

GYARMATI GÁBOR–MIZIK TAMÁS

A biodízel-termelés gazdasági és fenntarthatósági vizsgálata szakirodalom-elemzéssel

A Föld korlátozott fosszilis energiaforrásai miatt egyre nagyobb az igény a megújuló erőforrásokra, például a biodízeltre. Jelen tanulmány szisztematikus szakirodalmi áttekintéssel vizsgálta meg a biodízel-előállítás gazdasági és fenntarthatósági kérdéseit. E folyamat során 56 releváns tanulmányt elemeztünk összesen 16 054 beazonosított cikkből. Minden tanulmány egyetértett abban, hogy az első generációs technológiával kapcsolatban több aggály is felmerül, azonban a magas termelési költségek miatt a további generációk az ár tekintetében egyelőre nem lehetnek versenyképesek. Vannak azonban ígéretes alternatívák, mint például a szennyvízalapú mikroalgák, a zsír-olajzsiradék, amennyiben az alapanyag költsége kevesebb mint 799 dollár/tonna, valamint a települési szilárd hulladékból kinyerhető rövid láncú zsírsavra épülő technológia, ahol az alapanyag ingyenesen áll rendelkezésre. A jelenlegi magas kőolajárak (0,80 dollár/liter) következtében ugyan gazdaságos a biodízel előállítása, de a melléktermékek (elsősorban a glicerin) megfelelő hasznosítása ekkor is elengedhetetlen, amit csak a biofinomítók tudnak megfelelően kezelni. A fenntarthatóságot néha csak költséghatékonysági kérdésként kezelik, de a helyzet komplex megközelítése egyre gyakoribb. A fenntarthatóság minimális elemei a környezeti, társadalmi és a gazdasági pillérek. *Journal of Economic Literature* (JEL) kód: Q16, Q56.

Bevezetés

A Föld fosszilis energiaforrásai korlátozottak, ezért az emberiségnek meg kell találnia a pótlásuk módját megújuló forrásokból. A közlekedési ágazatban a bioüzemanyagok kínálnak erre lehetőséget. Megújuló természetük mellett üvegházhatásúgáz-semlegesnek tekinthetők, mivel égetésük során a korábban megkötött szén-dioxid felszabadul. Az üvegházhatású gázok kibocsátása azonban jelentős lehet a termelési folyamat egésze során, ha azt a természetéstől a feldolgozásig nézzük (*Mizik* [2020]).

Gyarmati Gábor egyetemi adjunktus, Óbudai Egyetem Keleti Károly Gazdasági Kar (e-mail: gyarmati.gabor@kgk.uni-obuda.hu).

Mizik Tamás egyetemi docens, BCE Vállalkozásfejlesztési Intézet (e-mail: tamas.mizik@uni-corvinus.hu). A kézirat első változata 2022. január 7-én érkezett szerkesztőségünkbe.

DOI: <https://doi.org/10.18414/KSZ.2022.5.643>

Normál esetben a biodízel használata magasabb nitrogén- (NO_x -), valamint alacsonyabb szén-monoxid- és füstkibocsátást eredményez. Ezt *Nabi és szerzőtársai* [2006] imafüzérfa (*Melia azedarach*) és dízel–biodízel keverékek felhasználásánál mutatták ki. *Kawano és szerzőtársai* [2008] ugyanezeket az eredményeket kapta a repceolaj–metil-észter és a gázolaj különböző keverékeinek a felhasználásával. Ez erősen befolyásolhatja a fenntarthatóságukat. A fenntarthatóságot az általánosan elfogadott, úgynevezett Brundtland-jelentés szerinti értelemben használtuk:

„Az emberiség képes arra, hogy fenntarthatóvá tegye a fejlődést annak biztosítása érdekében, hogy az megfeleljen a jelen igényeinek, anélkül hogy veszélyeztetné a jövő generációi szükségleteinek a kielégítését.” (*Brundtland-jelentés* [1987] 27. pont.)

A biodízel esetében a fenntarthatóságnak három, egymással összefüggő pillérét kell vizsgálni: környezeti, gazdasági és társadalmi (*Esteves és szerzőtársai* [2020]).

A bioüzemanyagokat önmagukban vagy a hagyományos üzemanyagokhoz keverve lehet felhasználni. Közös jellemzőjük a szerves nyersanyag (például gabonafélék, olajos magvak, szerves eredetű zsírok vagy hulladékok) és a megújuló jelleg. Alapvetően kétféle bioüzemanyag létezik, a bioetanol az Otto-motorokhoz és a biodízel a dízel-motorokhoz. Jelenleg a biodízel előállításának leggyakoribb alapanyagai az olajban gazdag növények, például a napraforgó, a repce vagy a pálmafa.

A tanulmány felépítése a következő. Először áttekintést nyújtunk a biodízel-ágazat főbb jellemzőiről, beleértve a biodízel-generációkat, a legfontosabb alapanyagokat, az előállítás költségeit, a legjelentősebb termelőket és a biodízel földrajzilag eltérő bekeverési arányait. Majd bemutatjuk a kutatás módszertanát, amellyel kiválasztottuk a releváns cikkeket. Az eredményeket két alfejezetre osztottuk: országszintű és globális biodízel-elemzések. Végül a főbb eredményeinket foglaljuk össze, és levonjuk következtetéseinket.

A biodízel-ágazat főbb jellemzői

A biodízel előállításának szempontjából a legjelentősebb tényező az alapanyag. Az alapanyagok és a termelési módszerek alapján három generációt különböztethetünk meg (1. táblázat).

1. táblázat

Biodízel-generációk

Generációk	Alapanyag	Átalakítási eljárás	Szénmérleg
Első	repce, napraforgó, pálma, szójabab, állati zsír	átészterezés	pozitív
Második	jatropha és nem ehető olajok	átészterezés	pozitív
Harmadik	algák és tengeri moszatok	algaszintézis	negatív*

* Meg kell jegyezni, hogy a negatív szén-dioxid-mérleg a biodízel-termelésben a helyettesített szén-dioxidon alapul, ami a különböző algafajták és technológiák szerint eltérő lehet (*Bai és szerzőtársai* [2017]).

Forrás: saját szerkesztés *Naik és szerzőtársai* [2010] alapján.

A gyártási folyamatot tekintve alapvetően két módszer létezik: hideg- és meleg-sajtolás, valamint a melegsajtolásnál van lehetőség további átészterezésre. Mivel ez utóbbi alkalmazásával lehet a legtöbb olajat kinyerni, ezért a nagy termelőegységek csak ezt a módszert használják. Összehasonlításképpen: a hidegaprítókkal kinyerhető az olaj 80 százaléka, míg a melegsajtolással és további átészterezéssel akár a 99 százaléka is, így szinte semennyi olaj nem marad a gyártás során képződő takarmányban (Jaeger–Siegel [2008]).

A biodízel értékláncában a nyersanyagok játsszák a legfontosabb szerepet. Ezért – a lehető legmagasabb – olajtartalmuknak kiemelt jelentősége van. Az alapanyag-tól függően ez 1 százalék (használt sütőolaj) és 70 százalék (mikroalgák) között változhat. A 2. táblázat áttekintést nyújt a jelenleg használt biodízel-alapanyagokról és azok olajtartalmáról.

2. táblázat

A legfontosabb biodízel-alapanyagok olajtartalma

Alapanyag	Olajtartalom (százalék)
EHETŐ	
Szójabab	15–20
Repce	37–50
Pálma	20–60
NEM EHETŐ	
Jatrophamag	35–60
Használt sütőolaj	1–42
EGYÉB ANYAGOK	
Mikroalgák	30–70
Szennyvízből algafajták	40–60

Forrás: saját szerkesztés Callegari és szerzőtársai [2020], Canakci [2007], Daud és szerzőtársai [2015] alapján.

Az ehető alapanyagok használata esetén az alapanyagköltség adja a teljes termelési költség zömét, jellemzően legalább a 80 százalékát, ami a repce esetében ráadásul némileg még magasabb, mint a szójababnál (Haas és szerzőtársai [2006], Li-Guo [2010]). Ez a fő oka annak, hogy a használt sütőolajok felhasználása gazdaságilag előnyösebb, mint bármely magas olajsavtartalmú, első generációs alapanyagé. A nyersanyagköltség mellett az alacsony működési hatékonyság és az anyag- és energiavesztés is jelentős lehet a termelési folyamat során (Amiri–Arabian [2016]).

A jelenlegi magas előállítási költségek miatt a biodízel előállításának pénzügyi fenntarthatósága megkérdőjelezhető. Baudry és szerzőtársai [2017] 11 különböző bioüzemanyag-alapanyagot elemezett, és megállapította, hogy gazdaságilag egyik sem fenntartható, még 50 dollár/hordó olajár mellett sem. A számításokhoz 0,32–1,11 euró/lge¹ (azaz

¹ Liter/benzin egyenértékes (Litre per Gasoline Equivalent, LGE).

hordónként 50 és 180 dollár közötti ár 2030-ig) közötti árakat feltételeztek. A végső fogyasztók számára a biomassza-alapú biodízel költségei a legalacsonyabbak a hat biodízel-alapanyag közül. Másrésztől a repceből származó biodízelnak a legnagyobb az államháztartásra gyakorolt pozitív hatása (0,03 euró/liter 50 dollár/hordó olajár mellett, ami 0,08 euró/literre nő 180 dollár/hordó olajárnál). A környezeti és a földhasználati kérdéseket figyelembe véve a mikroalgát találták a legkevésbé megfelelő forrásnak a biodízel előállításához, mivel magas a végfelhasználói költsége (még 180 dollár/hordó olajár mellett is 0,18 euró/tonna többletköltséget eredményez), és negatív az államháztartási hatása (180 dollár/hordó olajár mellett is -0,08 euró/liter). Országszinten a 3. táblázat nyújt áttekintést a legjelentősebb biodízel-termelők gyártási költségeiről.

3. táblázat

A legjelentősebb biodízelgyártók gyártási költségei, 2020

Országok	Dollár/liter	Súlyozott dollár/liter*
Argentína	0,60	0,67
Brazília	0,40	0,44
Európai Unió	0,85	0,94
Indonézia	0,84	0,93
Egyesült Államok	0,48	0,53

* A súlyozás figyelembe veszi a biodízel körülbelül 10 százalékkal alacsonyabb energiatartalmát a gázolajhoz képest (EU [2015]).

Forrás: saját összeállítás az IRS [2022] és az OECD/FAO [2022] adatai alapján.

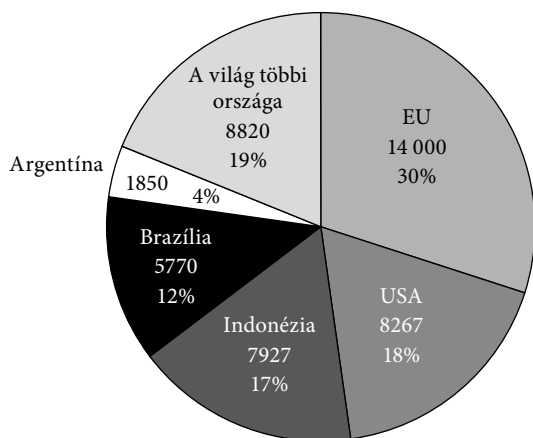
A jelenlegi magas olajár (a Bloomberg adatai alapján a WTI nyersolaj ára 113,9 dollár/hordó) 0,80 dollár/liter kőolajárat eredményez (<https://www.bloomberg.com/energy>). Ez Argentína, Brazília és az Egyesült Államok számára nyereséges biodízel-termelést jelent, ugyanakkor Indonézia és az Európai Unió számára veszteségeset, amit a biodízel alacsonyabb energiatartalmának (súlyozott dollár/liter ár) figyelembevétele tovább növel. Bár a 2021. évi biodízel-előállítás költségei még nem elérhetőek, az azonban jól látható, hogy az olajár emelkedése begyűri az alapanyagok árába, így várhatóan a fenti összehasonlításhoz képest sokkal rosszabb képet fogunk kapni. Gyakorlatilag ez azt jelenti, hogy további támogatás, adójóváírás vagy kötelező bekeverési arány nélkül a biodízel előállítása gazdaságilag nem mindenütt fenntartható. Az Egyesült Államokban, Argentínában és Brazíliában a fő nyersanyag a szója. Noha olajtartalma alacsony (15–20 százalék), a mellékterméke értékes takarmány a jó exportpiacokkal rendelkező Argentína és Brazília számára (*Cremonez és szerzőtársai* [2015]). Az Egyesült Államok a termelési folyamatot a szója termés hozamát és az olajtartalom növelését elősegítő géntechnológiával is támogatja. Az indonéz biodízel-termelés pálmaolajon alapul, amelynek az előállítási költsége literenként 0,84 dollár, míg a repcealapú európai termelés a legdrágább az elemzett országok között (literenként 0,85 dollár). Ennek következtében a biodízelárakra hatással van az eltérő alapanyagok piaci árának az egymáshoz való viszonya. Azt is szem előtt kell tartani, hogy

a 3. táblázatban szereplő értékek nagy része az árfolyamok (helyi pénznem/dollár) változásától is függ, például a dollárral szemben erősödő euró megemelte a dollárban kifejezett európai termelési költséget, míg Brazíliában a dollárral szemben gyengülő real jelentősen csökkentette azt 2020-ban.

A biodízel-világpiac erősen koncentrált, a négy legjelentősebb termelő adja a teljes termelés 77 százalékát (1. ábra). Az Európai Unió 14 000 millió liter (a teljes termelés 30 százaléka), az Egyesült Államok 8267 millió liter (18 százalékos részesedés) biodízelt termelt, míg az indonéz és brazil termelés 7927 és 5770 millió liter volt (a globális termelés 17, illetve 12 százaléka).

1. ábra

A biodízel termelése és összetétele, 2020 (millió liter)



Forrás: saját összeállítás az OECD/FAO [2022] adatbázis alapján.

A legmagasabb előállítási költségek ellenére az Európai Unió a világ legnagyobb biodízel-termelője. Ez kapcsolatban van azzal, hogy a dízelüzemű autók aránya Európában a legnagyobb, a teljes járműpark 41,9 százalékát, az új személygépkocsi-parknak pedig 35,9 százalékát tette ki 2018-ban (ACEA [2020a], [2020b]). Ez azonban nagyon eltérő a tagországok között, például Spanyolországban 60,0 százalék, Franciaországban 51,9 százalék, Olaszországban 44,4 százalék vagy Németországban 32,2 százalék volt (ACEA [2020a]). A biodízelt főleg buszokhoz, valamint a különféle haszongépjárművekhez használják a többi jelentős termelő országban, valamint gázolajhoz keverve az országok különböző bekeverési előírásai szerint. A személygépkocsik relatíve alacsony biodízel-felhasználását Brazíliában a rugalmas üzemanyag-felhasználású (benzin és tetszőleges arányú bioetanol keverékével üzemelő) gépjárművek magas aránya, míg az Egyesült Államokban a dízelüzemű személygépkocsik elhanyagolható aránya indokolja.

A jövőt illetően békebeli időkre épülő jóslatok szerint a biodízel-termelés várhatóan 7 százalékkal csökken a következő tíz évben, ráadásul a piaci struktúra sem fog jelentősen megváltozni (OECD/FAO [2022]). Ugyanakkor az olajár jelentős változása, az inflációs várakozások felborulása és a háborús helyzet, illetve

a koronavírus-világjárvány okozta változások teljesen felboríthatják ezeket az előrejelzéseket. A növekvő olajár a biodízel-termelés növekedésének irányába mutat:

- a top 5 termelő 2030-ban várhatóan megegyezik a jelenlegiekkel,
- az Európai Unió, az Egyesült Államok és Indonézia részesezése kismértékben csökkenni fog,
- Brazília és Argentína részaránya várhatóan növekedni fog.

Jelenleg a biodízel fő felhasználási formája a gázolajba történő bekeverés. A keverékben a biodízel részaránya 1 (B1) és 100 százalék (B100) között változhat. A bekeverésre vonatkozó előírás a biodízel iránti kereslet fontos és stabil eleme, valamint fenntartja, sőt növeli a biodízel-termelést. A biofinomítók fenntartása ettől, valamint az (alacsony) olajáraktól függetlenül is kiemelt jelentőségű, mivel fontos innovációs forrást jelentenek. A biodízel-bekeverésre vonatkozó előírások világszerte eltérnek (*Lane [2021]*):

- Argentína bevezette a B10-et, azonban a koronavírus-járvány és az akkori alacsonyabb olajárak hatására a bekeverési arány csökkenése várható 2021-re. Az ország több biodízelt exportál, mint amennyi a belső fogyasztása;
- Brazíliában 12 százalékos a bekeverési arány (B12). Az ország 100 százalékban önellátó, és jelentéktelen a biodízel külkereskedelme;
- a biodízel felhasználása Kínában és Indiában elhanyagolható;
- az Európai Unió 2020-ra vonatkozó általános célja a 7 százalékos bekeverési arány elérése, amely azonban országoként eltérhet;
- Indonézia bevezette a B30-at;
- nincs országsszintű előírás az Egyesült Államokban: Oregon állam 2016-ban vezette be a B5-öt, míg 2021-ben Minnesotában hatályba lépett a B20-as előírás a nyári hónapokra (a téli hónapokban 5 százalékos a bekeverés mértéke).

Anyag és módszer

A tudományos eredmények megfelelő szintjének eléréséhez öt jelentős online adatbázist használtunk: Scopus, Web of Science, JSTOR, ProQuest és Science Direct. Vizsgálatunkhoz a cikkek kiválasztását két lépésben hajtottuk végre. Először a legnagyobb adatbázisban (Science Direct) kerestünk a „biodízel”, „gazdasági” és „fenntarthatóság” kulcsszavakkal. A célunk olyan cikkek kiválasztása volt, amelyek egyszerre foglalkoznak gazdasági és fenntarthatósági kérdésekkel, és túllépnek az egyszerű termelési-költség- vagy a fenntarthatótermelés-alapú megközelítésen. Kezdeti szűrésünk 16 054 cikket eredményezett. Ezért a keresést leszűkítettük az elmúlt hét évben (2015-ben vagy később) megjelent angol nyelvű tudományos cikkekre, hogy a legfrissebb eredményeket dolgozhassuk fel. Ezzel a cikkek száma 2621-re csökkent. Az energia- és környezettudomány szakterületek kiválasztása 1830 cikket eredményezett. Ezek közül a következő kérdésekre összpontosító cikkeket távolítottuk el első körben:

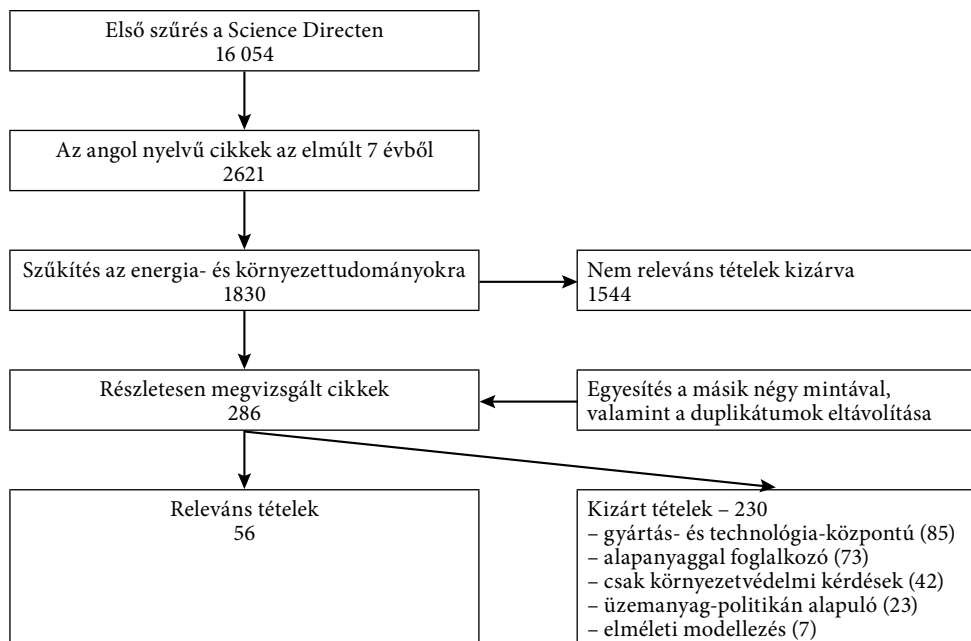
- nyersanyag-előállítás,
- technológiai és előállítási módszerek,
- szabályozással kapcsolatos kérdések,

- üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentése,
- nem üzemanyagcélú felhasználás (például áram termelése),
- megújuló energiák és egyéb bioüzemanyagok, például sugárhajtómű-üzemanyag, bioetanol, biobutanol, biogáz, biometán vagy biomassza.

A második körben ezt az almintát egyesítettük a másik négy mintával (Scopus, Web of Science, JSTOR, ProQuest). A duplikátumok eltávolítása után 286 cikkünk maradt a részletesebb elemzésre. Ebben az esetben áttekintettük az absztraktokat, illetve ha ez nem volt elegendő a döntés meghozatalához, akkor a cikkek többi részét is. A nem releváns cikkeket kizártuk, így 56 releváns tanulmányt elemeztünk. A 2. ábra összefoglalja az irodalom kiválasztásának lépéseit.

2. ábra

A szakirodalom kiválasztásának mérföldkövei

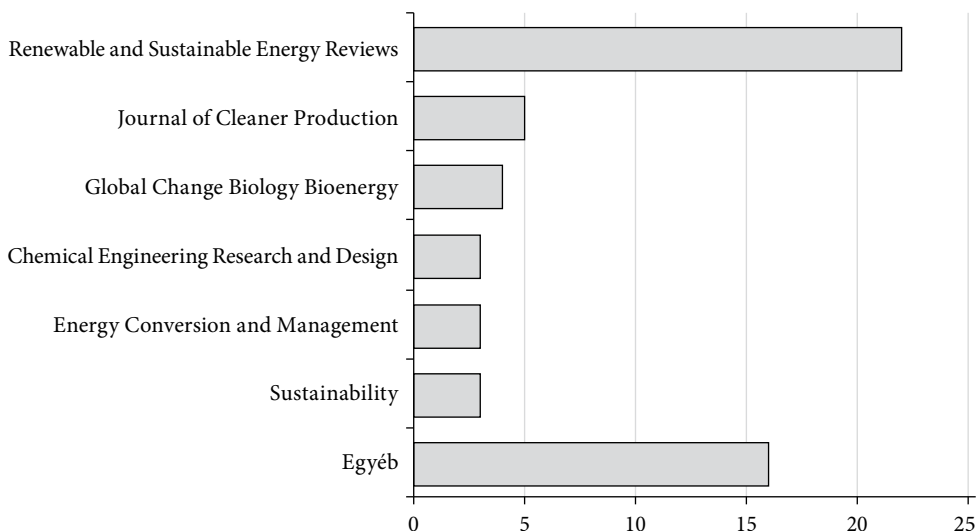


Forrás: saját szerkesztés.

A kiválasztott cikkek éves megoszlása az elemzett periódusban változó volt, azonban 2020-ban 12 cikk, 2017-ben 12 cikk és 2016-ban 9 cikk került publikálásra. A folyóiratok eloszlását illetően a Renewable and Sustainable Energy Reviews volt az elsődleges forrása a témához kapcsolódó cikkeknek, 56 cikkből 22 jelent meg ott (3. ábra). Ezt követi a Journal of Cleaner Production (5 cikk), míg 4 cikk jelent meg a Global Change Biology Bioenergy, 3-3 a Chemical Engineering Research and Design, az Energy Conversion and Management és a Sustainability című folyóiratokban. A fennmaradó cikkek 16 különböző folyóiratban jelentek meg.

3. ábra

A kiválasztott cikkek megoszlása folyóiratok szerint



Forrás: saját szerkesztés.

Eredmények

A kiválasztott cikkek két kategóriába sorolhatók: megközelítőleg a felük országspecifikus témákat elemez, míg a másik felük általánosított, világszintű kérdésekkel foglalkozik. Közös pontjuk a biodízel-termelés gazdasági és fenntarthatósági kérdéseinek együttes elemzése.

Országspecifikus elemzések

A biodízel-termelés jövedelmezőségét jelentősen befolyásolják az alacsony olajárak, valamint a magas növényi olajárak. Ezek az okai a széles körben elterjedt állami beavatkozásoknak, például a kötelező bekeverési aránynak, célértékeknek, támogatásoknak, valamint adókedvezményeknek/-mentességeknek, mivel ezek hiányában a termelés nem növekedne (Naylor-Higgins [2017]).

A globális termelésben betöltött fontos szerepe miatt a brazil biodízeliipar elemzése gyakran témája a kapcsolódó szakirodalomnak. De Oliveira-Coelho [2017] szerint Brazíliában a biodízel-termelés jelentősen nőtt (kevesebb mint 10 év alatt 736 m³-ről 3 419 838 m³-re), és fontos üzemanyagforrássá vált. A biodízel gazdasági és környezeti előnyökkel jár, mivel az ország az importált fosszilis gázolajat a helyben gyártott biodízellel helyettesítheti. A biodízelszektor mégis pénzügyi nehézségekkel küzd, a kereslet pedig kiszámíthatatlan. Jelenleg a szójaolaj és a marhafaggyú a két fő alapanyag, de az alapanyagok körét a jövőben bővíteni kell.

Rico-Sauer [2015] rámutatott arra, hogy az étkezési célra is használható növényi olajtermékek drágábbak, mint a biodízel, ezért támogatni kell a gazdákat a bioüzemanyagok előállításához szükséges alapanyagok előállításában. Bár a helyi termelés helyettesíti az importot, és megtakarítást eredményez, a támogatásokat is figyelembe kell venni. Ugyanez volt a helyzet a bioetanol gyártásával is mindaddig, amíg az ár tekintetében versenyképesse nem vált. A szerzőpáros összekapcsolta a fenntarthatóságot és a termelést, mivel a biodízel használata hozzájárul a jobb levegőminőséghez és az üvegházhatásúgáz-kibocsátás csökkenéséhez is.

Murta és szerzőtársai [2021] a biodízel vasúti felhasználását elemezte. A gázolajhoz képest a B20 használatával 3,42 százalékkal nagyobb fogyasztást mértek, de a széndioxid-kibocsátás jelentősen csökkent. A kutatás rámutatott a pálma használatának néhány előnyére, például segíthet a szén-dioxid megkötésében, ezáltal az éghajlatváltozási problémák enyhítésében, valamint a pálmaolaj előállítása ökológiailag is előnyös, mivel (más trópusi növényekből származó olajokhoz képest) alacsony a környezeti hatása, nagy az energiatartalma, és a pálmafák nagymértékben megkötik a szén-dioxidot. Több mint 20 éves hasznos gazdasági élettartama és egész évben folyamatos termése révén állandó és a többi haszonnövényénél magasabb jövedelmet biztosít a termelőknek, valamint fontos szerepet játszik a termelőrégiók szegénységének csökkentésében. Brazíliában a pálmafa az egyetlen olyan növény, amelyet rossz minőségű területeken is lehet termesztani.

Miranda és szerzőtársai [2018] a használt sütőolajat mint biodízel-alapanyagot elemezte. Számításaik szerint csak São Paulo háztartásaiból begyűjtve havonta 693 600 liter tiszta biodízelt (B100) lehetne előállítani belőle. Jelentős bevételek és megtakarítások eredményeznek a tiszta biodízel, a glicerin, a szén-dioxid-kredit (karbon-kredit) és a B20 helyi buszparkban történő felhasználásából. Ezek összege csaknem 1,3 millió dollár lenne havonta. A további pozitív hatás a zöldebb környezet, mivel a biodízel használatával kapcsolatban számos tanulmány jobb levegőminőségről számolt be. Logisztikai szempontból a biofinomítókat a lakott területek közelében kell elhelyezni, ahol a kínálat és a kereslet egyaránt biztosított. A használt növényi olaj biodízellel történő átalakítása gazdasági és környezeti előnyökkel is jár.

Da Silva és szerzőtársai [2018] generátorban tesztelte a használt sütőolajat, és azt találta, hogy 30 százalék biokomponensű keverékig az energiatermelési potenciál megegyezik a gázolajéval, ami legalább 33 százalékkal csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását. São Paulo városának a havi 8800 köbméter meghaladó használsütőolaj-termelési potenciálja képes kielégíteni buszparkjának igényeit, havi 5 millió dollár nyereséget termel, és ugyanennyi költséget takarít meg. Ily módon kapcsolható össze a használt sütőolajból származó biodízel-előállítás gazdasági és műszaki életképessége. Ezzel összhangban *César és szerzőtársai* [2017] eredményei szerint a brazil használt sütőolajra épülő biodízel gazdaságilag és technikaileg is fenntarthatónak bizonyult. A környezeti hulladékterhelés csökkentésével és a megsemmisítendő olaj felhasználásával a szennyvízkezelésre gyakorolt hatás is pozitív. Azt is látni kell, hogy mindezek a pozitív externáliák csak akkor érhetők el, ha megfelelő kormányzati támogatás áll mögötte. *Yang és szerzőtársai* [2017] ugyanezt tapasztalta Japán esetében, ahol a használsütőolaj-alapú biodízel-termelés

környezetvédelmi szempontból és gazdaságilag is hasznosnak bizonyult. A szerzők kiemelték az alacsonyabb károsanyag-kibocsátást és a hulladék újrafeldolgozását is, azonban ennek a rendszernek a működtetése hatékony gyűjtőrendszert igényel. Ennek ellenére az ingadozó világpiaci árak instabillá teszik a biodízel használatából származó nyereséget. *Cremones és szerzőtársai* [2015] szerint Brazília nagyon jó nyersanyagforrásokkal rendelkezik, lehetővé téve szójababból és olajos magvakból a közlekedési ágazat számára 372 millió tonna biodízel előállítását. A cikk írói rámutattak arra is, hogy a termelés a kapacitásnak csak 37 százalékát használja ki, ami nem lehet versenyképes.

Zhao és szerzőtársai [2021] számításai szerint Kínában a használt étolajból előállított biodízel szén-dioxid-kibocsátása (391 kilogramm olajegyenérték/tonna) 69 százalékkal alacsonyabb, mint a hagyományos dízelé (1270 kilogramm olajegyenérték/tonna). Az előállítási folyamat legjelentősebb költségeleme az alapanyag begyűjtése, ami az összes költség 83 százalékát teszi ki. A begyűjtött étolaj feldolgozási fázisát az átszterilizálás dominálja (117,64 dollár/tonna, a feldolgozási költség 65 százaléka), amely a metanolfogyasztásból (61 százalék), a villamosenergia- és szénfogyasztásból (27 százalék), a munkaerőköltségből (10 százalék) és az egyéb anyagfelhasználásból (1 százalék) áll. Összességében a használt étolajból előállított biodízel jobb környezeti teljesítményt nyújt, mint a hagyományos dízel. A jelentős szénfelhasználás és az átszterilizálási folyamat során használt metanol miatt azonban ez nem minden területen jelentkezik egyformán. A használt étolajból előállított biodízel gazdasági költsége 31 százalékkal magasabb, mint a fosszilis dízelé. Ennek fő oka az, hogy Kínában jelentős a használt étolaj illegális felhasználása, ezért fizetni kell az alapanyagért. A biodízel környezetvédelmi és gazdasági teljesítménye nagymértékben függ az energiaátalakítási arányoktól és az energiafelhasználás hatékonyságától.

A szennyvíz felhasználása is ígéretes alternatívát jelent. *Kligerman–Bouwer* [2015] az algákon alapuló szennyvízkezelést két szempontból is hasznosnak találta: megoldást nyújthat a tisztítatlan szennyvíz kérdésre, valamint általa a biodízel gazdaságosan előállítható. A szerzőpáros számításai szerint: ha Braziliában csak a települési hulladék 40 százalékát használnák fel, az legalább 10 százalékos haszonkulcsot eredményezne, ennek mértéke azonban a biodízel piaci árától és a – jelenleg még kiforratlan – gyártási technológiától is függ. Ez azt is jelenti, hogy a működési költségek a közeljövőben jelentősen csökkenhetnek. A módszer legfőbb előnye az ingyenes nyersanyag.

A növekvő népesség és az egyre nagyobb mértékű motorizáció miatt Kínában folyamatosan nő az üzemanyagok iránti kereslet, beleértve a bioüzemanyagokat is. Kína különböző részei lehetőséget kínálnak különféle biodízel-alapanyagok előállítására. *Xu és szerzőtársai* [2016] rámutatott, hogy a helyi adottságok miatt a repce, a gyapotmag, a jatropha és a mikroalgák is megfelelőek lehetnek, ráadásul a használt sűtőolaj minden kínai régióban rendelkezésre áll. A fenntarthatóságot ezen energiaforrások megújuló voltához kapcsolták. *Sun és szerzőtársai* [2019] ígéretes lehetőségnek találta a mikroalga-biodízelt Kínában, bár jelenleg még túl drága az előállítása. A tanulmány felhívta a figyelmet arra, hogy komplex elemzés szükséges, amely figyelembe veszi a környezeti fenntarthatóságot és az ökoszisztéma-szolgáltatásokat, mivel ezeket a biodízelpár befolyásolhatja.

Chen és szerzőtársai [2018] kínai kísérletek alapján azonosította a termelési költségek legfontosabb változóit: termesztési módszer, biomassza-termelékenység, a kivont lipid tisztasága, a növény jellemzői és a tőkebefektetés nagysága (föld, berendezések és épületek). Ahhoz, hogy a költségek elfogadható szintet érjenek el, olyan berendezéseket/technológiákat kell kifejleszteni, amelyek ezen kulcsváltozók vonatkozásában a jelenleginél olcsóbb és hatékonyabb megoldást kínálnak. Ez tovább ösztönözheti a fenntarthatóságot. A szerzők szerint a mikroalgák termelése jó alternatíva lehet a jövőre nézve, ha az olajmezők kimerülnek, és az egyéb biodízel-alapanyagok előállítására nehézségbe ütközik.

Dey és szerzőtársai [2020] a maláj és indonéz tapasztalatokat foglalta össze. A pálmaolajból származó biodízel környezetbarátnak tűnt, de még nem áll rendelkezésre elegendő információ. Mivel a pálmaolaj-termelés javítja a foglalkoztatás szintjét és a megélhetést, valamint a motor teljesítményét, miközben a károsanyag-kibocsátást csökkenti, ez a környezet szempontjából fenntartható felhasználási mód. A népeségnövekedés növeli az élelmiszerek iránti keresletet. A biodízel iránti kereslet is nő, mert csökkenteni kell a szén-dioxid-kibocsátást. A pálmaolaj a vezető bioüzemanyag 35 százalékos termelési részesedéssel, magas hozammal (hektáronként 4,2 millió tonna) és olajtartalommal (hektáronként 5000 kilogramm olaj), valamint alacsony piaci árral (660 dollár/tonna).

Van Noordwijk és szerzőtársai [2017] hangsúlyozta, hogy a gazdaságilag és ökológiailag fenntartható (indonéz) pálmaolaj-ágazat termelési szintje környezeti szempontból optimális, maximális nettó kibocsátásmegtakarítással, ami főleg a nitrogénműtrágya használatának a megfelelő mennyiségétől függ. *Yusoff és szerzőtársai* [2020] megkérdőjelezte a pálmaolaj-termelés fenntarthatóságát a trópusi erdők irtása miatt. Megjegyezte azt is, hogy Malajzia korlátozta a olajpálma-ültetvények telepítését az erdők helyén, így erre a célra leginkább más, kevésbé nyereséges növények (például kókusz, kakaó) termőterületeit használták fel. Bár Malajzia gazdag pálmaolajban, a biodízel használata azonban számos ok miatt alacsony, például elégtelenek a kormányzati ösztönzők a közlekedési vállalatok motiválására, túlzottan érzékenyek a szállítási szolgáltatások, és nincs erős piaci verseny. *Zailani és szerzőtársai* [2019] különböző kormányzati intézkedéseket (támogatásokat és/vagy adómentességet) javasolt ezeknek a problémáknak a megoldására, mivel a biodízel felhasználása számos előnnyel járhat (például alacsonyabb függőség a fosszilis tüzelőanyagoktól és jobb levegőminőség).

Faurani és szerzőtársai [2018] azzal érvelt, hogy az indonéz biodízel-termelés befolyásolja a nemzetgazdaság teljesítményét, a munkaerő-keresletet, a munkanélküliséget és a szegénységet. Hatékonysága és hatása azonban számos tényezőtől függ, például az exportártól, a dollár-rúpia árfolyamtól, a termék/nyersanyag fűtőértékétől és minőségétől, valamint a világ gazdaság helyzetétől. A szimuláció alapján a városi szegénység 2,71 százalékkal csökkent, a gazdasági növekedés (+3,65 százalék) és az ipari termelés bővülésének (+4,41 százalék) következtében. Ez 0,79 százalékkal növelheti a munkaerőigényt, míg a munkanélküliséget 24,39 százalékkal csökkentheti.

Harsono és szerzőtársai [2016] ígéretes alternatívának találta Indonézia számára a halhulladék és a növényi maradványok keverékét. A B100 használatával magasabb üzemanyag-fogyasztást tapasztaltak a kereskedelemben forgalmazott

dízélüzemanyaghoz képest (0,69 liter/10 kilométerrel szemben 0,65 liter/10 kilométer), ugyanakkor ez kisebb volt, mint az alacsony kéntartalmú tiszta gázolajé (1,03 liter/10 kilométer). Ez lehetővé teheti a gazdaságilag fenntartható üzemanyag-termelést, valamint a halhulladék ártalmatlanítását.

Ianda és szerzőtársai [2020] több országra kiterjedő megközelítést alkalmazott a biodízel-termelés és -fogyasztás tekintetében a szubszaharai Afrikában (Botswana, Malawi, Mozambik, Namíbia, Dél-Afrika, Tanzánia, Zambia és Zimbabwe). Ezzel a megközelítéssel megtalálható a legjobb nyersanyag, illetve növelhető az együttműködés a biodízel, valamint a melléktermékekből származó energia előállításában és felhasználásában. A szerzők megállapították, hogy a pálmaolaj termelése a legolcsóbb, de a jatrophaolaj termelése ötször több munkahelyet teremthet. A magas termelési költségek miatt a biodízel előállítása jelentős kormányzati segítséget (támogatást és/vagy adócsökkentést) igényel. A biodízel megújuló volta mellett a fenntarthatóságba beletartozik a társadalmi befogadás és a hátrányos helyzetű régiók fejlődése is.

Kgathi és szerzőtársai [2017] Botswanában szintén a jatropha-bioüzemanyagot elemezte: a gazdasági hatások nem voltak meggyőzők az alacsony hozamok miatt (korábbi nemesítés hiánya), valamint a leromlott termőképességű mezőgazdasági területek nem voltak alkalmasak termelésre, mivel a hozamok még a vártnál is alacsonyabbak lettek. A szerzők nyolc, a jatropha-bioüzemanyaggal kapcsolatos fenntarthatósági mutatót értékelték, amelyek vonatkozásában a hatások lehetnek pozitívak (+) vagy negatívak (-): makrogazdasági hatások (+), gazdasági életképesség (főleg -), földhöz való hozzáférés (- a nagyüzemek és + a kisüzemek esetében), élelmiszer-biztonság (-), biológiai sokféleség (-), vízkészletek (-), energiamérleg (+) és éghajlatváltozás (+).

Baral és szerzőtársai [2020] kiszámította a jatropha-biodízel környezeti és gazdasági fenntarthatóságát Nepálban. Ez nagyban függött a növény terméshozamától és az olaj kémiai paramétereitől. A hektáronként 3,9 tonnánál nagyobb terméshozam és a magas olajtartalmú jatrophafajta (50 százaléknál nagyobb olajtartalom) a hagyományos gázolajhoz hasonló kiskereskedelmi árat eredményez (1 dollár/liter). A jatropha-biodízel szén-dioxid-kibocsátásának a hagyományos gázolajéhoz (87,23 gramm szén-dioxid-egyenérték/megajoule) viszonyított csökkentése azonban nem egyszerű. Ehhez magas termés- (hektáronként több mint 5 tonna), valamint 50 tömegszázalék feletti olajhozamra van szükség. Emellett az erdőszűltség növelésének az érdekében alapvetően marginális területeket kell az ültetvények telepítéséhez használni.

Corral és szerzőtársai [2015] a spanyol Fuenteventura szigeten a szennyvíztisztító teleppel kombinált jatrophatermelés működését vizsgálta. A terület nagyságától és a távolságoktól függően a sziget járműforgalmának igényeit egyetlen jatrophaüzemmel is fedezni lehetne. Ez egyaránt eredményezne gazdasági és környezeti fenntarthatóságot. A sziget közlekedésigázolaj-igénye 40 960 tonna. A szennyvíztisztító telepek 10 kilométeres körzetében a termelés 1249 tonna lenne, ami a sziget teljes szükségletének 27,56 százaléka. *Castro Gonzáles* [2016] kiemelte a kedvező talaj-, éghajlati és gazdálkodási feltételek szükségességét, hogy a jatropha-biodízeltermelés gazdaságilag és környezetileg is megvalósítható legyen.

Habibullah és szerzőtársai [2015] kimutatta, hogy a tiszta biodízel előállítása Bangladesben drága. Várható költsége literenként 1,6–23,96 dollár között van, míg

a hagyományos gázolaj ára literenként csak 0,71–0,91 dollár, a 20 százalékos mustárbiodízelt tartalmazó keveréké pedig literenként 0,77 dollár. Az előállítási költség mérsékelhető a nyersanyag- és a feldolgozási költség csökkentésével és a metanol átszterezés utáni újrahasznosításával, ha ez utóbbit kereskedelmi mennyiségben gyártják.

Basili–Rossi [2018] azt tanulmányozta, hogy milyen gazdasági és környezeti fenntarthatóság jellemzi – többek között – az etiópai mustár (*Brassica carinata* – nem ehető virágos növény második generációs bioüzemanyag gyártásához) biodízeltermeléshez történő felhasználását Olaszországban. A szerzők összességében öt toszkán növény vizsgálata alapján megállapították, hogy a szakirodalomban közölt hozamok és eredmények csak optimális körülmények között érhetőek el, és a gazdasági életképességhez állami támogatásra van szükség. Indonéziában a pálmaolaj ára tonnánként 655 dollár, vagyis tonnánként 486 euró volt 2018 februárjában, a kőolaj ára pedig ugyanezen időszakban tonnánként 525–598 euró. Olaszországban az etiópai mustárolaj ára tonnánként 618 euró volt, ami sokkal magasabb, mint az indonéz pálmaolajé.

Durišić–Mladenović és szerzőtársai [2018] a szerb biodízelt-ágazat gazdasági életképességét vizsgálta. Szerbia olajos magvakból 128–266 ezer tonna, használt sütőolaj összegyűjtésével 10 ezer tonna, míg paradicsom-, szőlő- és dohánymagból 8 ezer tonna biodízelt tudna előállítani. Ennek eléréséhez azonban adómentességre és egyéb kormányzati támogatásokra lenne szükség. Az étkezési célú növényi olajok biodízelt-alapanyagként történő felhasználása nem tekinthető hosszú távú megoldásnak. Ezért fontos a nem ehető nyersanyagok feltárása. Ezek közül a használt sütőolaj tűnik a legígéretesebbnek. Ez azt feltételezi, hogy a begyűjtést szigorúan központilag szabályozzák mind a szolgáltatók, mind a háztartások esetében.

Ganev és szerzőtársai [2020] bolgár példákat vizsgált a környezeti kritérium alkalmazásával. Az elemzett időszakban (2016–2020) a biodízelt (B100) átlagos ára tonnánként 428 dollár volt. Ez 14 százalékkal magasabb, mint a gazdasági kritérium alapján számított biodízelt átlagos ára (tonnánként 378 dollár). Emellett a környezeti kritérium alkalmazásával az összes üvegházhatásúgáz-kibocsátás 6,6 százalékkal volt alacsonyabb.

A megújuló energiával kapcsolatos stratégiákat gondosan meg kell tervezni, mivel azok önmagukban nem feltétlenül fenntarthatók és környezetbarátok (*Naylor–Higgins* [2017]). Ezért *Parsons és szerzőtársai* [2020] felhívta a figyelmet a fenntartható termelésre. Ez akkor is fontos, ha egyes nyersanyagok (például a pálmaolaj egyedülálló zsírsavprofilja és alacsony ára miatt) nehezen pótolhatóak, mivel fontos a további trópusi erdőirtások lelassítása vagy leállítása. Néha nehéz figyelembe venni a fenntarthatóság társadalmi vonatkozásait. *Sajid–Lynch* [2018] a GreenZee-modellt javasolta Kanadában, amely a társadalmi hatásokat monetáris, pénzben kifejezett értékkel alakítja harmonizált valutaegységek alkalmazásával. *Nguyen és szerzőtársai* [2017] az inkluzív hatásindexet (*Inclusive Impact Indexet – Triple I*) használta háromdimenziós fenntarthatósági indexként a különböző biodízelt-keverékek értékeléséhez. Ez tartalmazta a gazdasági, környezeti, emberi jóléti és a társadalmi szempontokat is. Ezen módszer alapján a B20 keverék volt a legjobb rövid távú megoldás a tengerjáró hajók motorja számára Vietnámban.

Egy másik fontos kérdés az úgynevezett bumeránghatás (*rebound effect*). Például *Hochman–Tabakis* [2020] modelleredményeik alapján megállapította, hogy

a bioüzemanyag használatának bevezetése csökkentené az átlagos üzemanyagárát Dél-Koreában, és növelné a felhasznált üzemanyag mennyiségét. A környezetre káros hatás jelentkezne azonban, ha a gázolaj-felhasználás kisebb mértékben csökkenne, mint a bekevert biodízel mennyisége. Például a bioüzemanyag-kínálat 25 százalékos növekedésével (optimista forgatókönyv) – a kereslet adott rugalmassága mellett – a teljes kőolajfogyasztás átlagosan csak 8,7 százalékkal csökkenne, 65,2 százalékos bumerángthatás mellett. A szén-dioxid-kibocsátás 0,27 millió tonnával csökkenne, ami kevesebb terhet jelentene a környezetre, és növelné a gazdasági jólétet. A szerzők az erdészetben keletkező maradványokat ígéretes jövőbeli alternatívának tekintették, különösen azért, mert a dél-koreai biodízel-termelés importált alapanyagokra épül.

Alam és szerzőtársai [2021] a biomassza-alapú fenntartható repülőgép-üzemanyag egyesült államokbeli előállítását elemezte, ami csökkentheti a fosszilis tüzelőanyagoktól való függőséget és a káros szén-dioxid-kibocsátást a légi közlekedési ágazatban. A szerzők részletesen bemutatták az etiópai mustárból készült üzemanyag előállítási költségeit. A melléktermék értékesítése, valamint a megújuló energia kapcsán elérhető támogatások nélkül az etiópai mustárból készült üzemanyag drágább volt (literenként 0,85–1,28 dollár között), mint a hagyományos légi járművek üzemanyaga (literenként 0,50 dollár). A melléktermék és a támogatás figyelembevételével azonban az ár literenként 0,12–0,66 dollár közötti értékre csökkent. A teljes szén-dioxid-kibocsátás 918,67 gramm szén-dioxid-egyenérték volt az etiópai mustárból készült repülőgép-üzemanyag esetében literenként, ami 65 százalékos relatív szén-dioxid-megtakarítást jelent a hagyományos repülőgép-üzemanyaghoz képest (literenként 2618 gramm szén-dioxid-egyenérték). Az érzékenységvizsgálat szerint 95 százalékos valószínűséggel a relatív szén-dioxid-megtakarítás 61–68 százalék között lehet. Tanulmányuk azt jelzi, hogy az etiópai mustárból készült repülőgép-üzemanyag jelentősen csökkentheti a légi közlekedési ágazat szén-dioxid-kibocsátását.

Globális biodízel-elemzések

A fenntarthatóság kérdésénél foglalkoznunk kell annak sokféle oldalával. A kapcsolódó mutatóknak ki kell terjedniük a biodízel-termelés közvetlen és közvetett hatásaira. *Živković és szerzőtársai* [2017] megközelítése szerint a fenntarthatóságnak három különböző megközelítése van. A gazdasági fenntarthatóság alapvetően gazdasági versenyképességet jelent más energiaforrások költségeihez képest. A társadalmi fenntarthatóság egyenlő hozzáférést jelent például az ökológiai erőforrásokhoz, az élelmiszerekhez vagy az egészségvédelemhez. Végül a környezeti fenntarthatóság magában foglalja például a talaj és a víz minőségét, az üvegházhatást okozó gázok kibocsátását és a biológiai sokféleséget. Ezek a mutatók fontosak a biodízel-előállítás előnyeinek, valamint hátrányainak a mérése szempontjából is. Mivel további elterjedésének a fő oka a magas termelési költség, ezért a jövőbeni fejlesztéseket a költséghatékonyság fogja vezérelni: olcsóbb és lehetőleg nem ehető nyersanyagok, valamint energia- és hulladékmegtakarítási technológiák alkalmazása. E folyamat elsődleges mozgatórugójának a kormányzati politikának kell lennie.

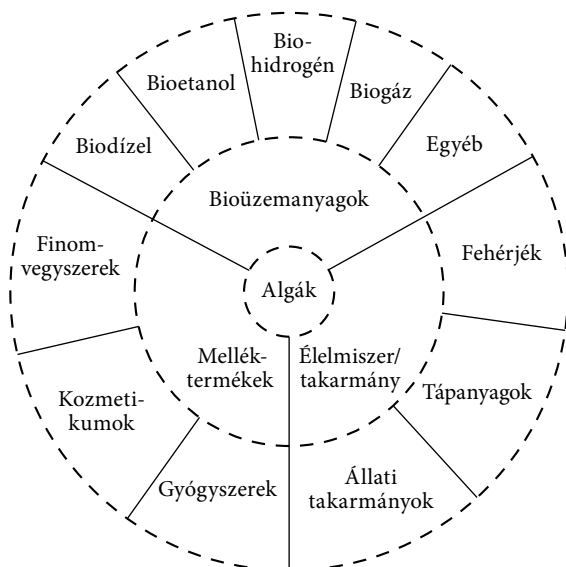
Thomassen és szerzőtársai [2017] a környezeti-technológiai-gazdasági értékelésre (*Environmental Techno-Economic Assessment*) tett javaslatot a fenntarthatósági értékelések különböző eredményeinek összehangolása érdekében. Négy kihívást azonosított: az egyértelmű elemzési keret hiánya, a módszertan megfelelő adaptálása, a harmonizált feltételezések hiánya és a technológiai folyamat integrálása. E módszertan alapján az algák alapuló biofinomítók ígéretes lehetőségnek tűnnek, ugyanakkor a teljes fenntarthatósági értékelésbe a társadalmi hatásait is be kell építeni.

Efroymsen és szerzőtársai [2020] kiemelte, hogy a gazdasági és környezeti mérési módszerek megfelelő megválasztása azért is fontos, mert a belső megtérülési ráta vagy akár a nettó jelenérték kiszámításával különböző eredményeket kaphatunk. Azt sem szabad figyelmen kívül hagyni, hogy egyes tényezők – például a társadalmi és gazdasági mutatók – összefügghetnek. A gyártás tényezői, az üzemleállások és a magas karbantartási igény szintén befolyásolják az algaalapú bioüzemanyagok költségeit és szén-dioxid-kibocsátását – ezáltal fenntarthatóságukat.

A melléktermékek megfelelő hasznosítása ugyanolyan fontos, mint a biodízel előállítás. Zhu [2015] kiemelte, hogy a jövőben csak nagy hozzáadott értékű termékek tehetik gazdaságossá a biofinomítók működését. Két fontos korlátot is azonosított: a folyamat energiamérlegének pozitívnak, a termelésnek pedig költséghatékonynak kell lennie. Elemzésében a fenntarthatóságot a nagy hozzáadott értékű termékek iránti megfelelő keresletre korlátozta. A bioüzemanyagok kategóriája biodízelt, bioetanolt, biohidrogént, biogázt és egyéb típusokat tartalmaz; a melléktermékek finomvegyszerek, kozmetikumok és gyógyszerek; míg az élelmiszer/takarmány lehetnek fehérjék, tápanyagok és állati takarmányok (4. ábra).

4. ábra

A mikroalgák potenciális termékei a biofinomítás során



Forrás: Zhu [2015].

Ez az oka annak, hogy a fenntarthatóságnak nemcsak az elsődleges termékre (jelen esetben a biodízel), hanem a glicerinre, a fő melléktermékre is ki kell terjednie. *Severo és szerzőtársai* [2019] azt javasolta, hogy az olyan fenntarthatósági mérőszámok használata is fontos, mint például a vízlábnyom vagy a globális felmelegedési potenciál. Csak a környezeti előnyök önmagukban nem elegendőek ahhoz, hogy magánbefektetőket vonzzanak egy biofinomító finanszírozásához a jelenlegi, kőolaj-finomítókhoz képest alacsony bevételek mellett.

Figyelembe véve a növekvő vízhiányt, a vízlábnyom a biodízel gyártásában is egyre fontosabb kérdéssé válik. A 4. táblázat áttekintést nyújt a repcealapú biodízel különböző felhasználásának vízigényéről. Ezek az értékek azonban nagymértékben függenek a repcefajtától, a talaj minőségétől, a megfelelő termelési módszerek alkalmazásától, valamint a különböző inputok minőségétől és mennyiségétől.

4. táblázat

A különböző módon használt biodízel-üzemanyagok vízfelhasználása (liter/utas/kilométer)

Szállítási mód	Alapanyag	Vízlábnyom*
Repülőgép	Repce	142–403
Autó (nagy)	Repce	214–291
Autó (kicsi, hatékony)	Repce	65–89
Busz	Repce	67–126
Vonat	Repce	15–40

* Az eredmények az első generációs bioüzemanyagokon alapulnak.

Forrás: saját összeállítás *Callegari és szerzőtársai* [2020] alapján.

Jacob és szerzőtársai [2020] eredményei alapján gazdaságilag csak a szennyvíz-alapú algákból előállított bioüzemanyagok termelése lehetne gazdaságilag megvalósítható. Szerintük a mikroalga-biodízel fenntarthatóságának három fontos szemponttal kell foglalkoznia: az energia- és szénegyensúly, a környezeti hatások és a termelési költségek.

Juneja–Murthy [2017] megállapította, hogy ez a fajta biodízel-előállítás drágább, mint a kőolajé, de üvegházhatású gázok negatív kibocsátását eredményezi. A szerzőpáros a fenntarthatóság fogalmát pozitív energiamérlegként értelmezi (az előállított energia nagyobb, mint a termeléshez felhasznált energia).

Kumar–Singh [2019] rámutatott arra, hogy az algaalapú biodízel termelése önmagában nem lehet racionális, a különböző melléktermékek (algaliszt, algaolaj, villamos energia, fermentált anyagok és hő) fontosak ahhoz, hogy a folyamat gazdaságossá és fenntarthatóvá váljon. Az ezen a téren a közelmúltban elért javulás ellenére az algaalapú biodízel gyártása még mindig nem jövedelmező, és a folyamat energiamérlege nem fenntartható.

A *Pinedo és szerzőtársai* [2016] által végzett modellezési kutatások alapján állíthatjuk, hogy a mikroalga-alapú biodízel előállítási költsége kilogrammonként 2,49 dollár, amely már tartalmazza a melléktermékekből (glicerin és műtrágya) származó

bevételeket és a megújuló üzemanyagok termeléséhez kapcsolódó támogatásokat. Jelenleg ez nem lehet versenyképes a kőolaj vagy akár az első generációs biodízel áraival. A szerzők felhívják a figyelmet az integrált biofinomítók szükségességére is, mivel a gazdaságilag fejlett biodízel-előállításhoz értékes melléktermékek szükségesek. Kutatásaik során a fenntarthatóságot kockázatelemzés kísérte, amely meghatározta a legfontosabb biztonsági eseményeket (tűz, robbanás és mérgező anyagok kibocsátása).

Lee-Den [2016] azt találta, hogy a mikroalga-biodízel-rendszer értéktényezője alacsony, de nagy a szén-dioxid-elnyelési lehetősége. Az értéktényező az életciklus energiahatékonysági arányának és az életciklus előállításiköltség-növekedési arányának a hányadosa. A jövőbeli műszaki fejlesztések várhatóan csökkentik a termelés energiaigényét, így az árak terén versenyképessé teszik ezt a fajta biodízel-előállítást. A tanulmány szerint a leggyakoribb fenntarthatósági mutatók a következők: a teljesítmény-, a gazdasági, a társadalmi, a környezeti és az erőforrásindexek.

Bravo-Fritz és szerzőtársai [2016] az algák gazdasági és környezeti fenntarthatóságát tanulmányozta. A tenyésztett fajok kiválasztása (jobb biomassza-termelékenység és fokozott lipidfelhalmozódás) jelentős hatást gyakorolt a termelés nettó jelenértékére. A kutatás során el tudták érni a hagyományos gázolaj előállítási árát, illetve az alá is tudtak menni. A biodízel összetételétől függően a literenkénti eladási árnak a nyereségesség szempontjából 1 és 3,5 dollár között kell lennie.

Doshi és szerzőtársai [2016] szintén pozitív környezeti, társadalmi és gazdasági hatásokat azonosított az általa vizsgált különböző típusú bioüzemanyagoknál. Bár a mikroalgák megoldást kínálnak az első generációs bioüzemanyagok számos hiányosságára, de a jelenlegi magas előállítási és energiaköltségük komoly akadályt jelent. Ennek ellenére a mikroalgákat a jövő üzemanyagának tekintik.

Habib és szerzőtársai [2020] szintén kiemelték, hogy az ellátási lánc legnagyobb költségtelei az üzem telepítése és az alapanyagok. Ezek miatt hatékonyabb technológiára van szükség. Nagyobb mértékben javasolták felhasználni a használt sütőolajat, ami a környezeti és társadalmi hatások növelését is lehetővé tenné. Egy másik ígéretes biodízel-alapanyag a zsír-olaj-zsíradék (*fat, oils, grease, FOG*). A szerzők megállapították, hogy a biodízeltől további 1,13 százalékot fizetve egy kívánatos társadalmi és környezetvédelmi szint lenne elérhető. Azt is megállapították, hogy a gazdasági cél 5 százalékos, a környezeti cél 6 százalékos és a társadalmi cél 7 százalékos csökkentése teljesen kizárta az episztemikus (megismerésbeli) bizonytalanság kockázatát.

Abomohra és szerzőtársai [2020] versenyképesebbnek találta a zsír-olaj-zsíradék nyersanyagot, mint más, lipidekben gazdag forrást. Ez azt jelenti, hogy a kőolaj világpiacon árának figyelembevételével a zsír-olaj-zsíradék alapanyag költsége nem haladhatja meg a tonnánkénti 799 dollárt. A tanulmány szerint a sárga és a barna zsír becsült tonnánkénti ára csak 412 dollár, illetve 224 dollár körül volt, tehát versenyképes termékek. Környezeti szempontból a repceből származó biodízel energiaigényes, és jelentősen hozzájárul a globális felmelegedéshez. A szójabab az alacsony energiafogyasztás és az alacsony károsanyag-kibocsátás ellenére sem jó választás. Ebből a szempontból a sárga zsír bizonyult a legjobb megoldásnak.

Gaeta-Bernardi-Parente [2016] a települési szilárd hulladékból kinyerhető rövid láncú zsírsavakra épülő technológiát (*municipal solid waste-volatile fatty acids*

technology) javasolta, amely még a használt sütőolajat használónál is hatékonyabbnak és versenyképesebbnek bizonyult. Számításai szerint a literenkénti 1,48 dollár eladási ár literenként 0,08–0,1 dollár nyereséget eredményezhet. A biodízel jelenlegi árai egyrészt nem lehetnek versenyképesek a gázolajéval, másrészt olyan tényezőktől is függenek, mint például az állami támogatás, a folyamatos és megbízható alapanyag-ellátás, a glicerín költségcsökkentő melléktermékként történő felhasználása stb. A technológiától függetlenül *Gebremariam–Marchetti* [2018] megállapította, hogy a legjelentősebb költségvetel az alapanyag. Ezért olcsóbb alapanyagokat kell találni. Ezek közé tartozik a tojáshéj, a fésűkagyló héja, a rákfélék, a kókuszhéj, a bioszén, a nátronlignin és a pirolizált cukor. Ráadásul ezek az alapanyagok újrahasznosíthatók. A technológiai fejlesztések pedig csökkentik a gyártási költségeket.

Részletes szakirodalom-elemzés alapján *Chamkalani és szerzőtársai* [2020] kimutatta, hogy a termelés hatékonysága szempontjából a biodízel nem mindig képes versenyezni a gázolajjal. A környezeti hatások sem egyértelműek, mivel laboratóriumi körülmények között végzett kutatások torzíthatják az eredményeket. Hatáselemzésük elsősorban az energiaigényre és az üvegházhatású gázok kibocsátására összpontosított. A szénhidrogénkészletek kimerülésével, a társadalom környezeti problémáinak érzékenységevel és remélhetően az új technológiák kifejlesztésével az algaalapú biodízel vonzóbb lehet, mint a fosszilis tüzelőanyagok. *Chowdhury–Loganathan* [2019] a termelés árhátrányát vizsgálta. A szerzők kijelentették, hogy az algák jelenleg még nem életképesek bioüzemanyag alapanyagaként, annak ellenére sem, hogy egyes fajok száraz tömegükből akár 70 százalék lipidet is képesek termelni.

Dutta és szerzőtársai [2016] igazolták, hogy a jobb minőségű, magasabb fűtőértékű olajok gazdaságilag életképesebbek. Mindez függ a földrajzi területtől, a termelés szezonális hatásaitól, a munkaerő költségétől, az alkalmazott oldószerektől és egyéb tényezőktől. Számításaik szerint a biodízel minimális eladási ára 10,55 dollár/GGE (a benzin gallon egyenértéke) volt 2011-es dollárban. A termelési és irányítási folyamatok fejlesztése javíthatja az életképességet és hatékonyságot, hogy a mikroalga-alapú rendszereket gazdasági és környezeti szempontból fenntarthatóvá lehessen tenni.

Callegari és szerzőtársai [2020] megerősítette, hogy az egyre intenzívebb kutatások jelentősen megnövelhetik a bioüzemanyagok piaci részesedését az alacsonyabb környezeti terhelésüknek köszönhetően. Megállapította, hogy a biodízel révén előállított energia, valamint a károsanyag-kibocsátás is alacsonyabb, mint a gázolajé (az energia: literenként 32,8 megajoule-lal szemben literenként 35,7 megajoule, szén-dioxid: literenként 2,48 kilogrammal szemben literenként 2,638 kilogramm). Mindazonáltal, hasonlóan a fosszilis erőforrásokhoz, ezen alapanyagok esetében is végesek a potenciális készletek. Ennek ellenére ezek lesznek a jövő meghatározó üzemanyagai.

Granjo és szerzőtársai [2015] felhívta a figyelmet az integráltabb és szélesebb ellátási lánc és termékportfólió szükségességére, amelyekkel az integráció különféle lehetőségei nyilhatnának meg. A szerzők megállapították, hogy a termelési költségek tonnánként 795 dollárról 584 dollárra csökkenthetők új alapanyagok, például a szójaliszt, a lecitin és a szójaolajpárlat felhasználásával. Ezek felhasználhatók az energia- és a vízfogyasztás csökkentésére a gazdasági és környezeti fenntarthatóság javítása érdekében.

Összefoglalás és következtetések

A fosszilis energiaforrások végesek, ezért folyamatosan növekszik az igény a megújuló megoldások iránt. A biodízel az egyik ilyen lehetőség a közlekedésben. Az Európai Unió a vezető biodízel-termelő, ami összhangban van a dízelüzemű járművek magas arányával. A legjelentősebb termelőknél a felhasznált alapanyagok a repce és a napraforgómag (Európai Unió), a szójabab (Argentína, Brazília, Egyesült Államok), valamint a pálmaolaj és a jatropaolaj (Indonézia). Az Egyesült Államok képes a legolcsóbb előállításra (literenként 0,48 dollár), és ez az ár alacsonyabb, mint a – rövid idő alatt jelentősen megdrágult – kőolajé (literenként 0,80 dollár).

Az ország szintű biodízel-elemzések a legjelentősebb termelőkkel, valamint a főbb nyersanyagokkal foglalkoztak. Az alapanyagok országonként változnak, de többnyire a magas olajtartalmú növényeket vizsgálták. A jövőbeli alternatívák is eltérők, de főleg különböző hulladékokat és maradványokat említettek a kutatások. A gazdasági kérdések (alacsonyabb függőség, alacsonyabb költségek, a hátrányos helyzetű régiók fejlődése) mellett a fenntarthatóság más szempontjai is megjelentek, például az üvegházhatású gázok alacsonyabb szintű kibocsátása vagy az erdőirtás megfékezése. A biodízel-előállítás gazdasági és fenntarthatósági vetületeinek az együttes elemzése egyre fontosabbá válik. Az 5. táblázat összefoglalja az ország szintű vizsgálatok főbb jellemzőit.

5. táblázat

Az ország szintű elemzések összefoglalása

Ország	Jelenlegi alapanyagok	Ígéretes alternatívák	Fő kérdések
Brazília	szójabab és marhahús-faggyú	használt sütőolaj, algaalapú szennyvízkezelés	alacsonyabb függőség, hulladékgazdálkodás, jobb levegőminőség, alacsonyabb üvegházhatásúgáz-kibocsátás
Kína	repce, gyapotmag, jatropaolaj	mikroalgák, használt sütőolaj	alacsonyabb költségek, fenntarthatóság
Indonézia (Malajzia)	pálmaolaj	halhulladék növényi maradványokkal, etiópai mustár	alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátás, az erdőirtás megfékezése
Szaharától délre fekvő Afrika	pálmaolaj, jatropaolaj	–	megújuló energia, hátrányos helyzetű régiók fejlesztése
Nepál	jatropaolaj	–	alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátás
Dél-Korea	importált alapanyagok	erdészeti maradványok	alacsonyabb szén-dioxid-kibocsátás, bumerángthatás
EU-tagországok	repce, napraforgó, használt sütőolaj	szójaolaj	magas előállítási költségek, eltérő üzemméret

Forrás: saját összeállítás.

Bár a gazdasági kérdések döntő szerepet játszanak a befektetési döntésekben, a tudományos kutatásokat ezek nem korlátozzák. Az általánosan használt nyersanyagok mellett a tudomány fenntarthatóbb megoldásokat keres, és megpróbálja azokat pénzügyileg életképesé tenni. Mivel a biodízel előállításának fő költségtetele a nyersanyag, ezért elengedhetetlen a minél olcsóbb vagy ingyenes források felkutatása. A használt növényi sűtőolaj nagy mennyiségben rendelkezésre áll, de megfelelő begyűjtését meg kell szervezni. A biodízel előállítása mellett a mikroalga-alapú szennyvíztisztítás megoldást jelenthet a tisztítatlan szennyvíz problémájára is. A zsír-olaj-zsíradék alapanyagként és a települési szilárd hulladékból kinyerhető rövid láncú zsírsavakra épülő technológia szintén számos előnyt nyújtanak.

A jelenlegi körülmények között a gazdasági fenntarthatóság nagymértékben függ a kőolaj világgiazi árártól és a támogatások mértékétől. Ezek kedvezőtlen alakulásával a biodízel-termelés kizárólag ebből a szempontból nézve nem tartható fenn. A biodízel gyártása szorosan kapcsolódik az élet más területeihez, például a foglalkoztatáshoz, az élelmiszer-termeléshez, a gazdasághoz, az alapanyagok előállításához, a kémia, a technológia, az innováció és a környezetvédelem területéhez. Ehhez összetett, többdimenziós megközelítésre van szükség. A kapcsolódó szakirodalom számos lehetőséget javasol, például a GreenZee modellt (*Sajid-Lynch* [2018]), amely a társadalmi hatásokat monetáris értékre fordítja le harmonizált pénzegységek alkalmazásával, illetve az inkluzív hatásindex révén háromdimenziós fenntarthatósági mutatóval értékelhetők a különböző biodízel-keverékek. A lehetséges mellékhatásokat, például a bumerághatást azonban szintén gondosan be kell építeni a rendszerbe.

A bioüzemanyagok számos társadalmi-gazdasági és környezeti előnnyel járnak, amelyek mind a fejlett, mind a fejlődő országokban ösztönzik a támogatásukat (*Singhal-Sengupta* [2012], *Sharma-Singh* [2017]):

- *gazdasági*: a kőolajtermékek importfüggőségének csökkentésével devizamegtakarítás érhető el, ami hozzájárul a nemzet energiabiztonságához;
- *környezeti*: a helyi légszennyezés és az éghajlatváltozást okozó szén-dioxid-kibocsátás csökkentésével kapcsolatos problémák mérséklődnek, mivel a bioüzemanyagok szén-dioxid-semlegesnek minősülnek;
- *társadalmi*: munkalehetőségek teremődnek, a vidék fejlődését elősegítik a termesztés révén, valamint az olajtermelés mezőgazdasági alapú iparaggá válik, amely részben helyettesíti a kőolajat.

A globális biodízelnkérdések a fenntarthatóság három fő szempontjával foglalkoznak: gazdasági, környezeti és társadalmi. A *gazdasági* fenntarthatóság az alacsonyabb termelési költségekre és a magasabb profitra összpontosít. Ennek eléréséhez új, lehetőleg nem ehető nyersanyagokra, valamint energia- és hulladékmegtakarító technológiákra van szükség. A *környezeti* fenntarthatóság központi eleme az alacsonyabb környezetterhelés. A *társadalmi* fenntarthatósággal kapcsolatos fő elemek a foglalkoztatás és a helyi erőforrások felhasználása a helyi közösség javára. A mérési eszközök különféleké, az energiamérlegtől kezdve a környezeti-technológia-gazdasági értékelésig. Az elemzett tanulmányok szerint potenciális és egyben ígéretes biodízel-alternatívák alapanyagai a mikroalgák, a zsír-olaj-zsíradék, a különböző szilárd hulladékok

és az egyéb nem ehető nyersanyagok. A 6. táblázat összefoglalja a globális biodízel-elemzések főbb elemeit.

6. táblázat

A globális biodízel-vizsgálatok összefoglalása

Téma	Főbb elemek
Gazdasági fenntarthatóság	lehetőleg nem ehető nyersanyagok energiatakarékos technológiák költséghatékonyság melléktermékek megfelelő hasznosítása (integrált biofinomítók)
Környezeti fenntarthatóság	alacsony vagy negatív üvegházhatásúgáz-kibocsátás (különösen az algák) szén-dioxid-kibocsátás csökkentése, globális felmelegedés kisebb vízlábnyom hulladékgyógyítás, újrahasznosítás
Társadalmi fenntarthatóság	foglalkoztatás helyi nyersanyagok felhasználása a helyi társadalom számára
Módszertani eszközök	energiamérleg belső megtérülési ráta, nettó jelenérték kockázatelemzés környezeti-technológiai-gazdasági értékelés
Potenciális és ígéretes alternatívák	mikroalgák használt zsír-olaj-zsiradék szennyvízből előállított olaj települési szilárd hulladékból kinyerhető rövid láncú zsírsavakra épülő technológia tojáshéj, fésűkagyló héja, rákfélék, kókuszshéj, bioszén, nátronlignin, pirolizált cukor

Forrás: saját összeállítás.

A részletesen elemzett cikkekben egyértelmű közös pontokat lehet beazonosítani. Megállapítható, hogy:

- az élelmiszer *versus* takarmány az első generációs bioüzemanyag-termelés fontos kérdése, különösen néhány afrikai és ázsiai országban, és az ehető nyersanyagok nem tudnak hosszú távú megoldást nyújtani;
- a biodízel-termelés nagyon érzékeny a kőolaj árának alakulására, ugyanakkor az állami támogatás gazdaságilag életképesé teheti, például az adómentesség és a támogatások révén;
- a szennyvízalapú mikroalgák előállítása gazdaságilag megvalósítható lehet az ingyenes nyersanyag miatt, amelyet sorrendben a használt sütőolaj követ;
- a melléktermékek ugyanolyan fontosak, mint a fő termék, ezért csak az integrált biofinomítók lehetnek sikeresek;
- a jelenleg felhasznált alapanyagok fizikai mérete és súlya miatt a termelési helyszín megválasztása során figyelembe kell venni a szállítási távolságot és a logisztikai lehetőségeket;

– az előállítási költség mellett más szempontokat is bele kell foglalni minden elemzésbe, például az üvegházhatásúgáz-kibocsátást vagy az algatermelést negatív széndioxid-egyenlegén keresztül – fontos kiemelni azt is, hogy az első generációs biodízel üvegházhatásúgáz-semlegessége kérdéses a teljes életciklust szemlélve;

– a fenntarthatóság minél tágabb értelmezése célravezető, aminek messze túl kell lépnie az egyszerű gazdasági kérdéseken, más szóval, a fenntarthatóságnak a gazdasági mellett más pillérekkel is rendelkeznie kell.

További kutatási irányok is azonosíthatók a szakirodalom szisztematikus elemzése alapján. Először, a téma számos másik elemét meg lehet vizsgálni, például a biodízelipar környezeti, társadalmi vagy politikai vonatkozásait. Másodsor, az időhorizont is kibővíthető, hogy a most kapott eredmények összehasonlíthatók legyenek korábbi megállapításokkal, és új következtetéseket lehessen levonni. Harmadszor, az összes, jelen esetben kizárt témát lehetne elemezni, így például a nyersanyagtermelés fenntarthatóságát vagy a más bioüzemanyagokkal, illetve általában a megújuló energiákkal kapcsolatos üvegházhatásúgáz-kibocsátás különböző szempontjait. Végül további kutatási irány lehet a biodízel mezőgazdaságon belüli felhasználása, a genetikailag módosított technológia potenciális szerepe a biodízel-termelésben, az életciklus-szemléletű karbon- és vízlábnyom, a körforgásos biogazdaságra történő áttérés vagy az energiaszegénység, az energiaközösségek, továbbá a méltányos áttérés (*just transition*) témaköre.

Hivatkozások

- ABOMOHR, A. E. F.–ELSAIED, M.–ESAKKIMUTHU, S.–EL-SHEEKH, M.–HANELT, D. [2020]: Potential of fat, oil and grease (FOG) for biodiesel production: A critical review on the recent progress and future perspectives. *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 81. 100868. o. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100868>.
- ACEA [2020a]: Fuel types of new passenger cars in EU. <https://www.acea.be/statistics/tag/category/share-of-diesel-in-new-passenger-cars>.
- ACEA [2020b]: Passenger car fleet by fuel type European Union. <https://www.acea.be/statistics/tag/category/passenger-car-fleet-by-fuel-type>.
- ALAM, A.–MASUM, M. F. H.–DWIVEDI, P. [2021]: Break-even price and carbon emissions of carinata-based sustainable aviation fuel production in the Southeastern United States. *GCB Bioenergy*, Vol. 13. No. 11. 1800–1813. o. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12888>.
- AMIRI, P.–ARABIAN, D. [2016]: The Effect of Reactor Configuration and Performance on Biodiesel Production from Vegetable Oil. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, Vol. 3. No. 2. 403–411. o. http://www.biotechrep.ir/article_69211_00423b828fba6fe550282065faaa03c5.pdf.
- BAI ATTILA–POPP JÓZSEF–PETŐ KÁROLY–SZŐKE IRÉN–HARANGI-RÁKOS MÓNKA–GABNAI ZOLTÁN [2017]: The significance of forests and algae in CO₂ balance: a Hungarian case study. *Sustainability*, Vol. 9. No. 5. 857. o. doi: <https://doi.org/10.3390/su9050857>.
- BARAL, N. R.–NEUPANE, P.–ALE, B. B.–QUIROZ-ARITA, C.–MANANDHAR, S.–BRADLEY, T. H. [2020]: Stochastic economic and environmental footprints of biodiesel production

- from *Jatropha curcas* Linnaeus in the different federal states of Nepal. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 120. 109619. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109619>.
- BASILI, M.–ROSSI, M. A. [2018]: Brassica carinata-derived biodiesel production: economics, sustainability and policies. The Italian case. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 191. 40–47. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.306>.
- BAUDRY, G.–DELRUE, F.–LEGRAND, J.–PRUVOST, J.–VALLÉE, T. [2017]: The challenge of measuring biofuel sustainability: A stakeholder-driven approach applied to the French case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 69. 933–947. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.022>.
- BRAVO-FRITZ, C. P.–SÁEZ-NAVARRETE, C. A.–HERRERA-ZEPPELIN, L. A.–VARAS-CONCHA, F. [2016]: Multi-scenario energy-economic evaluation for a biorefinery based on microalgae biomass with application of anaerobic digestion. *Algal Research*, Vol. 16. 292–307. o. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.03.028>.
- BRUNDTLAND-JELENTÉS [1987]: Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Megjelent még: World Commission on Environment and Development: Our common future. Oxford University Press, Oxford–New York, 1987.
- CALLEGARI, A.–BOLOGNESI, S.–CECCONET, D.–CAPODAGLIO, A. G. [2020]: Production technologies, current role, and future prospects of biofuels feedstocks: A state-of-the-art review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol. 50. 384–436. o. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1629801>.
- CANAKCI, M. [2007]: The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks. *Biore-source Technology*, Vol. 98. No. 1. 183–190. o. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.022>.
- CASTRO GONZÁLES, N. F. [2016]: International experiences with the cultivation of *Jatropha curcas* for biodiesel production. *Energy*, Vol. 112. 1245–1258. o. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.073>.
- CÉSAR, A. D. S.–WERDERITS, D. E.–DE OLIVEIRA SARAIVA, G. L.–GUABIROBA, R. C. D. S. [2017]: The potential of waste cooking oil as supply for the Brazilian biodiesel chain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 72. 246–253. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.240>.
- CHAMKALANI, A.–ZENDEHBOUDI, S.–REZAEI, N.–HAWBOLDT, K. [2020]: A critical review on life cycle analysis of algae biodiesel: current challenges and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 134. 110143 o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110143>.
- CHEN, J.–LI, J.–DONG, W.–ZHANG, X.–TYAGI, R. D.–DROGUI, P.–SURAMPALLI, R. Y. [2018]: The potential of microalgae in biodiesel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90. 336–346. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.073>.
- CHOWDHURY, H.–LOGANATHAN, B. [2019]: Third-generation biofuels from microalgae: a review. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, Vol. 20. 39–44. o. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2019.09.003>.
- CORRAL, S.–LEGNA-DE LA NUEZ, D.–ROMERO-MANRIQUE DE LARA, D. [2015]: Integrated assessment of biofuel production in arid lands: *Jatropha* cultivation on the island of Fuerteventura. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52. 41–53. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.070>.
- CREMONEZ, P. A.–FEROLDI, M.–NADALETI, W. C.–DE ROSSI, E.–FEIDEN, A.–DE CAMARGO, M. P.–CREMONEZ, F. E.–KLAJN, F. F. [2015]: Biodiesel production in Brazil: Current scenario and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42. 415–428. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.004>.

- DA SILVA, S. C.–MIRANDA, A. C.–SILVA, T. A. F.–CALARGE, F. A.–DE SOUZA, R. R.–SANTANA, J. C. C.–TAMBOURGI, E. B. [2018]: Environmental and techno-economic considerations on biodiesel production from waste frying oil in Sao Paulo city. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 183. 1034–1042. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.199>.
- DAUD, N. M.–ABDULLAH, S. R. S.–HASAN, H. A.–YAAKOB, Z. [2015]: Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: a review. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 94. 487–508. o. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.10.009>.
- DE OLIVEIRA, F. C.–COELHO, S. T. [2017]: History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 75. 168–179. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.060>.
- DEY, S.–REANG, N. M.–DAS, P. K.–DEB, M. [2020]: A comprehensive study on prospects of economy, environment, and efficiency of palm oil biodiesel as a renewable fuel. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 286. 124981. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124981>.
- DOSHI, A.–PASCOE, S.–COGLAN, L.–RAINEY, T. J. [2016]: Economic and policy issues in the production of algae-based biofuels: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 64. 329–337. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.06.027>.
- ĐURIŠIĆ-MLADENOVIĆ, N.–KISS FERENC-ŠKRBIĆ, B.–TOMIĆ, M.–MIČIĆ, R.–PREDOJEVIĆ, Z. [2018]: Current state of the biodiesel production and the indigenous feedstock potential in Serbia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81. 280–291. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.059>.
- DUTTA, S.–NETO, F.–COELHO, M. C. [2016]: Microalgae biofuels: A comparative study on techno-economic analysis & life-cycle assessment. *Algal Research*, Vol. 20. 44–52. o. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.09.018>.
- EFRYOYMSON, R. A.–PATTULLO, M. B.–MAYES, M. A.–MATHEWS, T. J.–MANDAL, S.–SCHOENUNG, S. [2020]: Exploring the sustainability and sealing mechanisms of unlined ponds for growing algae for fuel and other commodity-scale products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 121. 109708. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109708>.
- ESTEVEZ, V. P. P.–MORGADO, C. D. R. V.–FERNANDES ARAUJO, O. D. Q. [2020]: Regional and temporal sustainability assessment of agricultural-based biodiesel. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1–14. o.
- EU [2015]: Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2015/1513 irányelve (2015. szeptember 9.) a benzin és a dízelüzemanyagok minőségéről szóló 98/70/EK irányelv és a megújuló energiaforrásból előállított energia támogatásáról szóló 2009/28/EK irányelv módosításáról. HL, L 239, szeptember 15. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=CELEX:32015L1513&from=EN>.
- FAURANI SANTI, S.–HENDROWATI, T. Y.–SANUSI, A. [2018]: Indonesia Growth of Economics and the Industrialization Biodiesel Based CPO. *International Journal of Energy Economics and Policy*, Vol. 8. No. 5. 319–334. o.
- GAETA-BERNARDI, A.–PARENTE, V. [2016]: Organic municipal solid waste (MSW) as feedstock for biodiesel production: A financial feasibility analysis. *Renewable Energy*, Vol. 86. 1422–1432. o. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.025>.
- GANEV, E. I.–DZHELIL, Y. R.–IVANOV, B. B.–VAKLIEVA-BANCHEVA, N. G.–KIRILOVA, E. G. [2020]: Optimal design of a sustainable integrated biodiesel/diesel supply chain using first and second generations bioresources. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 81. 67–72. o. <https://doi.org/10.3303/CET2081012>.
- GEBREMARIAM, S. N.–MARCHETTI, J. M. [2018]: Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*, Vol. 168. 74–84. o. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.002>.

- GRANJO, J.–DUARTE, B.–OLIVEIRA, N. [2015]: Soybean biorefinery: Process simulation and analysis. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 45. 583–588. o. <https://doi.org/10.3303/CET1545098>.
- HAAS, M. J.–MCALOON, A. J.–YEE, W. C.–FOGLIA, T. A. [2006]: A process model to estimate biodiesel production costs. *Bioresource Technology*, Vol. 97. No. 4. 671–678. o. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.039>.
- HABIB, M. S.–TAYYAB, M.–ZAHOR, S.–SARKAR, B. [2020]: Management of animal fat-based biodiesel supply chain under the paradigm of sustainability. *Energy Conversion and Management*, Vol. 225. 113345. o. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113345>.
- HABIBULLAH, M.–MASJUKI, H. H.–KALAM, M. A.–RAHMAN, S. M. A.–MOFIJUR, M.–MOBARAK, H. M.–ASHRAFUL, A. M. [2015]: Potential of biodiesel as a renewable energy source in Bangladesh. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50. 819–834. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.149>.
- HARSONO, S. S.–SETYOBUDI, R. H.–ZEEMANI, T. [2016]: Biodiesel production from waste fish for zero waste concept in remote area of Eastern of Java, Indonesia. *Jurnal Teknologi*, Vol. 78. No. 4–2. 215–219. o. <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8210>.
- HOCHMAN, G.–TABAKIS, C. [2020]: Biofuels and their Potential in South Korea. *Sustainability*, Vol. 12. No. 17. 7215. o. <https://doi.org/10.3390/su12177215>.
- LANDA, T. F.–SALES, E. A.–NASCIMENTO, A. N.–PADULA, A. D. [2020]: Optimizing the Cooperated “Multi-Countries” Biodiesel Production and Consumption in Sub-Saharan Africa. *Energies*, Vol. 13. No. 18. 4717. <https://doi.org/10.3390/en13184717>.
- IRS [2022]: Yearly Average Currency Exchange Rates. <https://www.irs.gov/individuals/international-taxpayers/yearly-average-currency-exchange-rates>.
- JACOB, A.–ASHOK, B.–ALAGUMALAI, A.–CHYUAN, O. H.–LE, P. T. K. [2020]: Critical review on third generation micro algae biodiesel production and its feasibility as future bioenergy for IC engine applications. *Energy Conversion and Management*, Vo. 228. 113655. o. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113655>.
- JAEGER, W. K.–SIEGEL, R. [2008]: Economics of oilseed crops and their biodiesel potential in Oregon’s Willamette Valley. Special report, No. 1081. Oregon State University, <https://catalog.extension.oregonstate.edu/sites/catalog/files/project/pdf/sr1081.pdf>.
- JUNEJA, A.–MURTHY, G. S. [2017]: Evaluating the potential of renewable diesel production from algae cultured on wastewater: techno-economic analysis and life cycle assessment. *Aims Energy*, Vol. 5. No. 2. 239–257. o. <https://doi.org/10.3934/energy.2017.2.239>.
- KAWANO, D.–ISHII, H.–GOTO, Y. [2008]: Effect of biodiesel blending on emission characteristics of modern diesel engine. *SAE Technical Paper*, No. 2008-01-2384. <https://doi.org/10.4271/2008-01-2384>.
- KGATHI, D. L.–MMOPELWA, G.–CHANDA, R.–KASHE, K.–MURRAY-HUDSON, M. [2017]: A review of the sustainability of *Jatropha* cultivation projects for biodiesel production in southern Africa: Implications for energy policy in Botswana. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, Vol. 246. 314–324. o. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.014>.
- KLIGERMAN, D. C.–BOUWER, E. J. [2015]: Prospects for biodiesel production from algae-based wastewater treatment in Brazil. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 52. 1834–1846. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.030>.
- KUMAR, D.–SINGH, B. [2019]: Algal biorefinery: An integrated approach for sustainable biodiesel production. *Biomass & Bioenergy*, Vol. 131. 105398. o. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105398>.

- LANE, J. [2021]: The Digest's Biofuels Mandates Around the World 2021. The Digest's, január 6. <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/01/06/the-digests-biofuels-mandates-around-the-world-2021/>.
- LEE, M.-DEN, W. [2016]: Life cycle value analysis for sustainability evaluation of bioenergy products. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 113. 541–547. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.073>.
- LI, N.-GUO, Y. [2010]: Life Cycle Assessment of Rapeseed Biodiesel. *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 4. No. 4. 804–808. o. <https://doi.org/10.3390/wevj4040804>.
- MIRANDA, A. C.-DA SILVA FILHO, S. C.-TAMBOURGI, E. B.-CURVELOSANTANA, J. C.-VANALLE, R. M.-GUERHARDT, F. [2018]: Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 88. 373–379. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.028>.
- MIZIK TAMÁS [2020]: Impacts of International Commodity Trade on Conventional Biofuels Production. *Sustainability*, Vol. 12. No. 7. 2626. o. <https://doi.org/10.3390/su12072626>.
- MURTA, A. L. S.-DE FREITAS, M. A. V.-FERREIRA, C. G.-DA COSTA LIMA PEIXOTO, M. M. [2021]: The use of palm oil biodiesel blends in locomotives: An economic, social and environmental analysis. *Renewable Energy*, Vol. 164. 521–530. o. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.094>.
- NABI, M. N.-AKHTER, M. S.-SHAHADAT, M. M. Z. [2006]: Improvement of engine emissions with conventional diesel fuel and diesel-biodiesel blends. *Bioresource Technology*, Vol. 97. No. 3. 372–378. o. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.03.013>.
- NAIK, S.-GOUD, V. V.-ROUT, P. K.-JACOBSON, K.-DALAI, A. K. [2010]: Characterization of Canadian biomass for alternative renewable biofuel. *Renewable Energy*, Vol. 35. 1624–1631. o. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.033>.
- NAYLOR, R. L.-HIGGINS, M. M. [2017]: The political economy of biodiesel in an era of low oil prices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 77. 695–705. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.026>.
- NGUYEN, T. A.-MAEDA, Y.-KURODA, K.-OTSUKA, K. [2017]: Inclusive impact assessment for the sustainability of vegetable oil-based biodiesel – Part II. Sustainability assessment of inedible vegetable oil-based biodiesel in Ha Long Bay, Vietnam. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 168. 173–188. o. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.238>.
- OECD/FAO [2022]: OECD-FAO Agricultural Outlook, 2021–2030. <https://doi.org/10.1787/19428846-en>.
- PARSONS, S.-RAIKOVA, S.-CHUCK, C. J. [2020]: The viability and desirability of replacing palm oil. *Nature Sustainability*, Vol. 3. 412–418. o. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0487-8>.
- PINEDO, J.-GARCÍA PRIETO, C. V.-D'ALESSANDRO, A. A.-IBÁÑEZ, R.-TONELLI, S.-DÍAZ, M. S.-IRABIEN, Á. [2016]: Microalgae biorefinery alternatives and hazard evaluation. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 107. 117–125. o. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2015.10.039>.
- RICO, J. A. P.-SAUER, I. L. [2015]: A review of Brazilian biodiesel experiences. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45. 513–529. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.028>.
- SAJID, Z.-LYNCH, N. [2018]: Financial Modelling Strategies for Social Life Cycle Assessment. A Project Appraisal of Biodiesel Production and Sustainability in Newfoundland and Labrador, Canada. *Sustainability*, Vol. 10. No. 9. 3289. o. <https://doi.org/10.3390/su10093289>.
- SEVERO, I. A.-SIQUEIRA, S. F.-DEPRÁ, M. C.-MARONEZE, M. M.-ZEPKA, L. Q.-JACOB-LOPES, E. [2019]: Biodiesel facilities: What can we address to make biorefineries commercially

- competitive? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 112. 686–705. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.020>.
- SHARMA, Y. C.–SINGH, V. [2017]: Microalgal biodiesel: a possible solution for India's energy security. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 67. 72–88. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.031>.
- SINGHAL, R.–SENGUPTA, R. [2012]: Energy Security and Biodiesel: implications for land use and food security. *Economic and Political Weekly*, Vol. 47. No. 40. 66–73. o.
- SUN, J.–XIONG, X.–WANG, M.–DU, H.–LI, J.–ZHOU, D.–ZUO, J. [2019]: Microalgae biodiesel production in China. A preliminary economic analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 104. 296–306. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.021>.
- THOMASSEN, G.–VAN DAEL, M.–LEMMENS, B.–VAN PASSEL, S. [2017]: A review of the sustainability of algal-based biorefineries: Towards an integrated assessment framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 68. 876–887. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.015>.
- VAN NOORDWIJK, M.–KHASANAH, N.–DEWI, S. [2017]: Can intensification reduce emission intensity of biofuel through optimized fertilizer use? Theory and the case of oil palm in Indonesia. *Global Change Biology Bioenergy*, Vol. 9. 940–952. o. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12398>.
- XU, Y. J.–LI, G. X.–SUN, Z. Y. [2016]: Development of biodiesel industry in China: Upon the terms of production and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 54. 318–330. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.035>.
- YANG, J.–FUJIWARA, T.–GENG, Q. [2017]: Life cycle assessment of biodiesel fuel production from waste cooking oil in Okayama City. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol. 19. 1457–1467. o. <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0540-x>.
- YUSOFF, M.–ZULKIFLI, N. W. M.–SUKIMAN, N. L.–CHYUAN, O. H.–HASSAN, M. H.–HASNUL, M. H.–ZULKIFLI, M. S. A.–ABBAS, M. M.–ZAKARIA, M. Z. [2020]: Sustainability of Palm Biodiesel in Transportation: a Review on Biofuel Standard, Policy and International Collaboration Between Malaysia and Colombia. *Bioenergy Research*, Vol. 14. 43–60. o. <https://doi.org/10.1007/s12155-020-10165-0>.
- ZAILANI, S.–IRANMANESH, M.–SUNGHYUP, S. H.–MOHD HELMI, A. [2019]: Barriers of Biodiesel Adoption by Transportation Companies: A Case of Malaysian Transportation Industry. *Sustainability*, Vol. 11. No. 3. 931. o. <https://doi.org/10.3390/su11030931>.
- ZHAO, Y.–WANG, C.–ZHANG, L.–CHANG, Y.–HAO, Y. [2021]: Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 140. 110661. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110661>.
- ZHU, L. [2015]: Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 41. 1376–1384. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.040>.
- ŽIVKOVIĆ, S. B.–VELJKOVIĆ, M. V.–BANKOVIĆ-ILIĆ, I. B.–KRSTIĆ, I. M.–KONSTANTINOVIĆ, S. S.–ILIĆ, S. B.–AVRAMOVIĆ, J. M.–STAMENKOVIĆ, O. S.–VELJKOVIĆ, V. B. [2017]: Technological, technical, economic, environmental, social, human health risk, toxicological and policy considerations of biodiesel production and use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 79. 222–247. o. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.048>.