).

Elemzés folyamatának szakaszai

Az életciklus-elemzés több szakaszból áll, ezek a hatásterület és cél meghatározása, a leltár készítés, a hatások értékelése és az eredmények értelmezése (Tamaska et al. 2001).

Az LCA első lépése a *cél és tárgy meghatározása*, amely magában foglalja a cél, a terület, a funkcióegység, a rendszerhatárok és az adatminőség meghatározását, valamint a folyamat kritikai áttekintését. Fontos, hogy a cél és terület megfogalmazása legyen egyértelmű, mert ez az elemzés eredményét döntően befolyásolja. A funkcióegység meghatározásával lehetőség nyílik más tanulmányokkal történő összehasonlításra (Tamaska et al. 2001). Az életciklus *leltárelemzési szakasza* (Life Cycle Inventory - LCI) az életciklus-értékelés második szakasza. Ez a bemeneti/kimeneti adatok jegyzéke, amely a vizsgált rendszerre vonatkozik. Ez magába foglalja a szükséges adatok összegyűjtését, amelyek a tanulmány céljaihoz kapcsolódnak. Az életciklus hatásának *értékelő szakasza* (Life Cycle Impact Assessment - LCIA) az életciklus-értékelés harmadik szakasza. Az LCIA célja, hogy biztosítsa a további információt a termelési rendszer életciklus-értékelésének a megállapításához, melynek eredményeként jobban megérthetjük a környezeti jelentőségüket. Az életciklus *értelmezése* az életciklus-értékelés folyamatának utolsó fázisa, amelyben az LCI, vagy egy LCIA eredményeit, vagy éppen mindkettőt összefoglalja és megvitatja a következtetések és javaslatok alapján, valamint segít a döntéshozatalban a célt és az alkalmazási terület meghatározását illetően.

Vannak esetek, amikor az életciklus-értékelés céljához elegendő csupán a leltár vizsgálata és az értékelés. Ezeket általában LCI tanulmánynak nevezik. Az MSZ EN ISO 14040:2006-os szabvány kétféle vizsgálatot foglal magába: az életciklus-értékelési vizsgálatokat (LCA vizsgálatok) és az életciklus leltárvizsgálatait (LCI vizsgálatok). Az LCI vizsgálatok hasonlítanak az LCA-hoz az LCIA-szakasz nélkül. Általában az LCA-, vagy LCI-vizsgálat során megszerzett információt fel lehet használni egy átfogóbb döntési folyamat részeként.



17. ábra Az életciklus-elemzés lépései (Tóthné 2008)

Az adatminőség erőteljesen befolyásolja az elemzés pontosságát. Ügyelni kell az időbeli, földrajzi és technológiai lefedettségre, továbbá fontos, hogy a felhasznált adatok megbízhatóak, teljesek, jellemzőek, az adatforrások reprezentatívak legyenek, érvényesüljön az állandóság és a reprodukálhatóság (Tamaska et al. 2001).

Mivel a termékek és folyamatok életciklus elemzését nagy érdeklődés övezi, ezért e módszernek az erdészetben és erdészeti termékekkel kapcsolatos iparban is el kell terjednie.

Környezeti lábnyomok, karbonlábnyom

A lábnyom egy kvantitatív mérőszám, az emberiség természetbe történő beavatkozásnak mértékére szolgáló mutatószám (Hoekstra 2008). Az UNEP/SETAC (2009) definíciója szerint megmutatja, hogy különböző környezeti elemeket milyen hatás éri a fenntarthatósági célok megvalósítása során. Mára már több kutatás irányul arra, hogy a különböző (ökológiai, energia, víz, karbon) lábnyomokat összehasonlítsák és együttes hatásukat, vagy a köztük levő kapcsolatot értékeljék (Galli et al., 2010; Fang et al. 2013).

A kilencvenes években a fenntartható fejlődés és a környezetterhelés mérése okán megjelent egy új fogalom, amit ökológiai lábnyomnak neveztek el (Wackernagel – Rees 1996). Az ökológiai lábnyom népszerűsége további lábnyomok bevezetését eredményezte, amelyeknél az életciklus szemlélet is

erőteljesebben megjelent, és a Föld mellett más környezeti közegek terheléséről is információt adnak. A lábnyomok számítása objektív mérésnek tekinthető, és a szabványos módszerek alkalmazásával megbízhatósága elismert.

A környezeti lábnyomok a környezeti teljesítmény mérésére és összehasonlítására szolgáló mérőszámok. Az egyes környezeti közeget ért terhelések (föld, víz, levegő, vagy éppen élővilág, beleértve magát az embert is) számszerű kimutatásával kitűnő információt szolgáltatnak részvényesek, politikusok, üzleti partnerek, konkurensok vagy civil szervezetek számára, és orientálják a piaci szereplőket. A lábnyomok külön-külön, de együttesen is a fenntarthatóság felé tett lépések jellemzésére is szolgálnak, és jó eszközei a környezeti teljesítmények benchmarkjának (Tóthné Szita 2018). A szén-dioxid-, egyszerűbben karbon-, illetve szénlábnyom az emberi tevékenység környezeti hatásának egyik mércéje. A karbonlábnyom a légszennyezettséggel és klímaváltozással hozható összefüggésbe. A karbonlábnyom megmutatja, hogy mennyi egy személy, szervezet, rendezvény vagy termék teljes – direkt és indirekt – üvegházhatású gáz (ÜHG) kibocsátása szén-dioxid egyenértékben (kg vagy tonna CO₂ eq.) kifejezve. Minél nagyobb valamilyen tevékenység vagy egyén, közösség, társadalom karbonlábnyoma, természetesen annál nagyobb a globális felmelegedést okozó hatása (Tóthné Szita 2018).

ÉLETCIKLUS ELEMZÉS ERDÉSZETI ALKALMAZÁSA

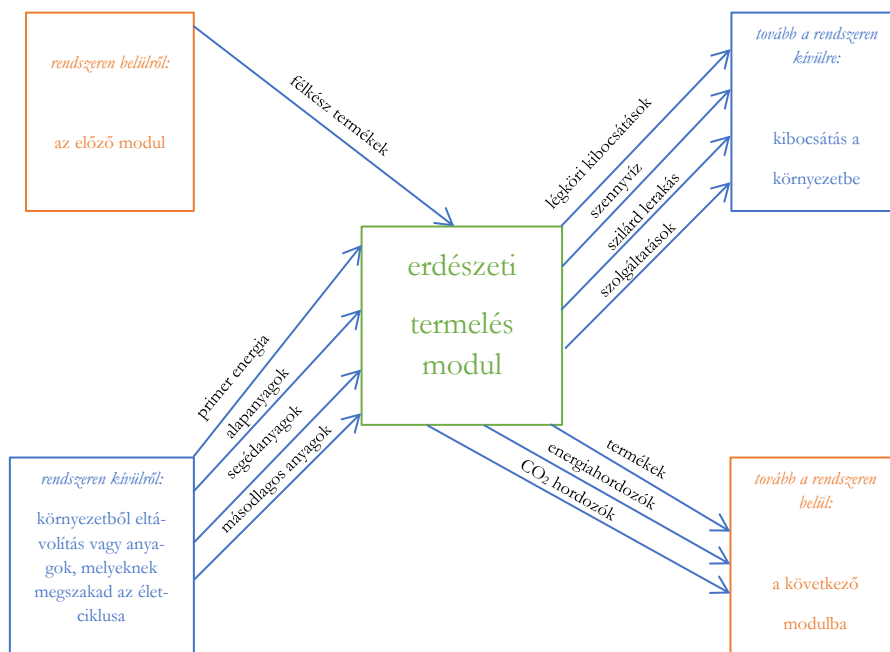
A fa, mint nyersanyag szénsemlegessége napjainkban is igazolásra szorul, megannyi tényező figyelembe vételével (Klein et al. 2015). **Az életciklus-elemzés kiváló eszköze a környezeti hatások megalapozott vizsgálatának, azonban az erdészeti alkalmazása máig kihívást jelent** az LCA szakértők számára. Az ipari ökológia gondolata az alábbi neves kutatókig nyúlik vissza: Rober Ayres (Ayres, Kneese 1969), Charles Hall (Hall et al. 1979), Howard T. Odum (Odum et al. 1977). Munkásságuk 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. 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. Az erdészet gépesítése forwarderek és vonszolók használatával teljesen átváltotta a lovas fakitermelést/közelítést közúti, tehergépkocsi szállításra.

A fatermékek életciklusának vizsgálata során végzett üvegház gáz kibocsátások elemzésén és energia számításokon alapulón Fröhwald és Wegener (1993) megállapította, hogy a faanyag az „előállítás” és „életút vége - end of life” életszakaszában helyettesíthet több olyan energiaintenzív anyagot, melyek üvegház gáz (ÜHG) lábnyoma jóval magasabb. Másrésről a fosszilis erőforrások felhasználásából származó emissziók elkerülhetők a faanyag elégetésével, annak életútja végén.

Fröhwald (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 nem változott jelentősen. Mivel a termékek és folyamatok életciklus elemzését nagy érdeklődés övezi, ezért e módszernek az erdészetben és erdészeti termékekkel kapcsolatos iparban is mindenképpen el kell terjednie (Fröhwald 1995). Heinimann (2012) nyomán kijelenthetjük, hogy **az erdészet hagyományos, megújuló nyersanyagot, mint terméket szolgáltat különböző ipari és háztartási folyamatok számára.**

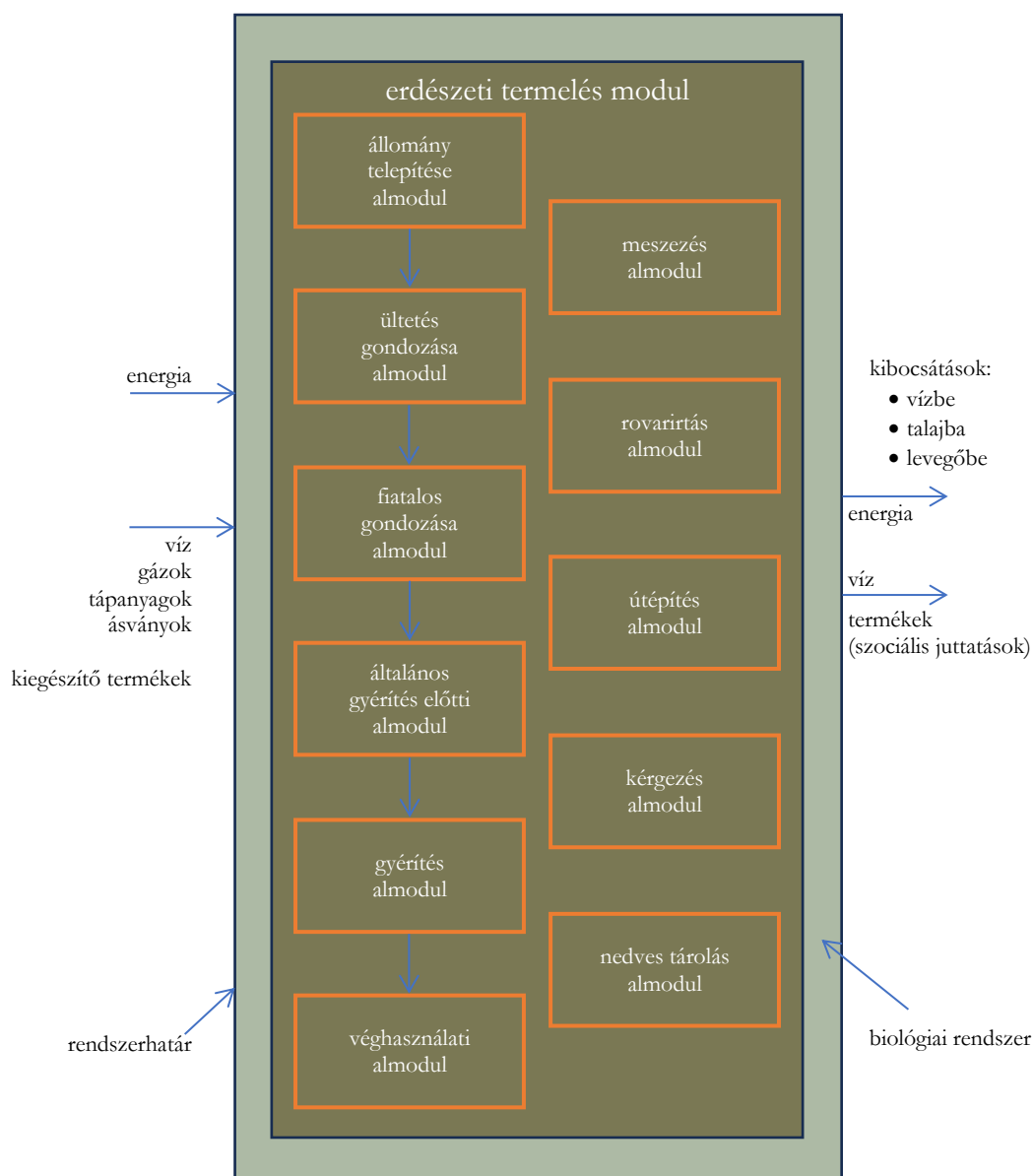
Az LCA pedig alkalmas módszer az elemzésre, mivel termékek vizsgálatára fejlesztették ki (ISO 14040:2006). A szektor LCA alkalmazása mind a külső (összehasonlító), mind a belső (hatékonyságnövelő) előnyök elérése érdekében is prioritás. Az LCA erdészeti alkalmazásának elmúlt, több mint húsz éves időszakát Heinemann (2012) és Klein et al. (2015) tekintik át munkájukban részletesen. Sandin et al. (2016) az erdészeti termékek életciklus-elemzésének specifikumait írták le.

Throe és Schweinle (1995) szerint a faipari termékek teljeskörű életciklus elemzésekor le kell fedni az erdei életút szakaszt is, mint az első lépést a „bölcsőtől a sírig” folyamatban. A fatermékek LCA-ja során a nyersanyagok beszerzésének és az erőforrások kimerülésének elemzésekor nagy figyelemmel kell lenni arra, hogy esetükben megújuló erőforrásról van szó. Az LCA ily módszertani fejlesztésére kiváló terület az erdészeti kutatás. A szerzők kialakították azt a standard erdészeti életciklus modell javaslatot, ami alapul szolgálhat az LCA erdészeti alkalmazásához (18. ábra).



18. ábra Standard erdészeti életciklus modell javaslat. Horizontális rész
(Throe, Schweinle 1995 alapján)

A modell horizontális részében meghatározták a felmerülő bemeneti/kimeneti leltáradatok körét. A modell vertikális részében 11 almodult határoztak meg (az erdőtelepítéstől a véghasználatig), melyek a német erdészeti technológiák főbb lépéseit fedik le (19. ábra). A modell integráns részeként már figyelembe veszik az erdei ökoszisztémát, mint a szén megkötésében és oxigén termelésében nagy szerepet játszó rendszert.



19. ábra Standard erdészeti életciklus modell javaslat. Vertikális rész (Thoroe, Schweinle 1995 alapján)

Életciklus elemzés: tűzifa-fosszilis tüzelőanyagok összehasonlító CO₂ kibocsátás elemzése

Jelen tanulmány szempontjából a módszertani kereteket az LCA nemzetközi szabványain (ISO 14040-44) alapuló ÜHG leltározással, az IPCC AR5 emissziós faktorok alapján kalkulált, ISO 14067 (Üvegházhatású gázok. Termékek szénlábnyma. Követelmények és irányelvek a számszerűsítéshez (ISO 14067:2018)) nemzetközi szabvány szerinti karbonlábnym kalkuláció adja.

ENERGIA NYERÉSÉRE HASZNOSÍTHATÓ FAANYAG

Energia nyerésére hasznosítható faanyag jelentős mennyiségben négy forrásból származhat:

- a hagyományos erdőgazdálkodás (állami- és magánszektorból) tűzifa választékából, amelynek elnevezése lehet lakossági tűzifa, export tűzifa, erőműi tűzifa, hosszú tűzifa, energiafa stb.;
- a fahasználatok során képződő apadék, vágástéri melléktermék, vékonyanyag, gallyanyag, tuskó stb.;
- a faanyag feldolgozása során képződő melléktermék, illetve elhasznált fatermékek;
- energetikai faültetvények faanyaga, mely többnyire apríték formában hasznosul.

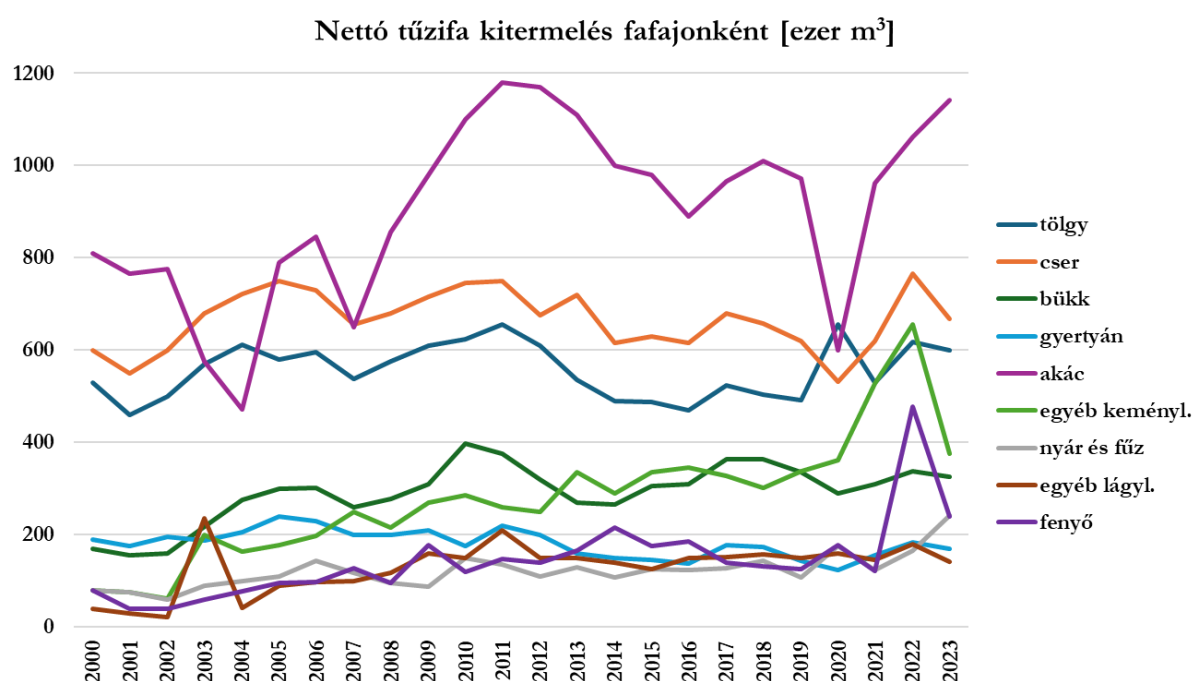
(A fás szárú biomassza alapanyagok között kell még megemlíteni a gyümölcsösökben és szőlőültetvények gondozása során képződő, energetikai célra hasznosítható faaprítékot, nyesedéket is.) Jelen kutatás elsősorban a hazánkban közel 2 millió hektáron történő erdőgazdálkodási tevékenységek során, a fakitermelési beavatkozások alkalmával képződő tűzifa választékra fókuszál.

A Nemzeti Földügyi Központ Erdészeti Főosztályának 2021. évi statisztikai adatai szerint (URL31) a magyarországi erdők élőfakészlete 403,987 millió bruttó m³, folyónövedéke 13,1 millió bruttó m³/év, a fakitermelések összesen 7,523 millió bruttó m³/év volt. Az erdőállomány élőfakészlete folyamatosan növekszik, ami a fakitermelések és a mortalitás, folyónövedékét meg nem haladó mértékéből egyértelműen következik. A magyarországi erdők faenergetikai lehetőségei a várható tűzifa mennyiségétől, valamint az erdei apadék hasznosításának lehetőségétől függenek. **2021-ben iparifa összesen 3.124.567 nettó m³, a tűzifa választék mennyisége 3.496.873 nettó m³ volt, ami a választék megoszlás tekintetében jelentős: 52,8%. Az összesített tűzifamennyiség az energetikai célú erdei apríték, a vastag tűzifa, illetve vékony tűzifa mennyiségeket tartalmazza. Energetikai célokra hasznosítható még a kitermelt tuskó mennyisége is: 3.517 nettó m³. A fakitermelések során jelentős mennyiségű úgynevezett vágástéri melléktermék, apadék képződik, amely a beavatkozásoktól, fafajtól és a termelési munkarendszertől függően a bruttó fatérfogatnak akár a 15-20%-át is jelentheti.** Amíg a megtermelt tűzifa teljes mértékben hasznosítható energia-termelésre, addig a jelentős mennyiségű várható apadéknak csak egy kisebb része juttatható el az erdőből az energiatermelés helyszínére. Ennek okai az alábbiak:

- A kéregapadék nagy része a faiparban jelenik meg, mert az erdei választékokkal együtt szállítják oda. A hasznosítható részt az egyéb faipari hulladékokkal együtt kell számba venni. Az a kevés kéreg, amely apró frakcióra törölve, a növényzettel borított erdőtalajra kerül a terepi kérgezés során, gazdaságosan nem gyűjthető össze.
- A fakitermelés során keletkező termelési apadéknak pedig csak egy töredéke hasznosítható (hajktest, törött fa, kiejtések), aminek jelentős része a faiparhoz kerül (túlméreteket, számbavételi felkerekítések miatt). A maradék összegyűjthetetlen anyag formájában (fűrészpor, apró forgács stb.) az erdőben marad.
- A vékonyfa, az 5 cm átmérő alatti ágak, gallyak, koronarészek összegyűjtése növelheti jelentősebb mértékben az energia-nyerésre átadható faanyag mennyiségét. Egyedül a főleg tarvágások formájában végrehajtott véghasználatok vékonyfa része gyűjthető össze termelékeny és hatékony módon, kb. 2/3 részben, és adható át hasznosításra, pl. erdei apríték formájában.

- A tuskó, gyökeres tuskó begyűjtése csak kevés esetben oldható meg gazdaságosan, illetve az ökológiai szempontokat is figyelembe véve. Költséges művelet, ezért csak ott indokolt az elvégzése, ahol a termőhely vagy a telepítendő célállomány igényli a teljes talajelőkészítést, forgatást, illetve az alapos mélylazítást. Évente 3–5 ezer ha területen végeznek az országban tuskókiemelést, a kiemelt tuskó hasznosítása viszont nem megoldott. A felhasználást nehezíti, hogy a tuskó sok szennyeződést, földet, homok-szemcséket tartalmazhat, amely az energetikai hasznosítás során a berendezések, kazánok tönkremeneteléhez vezethet.

Hazánkban az akác, cser (csertölgy) és tölgy (KTT – kocsánytalan tölgy, KST – kocsányos tölgy) fafajok kitermelési mennyiségei és rendszerei meghatározóak a hazai tűzifatermelés szempontjából, melyet az alábbi, 20. ábrán és a 25. táblázatban mutatunk be.



20. ábra Nettó fakitermelés tűzifa fafajonként (Forrás: Mócsényi 2023 és KSH)

25. táblázat 2021. évi nettó fakitermelés (Forrás: URL31)

Erdei fatermék	Tölgy	Cser	Bükk	Gyertyán	Akác	Egyéb ke- mény lomb	Nemes nyár	Hazai nyár	Fűz	Egyéb lág y lombos	Fenyő	Összesen
Lemezipari rönk	1.406	10	9.643	-	224	20	129.408	10.225	-	-	-	150.935
Fűrészipari rönk	151.203	11.489	126.800	3.061	64.133	27.815	445.604	93.389	1.425	23.738	226.678	1.175.336
Egyéb fűrészipari alapanyag	33.540	1.453	9.509	158	71.510	3.359	162.284	28.704	296	24.657	76.410	411.879
Bányászati faanyagok	-	5	-	-	1.006	-	-	-	-	-	-	1.012
Papírfa	2.658	4.353	5.873	725	-	1.500	63.739	73.479	56	9.021	131474	292.877
Rostfa	20.070	9.482	48.098	7.342	165	17.077	156.174	32.977	27.606	23.920	404904	747.816
Összes többi iparifa válasz- ték	11.736	2.166	3.253	278	103.162	8.412	96.758	21.866	45	598	25827	274.100
Ipari célú erdei apríték és ap- ríték alapanyag	2.189	950	870	129	7.679	47.092	685	6.530	-	-	4489	70.612
<i>Iparifa összesen</i>	<i>222.800</i>	<i>29.907</i>	<i>204.045</i>	<i>11.693</i>	<i>247.880</i>	<i>105.274</i>	<i>1.054.651</i>	<i>267.171</i>	<i>29.429</i>	<i>81.934</i>	<i>869782</i>	<i>312.4567</i>
Energetikai célú erdei aprí- ték	16.212	20.572	10.210	8.796	43.947	70.865	6.798	4.109	803	16.072	38530	236.914
Vastag tűzifa tömör köbmé- terben	468.462	567.168	286.789	138.215	787.605	407.574	44.345	44.346	7.334	113.723	64399	2.929.958
Vékony tűzifa tömör köbmé- terben	45.026	31.944	13.071	9.471	130.790	48.466	5.965	8.785	801	16.241	19442	330.001
<i>Tűzifa összesen (tuskó nél- kül)</i>	<i>529.700</i>	<i>619.684</i>	<i>310.069</i>	<i>156.481</i>	<i>962.341</i>	<i>526.905</i>	<i>57.108</i>	<i>57.239</i>	<i>8.938</i>	<i>146.036</i>	<i>122372</i>	<i>3.496.873</i>
Vágáslap feletti nettó fakiter- melés összesen	752.500	649.591	514.115	168.174	1.210.221	632.178	1.111.759	324.410	38.367	227.970	992154	6.621.440
Tuskó	356	328	38	13	510	636	255	29	-	24	1328	3.517

A kutatás során célul tűztük ki a hazai faalapú biomassza, pontosabban a dendromassza (azon belül a tűzifa/faapríték) energetikai célú hasznosításának összehasonlító karbonlábnyom kalkulációjának elvégzését életciklus-elemzéssel támogatva (comparative LCA).

Az összehasonlítás alapja a hőenergia előállítás és a különböző tűzifa bázisú (pl. kályhakész tűzifa vagy faapríték) tüzelőberendezések voltak, illetve bizonyos rendszerhatárok között a földgáz alapú hőenergia termelést is bevontuk az elemzésbe.

A tanulmányban akác, **cser (csertölggy)** és tölgy (KTT, KST) fafajok kitermelési rendszereivel foglalkoztunk, mivel ezek a meghatározóak a hazai tűzifatermelés szempontjából. **Itt a cser fafaj kitermelésével foglalkozunk részletesen. Tudjuk, hogy tuskózást akác esetében alkalmaznak, de a fafajok közötti különbségre visszavezethető esetleges különbségek kimutatása érdekében mindhárom esetben ugyanolyan műveletekkel számoltunk, így cser esetében is belevettük a számításba. Mivel a valóságban a tuskózás nem jellemző cser felújítás során, a cser tűzifa egyenlege ennyivel még kedvezőbb lesz. Tekinthetjük ezt a lehető legrosszabb forgatókönyvnek.**



Az elsődleges cél a hazai helyzetértékelés volt. A tanulmány nem terjed ki bármely más szempontú, különböző forgatókönyvek analízisére. Az összehasonlító környezeti életciklus-elemzés (LCA) esetén a tanulmányban célzottan a karbonlábnyom meghatározására alkalmas hatáskategóriákra fókuszáltunk. Jelen célzott kutatás *nem* terjed ki a további környezeti hatáskategóriák (mint pl. a savasodás, eutrofizáció, humántoxicitás, ózonréteg vékonyodás, fotokémiai ózonképződés stb.) indikátor eredményeinek vizsgálatára. Ennek elemzése további, jövőbeli kutatásokat igényel.

Rendszerhatárok

Az életciklus szemlélet alkalmazása révén a hasznos hő előállításához szükséges életút szakaszokat vizsgáltuk meg tűzifa és földgáz tüzelőanyagok esetében.

A tűzifa életút szakaszok esetében a „bölcsőtől a sírig” (cradle to grave) szemléletben vettük számba az egyes műveleti lépéseket akác, cser és tölgy (KTT és KST) állományokban, melyek konszekutív módon járulnak hozzá a végtermék, vagyis a hasznos hőenergia létrehozásához. A „bölcsőtől a sírig” rendszerhatárokon belül két markánsan elkülönülő terület körvonalazódik, melyek:

- a „bölcsőtől a kapuig” (cradle to gate) az erdészeti technológiákat, majd
- a „kaputól a sírig” (gate to grave) a tüzelőberendezésekben zajló hasznos hőenergia előállítását célzó tevékenységeket foglalják magukba.

Első lépésben a vizsgálati területen (Magyarország) jellemző erdészeti technológiák feltárására és kiválasztására volt szükség. A csemetekerti műveletek feltárása *nem* tartozik jelen tanulmány rendszerhatárai közé. Klein et al (2015) nyomán a „bölcsőtől az erdei útig” (cradle to gate) tártuk fel a műveleteket: a területen azonosítottuk az erdőtelepítés (mesterséges és természetes felújítás), ápolás, fatermesztés, fakitermelés, fahasználat (elő- és véghasználatok) és fafeldolgozás (tüzelőanyagelőkészítés: kályhakész tűzifa vagy faapríték) moduljait. Ezáltal lefedtük az erdőterületen jellemző elsődleges (kötelező) fő; és a másodlagos (fakultatív) segédfolyamatokat is. Figyelembe vettük a munkagépek közötti közlekedésével és a nyersfa termékek szállításával kapcsolatos tevékenységeket is.

Klein et al (2015) szerinti besorolásban így LCA tanulmányunk a „teljes rotációs megközelítésű” (whole rotation approach) kategóriába tartozik (figyelembe veszi a teljes erdei rendszert, beleértve az állomány minden korosztályát, minden folyamatát a teljes időszakra), mely részeiben és egészében kiváló megközelítés a karbonlábnym (Global Warming Potential – GWP) értékek meghatározására. Az elemzésbe a megbízható adatok hiánya miatt **nem** vontuk be a technológiákhoz szükséges gépek és eszközök előállításának környezeti paramétereit, az erdei utak vagy a földgáz vezetékek építésének hatásait, a földgáz mozgását és a földhasználat változásait.

Második lépésben a hasznos hő előállításához szükséges tüzelőberendezések kiválasztása történt meg; kizárólag lakossági és fűtőművi szinteket vizsgáltunk.

Mesterséges felújítás esetén a jellemző műveletek:

- Erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel *(még egyszer kiemelve: csak akác esetében, ott sem minden esetben alkalmazott eljárás; az összehasonlítás kedvéért mindhárom fajfajcsoportban vizsgáltuk, mintegy legrosszabb forgatókönyvet)*
 - Tuskókiemelés
 - Tuskóletolás
 - Mélyforgatás, egyidejű, barázdába történő ültetéssel
- Erdősítés gépi ápolása
 - Gépi sorköz ápolás az 1. évben
 - Gépi sorköz ápolás a 2. évben

Fafajonként (akác, cser és tölgy) és fahasználati módonként megtörtént a fakitermelési munkarendszer, technológia leírása, illetve az elvégzendő munkaműveletek modulok (almodulok) szerinti rendezése:

- 1. életszakasz: tisztító vágás (IT);
- 2. életszakasz: törzskiválasztó gyérítés (TKGY);
- 3. életszakasz: növedékfokozó gyérítés (NFGY) és
- 4. életszakasz: véghasználat (VH) ezen belül a vizsgált fafajok esetében tarvágás (TRV).

Referenciaáram: Életút szakaszonként változó. Területhasználati megközelítésben a jellemző kidöntendő állófa (m^3/ha) mennyisége különböző, amit az állomány kora (év) is befolyásol. Mennyiségi megközelítésben 100 m^3 kidöntött állófára vonatkoztatva különböző nagyságú területek jellemzik az egyes életút szakaszokat ($\text{ha}/100 \text{ m}^3$).

Hazánkban zajló fakitermelést rendkívül változatosan lehet végrehajtani az állomány adottságainak, földrajzi tulajdonságainak és a rendelkezésre álló gépek tekintetben. A jelen kutatásban vizsgált fafajok esetében valamennyi fakitermelési munkarendszer alkalmazható (teljesfás, hosszúfás, rövidfás, aprítéktermelési stb.) lenne. Közelítés tekintetében is figyelembe vett forwarderen, csörlős és markolós vonszolon kívül további gépek is (pl. szorítószámolyos vonszoló,

kötélpálya stb.) alkalmazhatók lennének. További modulok tekintetében is számos megoldás, gép létezik. A kutatás során **a Magyarországon leginkább alkalmazott megoldásokat** vettük alapul.

A lakossági tűzifa felhasználáshoz kapcsolódóan 4+2 esetet vizsgáltunk meg:

- a hagyományos kandallót/kályhát,
- korszerű kandallót,
- hagyományosnak mondható, de égéslevegőt nem ventilátorral szabályozott módon biztosító kazánt, valamint
- egy korszerű faelgázosító kazánt vizsgáltunk.
- Továbbá elemeztük a "Közütemi központi tüzelőberendezések, rendszerint: $> 140 \leq 1000$ kWth" és a
- "Nagyobb fűtőmű 1 MWth felett (közepes méretű erőmű kategória)" eseteket is.

A tüzelőberendezésekben tiszta, nem szennyezett, erdőről kitermelt tűzifát, illetve aprítékot vettünk figyelembe. Egy, az irodalmak által átlagosnak mondható elemi összetételű faalapú tüzelőanyagot vettünk figyelembe olyan helyeken, ahol számításra volt szükség.

Földgáz tüzelés esetében is ki kellett alakítanunk a rendszerhatárokat.

Figyelembe vettük a hazai földgáz mix validált öko-profiljához tartozó környezeti hatásokat és a releváns tüzelőberendezések emisszióit. Földgáz tüzelőberendezések esetében vizsgáltuk (földgáz tüzeléstől a hőenergia kilépő ágáig):

- egyedi lakossági tüzelőberendezés esetén: Biasi M260.2025 SM/T kondenzációs gázkazán, RinNova Eco kondenzációs gázkazán és az EOLO Mythos, 24 kW gázkazán műszaki adatait, valamint a
- földgáz alapú fűtőművi forróvíz és gőztermelést (távhő).

Megjegyzés: a hőenergia kilépő ágát követő technológiai lépcsők megegyeznek a többi távhőszolgáltató rendszerrel. A villamos segédenergia előállításának háttérhatásait is figyelembe vettük. **Fentiek alapján a kapcsolódó életciklusok közötti feltételezések és modellezési választások következetessége és szimmetriája biztosított.**

Funkcióegység

A leltárkészítés során az összegyűjtött adatokat a vizsgált termék vagy rendszer funkcióegységére vonatkoztatva kell megadnunk, ehhez legtöbb esetben átszámítási műveletekre is szükség van. A leltárkészítés ezen felül is több kiegészítő műveletet igényel (Tóthné 2008).

Tanulmányunkban az összehasonlító környezeti életciklus elemzés során meg kellett határozunk azt a konszekutív modulokon átívelő vonatkoztatási egységet, amely alkalmas arra, hogy az egymást követő erdészeti technológiák és különböző tüzelőberendezések során egységes szemléletben és a legmegfelelőbb mértékben fejezhessük ki a karbonlábnyom értékeket. Ezért **funkcióegységnek:**

a különböző tüzelőberendezésekben egységesen előállított 1 MJ hasznos hőenergiát választottuk, amihez átszámításokkal (tüzelőanyag fűtőértéke alapján) hozzá tudtuk rendelni az erdészeti technológiák során szükséges energetikai célra felhasználandó faanyag mennyiségét, a kizárólag e tűzifa mennyiséghez tapadó karbonlábnyommal együtt. A funkcióegység alapján az 1 MJ hasznos hőenergia előállításához szükséges mennyiségű tűzifa létrehozásából és a tüzelőberendezések működéséből adódó karbonlábnyomok összessége adja a teljes karbonlábnyom értéket.

Földrajzi hatókör

Az erdészeti technológiák esetén a felhasznált adatok földrajzi érvényessége hazai, országos. Dendromassza alapú tüzelőberendezések esetén a számítások/mérnöki becslések során felhasznált adatoknál előnyben részesítettük a hazai értékeket, de az európai értékek is relevánsak, mivel a jelenleg támogatandó korszerű tüzeléstechnikában és a tűzifa elemi összetételének vonatkozásában nagy különbségek nincsenek. Földgáz tüzelőberendezések és földgáz mix tekintetében hazai hatókört rögzítettünk.

Időbeli lehatárolás

A felhasznált adatok jellemzően 2020/2021 téli időszakából származnak.

Az „End of life” – „életút vége” szakasz kezelése

Ez a tanulmány nem tartalmazza az „életút vége” (EoL – 'End of life') forgatókönyvek elemzését (pl. fahamu, szennyvíz kezelése).

Hatáskategóriák és hatásértékelési módszerek

Az LCA elvégzésére alkalmazott módszertan megfelel az ISO 14040:2006 és ISO 14044: 2006 szabványok követelményeinek. Az elemzés a GaBi Professional (Sphera/GaBi Thinkstep) szoftverrel készült, ahol a karbonlábnyom értékeket az 'IPCC AR5 GWP100' módszertan szerint határoztuk meg (URL35).

Általános feltételezések és kizárások alkalmazása

Jelen kutatás nem terjed ki a további környezeti hatáskategóriák (mint pl. a savasodás, eutrofizáció, humántoxicitás, ózonréteg vékonyodás, fotokémiai ózonnépződés stb.) indikátor eredményeinek vizsgálatára. A csemetekerti műveletek feltárása nem tartozik jelen tanulmány rendszerhatárai közé. Az elemzésbe nem vontuk be a technológiákhoz szükséges gépek és eszközök előállításának környezeti paramétereit, az erdei utak vagy a földgáz vezetékek építésének hatásait, a földgáz mozgását, elosztását és a földhasználat változását. Az elsődleges cél a hazai helyzetértékelés volt. A tanulmány nem terjed ki bármely más szempontú (pl. technológiai változtatások, energiamix változásai), különböző forgatókönyvek analízisére. Fentiek elemzése további, jövőbeli kutatásokat igényel.

Normalizálás és súlyozás alkalmazása

Az ISO 14040 szerint a normalizálás és a súlyozás nem kötelező része az életciklus-hatásvizsgálati eljárásnak. Ebben a tanulmányban ezért ezeket nem vettük figyelembe.

LELTÁRELEMZÉS SZAKASZA

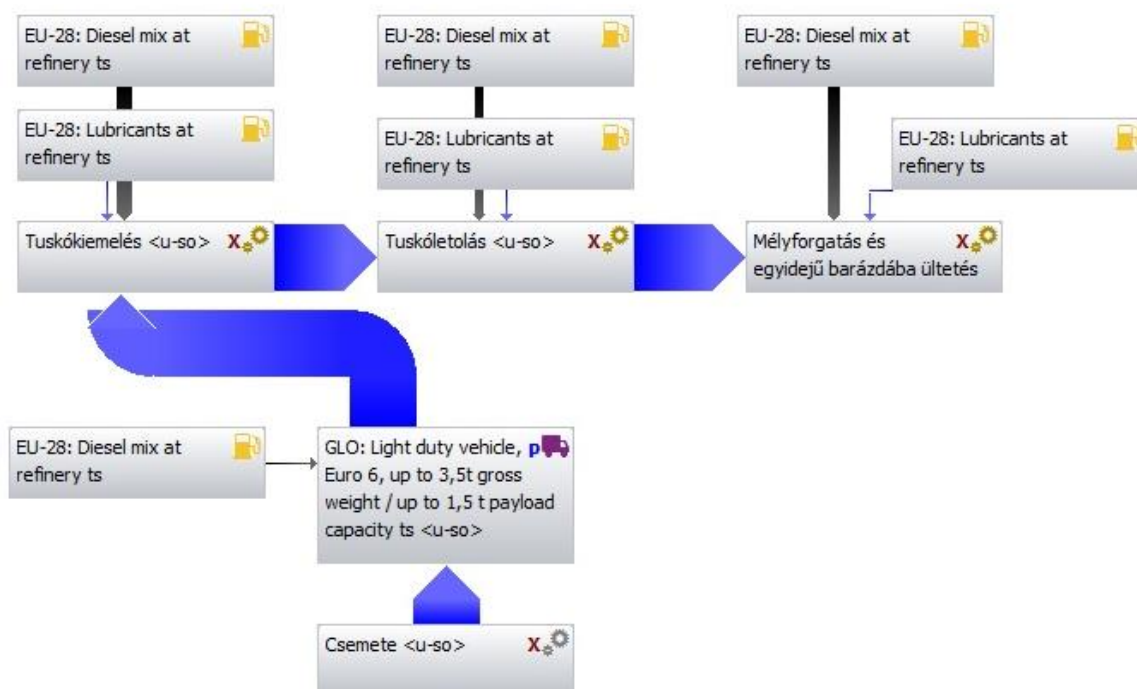
A leltárkészítés során a bemeneti (input) és kimeneti (output) adatok számszerű analízisét végezzük el adatgyűjtési és számítási eljárások segítségével. Az adatok az erőforrások kiaknázását, levegőbe, vízbe, talajba való kibocsátásokat foglalják magukba (Tamaska et al. 2001). Ebben a lépésben a szükséges adatokat és információkat különböző forrásokból gyűjtjük össze, melyek az alábbiak szerint osztályozhatók:

- Elsődleges, avagy primer adatok: közvetlenül egy szervezet által gyűjtött/mért adatok; pl. nyersanyagigény, energia (villamos energia, földgáz stb.), hulladékok (kibocsátások, valamint szilárd hulladékok) egy adott folyamat vagy termék be- és kimenetei. Az adatokat a téma szakértői, például anyag- és termékmérnökök, kutatási és fejlesztési menedzserek vagy LCA-szakértők gyűjtik és kezelik.
- Másodlagos, avagy szekunder adatok: publikációkból, tudományos irodalomból, statisztikákból és LCI adatbázisokból gyűjtött adatok.

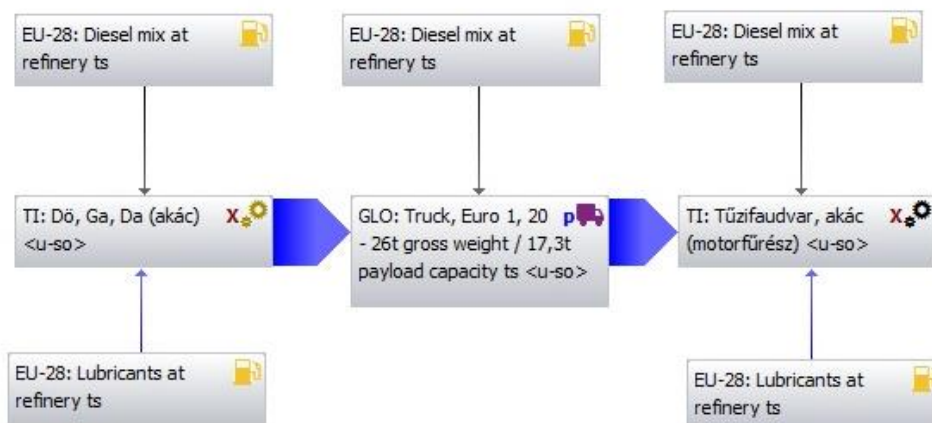
TERMÉKRENDSZEREK ÉS FOLYAMATÁBRÁK

Az alábbiakban a GaBi Professional LCA szoftverrel készült LCA modelleket mutatjuk be, ahol ez látványosabb (elsősorban a fahasználat anyag- és energiaáramai esetén). Az egyszerű LCA modellek esetében a bemutatástól eltekintünk (mivel itt a modell csak bemeneti és kimeneti táblákra, valamint kapcsolódó háttérfolyamatokra korlátozódik). Az életciklus modellek az adott modulban jól bemutatják a figyelembe vett rendszerhatárokat és az elemzés kereteit. Ezek eredője adja a teljes kutatási tanulmány rendszerhatárait.

Az ábrákon (21-27. ábra) demonstráljuk, hogy az LCA során a fő (primer adatokon nyugvó) folyamatok mellett a leltárelemzés fejezetben bemutatott (szekunder adatokon nyugvó) háttérfolyamatokat is megvizsgáltuk. Ezáltal komplex képet kaphattunk a vizsgált életciklus szakaszok rendszerhatárokon belüli átfogó környezeti hatásairól (együttesen a közvetlen – 'site effects' és háttérhatások – 'background effects' szerint). **Az összehasonlító életciklus-elemzés csak azonos funkcionális egység és azonos rendszerhatárok alkalmazásával volt lehetséges.**

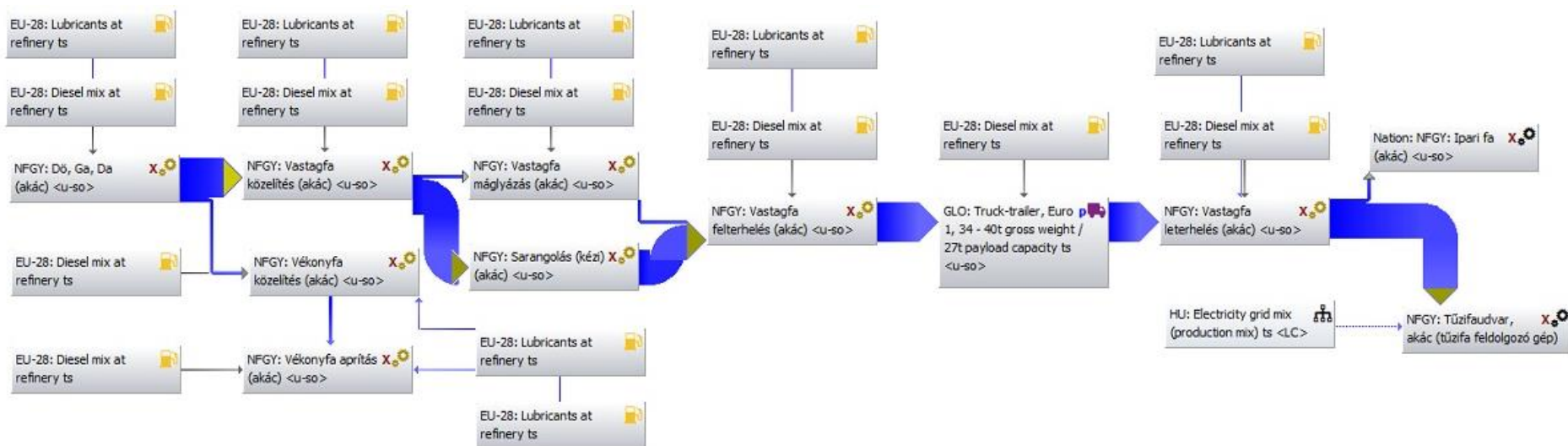


21. ábra Életciklus modell: Erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel



22. ábra Életciklus modell: Tisztítás (akác) (cser és tölgy esetében is értelmezhető)

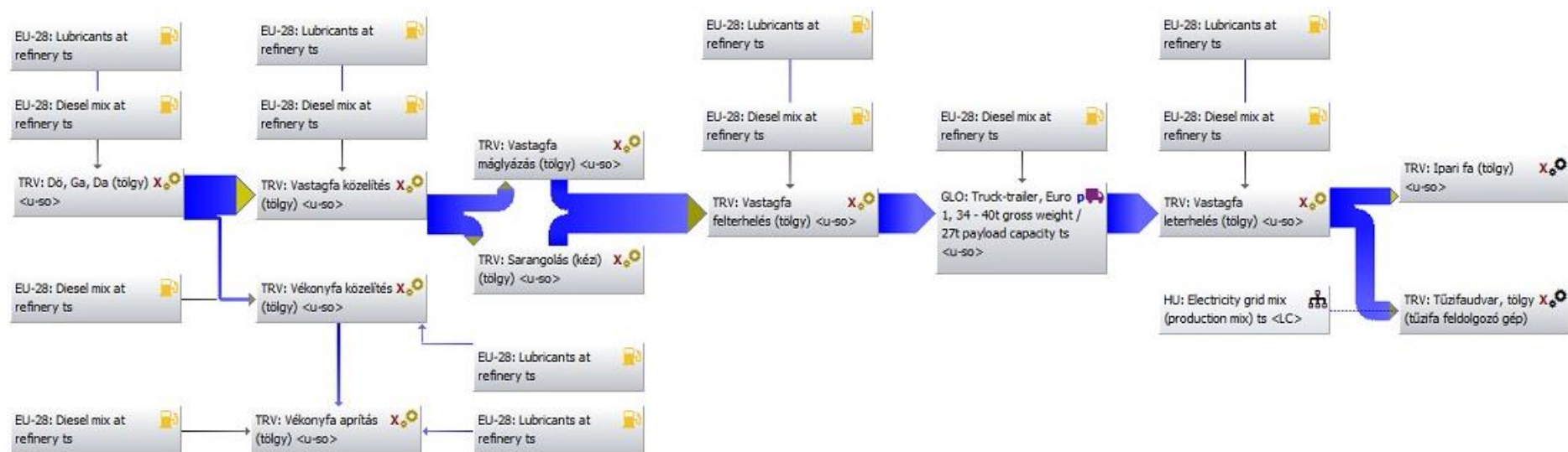




25. ábra Életciklus modell: Növedéfköszítő gyérítés (akác) (cser és tölgy esetében is értelmezhető)



26. ábra Életciklus modell: Véghasználat, tarvágás (akác) (cser esetében is értelmezhető)



27. ábra Életciklus modell: Véghasználat, tarvágás (tölgy)

ÉLETCIKLUS HATÁSÉRTÉKELÉSI SZAKASZ

Az LCA következő lépése a hatásértékelés, ahol először hatáskategóriákhoz kell hozzárendelni a leltáradatokat. A hatásértékelés célja a potenciális környezeti hatások jelentőségének értékelése, amelyhez a leltárelemzés során kapott eredményeket használja fel (Tamaska et al. 2001).

Tanulmányunkban az IPCC AR5 GWP 100 years (kg CO₂ eq.)* értékeket vettük figyelembe a karbonlábnyom meghatározásakor. Az IPCC AR5 a két változatban futtatható: az első szcenárió kizárja (excl.) a biogén eredetű CO₂-t (más néven biogén széntartalmat), a második pedig magában foglalja (incl.) a biogén eredetű CO₂-t. Esetünkben a faanyag elégetése teljes mértékben karbonsemleges, mely az 1. szcenáriót jelenti számunkra (excl biogenic carbon), ellenkező eset a 2. szcenárió (incl biogenic carbon).

Ezek alakulását vizsgáltuk a funkcióegység tekintetében a különböző tüzelőberendezések esetében. Ahol értelmezhető volt, ott többféle bemeneti tűzifa alternatívával (kályhakész tűzifa vastagfából, faapríték vastagfából, faapríték vékonyfából) is dolgoztunk.

Fő folyamatok karbonlábnyomának alakulása

Az alábbi táblázatban és a jobb átláthatóság érdekében a következő ábrán bemutatjuk azt az összeítést, amely a különböző lakossági és fűtőmű szintű tüzelőberendezések és alkalmazott tüzelőanyag (tűzifa és földgáz) esetében mutatja be a karbonlábnyom alakulását a funkcióegységre vonatkoztatva (1 MJ hasznos hő előállítása). **Az ábrák és a kiértékelés a cser állományból származó tűzifát veszi alapul. Ehhez teljes mértékben hasonló trendek voltak megfigyelhetők akác és tölgy (KTT, KST) vonatkozásában is. Utóbbiak ismétlődő bemutatásától ezért eltekintünk.**

26. táblázat 1 MJ hasznos hőenergia előállításának karbonlábnyma (incl. (I) és excl. (E) biogenic carbon) különböző tüzelőberendezésekben. Tüzelőanyag: *cser tüzifa*, (rendszerhatárok: incl.: természetes felújítás, fahasználat terepi műveletei és tüzelőberendezés; excl.: munkagépek közötti közlekedése és tüzifa szállítása).

TRV = tarvágás; NFGY = növedékfokozó gyérités; TKGY = törzskiválasztó gyérités; TI = tisztítás

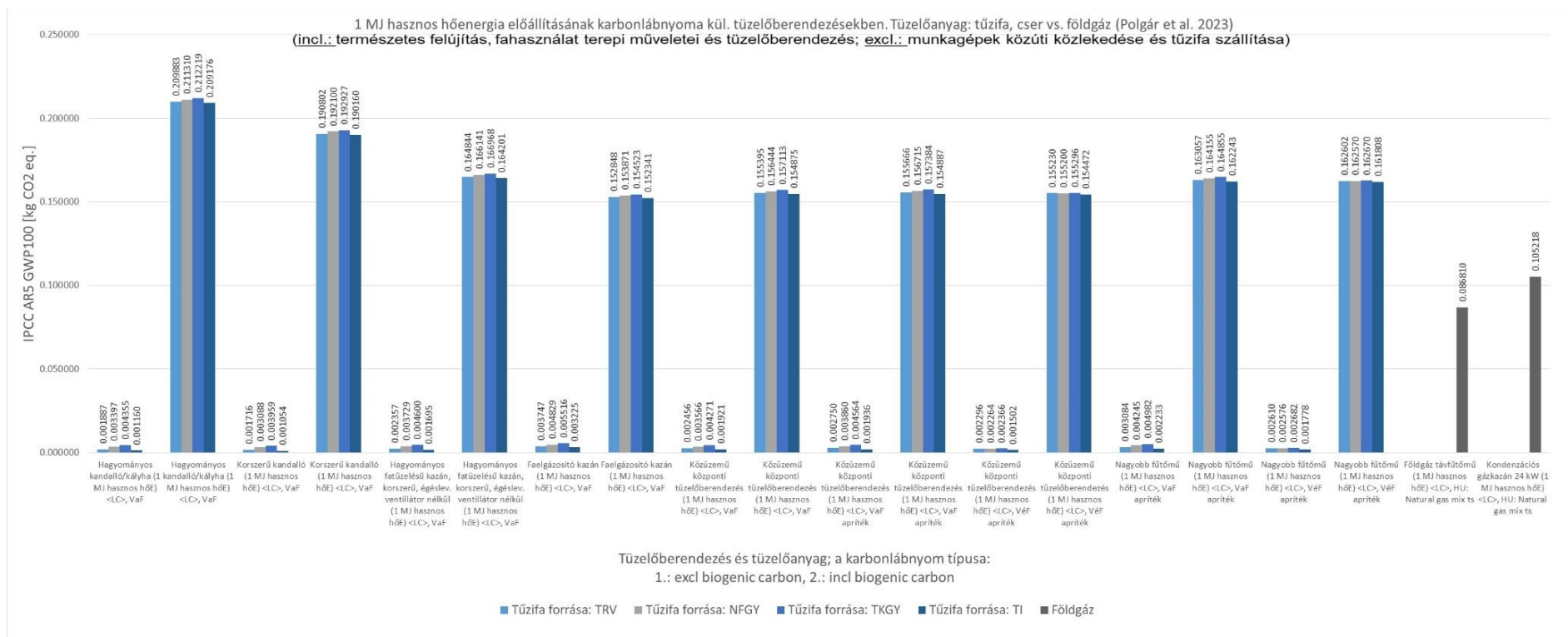
Funkcióegység: 1 MJ hasznos hőE	Tüzifa for-rása	TRV	TRV	TRV	NFGY	NFGY	NFGY	TKGY	TKGY	TKGY	TI	TI	TI
Tüzelőberendezés (cser)	IPCC AR5 GWP100 [kg CO ₂ eq.]	Back-gro-und	Site	Sum	Back-ground	Site	Sum	Back-gro-und	Site	Sum	Back-gro-und	Site	Sum
Hagyományos kandalló/kályha, VaF	E ^a	0.000513	0.001374	0.001887	0.000785	0.002612	0.003397	0.000963	0.003392	0.004355	0.000311	0.000848	0.001160
Hagyományos kandalló/kályha, VaF	I ^b	0.000428	0.209455	0.209883	0.000624	0.210686	0.211310	0.000753	0.211466	0.212219	0.000255	0.208921	0.209176
Korszerű kandalló, VaF	E	0.000466	0.001249	0.001716	0.000714	0.002374	0.003088	0.000875	0.003084	0.003959	0.000283	0.000771	0.001054
Korszerű kandalló, VaF	I	0.000389	0.190413	0.190802	0.000567	0.191532	0.192100	0.000685	0.192242	0.192927	0.000232	0.189928	0.190160
Hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű, égéslev. ventilátor nélkül, VaF	E	0.001108	0.001249	0.002357	0.001355	0.002374	0.003729	0.001516	0.003084	0.004600	0.000924	0.000771	0.001695
Hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű, égéslev. ventilátor nélkül, VaF	I	0.001031	0.163813	0.164844	0.001209	0.164932	0.166141	0.001326	0.165642	0.166968	0.000874	0.163328	0.164201
Faellgázosító kazán, VaF	E	0.002762	0.000985	0.003747	0.002957	0.001872	0.004829	0.003084	0.002432	0.005516	0.002617	0.000608	0.003225
Faellgázosító kazán, VaF	I	0.002701	0.150147	0.152848	0.002842	0.151029	0.153871	0.002935	0.151589	0.154523	0.002578	0.149764	0.152341
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF	E	0.001446	0.001011	0.002456	0.001646	0.001920	0.003566	0.001777	0.002494	0.004271	0.001298	0.000624	0.001921
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF	I	0.001384	0.154011	0.155395	0.001528	0.154916	0.156444	0.001623	0.155490	0.157113	0.001257	0.153619	0.154875
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF apríték	E	0.001369	0.001381	0.002750	0.001570	0.002291	0.003860	0.001700	0.002864	0.004564	0.001267	0.000669	0.001936
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF apríték	I	0.001284	0.154381	0.155666	0.001428	0.155287	0.156715	0.001524	0.155860	0.157384	0.001223	0.153664	0.154887
Közüzemű központi tüzelőberendezés, Véf apríték	E	0.001283	0.001014	0.002296	0.001278	0.000986	0.002264	0.001292	0.001073	0.002366	0.001156	0.000345	0.001502
Közüzemű központi tüzelőberendezés, Véf apríték	I	0.001221	0.154010	0.155230	0.001218	0.153982	0.155200	0.001227	0.154069	0.155296	0.001132	0.153340	0.154472
Nagyobb fűtőmű, VaF apríték	E	0.001640	0.001444	0.003084	0.001849	0.002396	0.004245	0.001986	0.002997	0.004982	0.001533	0.000700	0.002233
Nagyobb fűtőmű, VaF apríték	I	0.001551	0.161506	0.163057	0.001701	0.162453	0.164155	0.001801	0.163054	0.164855	0.001486	0.160756	0.162243
Nagyobb fűtőmű, Véf apríték	E	0.001549	0.001060	0.002610	0.001545	0.001032	0.002576	0.001559	0.001123	0.002682	0.001417	0.000361	0.001778
Nagyobb fűtőmű, Véf apríték	I	0.001484	0.161117	0.162602	0.001481	0.161089	0.162570	0.001490	0.161180	0.162670	0.001391	0.160417	0.161808

^a E = excluding biogenic carbon

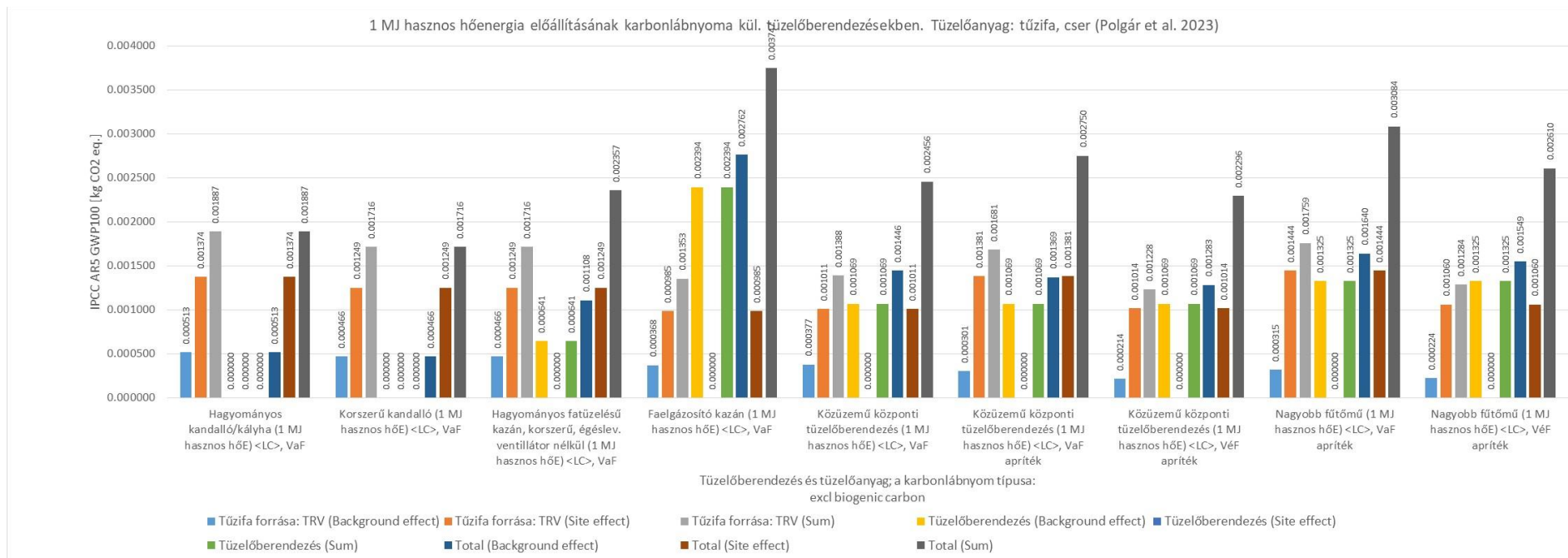
^b I = including biogenic carbon

27. táblázat 1 MJ hasznos hőenergia előállításának karbonlábnyma (incl és excl biogenic carbon) különböző tüzelőberendezésekben. Tüzelőanyag: földgáz (rendszerhatárok: incl.: HU: Natural gas mix, égetés tüzelőberendezés; excl.: földgáz elosztás és műveletei)

Funkcióegység: 1 MJ hasznos hőE	IPCC AR5 GWP100 [kg CO2 eq.]	Background	Site	Sum
Tüzelőberendezés				
Földgáz távfűtőmű, HU: Natural gas mix ts	excl biogenic carbon	0.019815	0.066995	0.086810
Földgáz távfűtőmű, HU: Natural gas mix ts	incl biogenic carbon	0.019791	0.066995	0.086787
Kondenzációs gázkazán 24 kW, HU: Natural gas mix ts	excl biogenic carbon	0.015418	0.089800	0.105218
Kondenzációs gázkazán 24 kW, HU: Natural gas mix ts	incl biogenic carbon	0.015396	0.089800	0.105196



28. ábra 1 MJ hasznos hőenergia előállításának karbonlábnyma (incl és excl biogenic carbon) különböző tüzelőberendezésekben. Tüzelőanyag: tűzifa, cser vs. földgáz (rendszerhatárok: incl.: természetes felújítás, fahasználat terepi műveletei, HU: Natural gas mix és tüzelőberendezés; excl.: munkagépek közötti közlekedése, tűzifa szállítása és földgáz elosztás műveletei). TRV = tarvágás; NFGY = növedékköszvény; TKGY = törzskiválasztó gyérítés; TI = tisztítás



29. ábra 1 MJ hasznos hőenergia előállításának karbonlábnyma (excl biogenic carbon) különböző tüzelőberendezésekben. Tüzelőanyag: tűzifa, cser (tarvágás)

A faanyag elégeése teljes mértékben karbonsemleges (excl biogenic carbon), ezért:

- az 1 MJ hasznos hőenergia megtermelése dendromassza alapon lakossági és fűtőművi szinteken is töredék mértékű karbonlábnyommal jár, mint az ugyanilyen földgáz alternatívák vonatkozásában.
- Vagyis az egységnyi energiatartalom megtermelése fenntartható módon történhet meg a fatüzelés előnyben részesítésével a földgázzal szemben:
 - lakossági esetben két nagyságrenddel kisebb,
 - míg fűtőművi szinten egy nagyságrenddel kisebb a dendromassza tüzelés karbonlábnyoma.

A karbonlábnyom értékek ebben az esetben kizárólag a fakitermelés és az elégetés során a faanyaghoz tapadó fosszilis eredetű CO₂-ból adódnak.

A teljes szummázott (Total) tüzelőberendezés karbonlábnyomok alapján a következő növekvő rangsorolás (legkedvezőbb elől) állapítható meg, melyben a villamos segédenergia (magyar energiamix) karbonlábnyoma meghatározó szerepet játszik: **korszerű kandalló – hagyományos kandalló/kályha – közüzemi központi tüzelőberendezés vékonyfa aprítékkal – nagyobb fűtőmű vékonyfa aprítékkal – hagyományos fatüzelésű kazán – közüzemi központi tüzelőberendezés vastagfával – közüzemi központi tüzelőberendezés vastagfa aprítékkal – nagyobb fűtőmű vastagfa aprítékkal – faelgázosító kazán.**

*(Megj.: amennyiben egy faelgázosító kazán olyan épületbe kerül telepítésre, ahol a villamos energia előállítását nap-
elemek végzik, úgy ezen berendezések minden tekintetben várhatóan az első helyre kerülnek a lakossági tüzelés rangsorában.)*

HATÁSERTELMEZÉS SZAKASZA ÉS KÖVETKEZTETÉSEK

Az eredmények értelmezése képezi az életciklus-elemzés utolsó lépését. Itt valósulnak meg a leltár-elemzési és/vagy a hatásértékelési fázisok eredményein alapuló következtetések, ajánlások és az összefoglaló jelentés megfogalmazása (MSZ EN ISO 14043:2001).

Fő folyamatok és segédfolyamatok együttes karbonlábnyomának alakulása

A határértékelés eredményeinek kiegészítésére számításokat végeztünk a fakitermelés segédfolyamatait, logisztikai rendszereit is figyelembe véve. Szükséges volt látni azt, hogy az eddigi rendszerhatárokat szélesítő segédfolyamatok miként befolyásolják a dendromassza alapú energiatermelés karbonlábnyomát (kizárólag a tűzifa mennyiségéhez tapadó további karbonlábnyom értékekkel).

Az addicionális segédfolyamatok a következők:

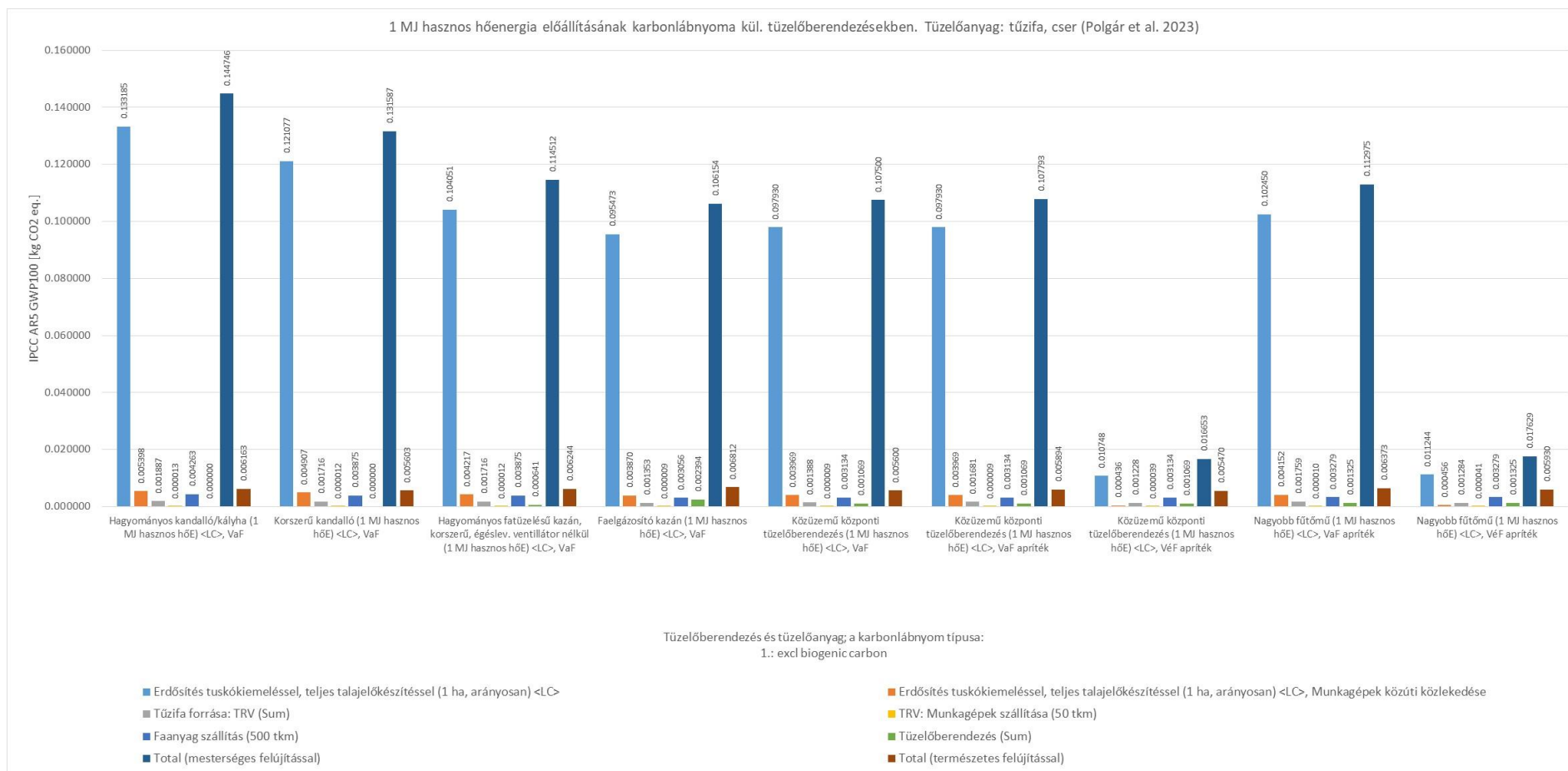
- erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel (terepi műveletek) (legrosszabb forgatókönyv – a legtöbb esetben nincs tuskóeltávolítás, főleg cser felújítás esetében)
- munkagépek közúti közlekedése az erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel műveletekhez
- fakitermeléshez szükséges munkagépek helyszínre szállítása (50 tkm)

- faanyag szállítása (500 tkm)

A fenti segédfolyamatok közül a rendszerhatárok kibővítését:

- természetes és mesterséges erdőfelújítási eseteket feltételezve végeztük el.
- Természetes felújítás esetén az erdősítés tuskókiemeléssel és teljes talajelőkészítéssel folyamatai nem jelentkeznek.

Földgázzal működő tüzelőberendezések karbonlábnyomával az összehasonlítás nem lehetséges, mivel a rendszerhatárok hasonló kibővítése (földgáz elosztás leltáradatainak feltárásával) további kutatási irányokat jelöl ki.



30. ábra Legrosszabb forgatókönyv (worst case scenario) analízis: 1 MJ hasznos hőenergia előállításának karbonlábnyma különböző tüzelőberendezésekben, a tűzifa karbonsemleges elégését feltételezve. Tüzelőanyag: tűzifa, cser, tarvágás. (Rendszerhatárok: mesterséges felújítás: erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel (terepi műveletek és munkagépek közötti közlekedése), tarvágás, munkagépek szállítása (50 tkm), faanyag szállítása (500 tkm), tüzelőberendezés)

Rendszerhatárok: természetes felújítás: tarvágás, munkagépek szállítása (50 tkm), faanyag szállítása (500 tkm), tüzelőberendezés)

A *természetes felújításból* származó cser (tarvágás) tűzifa variációból származó karbonlábnyom növekvő rangsorolása (legkedvezőbb elől): **közüzemi központi tüzelőberendezés vékonyfa aprítékkal – közüzemi központi tüzelőberendezés vastagfával – korszerű kandalló – nagyobb fűtőmű vékonyfa aprítékkal – közüzemi központi tüzelőberendezés vastagfa aprítékkal – hagyományos kandalló/kályha – nagyobb fűtőmű vastagfa aprítékkal – hagyományos fatüzelésű kazán – faelgázosító kazán.**

28. táblázat Mesterséges és természetes felújításból származó cser (tarvágás) tűzifával működő rendszerek teljes összesített (Total) karbonlábnyomának viszonya (IPCC AR5 GWP100 [kg CO₂ eq.]; excl. biogenic carbon)

Funkcióegység: 1 MJ hasznos hőE	TRV	TRV	TRV	TRV
Tüzelőberendezés (Cser)	Total (mesterséges felújítással)	Total (természetes felújítással)	Mesterséges/Természetes felújítás aránya	Természetes felújítás %
Hagyományos kandalló/kályha, VaF	0,144746	0,006163	23,48625526	4%
Korszerű kandalló, VaF	0,131587	0,005603	23,48625526	4%
Hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű, égéslev. ventilátor nélkül, VaF	0,114512	0,006244	18,33964773	5%
Faelgázosító kazán, VaF	0,106154	0,006812	15,58388334	6%
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF	0,107500	0,005600	19,19525043	5%
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF apríték	0,107793	0,005894	18,28857599	5%
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VÉF apríték	0,016653	0,005470	3,044425122	33%
Nagyobb fűtőmű, VaF apríték	0,112975	0,006373	17,72660676	6%
Nagyobb fűtőmű, VÉF apríték	0,017629	0,005930	2,973000824	34%

A *mesterséges felújításból* származó cser (tarvágás) tűzifa variációból származó karbonlábnyom növekvő rangsorolása (legkedvezőbb elől) (vékonyfa inputokra arányaiban kisebb karbonlábnyom esik): **közüzemi központi tüzelőberendezés vékonyfa aprítékkal – nagyobb fűtőmű vékonyfa aprítékkal – faelgázosító kazán – közüzemi központi tüzelőberendezés vastagfával – közüzemi központi tüzelőberendezés vastagfa aprítékkal – nagyobb fűtőmű vastagfa aprítékkal – hagyományos fatüzelésű kazán – korszerű kandalló – hagyományos kandalló/kályha.**

A mesterséges felújításból származó tűzifa esetében lakossági szinten 15-23-szoros, fűtőművi szinten 17-18-szoros karbonlábnyom többlettel kell számolnunk, mint természetes felújításkor. A vékonyfa apríték bemenettel működtetett tüzelőberendezések a legkedvezőbb karbonlábnyomot hozzák.

A vizsgált rendszer szénegyenlegének közelítése

Az előfakészlet magában foglalja a föld feletti (vágáslap feletti) vastagfa és vékonyfa teljes mennyiségét. Figyelembe véve a tüzelőberendezésekhez 1 MJ hasznos hőenergia előállításához szükséges eltérő faanyag mennyiségét, ezekhez tartozóan a föld feletti és föld alatti biomasszában megkötött szénmennyiséget, mint széntárolót (pool-t), közelíthetjük a rendszereinket jellemző szénmérleget.

Tüzelőberendezésenként, a jellemző pool-ban tárolt szén mennyiségét az egyes releváns életút szakaszokra jellemző karbonlábnyom értékekkel (karbonlábnyomok értelmezése: a tanulmányban alkalmazott 1. scenárió szerinti karbonsemleges faanyag elégetés feltételezésével) kell csökkentenünk, hogy a rendszer szénegyenlegét kimutathassuk.

Az alábbiakban táblázatos formában bemutatjuk a szénegyenleg alakulását cser (tarvágás) tűzifát illetően, mesterséges és természetes felújítás alternatívákat követve.

Megállapíthatjuk, hogy mesterséges felújítás alternatívája szerint a szénegyenleg a vastagfa tűzifa bemenetet használó rendszereknél karbon deficit (kis mértékben), kivéve egy szubfidites esetet: hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű égéslevegő ventilátor nélküli tüzelőberendezést (4% szabad karbon kapacitással). Vékonyfa inputtal működő rendszerek szénegyenlege egységesen 32% szabad karbon kapacitással jellemezhető.

A **szénegyenleg** alapján *mesterséges felújítás alternatíva* esetén felállítható rangsor (legkedvezőbb elől): **nagyobb fűtőmű vékonyfa aprítékkal – központi közüzemű tüzelőberendezés vékonyfa aprítékkal – hagyományos fatüzelésű kazán – központi közüzemű tüzelőberendezés vastagfa aprítékkal – központi közüzemű tüzelőberendezés vastagfával – faelgázosító kazán – nagyobb fűtőmű vastagfával – korszerű kandalló – hagyományos kandalló/kályha.**

Természetes felújítás alternatívája esetében 31-42% szabad karbon kapacitású szénegyenlegekkel találkozunk. A vastagfával szemben a vékonyfa inputot használó rendszerek az előző alternatívában tapasztalt jelentős előnye kiegyenlítődik.

29. táblázat A vizsgált rendszer szénegyenlegének közelítése cser (tarvágás) tűzifa input esetén különböző tüzelőberendezésekben, mesterséges és természetes felújítás alternatívák szerint (IPCC AR5 GWP100 [kg CO₂ eq.]; excl biogenic carbon)

Funkcióegység: 1 MJ hasznos hőE	TRV	TRV	TRV	TRV
Tüzelőberendezés (Cser)	Szénegyenleg (mesterséges felújítással) [kg CO ₂ eq.]	Szénegyenleg (természetes felújítással) [kg CO ₂ eq.]	Szénegyenleg szabad karbon kapacitása (mesterséges felújítással) [%]	Szénegyenleg szabad karbon kapacitása (természetes felújítással) [%]
Hagyományos kandalló/kályha, VaF	-0.036568	0.102015	deficit	32%
Korszerű kandalló, VaF	-0.033244	0.092741	deficit	32%
Hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű, égéslev. ventilátor nélkül, VaF	0.010432	0.118699	4%	42%
Faelgázosító kazán, VaF	-0.028608	0.070734	deficit	31%

Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF	-0.027958	0.073941	deficit	32%
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VaF apríték	-0.027935	0.073964	deficit	32%
Közüzemű központi tüzelőberendezés, VÉF apríték	0.062733	0.073916	27%	32%
Nagyobb fűtőmű, VaF apríték	-0.029431	0.077171	deficit	32%
Nagyobb fűtőmű, VÉF apríték	0.065421	0.077121	27%	32%

A **szénegyenleg** alapján *természetes felújítás alternatíva* esetén felállítható rangsor (legkedvezőbb elől): **hagyományos fatüzelésű kazán – hagyományos kandalló/kályha – korszerű kandalló – nagyobb fűtőmű vastagfa aprítékkal – nagyobb fűtőmű vékonyfa aprítékkal – közüzemű központi tüzelőberendezés vastagfa aprítékkal – közüzemű központi tüzelőberendezés vastagfával – közüzemű központi tüzelőberendezés vékonyfa aprítékkal – faelgázosító kazán.**

ZÁRSZÓ

Jelen kutatási tanulmányban a faalapú biomassza energetikai célú felhasználásának szénlábnyma és modellje, tűzifával való égetés CO₂-lábnym elemzése témakörében végeztünk helyzetértékelést.

A vizsgálatok során további kérdések is körvonalazódtak, amelyek további kutatási irányokat jelölnek ki, melyek az alábbiak:

- a helyzetértékelés alapján fel kell tárnai a fejlesztési pontokat az erdészeti technológiák, tüzelőberendezések, a logisztikai rendszerek tekintetében. Vizsgálhatók lehetnek az adott körülmények között fenntartható szállítási távolságok vagy a tüzelőberendezések hatásfokának fejlesztései, emissziócsökkentési lépések eredményeképp kimutatható karbon megtakarítások, megújuló energia használata stb.
- A karbonlábnym elemzés mellett az LCA lehetőséget ad további környezeti hatáskategóriák indikátor eredményeinek vizsgálatára is (pl. fotokémiai szmogképződés, humántoxicitás, ökotoxicitás, savasodás, stb.).
- A jelen tanulmányban a rendszerhatárokon kívül eső területek és leltáradatok bevonását mérlegelni kell a még pontosabb modellezés érdekében.

A dendromassza alapú energiatermelés és fosszilis alapú energiahordozók körének és a vizsgált rendszerhatárok egységes kibővítése még pontosabb, összehasonlító képet ad a döntéstámogatók számára a megfelelő lakossági és fűtőművi energiatermelési módok tervezésében, adott esetben a módszertan az erőművi szintre is kiterjeszthető.

Összefoglalva az LCA elemzés eredményeit

A kutatás során célul tűztük ki a hazai faalapú biomassza, pontosabban a dendromassza (azon belül a tűzifa/faapríték) energetikai célú hasznosításának összehasonlító karbonlábnyom kalkulációjának elvégzését életciklus-elemzéssel támogatva (comparative LCA). Jelen tanulmány szempontjából a módszertani kereteket az LCA nemzetközi szabványain (ISO 14040-44) alapuló ÜHG leltározással, az IPCC AR5 emissziós faktorok alapján kalkulált, ISO 14067:2018 nemzetközi szabvány szerinti karbonlábnyom kalkuláció adja.

Az összehasonlítás alapja a hőenergia előállítás és a különböző tűzifa bázisú (pl. kályhakész tűzifa vagy faapríték) tüzelőberendezések voltak, illetve bizonyos rendszerhatárok között a földgáz alapú hőenergia termelést is bevontuk az elemzésbe. Funkcióegységnek a különböző tüzelőberendezésekben egységesen előállított 1 MJ hasznos hőenergiát választottuk. A tanulmányban akác, cser (csertölgy) és tölgy (kocsánytalan és kocsányos tölgy) fafajok kitermelési rendszereivel foglalkoztunk, mivel ezek a meghatározóak a hazai tűzifatermelés szempontjából. Itt az eredményeket cser (tarvágás) tűzifa input példáján mutatjuk be, mivel akác és tölgy esetén hasonló trendek voltak megfigyelhetők. Az elsődleges cél rendszer szinten a hazai helyzetértékelés volt. A tanulmány nem terjed ki bármely más szempontú, különböző forgatókönyvek analízisére. Jelen célzott kutatás nem terjed ki a további környezeti hatáskategóriák (mint pl. a savasodás, eutrofizáció, humántoxicitás, ózonréteg vékonyodás, fotokémiai ózonképződés stb.) indikátor eredményeinek vizsgálatára. Ennek elemzése további, jövőbeli részletes kutatásokat igényel. Az életciklus szemlélet alkalmazása révén a hasznos hő előállításához szükséges életút szakaszokat vizsgáltuk meg tűzifa (mesterséges vagy természetes erdőfelújítás, fakitermelés, égetés tüzelőberendezésben) és földgáz (hazai földgáz mix, égetés tüzelőberendezésben) tüzelőanyagok esetében.

Amennyiben faanyag esetében kizárólag a fakitermelés és az elégetés során a fa-anyaghoz tapadó fosszilis eredetű CO₂-t vesszük figyelembe, illetve a fa elégetését teljes mértékben karbonsemlegesnek (excl biogenic carbon) tekintjük, megállapíthatjuk, hogy

- az 1 MJ hasznos hőenergia megtermelése dendromassza alapon lakossági és fűtőművi szinteken is töredék mértékű karbonlábnyommal jár, mint az ugyanilyen földgáz alternatívák vonatkozásában.
- Vagyis az egységnyi energiatartalom megtermelése fenntartható módon történhet meg a fatüzelés előnyben részesítésével a földgázzal szemben:
 - lakossági esetben két nagyságrenddel kisebb,
 - míg fűtőművi szinten egy nagyságrenddel kisebb a dendromassza tüzelés karbonlábnyoma.

A továbbiakban a fakitermelés segédfolyamatait, logisztikai rendszereit is figyelembe vettük. Szükséges volt látni azt, hogy az eddigi rendszerhatárokat szélesítő segédfolyamatok miként befolyásolják a dendromassza alapú energiatermelés karbonlábnyomát

(kizárólag a tűzifa mennyiségéhez tapadó további karbonlábnyom értékekkel). A figyelembe vett segédfolyamatok a következők:

- erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel (terepi műveletek) (legroszszabb forgatókönyvként szerepeltettük a tuskókiemelést – a legtöbb esetben nincs tuskóeltávolítás, főleg cser felújítás esetében!!!)
- munkagépek közúti közlekedése az erdősítés tuskókiemeléssel, teljes talajelőkészítéssel műveletekhez
- fakitermeléshez szükséges munkagépek helyszínre szállítása (50 tkm)
- faanyag szállítása (500 tkm)

A fenti segédfolyamatok közül a rendszerhatárok kibővítését:

- természetes és mesterséges erdőfelújítási eseteket feltételezve végeztük el, valamint
- természetes felújítás esetén az erdősítés tuskókiemeléssel és teljes talajelőkészítéssel folyamatai nem jelentkeznek.

Földgázzal működő tüzelőberendezések karbonlábnyomával az összehasonlítás nem lehetséges, mivel a rendszerhatárok hasonló kibővítése (földgáz elosztás leltáradatainak feltárásával) további kutatási irányokat jelöl ki.

Megállapítottuk, hogy mesterséges felújítás alternatívája szerint a szénegyenleg a vastagfa tűzifa bemenetet használó rendszereknél kis mértékben karbon deficit, kivéve egy szubficit esetet: hagyományos fatüzelésű kazán, korszerű égéslevegő ventilátor nélküli tüzelőberendezést (4% szabad karbon kapacitással). Vékonyfa inputtal működő rendszerek szénegyenlege egységesen 32% szabad karbon kapacitással jellemezhető.

Természetes felújítás alternatívája esetében 31-42% szabad karbon kapacitású szénegyenlegekkel találkozunk. A vastagfával szemben a vékonyfa inputot használó rendszerek az előző alternatívában tapasztalt jelentős előnye kiegyenlítődik.

Summary

Our goal was to conduct a comparative carbon footprint calculation for domestic wood-based biomass, specifically dendromass (firewood/wood chips), for energy purposes using life cycle analysis (comparative LCA). The methodological framework of this study is based on international LCA standards (ISO 14040-44) for GHG inventory, with carbon footprint calculations performed according to the ISO 14067:2018 standard, based on IPCC AR5 emission factors.

The comparison focused on heat energy production and various firewood-based (e.g., ready-to-use firewood or wood chips) heating systems. Within certain system boundaries, heat energy production based on natural gas was also included. The functional unit selected was 1 MJ of useful heat energy produced uniformly across the various heating systems. The study concentrated on the extraction systems for black locust, Turkey oak, and oak (sessile and pedunculate), as these are the key species for domestic firewood production. Here, results are presented using Turkey oak (clear-cutting) firewood input as an example since similar trends were observed for black locust and oak. The primary objective was a system-level evaluation of the domestic situation. The study does not extend to analyses of alternative scenarios or environmental impact categories (e.g., acidification, eutrophication, human toxicity, ozone layer depletion, photochemical ozone formation). These aspects require further, detailed future research. By applying the life cycle perspective, we examined the life stages necessary for useful heat production for firewood (artificial or natural forest regeneration, wood harvesting, burning in heating systems) and natural gas (domestic natural gas mix, burning in heating systems).

If only the fossil CO₂ associated with wood harvesting and combustion is considered, and wood burning is assumed to be entirely carbon-neutral (excluding biogenic carbon), the following conclusions can be drawn:

- The carbon footprint of producing 1 MJ of useful heat energy using dendromass, both at residential and district heating levels, is only a fraction of that associated with natural gas alternatives.
- This indicates that energy production per unit of energy content can be achieved sustainably by favoring wood burning over natural gas:
 - At the residential level, the carbon footprint is two orders of magnitude smaller.
 - At the district heating level, it is one order of magnitude smaller.

We also considered auxiliary processes and logistics systems related to wood harvesting. It was necessary to assess how these auxiliary processes, which extend the current system boundaries, influence the carbon footprint of dendromass-based energy production (considering only additional carbon footprint values associated with firewood quantities). The auxiliary processes included:

- Reforestation with stump removal and full soil preparation (field operations) (stump removal was considered a worst-case scenario – in most cases, stumps are not removed, especially for Turkey oak regeneration).
- Transportation of machinery for reforestation with stump removal and full soil preparation.
- Transportation of logging machinery to the site (50 tkm).
- Transportation of wood material (500 tkm).

The system boundary expansion was carried out by considering:

- Natural and artificial forest regeneration scenarios.
- For natural regeneration, the processes of reforestation with stump removal and full soil preparation do not occur.

Comparison with the carbon footprint of natural gas heating systems is not possible, as a similar boundary expansion (including natural gas distribution inventory data) would require further research directions.

It was determined that under artificial regeneration scenarios, systems using thick wood firewood inputs exhibited a slightly carbon-deficient balance, with one exception: traditional wood-fired boilers without advanced combustion air fans, which showed a 4% free carbon capacity. Systems using thin wood inputs consistently displayed a 32% free carbon capacity.

Under natural regeneration scenarios, carbon balances exhibited 31-42% free carbon capacity. The significant advantage of systems using thin wood inputs in the previous scenario is offset compared to those using thick wood inputs in this case.

Rövidítések, szómagyarázatok

Aeroszol: szilárd vagy cseppfolyós, diszperz, azaz esetünkben a légkörben diszpergált (szétosztott) részecskék.

Ammónia – savas csapadék: Első hallásra furcsának tűnhet, hogy az ammónia, melynek vizes oldata lúgos, felelős lehet savas csapadék kialakulásáért. Valójában a légkörbe kerülő ammónia fotokémiai reakciókon keresztül nitrogén-oxidokká alakul, melyek vizes oldatai már savasak, életideje mindössze három nap (Jaffe 2003). Ugyanakkor a kutatók azt találták, hogy ebben a három napban jelentősen növelheti, lúgos felé tolhatja a csapadék pH-ját (Liu et al. 2019, 2020), így az ammónia kibocsátás megítélése a légkörbe bizonytalan, további vizsgálatokat igényel (Apsimon et al. 1987; Irwin 1989; Zheng et al. 2023; Dong et al. 2023).

Dendromassza: a biomasszában belül a fás szárú növények.

EJ: exajoule (10^{18} J)

Erdei köbméter: 1 méteres sorokba rendezett, 1 méter hosszú darabokra vágott feldolgozatlan farönkökből 1,7 méter magasságú sarangot, azaz farakást jelent.

GWP: Global Warming Potential, magyarul globális felmelegedési potenciált. Gázok üvegházhatásának számszerűsítésére használt fogalom. Azonos mennyiségű szén-dioxidhoz képest határozzák meg az értékét, meghatározott időintervallumra (ez általában 100 év). A szén-dioxid GWP-je definíció szerint 1.

IPCC

IPCC AR5

IPCC AR5 GWP 100 years (kg CO₂ eq.)

Légfelesleg tényező: A tüzeléshez ténylegesen felhasznált és az elméleti levegőmennyiség hányadosa. A valós üzemi légfelesleg-tényező meghatározható a tüzelés során keletkező füstgáz oxigén-, illetve szén-dioxid-koncentrációjának mérésével.

Nem metán illékony szerves vegyületek (Non-methane volatile organic compounds – NMVOC): olyan szerves vegyületek összessége, amelyek kémiai összetételükben nagymértékben különböznek, de hasonló viselkedést mutatnak a légkörben. Számos forrásból kerülnek a légkörbe, beleértve az égési tevékenységeket, az oldószerhasználatot és egyéb ipari és termelési folyamatokat.

Normalizáció: a kategória-mutatószám eredményeit viszonyítja egy referenciaértékhez (pl. az összes CO₂-kibocsátás viszonyítása az adott ország éves CO₂ kibocsátásához).

NPK műtrágya: A növények számára a talajból felvehető ásványi tápanyagok közül a legfontosabbak az ún. makroelemek: a nitrogén, a foszfor és a kálium. Ezek abszolút mennyisége és egymáshoz viszonyított aránya sem mindegy sem a talajban, sem a különböző trágyákban. A műtrágyákon a százalékos összetételt és/vagy ezek arányát adják meg a csomagoláson.

Tartózkodási idő [sec]=tűztér térfogat [m³]/betáplált térfogatáram [m³/sec]

Felhasznált és ajánlott irodalom

- AEA Technology plc (2012). Conversion of biomass boiler emission concentration data for comparison with Renewable Heat Incentive emission criteria. Report for Defra (2012). AEA reference: Ref: ED46626/AEA/R/3296-Issue 1 https://uk-air.defra.gov.uk/assets/documents/reports/cat07/1205310837_Conversion_of_biomass_boiler_emission_data_rep_Issue1.pdf (2023.02.03.)
- Agrárminisztérium, H.O.I. (2021). Fűts okosan. *Agrárminisztérium. Budapest.* <http://www.futsokosankampany.hu/fa> (2023. 01. 28.)
- Apsimon, H.M., Kruse, M. & Bell, J.N.B. (1987). Ammonia emissions and their role in acid deposition. *Atmospheric Environment*. 21(9). 1939-1946. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(87\)90154-5](https://doi.org/10.1016/0004-6981(87)90154-5)
- Augusto, L., Bakker, M.R. & Meredieu, C. (2008). Wood ash applications to temperate forest ecosystems—potential benefits and drawbacks. *Plant and soil*. 306(1-2). 181-198. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9570-z>
- Ayres, R.U. & Kneese, A.V. (1969). Production, consumption and externalities. *The American Economic Review*. (59)3. 282-297.
- Barótfi, I. (2000). Megújuló energiaforrások hasznosítási technológiáinak KöM által meghatározott szempontok szerinti vizsgálata - Biomassza energetikai hasznosítása. Energia Központ Kht. Budapest, 3-4., 17-19. p.
- Bartha, P. (2019). Karbonsemleges-e a biomassza elégetése? *Erdészeti Lapok*. 154(4). 109-110. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01845/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_04_110.pdf (2024.02.13.)
- Békly A. (1980). Kocsánytalan tölgyesek erdőnevelési modelltáblája
- Bencze, G. (1893). Az ákáczfahamuról, mint trágyaszerről. *Erdészeti Lapok*. 32(5). 400-411. https://erdeszetilapok.oszk.hu/00722/pdf/00722_400-411.pdf (2024.02.13.)
- 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 No. 8, European Forest Institute. pp. 57-68.
- Signal, K.L., Langridge, S. & Zhou, J.L. (2008). Release of polycyclic aromatic hydrocarbons, carbon monoxide and particulate matter from biomass combustion in a wood-fired boiler under varying boiler conditions. *Atmospheric Environment*. 42(39). 8863-8871. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.013>
- Börcsök, Z. (2019). A faanyag fontossága a klímavédelemben. *Erdészeti Lapok*. 154(6). 192. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01847/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_06_192.pdf (2024.02.13.)
- Caserini, S., Livio, S., Giugliano, M., Grosso, M. & Rigamonti, L. (2010). LCA of domestic and centralized biomass combustion: The case of Lombardy (Italy). *Biomass and Bioenergy*. 34(4). 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.12.011>
- Chiovini Gy. (2012). Kérdőjelek a fatüzelés körül I. VGF&HKL szaklap 2012/4: <https://www.vgfszaklap.hu/lapszamok/2012/aprilis/2289-kerdojelek-a-fatuzeles-korul-i> (2023. 03. 17.)
- CML 2001: Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. De; Oers, L. Van; Wegener Sleeswijk, A.; Suh, S.; Udo De Haes, H.A.; Bruijn, H. De; Duin, R. Van; Huijbregts, M.A.J.: 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, ISBN 1-4020-

- 0228-9, Dordrecht, 2002, 692 pp. on-line: <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-projects/science/cml-new-dutch-lca-guide> (2024.02.08.)
- COM/2011/0885 A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, az Európai Tanácsnak, az Az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának 2050-ig szóló energiaügyi ütemterv <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/ALL/?uri=CELEX%3A52011DC0885> (2024.02.08.)
- COM/2019/640 A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, az Európai Tanácsnak, az Az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának - Az európai zöld megállapodás. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0012.02/DOC_1&format=PDF (2024.02.08.)
- Danish Ecological Council (2017). A lakossági tüzelés légszennyezése – Dán tapasztalatok nemzetközi tekintéssel: <https://mek.oszk.hu/19200/19277/19277.pdf> (2023. 03. 12.) (magyar fordítás)
- Demeyer, A., Nkana, J.V. & Verloo, M.G. (2001). Characteristics of wood ash and influence on soil properties and nutrient uptake: an overview. *Bioresource technology*. 77(3). 287-295. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00043-2)
- Dong, Z., Wang, S., Jiang, Y., Xing, J., Ding, D., Zheng, H. & Hao, J. (2023). An acid rain–friendly NH₃ control strategy to maximize benefits toward human health and nitrogen deposition. *Science of the Total Environment* 859. 160116. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160116>
- Ebert, H.P. (2007): Fatüzelés, Cser Kiadó, Budapest. 38; 47. p. ISBN: 9789639759503
- Pré Consultants, B.V. (2000). Eco-Indicator 99 Manual For Designers: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment Communications Directorate, The Netherlands, The Hague
- ECOINVENT: The ecoinvent Organisation: <http://www.ecoinvent.org/>
- Erkman, S. (1997): Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner production*. 5(1). 1-10. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00003-6)
- Fengel, D. & Wegener, G. (1984). Wood - chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter & Co, Berlin, p. 613. ISBN 3-11-012059-3 https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6459045/mod_resource/content/1/Wood%20Chemistry%20Fengel%20and%20Wegener.pdf (2023.02.03.)
- 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. *Greenhouse Gas Measurement and Management*. 2(2-3). 84-92. <https://doi.org/10.1080/20430779.2012.723513>
- Frühwald, A. & Wegener, G. (1993). Energiekreislauf Holz- ein Vorbild für die Zukunft. In: *Holz- Erzeugung und Verwendung-Ein Kreislauf der Natur*. 15. (pp. 1-10). DGfH, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. Dreiländer-Holztagung in Garmisch-Partenkirchen, 21. bis 24. September 1993. Tagungsband 49-60.
- 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 No. 8, European Forest Institute: pp. 10-11. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/proc08_net.pdf (2024.02.03.)
- Füzesi, I. (2015). *A fahamu alkalmazási lehetőségei a mezőgazdaságban* (Doctoral dissertation, NymE). p. 122. http://doktori.uni-sopron.hu/id/eprint/486/1/DOKTORI_F_I.pdf (2023.02.03.)
- GaBi (2016). Professional Database. Standard database provided with the GaBi software (Version 9.2.1.68). <https://gabi.sphera.com/databases/professional/>

- Galli A., Weinzettel G.G. & Ercin E. (2010). A footprint family extended MRIO model to support Europe's transition to a One Planet Economy. *Science of The Total Environment*. 461-462. 813-818. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.071>
- Górecka, H., Chojnacka, K. & Górecki, H. (2006). The application of ICP-MS and ICP-OES in determination of micronutrients in wood ashes used as soil conditioners. *Talanta*. 70(5). 950-956. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2006.05.061>
- Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes G., Zamagni, A., Masoni, P., Buonamici, R., Ekvall, T. & Rydberg, T. (2010). Life Cycle Assessment: Past, Present and Future. *Environmental Science & Technology*. 45(1). 90-96. <https://doi.org/10.1021/es101316v>
- Hall, C., Lavine, M. & Sloane, J. (1979). Efficiency of energy delivery systems: I. An economic and energy analysis. *Environmental Management*. 3(6). 493-504. <https://doi.org/10.1007/BF01866318>
- Halupa, L., Kiss, R. & Rédei, K. (1980). Akácosok erdőnevelési modell táblája. Akadémiai Kiadó. ISBN 978 963 454 764 8
- Hasler, P., Candinas, T., & Nussbaumer, T. (1998). Utilization of ashes from the combustion of hay, *Miscanthus*, hemp, straw and wood as fertilizer. *The 10th European Conference on Biomass for Energy and Industry, June 1998, Würzburg, Germany, Proceedings of the International Conference Würzburg* pp. 192-195.
- Heijungs, R. (2014). Ten easy lessons for good communication of LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 19. 473-476. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0662-5>
- Heinimann, H.R. & Maeda-Inaba, S. (2004). Environmental performance indicators epis for forest roads network systems. In Heidin, I. D., Krag, R (eds). Joint Conference of IUFRO 3.06 Forest Operations under Mountainous Conditions and the 12nd International Mountain Logging Conference. June 13-16. Vancouver, British Columbia, University of British Columbia. Vancouver, BC, Canada. Forest Engineering Research Institute of Canada, FERIC.
- Heinimann, H.R. (2012). Life Cycle Assessment (LCA) in Forestry - State and Perspectives. *Croatian Journal of Forest Engineering (CROJFE)*. 33(2). 357-372. ISSN: 1845-5719. https://crojfe.com/site/assets/files/3779/14_heinimann_357-372.pdf (2024.02.09.)
- Hjalmarsson, A. K., Bjurström, H. & Sedendahl, K. (1999). Handbok för restprodukter från förbränning. *Fjärrvärmeföreningen, februari*. p. 65.
- Hoekstra, A.Y. (2008). The water footprint of food - Water Footprint Network, Twente Water Centre, University of Twente, the Netherlands. <https://www.waterfootprint.org/resources/Hoekstra-2008-WaterfootprintFood.pdf> (2024.02.09.)
- Hoffer, A., Jancsek-Turóczi, B., Tóth, Á., Kiss, G., Naghiu, A., Levei, E. A., Marmureanu L., Machon A. & Gelencsér, A. (2020). Emission factors for PM10 and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) from illegal burning of different types of municipal waste in households. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 20(24). 16135-16144. <https://doi.org/10.5194/acp-20-16135-2020>
- IPCC (2003). Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. UNEP. Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. & Wagner F. (eds.) Published by the Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC. Japan. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/GPG_LULUCF_FULLEN.pdf (2024.02.09.) ISBN 4-88788-003-0
- IPCC (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. & Tanabe

- K. (eds). Published: IGES, Japan. URL: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (2024.02.09.)
- 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). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/> (2024.02.09.)
- Irwin, J.G. (1989): Acid Rain: Emissions and Deposition. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 18. 95-107. <https://doi.org/10.1007/BF01056194>
- Jayarathne, T., Stockwell, C.E., Bhawe, P.V., Praveen, P.S., Rathnayake, C.M., Islam, Md.R., Panday, A.K., Adhikari, S., Maharjan, R., Goetz, J.D., DeCarlo, P.F., Saikawa, E., Yokelson, R.J. & Stone, E.A. (2018). Nepal Ambient Monitoring and Source Testing Experiment (NAMAStE): Emissions of particulate matter from wood- and dung-fueled cooking fires, garbage and crop residue burning, brick kilns, and other sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 18(3). 2259-2286. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2259-2018>
- Johansson, L.S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C. & Potter, A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric environment*. 38(25). 4183-4195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>
- Jung, L. (2019). Akkor most éjjen az a tűzifa vagy ne? *Erdészeti Lapok*. 154(4). 109-110. https://erdeszeti-lapok.oszk.hu/01845/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_04_109-110.pdf (2024.02.09.)
- Kai, F, Song, S., Heijungs, R., de Groot, S., Dong, L. & Song, J., (2016). The footprint's fingerprint: on the classification of the footprint family. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. 23. 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.002>
- Kaufmann, H. & Nussbaumer, T. (1998). Characteristics and formation of fly ash particles in biomass furnaces. In *The 10th European Conference on Biomass for Energy and Industry, June 1998, Würzburg, Germany, Proceedings of the International Conference Würzburg*. pp. 1327-1329.
- Kellner, O. & Weibull, H. (1998). Effects of wood ash on bryophytes and lichens in a Swedish pine forest. *Scandinavian journal of forest research*. 2. 76-85.
- Kiesewetter, G., Borken-Kleefeld, J., Schoepp, W., Heyes, C., Bertok, I., Thunis, P., Bessagnet, B., Terrenoire, E. & Amann M. (2013). Modelling compliance with NO₂ and PM₁₀ air quality limit values in the GAINS model. TSAP Report #9, V1.0, DG-Environment of the European Commission, Belgium <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/10616/1/XO-13-056.pdf> (2023.02.23.)
- Kiesewetter, G., Borken-Kleefeld, J., Schöpp, W., Heyes, C., Thunis, P., Bessagnet, B., Terrenoire, E., Fagerli, H., Nyiri, A., & Amann, M. (2015). Modelling street level PM₁₀ concentrations across Europe: source apportionment and possible futures. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 15(3). 1539-1553. <https://doi.org/10.5194/acp-15-1539-2015>
- Kiss, R. (1980). Kocsányos tölgyesek erdőnevelési modell táblája
- Kiss, R. (1980). Kocsányostölgyesekink növedéke. *Erdészeti kutatások*. 73(1). 165-168.
- 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). 556-574. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0847-1>

- Knapp, B. A. & Insam, H. (2011). Recycling of biomass ashes: current technologies and future research needs. *Recycling of biomass ashes*. 1-16. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19354-5_1
- Kornél, N. (2011). Dendromassza-hasznosításon alapuló decentralizált hőenergia-termelés és felhasználás komplex elemzése (Doktori (PhD) Értekezés, Panon Egyetem, Keszthely). https://konyvtar.uni-panon.hu/doktori/2011/Nemeth_Kornel_dissertation.pdf (2023.02.03.)
- Korpilahti, A., Moilanen, M. & Finér, L. (1999). Wood ash recycling and environmental impacts-state-of-the-art in Finland. *International Energy Agency, Bioenergy Agreement Task 18 workshop*. 211. 82-89.
- Kovács, F. (1980). Cserések erdőnevelési modelltáblája.
- Krippel, M. (1943). Erdőhasználat; in: Mihályi Z. (ed.) Erdészeti zsebnaptár az 1943. évre, Új sorozat 1[39](1). 563-720.
- Lévai, L., Veres, S. & Széles, É. (2007). A fahamu lehetséges szerepe a növények tápanyagellátásában. *Acta Agronomica Óváriensis*. 49(2). 501-505. https://epa.oszk.hu/03100/03114/00018/pdf/EPA03114_acta_agronomica_ovariensis_2007_2_2_501-505.pdf (2023.02.03.)
- Lindkvist, L. (2000). Aska från biobränsle: produktions-och kvalitetsaspekter beträffande näringskompensation och vitalisering av skogsmark. *Skogsstyrelsen, Jönköping 2000, rapport 5*. p. 31.
- Liu, M., Huang, X. & Song, Y. (2019). Ammonia emission control in China would mitigate haze pollution and nitrogen deposition, but worsen acid rain. *PNAS - Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 116(16). 7760–7765. <https://doi.org/10.1073/pnas.1814880116>
- Liu, M., Song, Y., Xu, T., et al., 2020. Trends of precipitation acidification and determining factors in China during 2006–2015. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 125 (6). <https://doi.org/10.1029/2019JD031301>
- Maasikmets, M., Kupri, H.L., Teinemaa, E., Vainumäe, K., Arumäe, T., Roots, O., & Kimmel, V. (2016). Emissions from burning municipal solid waste and wood in domestic heaters. *Atmospheric Pollution Research*. 7(3). 438-446. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2015.10.021>
- Marutzky, R. (1997). Moderne Feuerungstechnik zur energetischen Verwertung von Holz und Holzabfällen. *Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag*. p. 357. ISBN 978-3189900286
- Mátyás, Cs. & Tolvaj, L. (2019). MTA ETB állásfoglalás az EASAC ajánlásáról az erdészeti bioenergia ügyében. *Erdészeti Lapok*. 154(9). 281-283. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01849/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_09_281-283.pdf (2024.02.09.)
- Mátyás, Cs. (2019). Látják-e a tűzfától az erdőt az EASAC-nál? *Erdészeti Lapok*. 154(3). 76-77. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01844/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_03_076-077.pdf (2024.02.09.)
- Mátyás, Cs. (2006). Erdők a globális és hazai szénforgalomban. In: Szulcsán, G. (szerk.): Alföldi Erdőkért Egyesület. Konferencia, Szeged, Magyarország, 2006. 11. 14. Proceedings. pp. 5-13. https://epa.oszk.hu/03400/03455/00007/pdf/EPA03455_kutato_i_nap_2006_005-013.pdf (2024.02.09.)
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric environment*. 33(24-25). 4029-4037. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2)
- Meiwes, K.J. (1995). Application of lime and wood ash to decrease acidification of forest soils. *Water, Air, and Soil Pollution*. 85. 143-152. <https://doi.org/10.1007/BF00483696>

- Mócsényi, M. (2023). Nettó fakitermelés 2000-2021. FATÁJ 2023.02.09. <https://fataj.hu/2023/02/netto-fakitermeles-2000-2021> (2024.02.09.)
- Molnár, S. (szerk.) (2000). Faipari Kézikönyv I. Faipari Tudományos Alapítvány. Sopron, p. 428. ISBN: 9630042304
- Molnár, S., Börcsök, Z., Pásztory, Z. & Komán, S. (2013). Mire elég a magyar dendromassza? – A faenergetika fejlesztésének lehetőségei és korlátai. *Erdészeti Lapok*. 148(6). 173-175. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01782/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2013_06_173-175.pdf (2023.02.03.)
- Moran, D., Kanemoto, K., Jiborn, M., Wood, R., Többen, J. & Seto, K.C. (2018). Carbon footprints of 13 000 cities. *Environmental Research Letters*. 13. 064041. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aac72a>
- Muse, J.K. & Mitchell, C.C. (1995). Paper mill boiler ash and lime by-products as soil liming materials. *Agronomy Journal*. 87(3). 432-438. <https://doi.org/10.2134/agronj1995.00021962008700030008x>
- Nagy, Sz.Á. (2011). Biomassza energetikai célú hasznosításának életciklus-elemzése városi fűtőműben (Life cycle analysis of the energetic utilization of biomass in a power plant for heating). Diplomadolgozat, Sopron, NYME, p. 109.
- Naylor, L.M. & Schmidt, E. (1989). Paper mill wood ash as a fertilizer and liming material: field trials. *Tappi Journal*. 72(6). 199-206.
- NEKT (2023). Magyarország Nemzeti Energia- és Klímaterve. Innovációs és Technológiai Minisztérium. <https://cdn.kormany.hu/uploads/document/5/54/54b/54b7fc0579a1a285f81d183931bfaa7e4588b80e.pdf> (2024.02.09.)
- Németh, G. (2014). Kisteljesítményű, faalapú pellet tüzelő berendezés környezeti hatásainak vizsgálata I. rész. *FAIPAR*. 62(2). 18–26. https://doi.org/10.14602/WoodScience-HUN_2014_14
- Németh, K. (1997). Faanyagkémia–Kémiai szerkezet, reakciók. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest. pp. 19-27. ISBN 9633562171
- Németh, K. (1998). A faanyag degradációja. Mezőgazdasági Szaktudás Kiadó, Budapest, p. 101. ISBN 9633562260
- Nemzeti Vidékstratégia 2012-2020 <https://www.parlament.hu/irom40/02305/02305.pdf> (2024.02.09.) Vidékfejlesztési Minisztérium, 2012.
- NES (2016). Nemzeti Erdőstratégia 2016-2030. Földművelésügyi Minisztérium. Budapest https://erdo-mezo.hu/wp-content/uploads/2016/10/nemzeti_erdostrategia_2016.pdf (2024.02.09.)
- NÉS-2 (2018). A 2018-2030 közötti időszakra vonatkozó, 2050-ig tartó időszakra is kitekintést nyújtó 2. Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia. Innovációs és Technológiai Minisztérium <https://magyarkozlony.hu/dokumentumok/6bcb816077f795960249fcc31c699245299be2da/letoltes> (2024.02.09.)
- NFM (2012). Nemzeti Energiastratégia 2030. Nemzeti Fejlesztési Minisztérium. <https://2010-2014.kormany.hu/download/4/f8/70000/Nemzeti%20Energiastat%C3%A9gia%202030%20teljes%20v%C3%A1ltozat.pdf> (2024.02.09.) ISBN 978-963-89328-1-5
- Niederberger, J. (2002). Holzaschequalität und technische Rahmenbedingungen bei der Verbrennung–Ergebnisse einer Betreiberbefragung. *Forstwirtschaftliche Fakultät der Universität Freiburg, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg* (ed) *Holzasche-Ausbringung im Wald, ein Kreislaufkonzept*. *Freiburger Forstliche Forschung, FFF-Bericht Heft* (43). 107-122. FVA-Kolloquium in Freiburg vom 5. bis 6. März 2002, 166 S, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg Freiburg (Hrsg.).

- NIR (2023). Nemzeti Üvegházhatású Gázleltár Jelentés. <https://unfccc.int/documents/627849> (2024.02.09.)
- Nkana, J.V., Demeyer, A. & Verloo, M.G. (1998). Chemical effects of wood ash on plant growth in tropical acid soils. *Bioresource Technology*. 63(3). 251-260. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)00134-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)00134-X)
- NKP-5 (2022). 5. Nemzeti Környezetvédelmi Program 2026-ig szóló szakpolitikai stratégia. Technológiai és Ipari Minisztérium 2022. <https://xn--krnyezetvdelem-jkb3r.hu/sites/default/files/media/docs/nkp-5.pdf> (2024.02.09.)
- Nussbaumer, T. (1994) Emissions from Biomass Combustion, IEA Biomass Agreement, Task X – Biomass Utilization, Activity 1: Combustion, Final Report of the Triennium 1992–1994
- Nussbaumer, T. (1998). Furnace design and combustion control to reduce emissions and avoid ash slagging. International Energy Agency, *Biomass Combustion Activity*, Final Report of the Triennium 1995–1997, Report No. IEA Bioenergy: T13: *Combustion*, no. 03
- Nussbaumer, T.H. (2004). Emissions of PCDD/F and PAH from private waste incineration. Maine Agricultural Experiment Station Technical Report no. 1615. pp. 1435-1438.
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF01865858>
- Ohno, T. (1992). *Neutralization of soil acidity and release of phosphorus and potassium by wood ash*. 21 (3). 433-438. <https://doi.org/10.2134/jeq1992.00472425002100030022x>
- Pagony, H. & Prem, J. (1969). A talaj tápereje és az erdeifenyő tűkarcgomba fertőzésének mértéke közötti összefüggés. *Az Erdő* 104(3). 130-132. https://erdeszetilapok.oszk.hu/00202/pdf/EL_1969_03_130-132.pdf (2023.02.03.)
- Pájer, J. (1998): Környezeti hatásvizsgálatok. Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron 138. o.
- Párizsi Megállapodás (2015). Paris Agreement, FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1 (angol nyelven). UNFCCC. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/FCCC_CP_2015_10_Add.1.pdf (2024.02.09.)
- Park, Y.K., Kim, W. & Jo, Y.M. (2013). Release of harmful air pollutants from open burning of domestic municipal solid wastes in a metropolitan area of Korea. *Aerosol and Air Quality Research*. 13(4). 1365-1372. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.10.0272>
- Patterson, S.J., Acharya, S.N., Thomas, J.E., Bertschi, A.B. & Rothwell, R.L. (2004). Barley biomass and grain yield and canola seed yield response to land application of wood ash. *Agronomy journal*. 96(4). 971-977. <https://doi.org/10.2134/agronj2004.0971>
- Hansen, H.K., Pedersen, A.J., Ottosen, L.M., Villumsen, A. Speciation and mobility of cadmium in straw and wood combustion fly ash. *Chemosphere*, 2001, 45(1), pp. 123–128. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(01\)00026-1](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(01)00026-1)
- Pedersen, A.J., Ottosen, L.M., Simonsen, P., Christensen, T.C. (2004). Electrodialytic removal of Cd from biomass combustion fly ash. - A new approach for sustainable recycling of bioashes. 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, Rome, Italy, 10-14. May 2004. pp.2007–2010.
- Pitman, R.M. (2006). Wood ash use in forestry—a review of the environmental impacts. *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 79(5). 563-588. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpl041>

- Polgár, A. (2012). Környezeti hatásértékelés a környezetirányítási rendszerekben. Doktori disszertáció, Nyugat-magyarországi Egyetem, Sopron. <http://doktori.uni-sopron.hu/id/eprint/372/1/disszertacio.pdf> (2024.02.09.)
- Póliska, C. (2012). Fás szárú energianövények szerepe kistelepülések hőenergia ellátásában. *Anyagmérnöki Tudományok*, 37(1). 331-342. <http://midra.uni-miskolc.hu/document/13548/5700.pdf> (2023.02.03.)
- ProBas. Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme: <http://www.probas.umweltbundesamt.de> (2024.02.09.)
- Rátky, M. & Tóth, M., (2022). A magyar energiaszektor tanulságai. Akadémiai Kiadó, Budapest. ISBN: 978 963 454 763 1
- Richter, F. & Rein, G. (2020). A multiscale model of wood pyrolysis in fire to study the roles of chemistry and heat transfer at the mesoscale. *Combustion and Flame*, 216. 316-325. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.02.029>
- Rumpf, J. (2011). Az erdőhasználaton kézikönyve. Első kötet. Rumpf János kiadása. Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar, Erdészeti-műszaki és Környezettechnikai Intézet Erdőhasználaton Tanszék. Sopron <https://oszkdk.oszk.hu/storage/00/01/42/40/dd/1/erdohasznalattan.pdf> (2024.02.09.)
- Sandin, G., Peters, G. M. & Svanström, M. (2016). Life Cycle Assessment of Forest Products: Challenges and Solutions. SpringerBriefs in Molecular Science. Biobased Polymers. Springer. ISBN 3319440276, 9783319440279 https://doi.org/10.1007/978-3-319-44027-9_4
- Santalla, M., Omil, B., Rodríguez-Soalleiro, R. & Merino, A. (2011). Effectiveness of wood ash containing charcoal as a fertilizer for a forest plantation in a temperate region. *Plant and soil*, 346. 63-78. <https://doi.org/10.1007/s11104-011-0794-y>
- Saxena, P. & Naik V. (2018). Air pollution. London, UK: Cabi Publishing. ISBN 978-1786393890
- Schatowitz, B., Brandt, G., Gafner, F., Schlumpf, E., Buhler, R., Hasler, P. & Nussbaumer, T. (1994). Dioxin emissions from wood combustion. *Chemosphere*, 29. 2005-2013. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(94\)90367-0](https://doi.org/10.1016/0045-6535(94)90367-0)
- Schiberna, E. (2019). Erdő – Vagyon – Gazdálkodás. *Erdészeti Lapok*, 154(3). 78. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01844/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_03_078.pdf (2024.02.09.)
- Sipos, G. (2019). Tévedés, hogy jobb fával fűteni, mint szénnel(?) *Erdészeti Lapok* 154(1). 5-6. https://forestpress.hu/hu2/images/pdf/EASAC_tevedes.pdf (2024.02.09.)
- Sitek, T., Pospíšil, J., Poláček, J., Špiláček, M. & Varbanov, P. (2019). Fine combustion particles released during combustion of unit mass of beechwood. *Renewable Energy*, 140. 390-396. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.089>
- Sjaak Van Loo, Koppejan J. (eds.) (2008). The Handbook Of Biomass Combustion & Co-firing. Earthscan, London. ISBN 9781844072491
- Someshwar, A.V. (1996). Wood and combination wood-fired boiler ash characterization. *Journal of Environmental Quality*, 25(5). 962-972. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.004724250002500050006x>
- Somogyi, Z. (2008). A hazai erdők üvegház hatású gáz leltára. *Erdészeti Kutatások 2007-2008*, 92. 145-162. https://www.scientia.hu/cv/2008/Somogyi_EK_2008.pdf (2024.02.09.)
- Somogyi, Z. (2019a). A Párizsi Megállapodás és az erdőgazdálkodás. *Erdészeti Lapok*, 154(10). 317-319. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01850/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_10.pdf (2024.02.09.)

- Somogyi Z. (2019b). Az erdei biomassza égetése gyorsíthatja a klímaváltozást. *Erdészeti Lapok*. 154(2). 37-39. https://erdeszetilapok.oszk.hu/01843/pdf/EPA01192_erdeszeti_lapok_2019_02_37-39.pdf (2024.02.09.)
- Sopp, L. & Kolozs L. (szerk.) (2013). Fatömegszámítási táblázatok -fatermési táblák nélkül, negyedik, változatlan kiadás. Nemzeti Élelmiszerlánc-biztonsági Hivatal Erdészeti Igazgatóság, Budapest, ISBN 978-963-87105-2-9, 280 p. https://nfk.gov.hu/Magyarország_erdeivel_kapcsolatos_adatok_news_513 (2024.02.09.)
- Steenari, B. M., Lindqvist, O., Marsic, N., Karlsson, L.G. & Tomsic, A. (1998). Long-term leaching of stabilized wood ash. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2. 3-16. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(98\)00070-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(98)00070-1)
- Sundberg, U. & Svanqvist, N. (1987). Fuel consumption as indicator of the economics in mechanization. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 2(1-4). 389-398. <https://doi.org/10.1080/02827588709382477>
- 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. Garpenberg
- Szell, A. (2009). Emissziós vizsgálatok használt forgácslapra (Doctoral dissertation, NymE), p. 138. <http://doktori.uni-sopron.hu/id/eprint/151/1/ertekezes.pdf> (2024.01.25.)
- Szendrey, I. (1981). Faipari kémiai technológia I. Egyetemi jegyzet. Erdészeti és Faipari Egyetem. Sopron, p. 159.
- Tamás, B.A. (2021). A hulladék hozzátüzelés hatása egy vegyestüzelésű kazán üzemi és kibocsátási paramétereire. Miskolci Egyetem, Energia- és Minőségügyi Intézet, Tüzeléstani és Hőenergia Intézeti Tanszék MSc. diplomamunka. p. 83. <http://midra.uni-miskolc.hu/document/38042/35136.pdf> (2023.02.03.)
- Tamaska, L., Rédey, Á. & Vízi Sz. (2001). Életciklus elemzés készítése. Veszprémi Egyetem Környezetmérnöki és Kémiai Technológia Tanszék. In Zilahy, Gy. (2001): Tisztább Termelés Kiskönyvtár, II. kötet, Budapest, Tisztább Termelés Magyarországi Központ. ISBN 963 00 6829 X
- Throe, 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 No. 8, European Forest Institute. pp. 15-16. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/proc08_net.pdf (2024.02.09.)
- Tóth, B., Bojtok, K., Hankovszky, G., Veres, S. & Lévai, L. (2012). Bioenergetikai melléktermékek: A fahamu és szalmahamu hatása a kukorica fejlődésére. *Növénytermelés*. 61(2). 97-107. http://real-j.mtak.hu/20627/2/NT_2012_61_02_.pdf (2023.02.03.)
- Tóthné Szita K. (2008). Életciklus-elemzés, életciklus-hatásértékelés. ME-GTK, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc, p. 39., 41. ISBN: 978-663-661-838-4
- Tóthné Szita K. (2018). Amit a környezeti lábnyomok üzennek. ECO-MATRIX (Az LCA Center Egyesület online folyóirata 2017). 1-2. 24-36. https://lcacenter.hu/wp-content/uploads/2018/12/ECO-Matrix_2017.pdf (2024.02.09.)
- U.S. Department of Health and Human Services - Public Health Service (1995). Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons. <https://semspub.epa.gov/work/07/30352463.pdf> (2024.01.30)
- Ugolev, B.N. (2014). Wood as a natural smart material. *Wood science and technology*. 48(3). 553-568. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0611-2>

- Vance, E.D. (1996). Land application of wood-fired and combination boiler ashes: An overview. *Journal of Environmental Quality*. 25(5). 937-944. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500050002x>
- Wielgosiński, G., Lechtańska, P. & Namiecińska, O. (2017). Emission of some pollutants from biomass combustion in comparison to hard coal combustion. *Journal of the Energy Institute*. 90(5). 787-796. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.06.005>
- Williams, T. M., Hollis, C.A. & Smith, B.R. (1996). Forest soil and water chemistry following bark boiler bottom ash application. *Journal of Environmental Quality*. 25(5). 955-961. <https://doi.org/10.2134/jeq1996.00472425002500050005x>
- Zevenhoven-Onderwater, M. (2001). *Ash-forming matter in biomass fuels*. Åbo/Turku, Finland: Åbo Akademi. p. 58. ISBN 952-12-0813-9 <https://users.abo.fi/mzevenho/portfolj/publikationer/PhD%20MZ.pdf> (2023.02.03.)
- Zheng, G., Su, H. & Cheng, Y. (2023). Role of carbon dioxide, ammonia, and organic acids in buffering atmospheric acidity: The distinct contribution in clouds and aerosols. *Environmental Science and Technology*. 57. 12571-12582. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c09851>

Elektronikus anyagok, webes felületek

- URL1: <https://www.worldbioenergy.org/> (2023. 04. 19.)
- URL2: <https://www.schiedel.com/hu/rolunk/kornyeztbarat-fatuzeles/> (2023. 05. 10.)
- URL3: https://www.ksh.hu/stadat_files/jov/hu/jov0058.html (2023. 05. 10.)
- URL4: <https://www.levego.hu/hirek/ellenezuk-megis-egetunk/> (2023. 05. 10.)
- URL5: https://www.levego.hu/sites/default/files/Kantar_Hoffmann_Levego_MCS_Hulladekegetes_2017dec.pdf (2023. 05. 10.)
- URL6: https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0006.html (2023. 10. 18.)
- URL7: <https://habitat.hu/sites/lakatasi-jelentes-2022/vissza-a-tuzifahoz-lakossagi-szilard-tuzeles-magyarorszagon/> (2023. 05. 28.)
- URL8: <https://habitat.hu/sites/lakatasi-jelentes-2022/vissza-a-tuzifahoz-lakossagi-szilard-tuzeles-magyarorszagon/> (2023. 05. 28.)
- URL9: <https://24.hu/fn/gazdasag/2022/10/30/futesi-celu-energiafelhasznalas-tel-homerseklet-foldgaz-tuzifa-tavho-aram/> Központi Statisztikai Hivatalnak a Háztartási költségvetési és életkörülmény adatfelvétel keretében lebonyolított lakossági felméréseken alapuló becslései alapján (2023. 05. 28.)
- URL10: <http://ecolounge.hu/eletmod/hazankban-a-kismeretu-szalloporkibocsatas-kozel-70-at-a-lakossagi-futes-okozza-mit-tehetunk-egeszsegunk-vedelmeben> (2023. 04. 18.)
- URL11: <https://www.homeinfo.hu/epitkezes-felujitas/gepeszet/futes/2184-kornyeztbarat-vagy-sem-a-fatuzeles> (2023. 04. 10.)
- URL12: <https://www.joanneum.at/en/> (2023. 05. 19.)
- URL13: <https://alternativenergia.hu/tag/umweltbundesamt-uba> (2023. 05. 19.)
- URL14: <https://ghgprotocol.org/Third-Party-Databases/BUWAL> (2023. 05. 19.)
- URL15: https://www.researchgate.net/institution/BIOENERGY_2020_GmbH (2023. 05. 19.)
- URL16: <https://phyllis.nl/Browse/Standard/ECN-Phyllis#firewood;>

URL17: <http://cdmaster2.vt.tuwien.ac.at/biobib/biobib.html>

URL18: <https://www.levego.hu/egyeb/futes-szennyezese/> (2023. 07. 10.)

URL19: https://www.ksh.hu/docs/hun/xstadat/xstadat_eves/i_ua025c.html (2023. 07. 23.)

URL20: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0700129.tv> (2023.06.28.)

URL21: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=A1300481.KOR&txtreferer=A0400140.TV> (2023.06.28.)

URL22: <http://www.jogiportal.hu/index.php?id=vokiwo8mq0ccnah3&state=20090301&menu=view> (2023.06.28.)

URL23: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0600020.kvv> (2023.06.28.)

URL24: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0700092.kvv> (2023.06.28.)

URL25: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1185> – A Bizottság (EU) 2015/1185 rendelete a 2009/125/EK európai parlamenti és tanácsi irányelvnek a szilárd tüzelésű egyedi helyiségfűtő berendezések környezettudatos tervezésére vonatkozó követelmények tekintetében történő végrehajtásáról (2024.01.30.)

URL26: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1700053.fm> - 53/2017. (X. 18.) FM rendelet a 140 kW_{th} és annál nagyobb, de 50 MW_{th}-nál kisebb névleges bemenő hőteljesítményű tüzelőberendezések működési feltételeiről és a légszennyező anyagainak technológiai kibocsátási határértékeiről (2023. 03. 16.)

URL27: <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a1300110.vm> - 110/2013. (XII. 4.) VM rendelet az 50 MW_{th} és annál nagyobb teljes névleges bemenő hőteljesítményű tüzelőberendezések működési feltételeiről és légszennyező anyagainak kibocsátási határértékeiről (2023. 03. 16.)

URL28: <https://www.schiedel.com/hu/rolunk/kornyezetbarat-fatuzeles/> (2023. 01. 10.)

URL29: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=LrBgld&Gesetzesnummer=20000077&FassungVom=2019-09-11> (2023. 03. 28.)

URL30: <https://www.ica.org/energy-system/buildings/district-heating>

URL31: https://nfk.gov.hu/Magyarország_erdeivel_kapcsolatos_adatok_news_513 - Nemzeti Földügyi Központ Erdészeti Főosztályának 2021. évi statisztikai adatai

URL32: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/> (2024.02.12.)

URL33: European Environment Agency. Country profiles - greenhouse gases and energy 2020. <https://www.eea.europa.eu/themes/climate/trends-and-projections-in-europe/climate-and-energy-country-profiles/country-profiles-greenhouse-gases-and-1> (2024.02.12)

URL34: <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/national-inventory-submissions-2018>

URL35: <https://sphera.com/wp-content/uploads/2022/02/GaBi-Databases-2022-Edition-Upgrades-and-Improvements.pdf>

URL36: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/>

URL37 <http://www.lcia-recipe.net/project-definition> (2024.02.13.)

MSZ EN ISO 17225-5:2021: Szilárd bio-tüzelőanyagok; Tüzelőanyag-előírások és osztályok; 5. rész: A tűzifa osztályozása

MSZ EN 303-5:2021: Szilárd tüzelőanyagokkal üzemelő, kézi és automatikus táplálású fűtőkazánok 500 kW-ig. (Rönkfa, bálás kazán, hasábfá, pellet, brikett, szén)

MSZ EN 15544:2009: Egyedi kivitelezésű téglá- és cserépkályhák.

MSZ EN 16510-1:2018: Szilárd tüzelésű kandallóbetétek, a nyitott tűzterű készülékeket is beleértve.

MSZ EN ISO 14040:2006 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Alapelvek és keretek (angol nyelvű) (MSzT);

MSZ EN ISO 14041:2001 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. A cél és a tárgy meghatározása és leltárelemzés (visszavont) (MSzT);

MSZ EN ISO 14042:2001 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Az életciklus alatti hatások értékelése (visszavont) (MSzT);

MSZ EN ISO 14043: 2001 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Az életciklus értelmezése (visszavont) (MSzT);

MSZ EN ISO 14044:2006 Környezetközpontú irányítás. Életciklus-értékelés. Követelmények és útmutatók (angol nyelvű) (MSzT);

MSZ EN ISO 14045:2012 Környezetközpontú irányítás. Termékrendszerek ökológiai hatékonyságának értékelése. Alapelvek, követelmények és útmutató (angol nyelvű) (MSzT);

ISO 14040:2006: Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework (ISO 14040:2006), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 14044:2006: Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines (ISO 14044:2006), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

ISO 14046:2014 Környezetközpontú irányítás. Vízlábnyom. Elvek, követelmények és irányelvek (ISO);

ISO/TR 14047:2012 Környezetközpontú irányítás. Életciklus értelmezés. Szemléltető példák az ISO 14044 hatásbecslésre (ISO);

ISO/TR 14048:2002 Környezetközpontú irányítás. Életciklus értelmezés. Adatok dokumentációs formátuma (ISO);

ISO/TR 14049:2012 Környezetközpontú irányítás. Életciklus értelmezés. Szemléltető példák az ISO 14044 alkalmazására (ISO).

ISO/TS 14067:2013: Carbon footprint of products—requirements and guidelines for quantification and communication: 52

ISO 14067:2018: Üvegházhatású gázok. Termékek szénlábnyma. Követelmények és irányelvek a számszerűsítéshez

