

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

**6.13. sz. függelék: A MATE egységes szakdolgozat /
diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója**

5.1. sz. melléklete: Külső és belső címlap

SZAKDOLGOZAT

Varga János Sándor

2025



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Környezettudományi Intézet
környezetmérnöki alapképzési szak

**A magyarországi bioetanol előállítás
talajtani vonatkozásainak vizsgálata**

Belső konzulens: Dr. Boros Norbert
tudományos főmunkatárs

Belső konzulens intézete/tanszéke:
Talajtani Tanszék

Készítette: Varga János Sándor

Gödöllő

2025

Tartalomjegyzék

1. Témafelvetés és célkitűzések.....	2
1.1. Téma jelentősége számomra.....	3
2. Irodalmi feldolgozás.....	4
2.1. Bioetanol fentarthatósága és irányelvei.....	5
2.2. Bioetanol alapanyagok és talajvédelmi követelményeik.....	8
2.3. A szármadaradvány kezelés és a talajszén dinamika hatása a bioetanol ÜHG mérlegére..	12
2.4. A talajszén megőrzésének agronómiai és technológiai rendszerei a bioetanol alapanyag termesztésben.....	14
2.5. Talajszervesanyag tartalmának szerepe a bioetanol LCA-ban.....	19
2.6. A magyar bioetanol értéklánc talajszén és fenntarthatósági megfelelési rendszere.....	22
3. Anyag és módszertan.....	25
4. Eredmények.....	26
4.1. Magyar bioetanol termelés és kapacitásbővülés.....	26
4.2. Kukoricaterület és átlag termésmennyiség összefüggése.....	28
4.3. A talajfedettség és vízmegtartó képesség összefüggése.....	32
4.4. A talaj fizikai állapotai.....	37
4.5. A talaj szerves széntartalmának változása.....	39
5. Következtetések és javaslatok.....	42
6. Összefoglalás.....	44
7. Irodalomjegyzék.....	46
8. Ábrajegyzék.....	50
9. Táblázat jegyzék.....	51

1. Témafelvetés és célkitűzések

A bioetanol a jövőt tekintve az egyik, hanem a legjobb megújuló üzemanyag, amelyet főként kukoricából, cukorrépából és gabonafélékből állítanak elő. Legnagyobb előnye, hogy csökkenti az üvegházhatású gázok (ÜHG) kibocsátását a fosszilis üzemanyagokhoz képest, és az importált kőolaj függést is képes visszafogni. Magyarországon nagy szerepe van a közlekedési szektor dekarbonizációjának folyamatos csökkentésében és a vidéki gazdaságok jövedelem bővítésében (European Parliament & Council, 2018; Európai Bizottság, 2019; European Parliament & Council, 2023).

Az Európai Unió megújuló energiával foglalkozó irányelvei a Renewable Energy Directive II és III (RED II és RED III) előírják, hogy a bioüzemanyagok csak akkor számíthatók be a klímacélok teljesítésébe, ha a teljes ellátásiláncuk fenntartható előállítással történik. Ez tartalmazza a talajminőség megőrzését, a nagy szénkészletű területek kirekesztését ez alól, valamint az életciklus elemzés (Life Cycle Assessment, LCA) felülvizsgál hatóságát (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; Elless et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

Magyarországon a bioetanol alapját a nagy biofinomítók (azaz olyan finomítók, ahol a bioetanolhoz előállítására szolgáló alapanyagokat finomítanak) adják, melyekben évente több százmillió liter etanolt állítanak elő. Ez a kapacitás nagyjából 140–250 ezer hektár kukoricaterületet vesz igénybe, az adott év termelési hozamától függően, és a termelés jelentős hatást gyakorol a talajra, különösen a fő kukoricatermő övezetekben (Hingyi et al., 2006; Központi Statisztikai Hivatal, 2021; Pannonia Bio Zrt.; Agrana Beteiligungs-AG).

A bioetanol előállítás folyamatos növekedése miatt, a talajra gyakorolt hatás is intenzíven megnőtt. Az energetikai célú szármaradvány termőföldről való eltávolítása, az intenzív talajművelés és a nagy tengelyterhelésű mezőgazdasági gépek használata együttesen hozzájárulhatnak a talajban történő erózióhoz, a tömörödéshez, a szerkezetromláshoz, illetve a szervesanyag tartalom csökkenésének felgyorsulásához (R. Lal, 2004; R. Lal, 2006; Birkás et al., 2015; J. Stolte et al., 2016).

Ezek az eljárások nem kizárólag a talaj termékenységét csökkentik, hanem a bioetanol klímamérlegét is rontják. A fenntarthatósági kényszer egyre inkább a termőföldi problémák megoldására koncentrálnak, mint például a maradvány visszahagyás, a forgatás nélküli vagy csökkentett talajművelés, valamint a folyamatos felszínborítottság, ez mára alapkövetelmény a RED II

és RED III szerinti elszámoltathatósághoz (European Parliament & Council, 2018; Európai Bizottság, 2019; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A téma fontossága a jelenlegi helyzetben, hogy a klímacéloknek való megfelelés csak abban az esetben teljesíthető, ha a bioüzemanyag termelés nem jár a talajok állapotának minőségi romlásával. A magyar mezőgazdasági területeken ez különösen fontos, mivel ezen területek több mint fele közepes vagy fokozott eróziós kitétségnek van kitéve (Birkás, 2005; Hingyi et al., 2006; Központi Statisztikai Hivatal, 2021).

A kutatási kérdéseim és a hipotézisem a következők:

1. Hogyan befolyásolja a bioetanol ipar növekedése (2019–2025) a kukoricaterület nagyságát és a talajhasználati nyomást Magyarországon?
2. Milyen tendenciát mutat a talaj szerves széntartalma (SOC) a bioetanol alapanyag termelés alatt?
3. Milyen összefüggés figyelhető meg a művelési mód és a talaj fizikai állapotváltozásai között?

Hipotézis:

Ha a bioetanol alapanyag termelésben egységesen bevezetésre kerül a maradványvisszahagyás, a takarónövény használat és a kímélő talajművelés rendszere, akkor a kukorica intenzifikáció mellett is stabilizálható a talaj szerves széntartalma és csökkenthető a degradáció, így a bioetanol termelés hosszú távon fenntartható marad.

1.1. Téma jelentősége számomra

Környezetmérnök hallgatóként azért ezt a témát választottam, mivel a klímavédelem, a fenntartható talajhasználat és az ipari tevékenységek összehangolt működése fontos számomra. A bioetanol termelés ékes példája annak, hogyan válhat egy alapjaiban környezetbarátnak tartott technológia fenntarthatatlanná, ha nem figyelünk oda megfelelően a talajra, mint alapvető erőforrásra.

2. Irodalmi feldolgozás

A mezőgazdasági növények adják a bioetanol termelés egyik legfontosabb alapanyagbázisát, a különböző gabonafélék, de elsősorban a kukorica és a cukorrépa tekinthető a legjelentősebbnek az alapanyag termelés szempontjából. Viszont a termesztésük jelentős hatással van a talaj állapotára, köztük a talaj termékenységére, ezáltal a hosszú távú fenntarthatóságára is nagy befolyással bír, mivel kimeríti a talaj szervesanyag tartalmát. A 2020. év után több szakirodalom is kiemelten foglalkozik azzal a témával, hogy a bioüzemanyagok, és a bioetanol előállítására szolgáló növények, hogyan és milyen formában befolyásolják a talajhasználatot, ezáltal milyen környezeti kompromisszumokat várnak el, és követelnek meg (Hingyi et al., 2006; Sebestyén et al., 2011; Takács et al., 2023).

A talajdegradációt fokozza az intenzív cukorrépa és kukorica termesztés, főleg abban az esetben, ha a termesztés során nagy mennyiségű műtrágyát és növényvédő szert alkalmaznak, erre a tényre már számos kutatás is rámutatott.

Ilyen kutatásokat végeztek és tettek közzé Birkás Márta és munkatársai (2015), valamint Rattan Lal kutatási munkái (2004; 2006), amelyekben arról értekeztek, hogy a talaj szerkezetének romlása, az erózió veszélye és a humusztartalom csökkenése mind jelentős kockázatot jelentenek a talaj állapotára nézve. A negatív hatásokat ugyanakkor csökkenteni és mérsékelni lehet, ha helyes talajművelési gyakorlatot használnak, ilyen például a vetésforgó és a zöldtrágya használata, melyekkel a káros környezeti hatások visszább foghatóak (R. Lal, 2004; Birkás, 2005; R. Lal, 2006; Birkás et al., 2015).

A fenntartható talajhasználati megoldásokkal több kutató is foglalkozott, vizsgálták a bioetanol alapanyagok termesztésének kérdéseit a fenntarthatóság szemszögéből, ami egy teljesen más nézőpontból világított rá a problémákra. Birkás Márta és Gyuricza Csaba (2004) a forgatás nélküli és csökkentett talajművelés szerepét emelték ki, a talajnedvesség és szervesanyag megőrzésében, míg Jannes Stolte és munkatársai (2016) európai viszonylatban vizsgálták a talajdegradációs kockázatokat és a megelőzés lehetőségeit. Az értekezéseikben már többen is hangsúlyozták, hogy integrált talajhasználati stratégiákra van szükség, a talajminőség megőrzése érdekében. A talaj állapotának javításához hozzájárulhatnak az ökológiai gazdálkodásban és a precíziós mezőgazdaságban is alkalmazott technológiák, mint például a változó dóziszú műtrágya kijuttatás. De a szabályozás szükségszerűségeit is hangsúlyozzák, ezért az uniós fenntarthatósági stratégiákban, különösen a RED II és RED III irányelvekben, a talajvédelem kiemelt

szerepet kapott (Birkás & Gyuricza, 2004; J. Stolte et al., 2016; European Parliament & Council, 2018; Európai Bizottság, 2019; European Parliament & Council, 2023).

Kiemelendő továbbá, hogy a "második generációs" bioüzemanyagok alapanyagául szolgáló energianövények (pl. cirok, vesszős köles) termesztése sokkal kisebb környezeti terhelést jelenthet, mint a klasszikus gabonaféléké. A vesszős köles (*Panicum virgatum*) lignocellulóiban gazdag, ezért a biomasszája magas hozamú és alkalmassá teszi energianövényként való felhasználásra, viszont a hátránya, hogy feldolgozásához speciális második generációs biofinomítókra van szükség. Ehhez képest a cirok, amely a növény magas keményítő és cukortartalma miatt vált jó bioetanol alapanyaggá különösen Európában, ahol is a termés nagyobb részét használják erre a célra, további előnye, hogy a cirokból viszonylag könnyen nagy mennyiségű etanol is ki nyerhető. Nem mellékesen a termelés melléktermékei, ilyen például a szár, teljes mértékben felhasználható, ezáltal tökéletesen illeszkedik a körforgásos gazdaság modelljébe. További előnyük, hogy ezek a növények sokszor jobban alkalmazkodnak a marginalizált, és rosszabb minőségű talajokhoz, így a talajhasználat által hozzájárulhatunk a diverzifikálásához. Az Avitabile Vincenzo (2024) és Motola Vito (2023) által jegyzett uniós kutatások kimutatták, hogy az ilyen típusú növények termesztése mérsékli a talajhasználatból eredő kibocsátásokat. A Pannonia Bio Zrt. és a Biobased Industries Consortium (BIC) jelentései szerint az új alapanyagok bevezetése és a második generációs biofinomítók technológiai fejlesztése kulcsszerepet játszik a körforgásos gazdaságban (Motola et al., 2023; Avitabile et al., 2024; Donley, 2024; BIC, 2024; Pannonia Bio Zrt.).

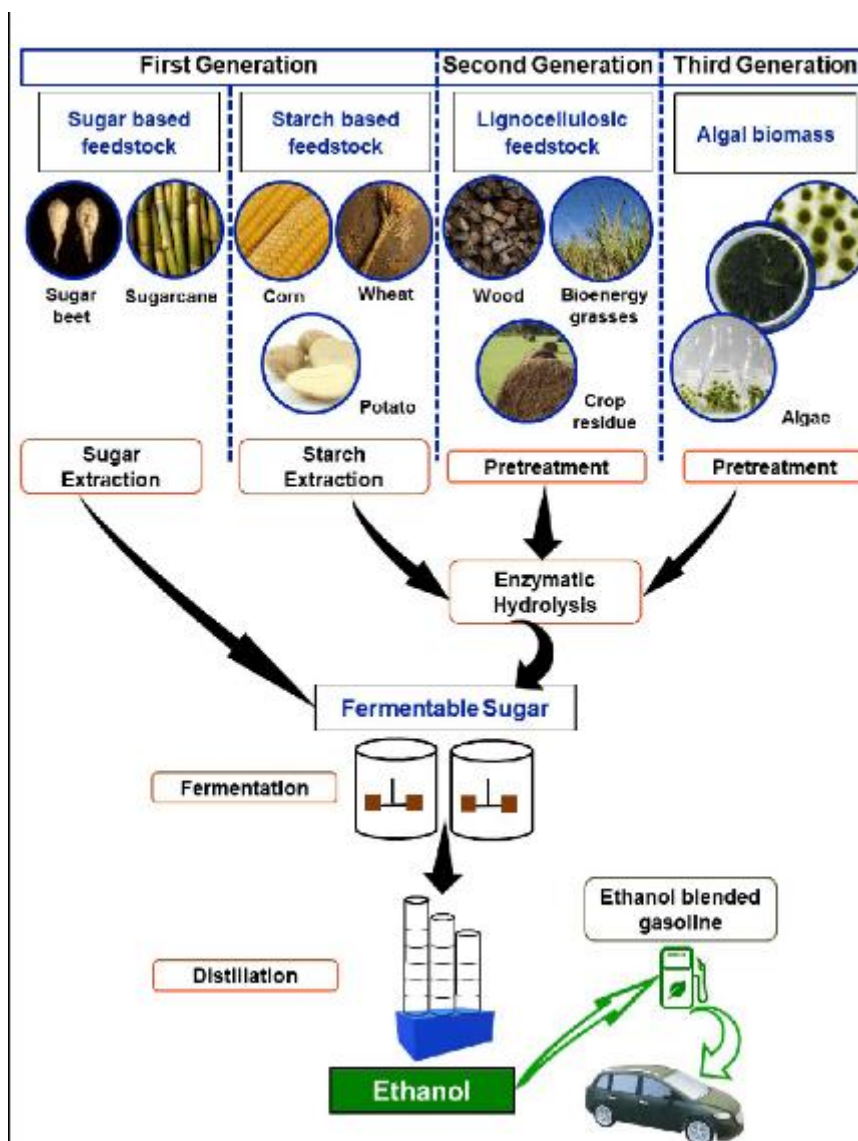
Amint látszik a szakirodalom megerősítette, hogy a talajra komplex hatással van a bioetanol előállításra szolgáló növénytermesztés. A megfelelő gazdálkodási stratégiákkal, ugyan a hatások csökkenthetőek, de azért sok negatív környezeti következménnyel jár a bioetanol előállítás. A jövőbeli kutatások fő irányának a meghatározója mindenképpen az lesz, hogy a fenntartható agrotechnikai megoldások, milyen összeállításban alkalmazhatók a talajromlás elkerülésének érdekében (Birkás, 2005; R. Lal, 2006; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

2.1. Bioetanol fenntarthatósága és irányelvei

Az Európai Unió RED II irányelve, illetőleg az annak továbbfejlesztett célrendszere a RED III módosított irányelv, melynek célja 2030-ra 42,5%-os megújuló energia arányának elérése az energiafogyasztásban, és ehhez olyan normatív és végrehajtási keretrendszer megalkotása,

amely a bioüzemanyagokat, mint a kukoricaalapú bioetanol csak abban az esetben veszi figyelembe, ha azok illeszkednek a megújuló energiacélokhoz. Ezen kívül illeszkedniük kell a fenntarthatósági és az üvegházhatású gázmegtakarítási kritériumokhoz is, mivel ezen megfelelés teljesítésével a földhasználati döntéseket, és a nagy szénkészletű területek védelmét is, nyomon lehet követni a tömegmérlegelv segítségével (dr. Gyulai, 2009; Motola et al., 2023; Avitabile et al., 2024).

Az 1. ábra szemlélteti a bioetanol termelés folyamatát, bemutatva a hozzá kapcsolódó technológiai lánc fő szakaszait (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).



1. ábra: A bioetanol előállítás generációs fázisai

(Forrás: Bera T., Inglett K., Wilkie A. C. (2020) Biofuel: Concepts and Considerations)

Az 1. ábra szemlélteti a bioetanoltermelés három technológiai generációját, az első cukor és keményítőalapú (sugar, starch based), a második lignocellulóz alapú (lignocellulosic), míg a harmadik algás biomasszát (algal biomass) alkalmazza. Az alapanyagokból az előkezelés (pretreatment), erjesztés (fermentation) és lepárlás (distillation) folyamatait követően készül el az etanol (ethanol).

Az Európai Bizottság a végrehajtás kommunikációit használja, a megfelelés operatív eszköztárának a tagállami szintekre történő átültetésére, az önkéntes tanúsítási rendszerekkel való együttműködést, az auditálható dokumentációt és a koherens életciklusalapú ÜHG számításokat, ami által a bioetanolellátási lánc minden pontján mérhető és ezáltal ellenőrizhető teljesítési kötelezettséget tud teremteni (European Parliament & Council, 2018; European Commission, 2019; Európai Bizottság, 2019; European Parliament & Council, 2023).

Ez a jogi szerkezet nem felel meg a klasszikus talajvédelmi szabályozásnak, mivel a területkiszárási és védelmi szabályok, főleg a nagy szénkészletű ökoszisztémák és az érzékeny élőhelyek agrárcélú igénybevételének tiltása miatt, kézzelfoghatóan internalizálják és racionális megfelelési stratégiaként kezelik, a talajszénvesztés és a talajdegradáció kockázatát, ezért a beszámíthatóság szempontjából a talajszénmegőrzés, az eróziókontroll és az agrotechnikai beavatkozások (mint a maradványvisszahagyás, kímélő művelés és a takarónövény) ma már elkerülhetetlenek (European Commission, 2019; Európai Bizottság, 2019; Motola et al., 2023).

Az Európai Számvevőszék átfogó értékelése külön is felhívja a figyelmet, hogy a megfelelés megbízhatóságának a kritikus tényezője, az adatminőség és a verifikációs lánc, viszont a rendszer hatékonyan ösztönzi a fenntarthatóságot, de további fejlesztéseket igényel több területen is, mint például az adatintegritás, a kockázatalapú ellenőrzési mélység és az auditálási konzisztencia. Mivel ezen fejlesztések szükségesek ahhoz, hogy a kimutatott ÜHG megtakarítás ténylegesen tükrözze a valós földhasználati és talajszéndinamikát. Ebből következik, hogy a RED küszöbök elérésére közvetlenül hat az életciklus ÜHG mérlegre is, mely által a műtrágya és energiafelhasználás, a szármadaradvány gazdálkodás és a művelésimód, a gazdálkodói és feldolgozó oldalon már nem csak megfelelés, hanem nyilvántartási feladat is (European Parliament & Council, 2018; Európai Bizottság, 2019; European Parliament & Council, 2023).

Magyar jogi környezet egyértelművé teszi, hogy beszámítás csak igazoltan fenntartható biomasszára és a kötelező ÜHG megtakarítások elérésére épülhet, ezt konkretizálja az a kormányrendelet (279/2017. (IX. 22.) Korm. rendelet), amely a fenntarthatósági követelményeket rögzíti, ezzel a talajfunkciók megőrzése mindenképpen (mint a vízmegtartás, szervesanyagkészlet, szerkezet) a beszámíthatóság előfeltételévé válik (European Parliament & Council, 2018; Magyarország Kormánya, 2021; European Parliament & Council, 2023).

A szakirodalom arra is rámutat, hogy az Indirect Land Use Change (ILUC) kockázatok, azaz az közvetett földhasználat változás mérséklése és a talajszén megőrzés rendszerszintű feltétele elengedhetetlen ahhoz, hogy a bioüzemanyagok klímalábnyomának stabilizációját elérjük. Ezért fontos mindenképpen a kukoricaalapú nyersanyag termelésben a maradvány visszahagyási arányokat optimalizálni, ezzel egyidejűleg a talajfelszín folyamatos takarása és a bolygatás csökkentése elősegíti a hozamstabilitást és a megfelelési ÜHG küszöbök elérését (European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

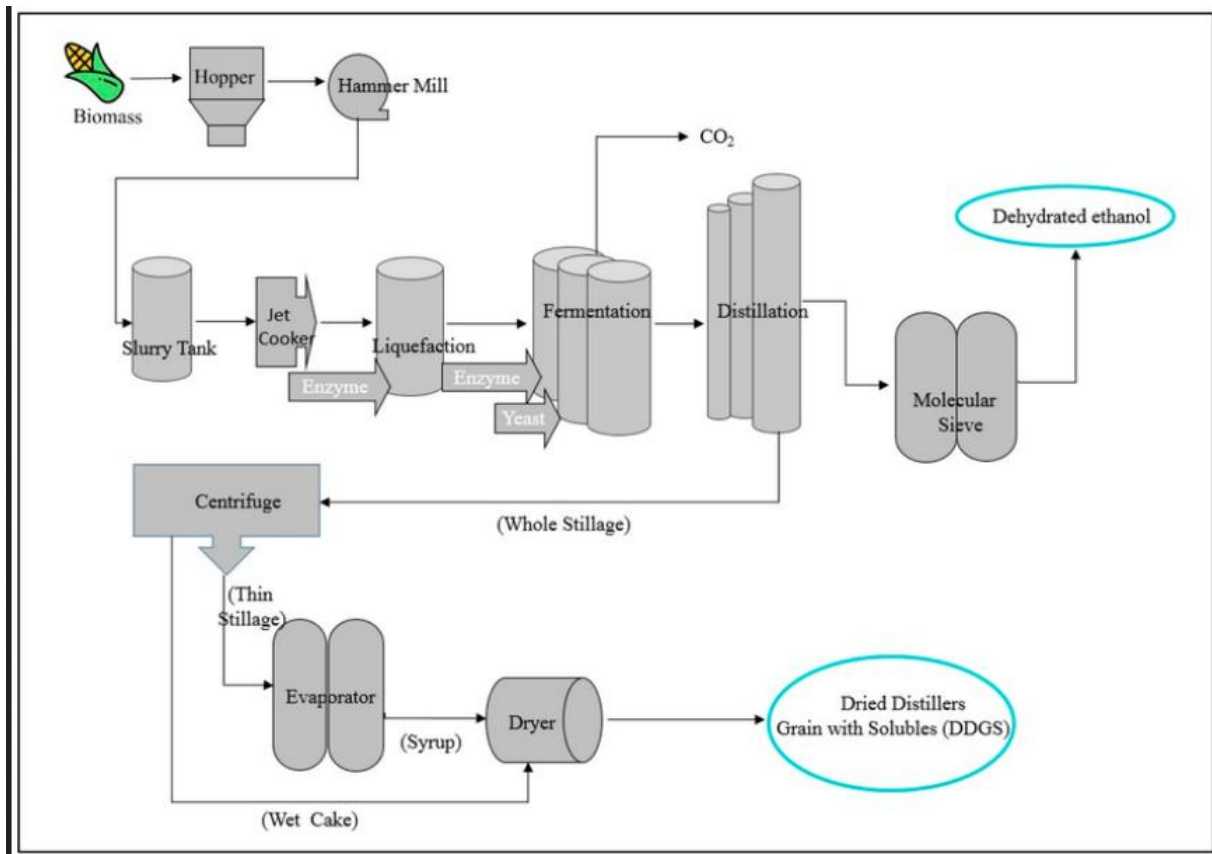
Elmondható, hogy a RED II/RED III nem tekinthető kifejezetten „talajjognak”, mégis az ösztönzők rendszerén keresztül elősegíti, a bioetanol ellátási lánc kulcspontjaira „rátámasztott” megfelelési elvárásokkal a talajszén megőrzést és a degradáció megelőzését. Ezáltal a piaci hozzáférés és a beszámíthatóság előfeltételévé válik, ami a magyarországi kukoricatermesztésben a racionális szármaradvány gazdálkodás és a konzervációs művelés felértékelődéséhez vezet (European Parliament & Council, 2018; Motola et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Avitabile et al., 2024).

2.2. Bioetanol alapanyagok és talajvédelmi követelményeik

A fejlett bioüzemanyagokról az uniós szakmai háttéranyagok nagy segítséget nyújtanak, mivel a RED II/RED III normatív elvárásrendszerét technológiai, agronómiai és ellátásláncirányítási gyakorlatokra bontják fel, kiemelve a nyersanyagkategóriák differenciálását, az ILUC kockázatok csökkentését és a talajminőség, illetve talajszénmegőrzés beépítését a megfelelési korlátok közé (European Parliament & Council, 2018; Motola et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

Ezek a háttéranyagok egyrésztől rendszerezik az úgynevezett „fejlett” alapanyagok körét, mint a maradékok, hulladékok, nem élelmiszer vagy takarmánycélú biomassa, másrésztől olyan műszaki, ökológiai feltételeket tartalmaznak (talajfelszínborítottsági küszöbök, maradványbetakarítás fenntartható maximumai, kockázatos területek kizárása), amelyek által a talajfunkciók megőrzése, a beszámíthatóság és a valós ÜHG megtakarítás előfeltételévé válik (European Parliament & Council, 2018; Motola et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A 2. ábra szemlélteti a fejlett bioüzemanyag folyamatlánc felépítését, az alapanyag beszerzéstől, egészen a technológiai konverzióig, a környezeti fenntarthatósági tényezőkhöz.



2. ábra: A bioetanol előállítás biokémiai folyamata

(Forrás: Soleymani Angili P., Grzeslik K., Rödl A., Kaltschmitt M. (2021). Life Cycle Assessment of Bioethanol Production: A Review of Feedstock, Technology and Methodology.)

A 2. ábra a kukoricaalapú bioetanol (corn based bioethanol) előállításának folyamatát mutatja be. Az ábra szemlélteti, hogyan alakul át a biomassza (biomass) a darálás (hammer mill), főzés (jet cooker), cseppfolyósítás (liquefaction), erjesztés (fermentation) és lepárlás (distillation) lépésein keresztül vízmentes etanollá (dehydrated ethanol), miközben melléktermékként szárított gabonatörköly (dried distillers grain with solubles, DDGS) keletkezik.

A modern tudományos anyagok a maradék, illetve a hulladékáramok skálázása felé mozdulnak, ezáltal mérsékelve a közvetlen földhasználatváltás és a talajszénvesztés kockázatát. Ugyanakkor ezek az anyagok következetesen rámutatnak arra is, hogy a mezőgazdasági maradványok túlzott eltávolítása (mint például kukoricaszár nagy arányú begyűjtése) a talaj szerves szénkészletének csökkenését, erózió fokozódást és vízháztartási romlást idézhet elő, ezért fontos a betakarítási arányt a helyi talaj, éghajlat és domborzati kitettséghez illeszteni (Searle & Bitnere, 2017).

Ezért a szakmai háttéranyagok javaslatokat fogalmaznak meg a maradványvisszahagyási minimumokra és a talajfelszín folyamatos borítottságát célzó gyakorlatokra nézve (takarónövény,

mulcshagyás, csökkentett vagy forgatás nélküli művelés), mivel ezek stabilizálják a talajszerkezetet, mérséklék az eróziót és kedveznek a Soil Organic Carbon (SOC) mérlegnek is (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A végrehajtási előrehaladást összegző jelentések (mint például a REDIIBIO progressz riportjai) azt is konkretizálják, hogy miként válik a „soil quality/soil carbon” dimenzió a megfelelési auditok eszközévé, és a gazdálkodói gyakorlatok dokumentálása (maradványkezelés, talajtakarás, művelésmód), a tömegmérleg és a nyomon követés integrálása, illetve az életciklus ÜHG számítások egységesítése révén a talajszén megőrzése már nemcsak ajánlott, hanem auditálható követelménnyé lép elő (R. Lal, 2004; R. Lal, 2006; European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

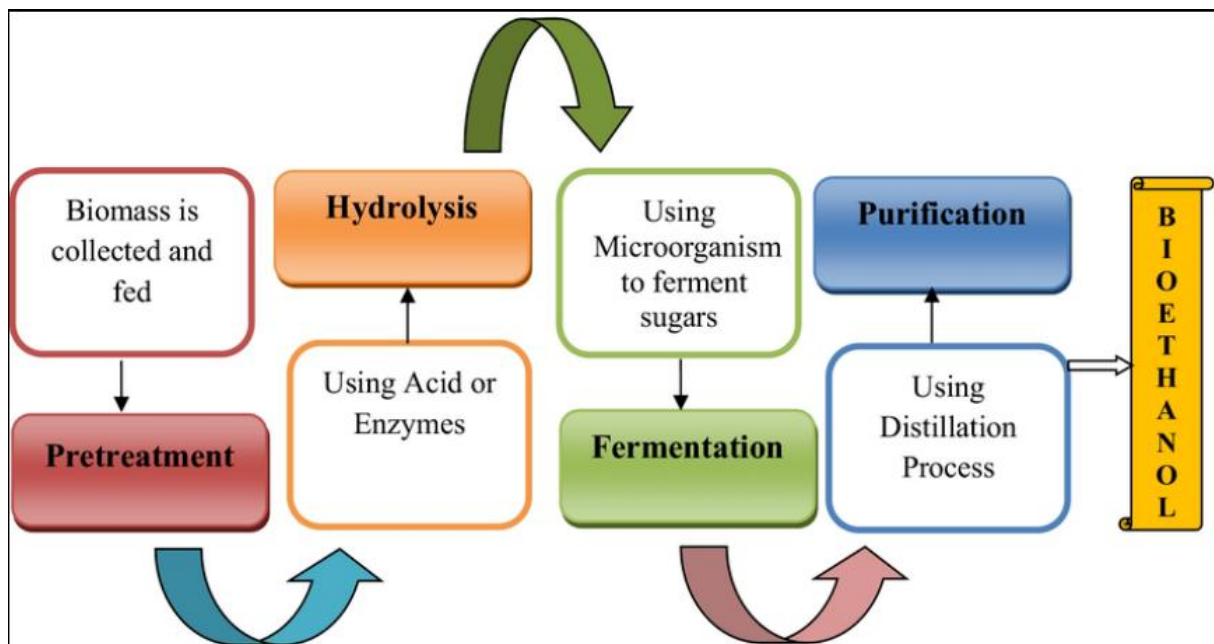
A rendszer legfőbb mondanivalója, hogy a „hagyományos” (gabonaalapú) bioetanol is fenntarthatóan megterthető az uniós dekarbonizációs kosárban, abban az esetben, ha az alapanyagtermesztés bizonyíthatóan nem rontja a talaj szénkészletét és nem növeli az eróziós kitétséget, mivel ellenkező esetben a teljes ellátási lánc ÜHG mérlege romlik, és ezáltal sérülhet a beszámíthatóság mértéke (European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

A JRC/European Technology and Innovation Platform (ETIP) anyagok immáron a skálázás „rendszerszintű” feltételeit is kijelölik, mivel az ellátásbiztonság és a fenntarthatóság csak együtt tartható fenn. Ezen feltételek közé tartoznak, hogy a maradványbetakarítás térben és időben differenciált legyen, a talaj és éghajlati heterogenitáshoz igazodnia kell, és a fejlett alapanyagok növekvő részaránya mellett a talajfunkciók megőrzését célzó agronómiai intézkedéseket kötelezően be kell építeni az üzemeltetési rendbe. A klímapolitikai és technológiai irányítások szempontjából ezek a háttéranyagok fontos leiratokat adnak az ILUC kockázat kezeléséhez is, a fejlett alapanyagok előtérbe helyezése önmagában nem garancia, ha a helyettesített anyagáramok és a talajszén hatások nincsenek számvitelileg vissza bontva, ezért ösztönzik és javasolják a jobb adatintegritást, a kockázatalapú ellenőrzéseket és az egységesített ÜHG metodikákat a lánc minden részében (European Parliament & Council, 2018; Motola et al., 2023; Bauer et al., 2024).

Gyakorlati szempontból ez annyit tesz, hogy a magyar kukoricaalapú bioetanol ellátás csak akkor maradhat tartósan beszámítható, ha a termelők a talajvédelmi technikákat (maradványvisszahagyás, takarónövény, kímélő művelés) és a precíziós tápanyag gazdálkodást egységesen alkalmazzák, viszont a maradvány eltávolítási arányokat a talaj és hozamstabilitás kárára

semmiképpen sem emelik meg, és az audit illetőleg a dokumentációra vonatkozó követelményeket teljes mértékben teljesítik (Koper et al., 2021; Magyarország Kormánya, 2021).

A 3. ábra részletesen bemutatja és szemlélteti, a második generációs bioetanoltermelés lépéseit, és a hozzájuk kapcsolódó folyamatokat, beleértve az előkezelést és az enzimatikus bontást is, egészen a végeredményig.



3. ábra: A második generációs bioetanol üzem technológiai rendszere

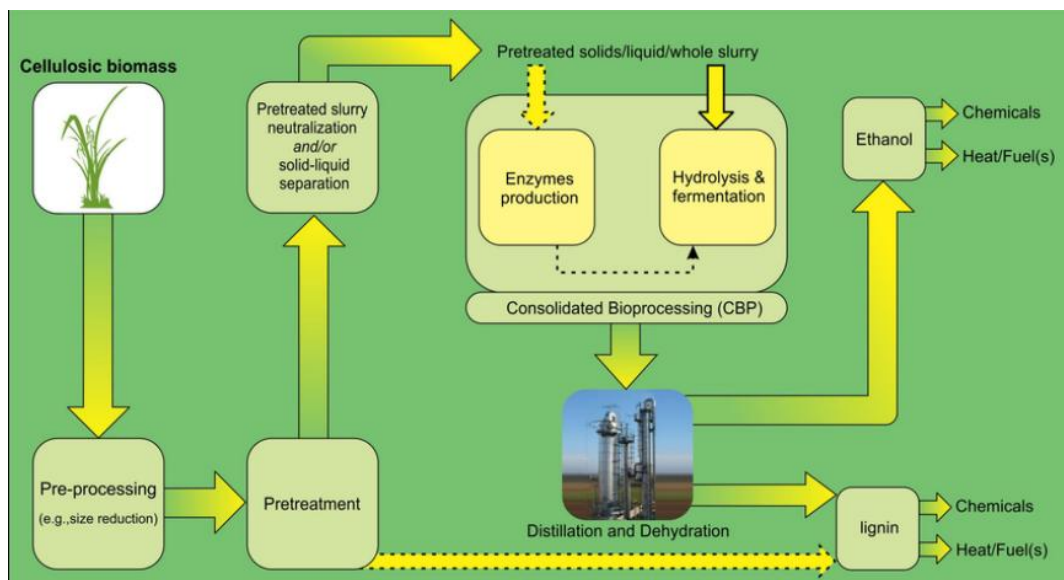
(Forrás: Devi A., Bajar S, Kour H., Kothari R., Pant D., Singh A. (2016). Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach.)

A 3. ábrán bemutatott folyamat szemlélteti a bioetanol (bioethanol) előállításának fő lépéseit, ahol a biomassza (biomass) előkezelésen (pretreatment), hidrolízisen (hydrolysis), fermentáción (fermentation) és tisztításon (purification) megy keresztül, míg végül lepárlással (distillation process) kész bioetanolt (bioethanol) állítunk elő.

Összefoglalva ezen csoportok nem csupán elméletileg és fogalmilag a „fejlett” irányba tolják a bioüzemanyag portfóliót, hanem világos, talaj és ökoszisztéma irányult üzemeltetési követelményeket is kijelölnek, ezek nélkül a bioetanol ÜHG előnyei könnyen eltűnnek, míg a jó talajgazdálkodási gyakorlatokkal a mezőgazdasági alapanyag termelés és a dekarbonizációs beszámíthatóság megtartható (Koper et al., 2021; Motola et al., 2023).

2.3. A szármарadvány kezelés és a talajszén dinamika hatása a bioetanol ÜHG mérlegére

Talajszén és szármарadvány kezelés adja a bioetanol ellátási lánc fenntarthatósági gerincét, mivel a kukoricaalapú alapanyag termelés hatásai a talajra közvetlenül befolyásolják a teljes életciklus és az ÜHG mérleget, ezáltal a beszámíthatóságot is. Az európai megfigyelések és vizsgálatok egyértelműen jelzik, hogy a szármарadványok túlzottan nagymértékű eltávolítása a talaj szerves szén (SOC) készletének csökkenéséhez vezethet, aminek a várható következménye a szerkezet romlás és az erózió fokozódása, különösen igaz ez a lejtős, szélsőséges csapadék eloszlású, illetve könnyű mechanikai összetételű talajokra nézve (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023). Mivel a csapóeső okozta aggregátum szétverést növeli a talajfelszín borítottságának megszüntetése, ezáltal a maradványok eltávolítása csepperózióra és a felületi lefolyásra is ugyanolyan hatással bír, eközben viszont megszakítja a szénbevitel és a humifikáció utánpótlását, ami által a SOC lassú, de tartós apadása várható (European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023). A 4. ábrán látható, hogy hogyan és miként hatnak a különböző biomassza hasznosítási és maradványkezelési stratégiák a talaj szén körforgalmára és az előállításához kapcsolódó üvegházhatású gázmérlegére.



4. ábra: Az első és második generációs bioetanol folyamatok összehasonlítása

(Forrás: Kumar R., Tabatabaei M., Karimi K., Horváth I. S. (2024). Recent updates on lignocellulosic biomass derived ethanol - A review.)

A 4. ábra párhuzamosan mutatja be a két technológiai irány fő különbségeit, mivel míg az első generációs előállítási folyamat az élelmiszer növényekre épül, addig a második generációs rendszerek lignocellulóz alapú hulladékokra és melléktermékekre támaszkodnak. Ezáltal a talajterhelés, víz és energiaigény tekintetében a második generációs bioetanol üzemek fenntarthatóbbnak tekinthetők.

A publikációk jelentős része tartalmazza a maradvány visszahagyás minimális arányainak meghatározását, a talajfelszín állandó borítottságát mulcs és takarónövény által, és a talajbolygatás mérséklését. Javasolja a csökkentett vagy forgatás nélküli művelést, mivel ezek együttes hatásai stabilizálják az aggregátumokat, ezáltal lassítják a mineralizációt és mérséklék az eróziót, és a SOC megőrzésén keresztül javítják a bioetanol rendszer ÜHG mérlegét is (Barczy et al., 2015; Szabó et al., 2015; European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

A kísérletes és terepi vizsgálatok foglalkoznak a maradványok talajba kerülésének sorsával, úgy, mint a mineralizáció, fizikaikémiai stabilizáció, mikrobiális beépülés. Részletezik többek között, hogy a szén egy része rövid távon CO²-ként távozik, de jelentős hányada viszont stabilabb frakciókba épülhet be, amennyiben a talaj szerkezete és a textúrája, és a nedvesség és tápanyagviszonyok ezt támogatják. A közép és hosszú távú SOC megőrzéshez mindenképpen jelentős a finom frakciókhoz való kötődés és az aggregátumbelüli védelem (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023; Avitabile et al., 2024).

A nitrogénnel való együtt mozgás azaz a C/N dinamika, ami szintén meghatározó, mivel a maradványok lebomlásához szükséges nitrogén rendelkezésre állása és a takarónövények nitrogén kötő, valamint nitrogén scavenging funkciója együttesen képes csökkenteni a kilúgozási veszteségeket és ezáltal kiegyensúlyozni a mineralizációt, ami indirekt módon tudja a SOC stabilitást segíteni (Első Magyar Karbongazdálkodási Kft., 2012; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

Ezzel együtt a kiterjedt programösszefoglalók, amelyek a bioüzemanyagcélú maradványeltávolítás talajhatásait értékelik, kiemelik azt a tényt, hogy a fenntartható maradványbetakarítás nem egy fix százalék, hanem talajtípus, éghajlat, lejtés és vetésforgófüggő optimum, amelyet helyspecifikus kockázatértékelésre és monitoringra kell építeni, az erózió, tömörödés, vízháztartás függvényében (Searle & Bitnere, 2017; Koper et al., 2021).

A gyakorlatban ez gyakran több komponensű küszöb, minimális felszínborítottság fenntartása érdekében a kritikus időszakokban, a maradványvisszahagyási arány rögzítése, különösen kükoricánál, valamint a takarónövényes területek beiktatása a fedettség folytonosságának biztosítására (Koper et al., 2021).

A tudományos értekezések háromféle gyakorlati üzenetet fogalmaznak meg. Az első, hogy a bioetanol LCA-ban a maradvány kezelés talajszén hatása döntő szerepet játszik, mivel a maradvány eltávolítás tartós SOC csökkenést okoz, ezáltal a bioetanol deklarált ÜHG előnye csökkenhet vagy elolvadhat, így a RED szerinti küszöbök elérése veszélybe kerülhet (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A második a konzervációs agronómia, azaz a mulcshagyás, takarónövény, csökkentett művelés szerepe nemcsak ökológiailag jó gyakorlat, hanem megfelelési eszköz is, amely javítja az ÜHG mérleget a talajszén megőrzésén keresztül (European Parliament & Council, 2018; Elless et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

Végül a harmadik a fenntartható maradvány betakarítás, regionális és táblaszintű szabályozása szükségessége. Aminek a fix, országos arányok helyett a helyspecifikus kockázat alapú keretezés és ellenőrizhető indikátorok, mint a felszínborítottság, eróziós veszteség és a SOC trend adnak robusztus megfelelési alapot (European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

Ezek a meghatározások a magyarországi kukoricatermesztésben különösen relevánsak főleg a lejtős löszterületeken, a szélsőséges csapadék hozamú években és a könnyű vályoghomok átmenetű területeken, illetve ahol a maradvány eltávolítás és a forgatásos művelés összességében jelentősen növeli az eróziót, ilyen esetekben kockázatot a maradvány visszahagyás, a takarónövény és a minimális bolygatás együttesen csökkenti (Searle & Bitnere, 2017; Koper et al., 2021).

Összefoglalva a valós klíma előny és a beszámíthatóság perem feltétele, hogy a szármaradvány kezelés, a fedettség és a talajbolygatás mértéke és a bioetanol fenntarthatósági minősítése nem választható el a talajszén menedzsmenttől.

2.4. A talajszén megőrzésének agronómiai és technológiai rendszerei a bioetanol alapanyag termesztésben

Minden maradványhasznosítási döntésnek a talajvédelmi funkciókra, a helyspecifikus erózió, tömörödés és vízháztartási kockázatokra, valamint a SOC trendek ismeretére kell épülnie, mivel a szerves szénkészlet (SOC) és a nitrogénkörforgás szoros összefüggésű rendszerét érinti, a kukoricaszár és más szármaradványok eltávolítása (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

Mivel a mulcstréteg eltávolításával megszűnik a talaj felszínének fizikai védelme, ezáltal közvetlenül nő a csapóesőenergia érvényesülése, a csepperózió és a felületi lefolyás, ennek hatására az aggregátumok szétesnek, a finom frakciók mobilizálódnak. Ez gyors talajvesztést és SOC apadást idéz elő a lejtős, könnyű mechanikai összetételű és csapadékszélsőségeknek kitett táblákon, ami rövid távon állománystresszt és tápanyagvesztést, közép és hosszú távon pedig hozaminstabilitást és művelhetőségi romlást okoz (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

Továbbá a mulcs hiánya fokozza a hő és vízrendszer ingadozását is, ami a mikrobiális aktivitás hullámzásán keresztül felgyorsítja a mineralizációt, így a humifikáció mérlege negatív irányba mozdul el, csökkentve a vízmegtartást, ezáltal a szerkezet lazul, és mindezek együttesen rontják a talaj ökoszisztémaszolgáltatásait és növelik a mezőgazdasági inputigényt (Koper et al., 2021; Elless et al., 2023),

A maradványok energetikai kinyerése egyúttal anyagforgalmi deficitet is teremt, mivel a szárrakkal elszállított Nitrogén–Foszfor–Kálium (NPK) és báziskationok pótlásának az elmaradása esetén, a termőképesség gyorsan romolhat, ezért a maradványbevitel rövid távú előnyét szembe kell állítania a visszapótlás és a talajállapotmenedzsmet többletköltségeivel (Searle & Bitnere, 2017).

Mindent összevetve az európai szakmai összefoglalók nem ajánlanak egységes és biztonságosnak nyilvánított begyűjtési százalékot, mivel a fenntartható maradványeltávolítás feltétele a talajtípus, lejtés, éghajlat és vetésforgótól függő optimum meghatározása, amelyeket a helyspecifikus kockázatértékelésre és folyamatos monitorozásra kell alapozni. A gyakorlatban indikátorcsomag határolja körül a döntési teret, hogy melyek a minimális felszínborítottsági küszöbök, különösen az őszi-téli, kora tavaszi csúcshintenzitású csapadékidőszakokra nézve, és mennyi a becsült vagy mért eróziós veszteség, meghatározott időközökként mért SOC trend és tömörödési mutatók, továbbá a technológiai háttér alapján. A differenciált maradványstratégia ezáltal a gyakorlati következménnyé lép elő, és az erózióra hajlamos táblákon és kritikus meteorológiai kilátások mellett, a begyűjtés mellőzését vagy akár szigorú korlátozást is indokoltta tehet. A heterogén táblákon viszont a zónánként eltérő visszahagyási arányok a kívánatosak, és be kell építeni egy stopszabályt, ha a borítottsági vagy eróziós indikátorok értéke a küszöb alá süllyedne (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

A konzervációs csomag vált a talajvédelem és SOC megőrzés technológiai alappillérvé, a mulcshagyás vagy a takarónövény a felszín folyamatos borítására, illetőleg e két eljárás együttes használata, a csökkentett vagy forgatás nélküli művelésű aggregátumok védelmét és a

mineralizáció mérséklését, valamint precíziós tápanyagmenedzsment a maradványok lebontása során fellépő átmeneti C/N feszültségeket és a nitrogén kötési hullámok kezelését is elősegítheti. Mivel ez a három módszer egyszerre csillapítja a lefolyást, és stabilizálja a hő és vízregimet, és ezáltal növeli annak a valószínűségét, hogy a maradványeredetű szén nagyobb hányada a védett frakciókba, azaz az aggregátumbelsőbe, agyaghumusz komplexekbe épüljenek be (European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; Elless et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A bioetanol életciklus ÜHG mérlege, azaz az uniós beszámíthatóság, érzékeny a talajszénváltásra, mert ahol a maradványelvétel tartós SOC csökkenést, eróziófokozódást és tápanyagvesztést indukál, ott a termék klímálábnyoma romlik, viszont ahol a maradványvisszahagyás, a takarónövény és a kímélő művelés kombinációja stabil SOC eredményeket mutat, ott az ÜHG küszöbök teljesítése stabilabb mutatókat eredményez (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; Motola et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Avitabile et al., 2024).

Magyarországi viszonylatban mindez különösen releváns képet mutat, a lejtős löszvidékeken és a csapadékészelsőségeknek kitett tájakon. Mivel a kukoricaszár energetikai hasznosítása csak abban az esetben tartható fenn ökológiai szempontból, ha a borítottsági minimum teljesül, és a várható eróziós veszteség elfogadható sávban marad, viszont a SOC trend legalább stagnál. Ellenkező esetben a rövid távú energetikai haszon átalakulhat, tartós talaj és hozamvesztéssé és kedvezőtlen LCA romlássá, ami a beszámíthatóság elvesztésének kockázatát rejti magában (Searle & Bitnere, 2017; European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023).

Tehát, ha mindent összevetünk, a residuumkezelés a bioetanollellátási lánc talajcentrikus kapcsolóeleme, amely fenntartható csak akkor maradhat, ha a maradványhasznosítást be tudjuk illeszteni a talajfizikai védelem, a SOC megőrzés és a kockázatalapú, indikátorvezérelt agronómiai szabályok korlátjai közé, és a döntéseket hozzá tudjuk igazítani a táblaszintű heterogenitáshoz, időjárás-előrejelzéshez és mérhető talajindikátorokhoz (European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; European Parliament & Council, 2023; Avitabile et al., 2024).

A talajszén megőrzésének gyakorlati rendszere, ezért épül a bioetanolalapanyag termesztésben a folyamatos felszínborítottságra, a bolygatás minimalizálására, a célhoz illeszkedő takarónövénystratégiára, továbbá a precíziós tápanyagmenedzsment és a helyspecifikus, indikátoralapú döntéshozatal egyidejű alkalmazására. Ez a kombináció nyújt ténylegesen esélyt arra, hogy az életciklus ÜHG mérleg stabilan tudja teljesíteni a beszámíthatósági küszöböket, miközben a talajfunkciók, mint a vízmegtartás, szerkezet, tápanyagszolgáltatás nem romlik. A védelmi, azaz

a „pajzs” funkciót a felszín folyamatos borítása, a maradványvisszahagyás és takarónövény biztosítja, ezáltal tompítja a csapóesőenergiát, azaz mérsékli a csepperóziót és a lefolyást, stabilizálja a hó és vízregimet, továbbá fenntartja a szénbevitel útvonalaival. Viszont ezzel ellentétben a borítottság hiánya felgyorsítja az aggregátumok szétesését és a mineralizációt, különösen lejtős, könnyű mechanikai összetételű és csapadékszélsőségeknek kitett táblákon (European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; Elless et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A bolygatás minimalizálása, a forgatás nélküli vagy csökkentett művelésű területeken, az aggregátumok és az agyaghumusz komplexek védelmén keresztül lassítja a SOC veszteséget, ezáltal csökkentve az eróziót, de a siker előfeltétele a maradványok egyenletes elosztása és a talposági útvonalak kontrollja, továbbá a kerékterhelés csökkentése és a gyomnyomás menedzselése, mivel ezek lehetnek a fizikai instabilitás és a biotikus nyomás, a no-till rendszerek gyenge pontjai (Barczy et al., 2015; Szabó et al., 2015; European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

A takarónövénystratégia funkcionális, azaz a téli kilúgozásnál a nitrogén megkötő keverékek, nitrogén kiegészítéshez a pillangós komponensek, a tömörödési zónáknál mély gyökerű fajok és a fedettség folytonosság növeli az aggregátumstabilitást és annak esélyét, hogy közép és hosszú távon a maradványeredetű szén a védett frakciókba épüljön be, ami a kulcsa a SOC trend stabilizálásának. A precíziós tápanyagmenedzsment, kezeli a maradványok lebontásakor fel lépő átmeneti C/N feszültségeket, a felvételi csúcsokhoz közel, ammóniumpreferencia, sávos elhelyezéssel, azaz az időzített és térben célzott nitrogén kijuttatással. A takarónövények téli nitrogén megtartásával és a tavaszi átadásával együtt ez mérsékli a veszteségeket és a hozamkockázatot (European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; European Parliament & Council, 2023).

A maradványeltávolítás sosem vehetjük fix százaléknak, mivel függ a talajtípus, lejtés, éghajlat és vetéscserélőfüggő optimumától. Ellenben a döntést indikátorcsomag vezérli, a minimális borítottsági küszöböt a kritikus időszakokra, a becsült vagy mért eróziós veszteség, periodikus SOC mintavétel és tömörödési mutatók szerint, abban az esetben, ha bármelyik határérték romlik, automatikusan a topszabályt lépteti életbe, mivel az adott évben és zónában begyűjtés nem, vagy csak arányaiban engedhető meg (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

Átmeneti műveleti gyakorlatként ilyen esetben célszerű a maradványbetakarítás rotációs ritkítása, hogy ne ugyanazon táblán történjen minden évben, a lejtős zónák kihagyása mellett, a fedettség minimumok szigorú betartása és a no-till/strip-till arányának fokozatos emelése.

Mivel ezek együttesen csökkentik az eróziós és SOC kockázatot úgy, hogy nem jelentenek túlzott terhet egyetlen technológiai elemre sem (European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

A bioetanolalapanyag termesztésben, a talajszén megőrzése és a degradáció akkor tud hatékonyan és megbízhatóan működni, ha egyetlen, helyspecifikus döntési keretben kapcsolódik össze, a maradványvisszahagyás, a takarónövényborítottság, a bolygatás minimalizálása és a precíziós tápanyaggazdálkodás, amelyek esetében a mérhető indikátorok és az előre rögzített szabályok tudnak határvonalat szabni (Johnson, 2022; Elless et al., 2023).

A maradványréteg és az élő fedettség együttesen lát el fizikai, azaz csepperózió csillapító és lefolyás mérséklő folyamatot. Továbbá mikroklimatikus, hó és vízregim stabilizáló és biogeo-kémiai, azaz folyamatos szénbeviteli és gyökérkiválasztási funkciót. Ez a három együttható teremti meg azt a környezetet, amelyben az aggregátumok stabilabbak lesznek, a mineralizáció lassul, és nagyobb az esély nyílik arra, hogy a maradványeredetű szén védett frakciókba, azaz az aggregátumbelsőbe és az agyaghumus komplexekbe épüljenek be, ezáltal a közép és hosszú távú SOC trend romlása nem következik be. A „nem fix százalék” elv gyakorlati fordítása azt jelenti ebben az esetben, hogy a maradványeltávolítás mértékét minden táblán a lejtés, a talajtípus, a csapadékintenzitás és a vetésforgó fedettségi réseinek függvényében kell megállapítani. A döntést a minimális borítottsági küszöb, különösen az őszi-téli és kora tavaszi eróziós csúcsokra tekintettel, a becsült vagy mért eróziós veszteség, a periodikus SOC mintavétel és tömörödési mutatók vezérlik, és amennyiben bármelyik indikátor a határérték alá süllyed, automatikusan életbe lép a begyűjtés tiltása, illetve visszafogása. A takarónövénystratégia célfüggvénye három irányú, a téli nitrát kilúgozás mérséklése nátrium megtartó keverékekkel, a rendszer nettó nátrium kiegészítése pillangós komponensekkel, és a mélyebb tömörödési zónák oldása karógyökerű fajokkal, ami által a keverékek diverzitása növeli a rezilienciát, az évjárat és talajheterogenitás mellett, miközben a magágyminőség és a vetésbiztonság érdekében a terminálás időzítését a főnövény igényeihez igazítja. A bolygatás minimalizálása, a forgatás nélküli vagy csökkentett művelésű területeken csak akkor hoz következetes eredményt, ha együtt jár a maradványok egyenletes elosztásával, a taposási útvonalak kontrolljával és a kerékterhelés csökkentésével is. A no-till környezetben a gyomnyomás és a kártevődinamika kezelése, továbbra is külön figyelmet igényel, de a fizikai talajvédelem és a SOC megőrzés szempontjából ez a technológiai alapelem nem helyettesíthető mással (Birkás et al., 2015; European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

A precíziós tápanyagmenedzsment a maradványok lebontásakor fellépő C/N feszültségek kezelésében is szerepet játszik, az időzített és térben differenciált nitrogén kijuttatással csökkentve a veszteségeket és a termés mennyiség kockázatát (Johnson, 2022; Takács et al., 2023).

Ellátásilánc szinten mindez nem csak ökológiailag a legkedvezőbb, hanem megfelelési eszköz is egyben, mivel a maradványvisszahagyás, a takarónövény és a kímélő művelés kombinációi megszilárdítják az emissziós profilt és javítják a talajszénmérleget, ezáltal nő a RED szerinti életciklus és teljesül az ÜHG küszöbök tartós biztosítása. Viszont ellenben a túlzott maradványeltávolítás a rövid távú energetikai hasznot átalakítja, hosszabb távú talaj és hozamvesztéssé, valamint LCA romlássá, ami a beszámíthatóságot is veszélyezteti (European Parliament & Council, 2018; Koper et al., 2021; Takács et al., 2023; Johnson, 2022; Elless et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

Célravezetően a zónánként differenciált maradványstratégiát úgy kell kialakítani, rotációs ritkítás ne ugyanazon táblán történjenek minden évben, ami a lejtős zónák kihagyását, fedettség minimumok szigorú betartását és a no-till/strip-till arányának szakaszos emelését jelenti, mivel ezek együtt úgy csökkentik az eróziós és SOC kockázatot, hogy egyik technológiai elemre sem nehezedik aránytalanul több teher, miközben a gazdaság szintjén a monitoring, a borítottság, eróziónyomok, periodikus SOC mintavétel tekintetében, a dokumentáció az auditálhatóság feltételét is teljesíteni tudja (European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

2.5. Talajszervesanyag tartalmának szerepe a bioetanol LCA-ban

Klímamérleg és életciklus, azaz a SOC szerepe a bioetanol LCA-ban, ami arra mutat rá, hogy a talaj szerves szénkészletének, azaz a SOC változását az erózió közvetlenül befolyásolja a kukoricaalapú bioetanol életciklus üvegházgáz ÜHG mérlegében, ezért a beszámíthatóság ebben az esetben nem csak feldolgozóüzemi hatékonyság és logisztika kérdése, hanem elsősorban talajállapot menedzsment területe. A nemzetközi szakirodalom és az európai elemzések következtében jelzik, hogy ha a maradványeltávolítás, az erózió és a fokozott mineralizáció nettó SOC csökkenést idéz elő, a bioetanol meghatározott ÜHG előnye érezhetően romlik, szélsőséges esetben el is tűnik, ezzel ellentétben a maradványvisszahagyás, a takarónövény és a kímélő művelés együttese megerősíti a talajszénmérleget, így javítja az LCA eredményt és növeli a RED küszöbök tartós teljesítésének elérésének esélyét (European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; Elless et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

Az LCA érzékenység oka, hogy a mezőgazdasági fázis emissziói mellet, amit a műtrágya, energia, N₂O kibocsátás okoz, a talajszénváltás jelenti a legnagyobb bizonytalansági és kockázati tételt, ami a SOC csökkenése és a talajból származó CO₂ egyenleg romlásaként jelenik meg, míg a SOC megőrzése vagy növelése a rendszer szénmérlegét kedvezően befolyásolja (Birkás et al., 2015; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

A fejlett és a hulladék alapú bioüzemanyagok esetében az európai kutatások külön felhívják a figyelmet arra az ellentmondásra, hogy a nyersanyagkorlátok és a fenntarthatósági minimumok szigorodása mellett a hagyományos alapanyagok, mint például a kukorica, LCA teljesítménye nagyon nagy mértékben függ a talajszénmenedzsmenttől, ahol a talajállapot rutinok konzisztensen jók, ott a bioetanol ÜHG előnye fent tud maradni, ahol viszont jelentkezik az erózió és SOC apadás, ott az előny gyorsan csökkenő tendenciát mutat (European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Suzan, 2024; Avitabile et al., 2024).

Az üzemek és a beszállítói hálózatok számára, ennek a rutinnak a következménye, hogy a talaj intenzív megfelelés válik standarddá, ami által a maradvány visszahagyási küszöbök és takarónövény kötelezettségek, valamint csökkentett vagy forgatás nélküli művelés arányának növelése. Illetőleg elkerülhetetlen a helyspecifikus monitoring beépítése a beszállítói protokollokba, mert az LCA biztonság csak így tartható fenn (Takács et al., 2023; Avitabile et al., 2024).

A magyar agrár és gazdasági háttérelmézések is alátámasztják azt a tényt, hogy a bioetanol fenntarthatósági teljesítménye nem leválasztható a talajfunkciók megőrzéséről, mivel a hozamstabilitás, a tápanyaggazdálkodási ráfordítások és a talajvédelem együttesen szabják meg az élelciklus kibocsátásokat és a beszámíthatóságot, emellett a talajromlás költségei a termelési oldalon és az LCA-ban egyaránt fellelhetők (Takács et al., 2023; KSH, 2021).

Ezen jellemzők tanulsága, hogy a bioetanol klíma mérlege SOC érzékeny rendszer, amelyben a talajszénmegőrzés és az eróziókontroll nem kísérő elvek, hanem az ÜHG előny strukturális feltételei, de a maradványvisszahagyás, a takarónövény és a kímélő művelés kombinációi adják azt a talajcentrikus megfelelő eredményt képező csomagot, amellyel az LCA biztonság és az uniós beszámíthatóság hosszú távon fenntartható (Birkás et al., 2015; European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

A számvetési metodikában is közvetlen ábrázolást, megfeleltetést kíván a bioetanol élelciklus ÜHG mérlegének talajszén érzékenysége, mivel a mezőgazdasági fázis kibocsátásai úgy, mint

az üzemanyag és áramfelhasználás, műtrágya gyártás és kijuttatás, N₂O emissziók képződése mellé egyértelmű módon be kell emelni a SOC változásból eredő egyenleget. Eközben a bizonytalansági sávokat a kockázatos zónákra, mint a szélsőséges csapadék, erózióra hajlamos lejtők, könnyű mechanikai összetételű talajok szerint kéne felosztani, mivel ezek megléte esetén kiterjesztett monitoringgal és konzervatív elszámolással kell kezelni a problémás területeket. Ez a módszertani szigor nem elméleti finomhangolás, hanem a beszámíthatóság strukturális feltétele, mivel ahol a maradvány eltávolítás, az erózió és a fokozott mineralizáció tartós SOC csökkenést idéz elő, ott a termék ÜHG előnye gyorsan eltűnhet. Viszont abban az esetben, ahol a talajszén mérleget a maradvány visszahagyás, a takarónövény és a kímélő művelés stabilizálja, ott az LCA eredmény szilárd marad (Birkás et al., 2015; European Parliament & Council, 2018; Johnson, 2022; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

Ennek értelmében a működési minimumok nem választhatók, mivel a táblaszintű maradvány visszahagyási küszöbök, a fedettség minimum a kritikus időszakokra, a csökkentett vagy forgatás nélküli művelés arányának növelése, a precíziós nitrogén időzítés és elhelyezés a C/N feszültségek kezelésére. Valamint alkalmazni kell, a helyspecifikus indikátor csomagra úgy, mint a felszínborítottság, becsült vagy mért eróziós veszteség, periodikus SOC mintavétel és a tömörödési mutatókra épített stop szabályok, amelyek a romló trendek esetén automatikusan korlátozzák vagy éppen tiltják a maradvány begyűjtést (European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Elless et al., 2023).

Ezen gyakorlatok az ellátásilánc szinten, szállítói protokollokban és auditálható gyakorlatokban testesülnek meg, mivel az egységes adatstruktúra a táblaszintű műveletekről és fedettségről, kockázatos zónák célzott ellenőrzéséről, a verifikációs kapacitások megerősítéséről, valamint a talajszén érzékeny mutatókhoz kötött ösztönzőkben nyilvánul meg. Ezáltal a gazdálkodói oldal a megfelelési kényszerét valós agronómiai előnnyé konvertálja. Ennek egyenes következménye, hogy a bioetanol LCA biztonsága nem a feldolgozóipar marginális hatékonyság növelésén, hanem a talajszén megőrzését fókuszba állító termelési protokollok ésszerű végrehajtásán áll vagy bukik. Így a későbbi fejlesztések esetében érdemes külön figyelmet szentelni a regionális differenciálásnak, mint a talajtípus, lejtés, csapadékintenzitás, illetőleg a szezonális fedettség stratégiaiknak és az ÜHG elszámolás bizonytalanság kezelésének, hogy kutatások a gyakorlatba is átültethetőek legyenek (European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Avitabile et al., 2024).

2.6. A magyar bioetanol értéklánc talajszén és fenntarthatósági megfelelési rendszere

Magyar ipari és akadémiai környezet, az alapanyag, melléktermék, talaj esetében azt hangsúlyozza, hogy a hazai bioetanol értéklánc klímamérlege és beszámíthatósága nemcsak üzemhatékonysági, hanem agronómiai és talajgazdálkodási kérdés is egyben. Mivel a kukoricaalapú termelés fenntarthatóságát együttesen határozza meg a talajszénmegőrzés, az eróziókontroll, a mellék termékáramok felelős hasznosítása és az egységesített adatszolgáltatás (Hingyi et al., 2006; Takács et al., 2023).

A hazai ipari alkalmazási rutinban a nagy résztvevők, mint például a magyarországi bioetanol-üzemek, a főtermék mellett értékes melléktermékeket is elő állítanak, mint a DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles) és WDGS (Wet Distillers Grains with Solubles) takarmány és a kukoricaolaj, amelyek a takarmányláncba áramoltatva csökkenthetik a rendszerszintű ÜHG terhelést a helyettesítési hatásokon keresztül. Ugyanakkor a szántóföldi oldalon megmarad a talajszénérzékenység, ezáltal a szármaradványok túlzott energetikai kivonása eróziót és SOC apadást eredményezhet, rontva ezzel a teljes LCA eredményt (European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Pannonia Bio Zrt.; Agrana Beteiligungs-AG).

A magyar agrárközgazdasági és akadémiai anyagok konzekvensen jelzik, hogy a hozamstabilitás és a LCA biztonság kulcsa a konzervációs agrotechnika, azaz a maradvány visszahagyás, takarónövény, csökkentett vagy forgatás nélküli művelés, és a precíziós tápanyag gazdálkodás összehangolása. Ezek a gyakorlatok a talajfunkciók, mint a porozitás, vízmegtartás, tápanyag-szolgáltatás stabilizálásán keresztül mérséklék a kibocsátásokat és javítják az ÜHG mérleget (Birkás & Gyuricza, 2004; Madarász, 2015; European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A rendszerirányítás szintjén a beszámíthatóság közvetlen feltétele a magyar szabályozásban rögzített életciklus ÜHG számítás, a tömegmérlegelv, a nyomon követhető adatszolgáltatás és az auditálhatóság, amely a módszertani keret és a mezőgazdasági kibocsátási komponenseket, mint az energia, műtrágya, N₂O összetétel, kiegészíti a földhasználati és talajszénváltozás kezelésével (68/2021. Innovációs és Technológiai Minisztérium) (European Parliament & Council, 2018; Magyarország Kormánya, 2021; European Parliament & Council, 2023).

Az üzem és láncszintű átalakítás és fejlesztés csak akkor hoz tartós ÜHG előnyt, ha a beszállítói protokollok a talajszénmegőrzés operatív minimumait, azaz a maradványvisszahagyási küszöbök, fedettségi minimumok, kockázatos zónákban maradványtilalom, helyspecifikus

monitoring és stopszabályok használatát kötelezővé teszik, mert a LCA érzékenység döntően a táblaszintű gyakorlatokon múlik (European Parliament & Council, 2018; Magyarország Kormánya, 2021; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A hazai ipari melléktermék áramok, mint a DDGS vagy WDGS és kukoricaolaj is hozzájárulnak a rendszerszintű hatékonyság növeléséhez, de nem tudják helyettesíteni a talajvédelmet, mert a takarmányhelyettesítési előnyök csak akkor biztosak, ha a szántón a SOC trend nem romlik, ellenkező esetben a talajból származó CO₂ egyenleg és eróziós emissziók lerontják a bioetanol előnyét (Hingyi et al., 2006; European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A magyar publikációk szerint az agronómiai adaptáció gazdasági racionalitása egyértelmű, mivel a talajromlás közvetlen költségei kihatnak a művelhetőségre, inputhatékonyságra és a hozamkockázatra is, és ezáltal a közvetett LCA romlás egyszerre rontja a versenyképességet és a beszámíthatóságot. Ezzel szemben a fedettség, a kímélő művelés és a precíziós tápanyagmenedzsment hosszabb távon csökkenteni tudja a fajlagos költségeket és növelheti a megfelelési biztonságot is (Madarász, 2015; Takács et al., 2023).

Összefoglalva a magyar bioetanol értéklánc fenntarthatósága talajcentrikus, mivel függ a talajszénmegőrzéstől és az eróziókontroll beépítésétől a beszállítói szerződésekbe, ezáltal a táblaszintű monitoring és a LCA számvitel szigorítása együtt teremti meg a tartós ÜHG előnyt és a piaci beszámíthatóságot, miközben a melléktermék áramok hasznosítása a rendszer egészének hatékonyságát tudja javítani, de nem tudja pótolni a szántóföldi talajvédelem hiányát (Hingyi et al., 2006; Bacovsky & Matschegg, 2019; European Parliament & Council, 2018; Magyarország Kormánya, 2021; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A hazai értéklánc akkor tud tartósan beszámítható és versenyképes lenni, ha a termőföldi gyakorlatokat, a melléktermék áramok kezelését és az adatarcitektúrát egyetlen, talajszén érzékeny irányítási keretbe tudja foglalni, amely által a beszállítói protokollok a maradvány visszahagyási küszöböket, a fedettségi minimumokat és a kockázatos zónákat, mint a lejtős, könnyű szerkezetű, csapadék szélsőségeknek kitett táblák maradvány tilalmát kötelező elemé teszik, és mindezt ellenőrzött és auditálható indikátorokkal, úgy mint a felszínborítottsággal, becsült vagy mért eróziós veszteséggel, periodikus SOC mintavétellel, tömörödési mutatókkal támasztják alá. Ezért az üzemek oldalán ehhez mindenképpen hozzá kell rendelni a takarmány helyettesítési előnyök pontos számviteli leképezését, a DDGS vagy WDGS és kukoricaolaj tükrében úgy, hogy a helyettesítési pontszám ne fedje el a szántón fellépő SOC romlást, mert a talajból eredő CO₂ egyenleg és az eróziós emissziók gyorsan elhasználhatják a papíron kimutatott klímaelőnyt

(Madarász, 2015; Magyarország Kormánya, 2021; European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A működésben a legnagyobb veszélyt a „nem fix százalék” elv következetlen alkalmazása jelent, mivel a maradvány begyűjtés egységes, táblákra meghatározott aránya helyett zónánként és évenként kell dönteni, a stop szabályt érvényesítve, ha a borítottsági vagy eróziós indikátor romlik. Ennek kötelezőségét támogatja a szezonális fedettségi naptár, mint az őszi-téli vagy kora tavaszi csúcsokra dedikált takarónövény ablakok, a kímélő művelés arányának fokozatos emelése, a no-till/strip-till azaz a forgatás nélküli vagy sávos talajművelés, valamint a precíziós nitrogén időzítés és térbeli elhelyezés, amely az átmeneti C/N feszültségeket kezelhetővé teszi anélkül, hogy a hozamstabilitásra hátrányosan hatna (Madarász, 2015; Takács et al., 2023).

Ellátásilánc irányítási szempontjából elengedhetetlenek a szabványosított adatlapok és a digitális művelési naplók bevezetése, amivel nyomon követhető a tábla szintű fedettség, maradványtömeg becslés, művelési mód, tápanyagkijuttatás, eróziós események utáni felmérés adatai. Emellett csökkenti a számviteli bizonytalanságot, és lehetővé teszi a kockázatalapú ellenőrzést, így a kockázatos zónák gyakrabban mintavételezhetők SOC-ra és tömörödéssre, míg az alacsony kockázatú zónák variálható ritkítással is fenntarthatók, ezzel finomítva az ellenőrzési költségeken (Magyarország Kormánya, 2021; European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

Ipari oldalról nézve a melléktermék áramok, mint a DDGS vagy a WDGS, és a kukoricaolaj értékesítése javítja az általános hatékonyságot, de nem tudja helyettesíteni a talajvédelmet. A takarmány helyettesítési egység hagyományosan számítandó, és csak akkor tekinthető tartósnak, ha a beszállítói táblákon a SOC trend legalább szilárd és állandó, ellenkező esetben a talajromlás miatti LCA romlás visszafordíthatja a számított előnyt (Madarász, 2015; European Parliament & Council, 2018; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A versenyképesség és a megfelelés teljes összhangját az tudja megteremteni, ha a beszállítói szerződésekben a talajszén megőrzés operatív minimumai határozott feltétellé válnak, az üzemek pedig olyan ösztönzőket kínálnak, mint például a felár, hosszabb szerződés, beszállítói szolgáltatások, amelyek a gazdálkodói oldalon a fedettség, a kímélő művelés és a precíziós tápanyag menedzsment többletköltségeit ellensúlyozni tudják. Így a talajcentrikus előírás nem csak környezeti, hanem üzleti szempontból is ésszerű utat tud mutatni a magyar bioetanol értékláncnak, és tartósan tudja biztosítani a RED szerinti LCA küszöbök teljesítését (European Parliament & Council, 2018; Magyarország Kormánya, 2021; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

3. Anyag és módszertan

Az adatgyűjtés két részből tevődött össze, egyrészt a hivatalos statisztikai adatok feldolgozásából (KSH, AKI, Eurostat), másrészt a digitális adatok és tudományos források átvizsgálásából. A statisztikai adatokból a kukorica vetésterületeire, termés mennyiségére és annak feldolgozási mennyiségeire vonatkozó információkat gyűjtöttem össze, ezeket excel segítségével összesítettem és dolgoztam fel. Ezen értékek alapján a becsült talajhasználat 140–250 ezer hektár között mozgott, ami az időjárási viszonyok és az adott év hozam függvényében változik (KSH, 2021).

Az irodalmi kutatás kiterjedt a hazai és nemzetközi szakirodalmakra is. A forrásokat a Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, valamint hazai szinten a MATARKA és MEK adatbázisokból gyűjtöttem össze és dolgoztam fel. A kereséshez használt fő kulcsszavak a bioetanol Magyarországon, kukorica talajhatás, soil organic carbon, ISCC compliance, RED II bioetanol, szármaradvány visszahagyás, talajdegradáció bioetanol által (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A találatok közül azokat használtam fel, amelyek talajtani, fenntarthatósági vagy agronómiai szempontból relevánsnak számítottak, illetve megbízható, ellenőrzött forrásból származtak.

A források feldolgozásának célja az volt, hogy meghatározzuk melyek a legfontosabb indikátorok a bioetanol termelés szempontjából. Az adatfeldolgozás során a különböző forrásokból összeszedett információkat egyesítettem, ellenőriztem, majd a fontosabb adatokból táblázatos összefoglalót és diagramokat csináltam. A kutatás Magyarország teljes területét lefedi, különös azokra a mezőgazdasági térségekre koncentrálva, ahol a bioetanol alapanyagának termelése, azaz kukoricatermesztés zajlik. Ilyen területek a Dél- és Észak-Alföld, valamint a Dunántúl déli régiói (Tolna, Somogy, Baranya). Ezeken a térségeken elsősorban megtalálható a csernozjom, réti és barna erdőtalaj típusok, amelyek magas termékenységgel rendelkeznek, fokozottan érzékenyek az erózióra, a tömörödéésre és a szervesanyag tartalom csökkenésére (Madarász, 2015; Birkás et al., 2015).

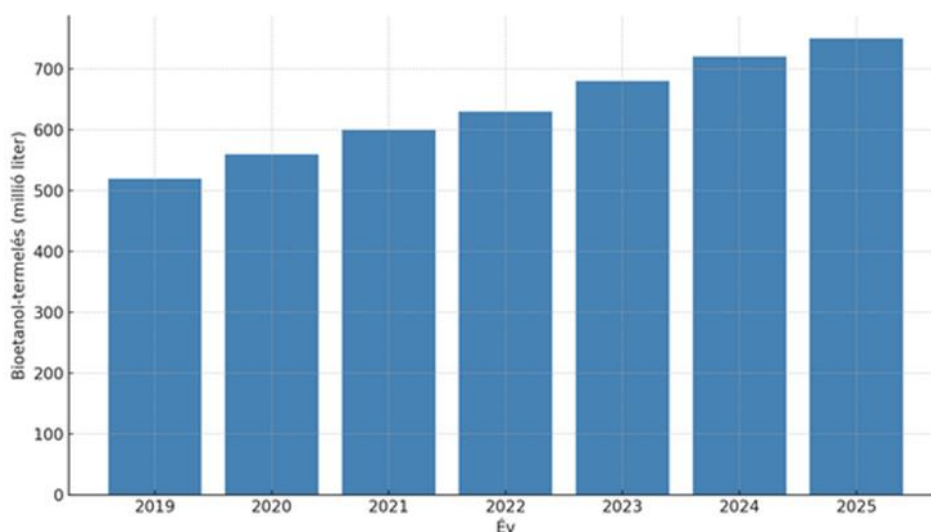
A hazai bioetanol termelés alapját a Pannonia Bio Zrt. (Dunaföldvár) és a Hungrana Kft. (Szabadegyháza) adja, amelyek együttesen évente közel 1–1,2 millió tonna kukoricát dolgoznak fel. Ez a mennyiség a magyar kukoricatermesztés közel 1/6-át teszi ki hozamtól függően, és területi összpontosulást okoz, amely a talajhasználati nyomást is növeli. A vizsgálat során ezek a területek kerültek a középpontba, mivel itt a talajállapot és a bioetanol termelés kapcsolata a legszorosabb (BIC, 2024; Hungrana Kft.; Pannonia Bio Zrt.).

4. Eredmények

4.1. Magyar bioetanol termelés és kapacitásbővülés

A kapacitás gerincét Magyarországon a bioetanol termelésben, két nagy, egymással összehangoltan működő biorefinéria adja. Az egyik a dunaföldvári Pannonia Bio Zrt., a másik meg a szabadegyházi Hungrana Kft., amelyek összevont éves feldolgozása 2019–2025. év között megközelítőleg 1,0–1,2 millió tonna kukorica, mely a hazai bioetanol termelés döntő hányadát adja, ezáltal megbízható alapot teremtve az országos hatásvizsgálatokhoz (Donley, 2023; Pannonia Bio Zrt.; Agrana Beteiligungs-AG; Hungrana Kft.).

A dunaföldvári Pannonia Bio Zrt., a hazai bioetanolipar kulcsszereplője, amely éves szinten mintegy egymillió tonna kukoricából több száz millió liter bioetanol állít elő. A termelés 2019-ben átlépte az 500 millió litert, és azóta folyamatos bővülést mutat, amit a 5. ábra is jól szemléltet (BIC, 2024; Avitabile et al., 2024; Pannonia Bio Zrt.; Hungrana Kft.).



5. ábra: Magyarország bioetanol-termelése 2019–2025 között

(Forrás: Saját szerkesztés Eurostat (2019–2023), ePURE (2024) Pannonia Bio Zrt. és Hungrana Kft. adatai alapján.)

A szükséges kukoricaterület az adott év időjárási és termelési körülményeihez alkalmazkodva változik, 2019. évben ez 140–220 ezer hektár között mozgott, 2022. évben az aszály miatt 200–240 ezer hektárra nőtt, míg 2025. évre a kapacitásbővülés hatására várhatóan 188–250 ezer

hektáron folyik megfelelő alapanyag termesztés. Az intenzív kukoricatermesztés komplex hatásokat gyakorol a talajra a szármaradványok energetikai célú eltávolítása csökkenti a talaj szervesanyag tartalmát, amely hosszú távon gyengítheti a talaj termőképességét és szerkezetét (Hingyi et al., 2006; Lal, 2006; Takács et al., 2023).

Az országos statisztikák nem közölnek gyárszintű, évenkénti vetésterületet, ezért a bioetanolhoz kötött kukorica hektárigény a feldolgozott tonna és az adott év hivatalos átlaghozamának hányadosaként becsülhető, mely a 2019.–2025. év közötti hozamingadozás mellett ez körülbelül 140–250 ezer hektár sávban mozgott, aszályos évben magasabb területigénnyel ugyanazon feldolgozott tömegre, míg régiós beszállításnál súlyozott hozamátlag csökkentheti a torzítást (Hingyi et al., 2006; KSH, 2021).

A vizsgálat egységes talaj indikátorpanelekre támaszkodott, az összes szerves szén 0–30 cm (g/kg vagy %), penetrométer 0–40 cm (MPa) 2–5 cm-es felbontással, térfogattömeg 0–30 cm (g/cm³), telített beszivárgási sebesség (mm/h), téli félévi fedettség (%), mikrobiális biomassza C és enzimaktivitás (dehidrogenáz/foszfátáz) alkalmazásával. A mérések betakarítás után 4–6 héttel, háromévente kiterjesztett profillal történtek, és célérték sávokhoz viszonyítva kerültek értékelésre (pl. penetrométer kritikus >2,0–2,5 MPa, téli fedettség ≥60%, térfogattömeg vályogon 1,3–1,5 g/cm³, SOC legalább stagnáló 5 éves ablakban) (Birkás et al., 2005; Madarász, 2015).

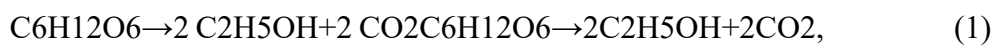
A döntési szabályok lényege, ha 20–40 cm-ben a penetrométer >2 MPa, állandó nyomsáv és sávos/no-till próbatábla bevezetése indokolt, SOC-csökkenésnél maradvány visszahagyás és takarónövény fedettség növelése szükséges, fedettség <60% esetén fokozódó eróziókockázat mérsékelhető takarónövény programmal és mulcstakarással (Birkás et al., 2007; Gyulai, 2009; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A 2019–2025. év közötti időszakban a kukorica iránti növekvő kereslet és a kapacitásbővülés a fő kukoricaövezetekben (Alföld és Dél-Dunántúl) időben és térben koncentrált művelési nyomást okozott. A szármaradványok energetikai célú elhordása a felső 0–20 cm-ben gyorsíthatja a humuszvesztést és az aggregátum stabilitás romlását, ami vízmegtartás és pufferkapacitás csökkenéssel, valamint alacsonyabb enzimaktivitással járhat, míg a gépesített betakarítás és a kedvezőtlen időzítésű műveletek 20–40 cm-ben tömör zónát alakíthatnak ki (csökkent beszivárgás, nagyobb felszíni lefolyás), összességében erősítve az eróziót és a hozamingadozást. A talajtípus érzékenysége eltérő, homoktalajon a fedetlenség és a szél defláció ellen egész éves borítás és 50–60% téli maradványtakarás. Vályogtalajon a taposási tömörödés mérséklésére állandó nyomsáv, sávos/no-till és abroncsnyomás kezelés. Kötött talajon vízgazdálkodási kockázat esetén szigorú művelési időzítés és puffer vízlevezető elemek indokoltak. A talajkímélő és

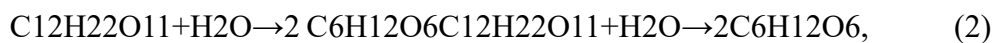
precíziós technológiák (forgatás nélküli/sávos művelés, automata nyomsáv, helyspecifikus tápanyag kijuttatás, takarónövények) együtt képesek mérsékelni a degradációt, amit a Közös Agrárpolitika (KAP) ösztönzői gyorsítottak, miközben a hazai ágazati közlések a bekeverési arányok bővülésével a bioetanol stabil keresletére is utalnak (R. Lal, 2006; Hingyi et al., 2006; Birkás et al., 2006; European Commission, 2010; Searle & Bitnere, 2017; Madarász, 2015; Takács et al., 2023).

A bioetanol folyamat ipari lánc az őrlés–enzimes cukrosítás–fermentáció–desztilláció–víztelenítés egységeken alapul, melléktermékként DDGS/WDGS és kukoricaolaj keletkezik,

az alkoholos erjedés fő sztöchiometriája:



szacharóz esetén invertáz bontás:



a keményítő α -amiláz és glükóamiláz hatására hidrolizál glükózzá, iparilag batch, fed batch és folyamatos fermentációs rendszerek terjedtek el, a minőségbiztosított végtermék víztelenítése molekulaszitával történik üzemanyag specifikációra (E5–E10–E85). A hazai bioetanol elsődleges felhasználása a közlekedési benzinhoz történő bekeverés, kisebb részben oldószer és vegyipari alapanyag, jelentőségét a fosszilis benzinhoz képest elérhető ÜHG megtakarítás adja, feltéve, hogy a RED II/RED III szerinti fenntarthatósági és lánc nyomon követési elvárásoknak megfelel, amihez International Sustainability and Carbon Certification (ISCC) alapú tanúsítási rendszerek állnak rendelkezésre és a hazai ipari gyakorlatban alkalmazásban vannak (Panella & Kaffka, 2010; European Parliament & Council, 2018; ePURE, 2023; European Parliament & Council, 2023; ePURE, 2024).

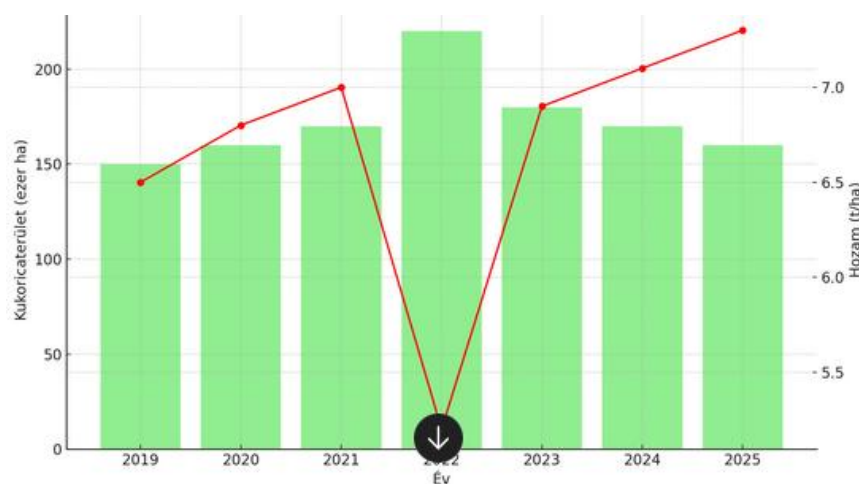
4.2. Kukoricaterület és átlag termésmennyiség összefüggése

Magyarország bioetanol termelésében két fő szereplő van, amelyek szoros együttműködésben biztosítják az iparág folyamatos működését és a rendelkezésre álló adatok megbízható értékelését, a dunaföldvári Pannonia Bio Zrt. és a szabadegyházi Hungrana Kft. A szakdolgozatban szereplő adatok a két üzem termelési eredményeit egybevonva kerültek feldolgozásra, így a

bioetanol ipar hatása a talajokra és a mezőgazdasági területekre átfogó, egységes képet mutatott (Donley, 2023; BIC, 2024; Hungrana Kft.; Pannonia Bio Zrt.).

Az országos statisztikákban azonban nem áll rendelkezésre közvetlen, évenkénti és gyárspecifikus adat a bioetanol célú kukoricavetésekről, ezért a bioetanol termeléshez kötött kukoricaterületek nagyságának becslésére a szakdolgozatomban a feldolgozott kukorica tonnában mért mennyiségét veszem alapul. Ez az adat közel áll a valósághoz, hiszen a hazai bioetanol gyárak, elsősorban a Pannonia Bio Zrt., 2019. és 2025. év között mintegy 1,0–1,2 millió tonna kukoricát dolgoztak fel évente, amely 2025. évre várhatóan további bővülést mutat (KSH, 2021; Donley, 2023; Pannonia Bio Zrt.).

A feldolgozott tonnák és az adott évre jellemző hivatalos kukorica hozamok alapján a bioetanol termeléshez szükséges kukoricaterület 140 ezer hektártól 250 ezer hektárig terjedt az adott időszakban, amelyet a hozamok évjáratától és időjárási körülményektől függő ingadozása határozott meg. Ahogy a 6. ábrán látható, a termőterület és a hozam között fordított arányosság figyelhető meg. A kedvezőtlen aszályos években a hozam visszaesése nagyobb vetésterületet eredményezett, ugyanazon bioetanol mennyiség előállításához, míg a kedvező csapadék ellátottságú és kiegyensúlyozottabb évjáratokban kisebb területen is biztosítható volt az alapanyag ellátottság (KSH, 2021; BIC, 2024).



6. ábra: Kukoricaterület és hozam kapcsolata 2019–2025. év között

(Forrás: Saját szerkesztés KSH (2021), Eurostat (2024), Takács et al. (2023) és BIC (2024) adatai alapján.)

Az ábra egyértelműen bemutatja a bioetanol termelés területi igényének érzékenységét az éghajlati tényezőkre, különösen a 2022. évben, amikor az extrém szárazság miatt a hozam

jelentősen visszaesett, miközben a termeléshez szükséges kukoricaterület meghaladta a 220 ezer hektárt. Az ezt követő években, 2023. és 2025. év között a javuló időjárási körülmények hatására a hozamok ismét növekedtek, 7 tonna feletti hozamot érve el, ami mérsékelte a vetésterületet és stabilizálta az alapanyag ellátást. A 6. ábra tehát jól szemlélteti, hogy a bioetanol termelés mennyisége közvetlenül függ a kukoricatermelés eredményességétől és a természeti feltételek alakulásától. Így a jövőbeni fenntarthatóság szempontjából kiemelt jelentőségű a hozamstabilitás és a termőterület optimális kihasználása. Módszertani megjegyzés (hektár proxy) becsült hektár = bioetanol célra feldolgozott kukorica (t/év) ÷ országos kukorica átlaghozam (t/ha/év). Érzékenységi vizsgálatban $\pm 20\%$ hozam. A kukorica betakarítás gépesített elmozdulással sávos területigényt ad, aszályos év (alacsonyabb t/ha) azonos feldolgozott tömegre nagyobb hektárigényt eredményez, így a becslés konzervatív. Régiós beszállítás esetén súlyozott hozamátlag alkalmazható a torzítás csökkentésére. A becslések a KSH, Eurostat és BIC statisztikai adatbázisai, valamint ipari közlései alapján készültek, amelyek hivatalos és hiteles forrásokra épülnek (KSH, 2021; BIC, 2024; Eurostat, 2024).

A feldolgozott szakirodalmi értékeléshez egységes talajindikátor panelt alkalmaztak, összes szerves szén 0–30 cm (g/kg vagy %), penetrométeres ellenállás 0–40 cm (MPa) 2–5 cm-es felbontással, térfogattömeg 0–30 cm (g/cm³), telített beszivárgási sebesség (mm/h), téli félévi felszíni fedettség aránya (%), tarló+zöldborítás), mikrobiális biomassza C (mg C/kg) és egy enzimaktivitás (pl. dehidrogenáz/foszfátáz, $\mu\text{g TPF/g/óra}$). A mérések évente egyszer, betakarítás után 4–6 héttel történtek, háromévente kiterjesztett profillal (penetrométer + térfogattömeg 0–40 cm). Az értékelést célérték-sávokhoz viszonyítottuk (vályogon 1,3–1,5 g/cm³, penetrométer kritikus $>2,0$ – $2,5$ MPa, téli fedettség $\geq 60\%$, SOC 5 éves ablakban legalább stagnál) (Birkás et al., 2005; Birkás et al., 2006; Madarász, 2015; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A döntési szabály, ha a 20–40 cm zónában a penetrométer >2 MPa, állandó nyomsáv és sávos/no-till próbatábla bevezetése szükséges, SOC-csökkenésnél maradvány visszahagyás és takarónövény fedettség növelendő (Birkás et al., 2015; Madarász, 2015; European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A kukorica iránti növekvő kereslet és a bioetanol kapacitásbővülése szoros összefüggésben áll a vetésterület növekedésével, amely viszont számos, a talajra kifejtett kedvezőtlen hatással járhat. Az intenzív kukoricatermelés során alkalmazott szármaradvány eltávolítás, amely az energetikai felhasználás miatt elterjedt módszer, a talaj szervesanyag tartalmának csökkenéséhez és a humuszkészlet fogyatkozásához vezethet, különösen amennyiben nem alkalmazzák a visszapótlást és talajkímélő gazdálkodási technológiákat (Lal, 2006; Takács et al., 2023).

A hazai szakirodalom szerint a talajkímélő művelés (forgatás nélküli vagy csökkentett talajforgatás, direktvetés és takarónövények alkalmazása) aránya 2016. és 2023. év között jelentősen, 10%-ról 32%-ra nőtt, így több mint 1,3 millió hektárra terjedt ki, aminek feltételezhetően mérséklő hatása van a degradáció ütemére. Ugyanakkor a kukoricaterületekre koncentrálódó magas eróziós veszély is kiemelten fontos tényezőnek tekinthető (Birkás et al., 2005; Madarász, 2015; Stolte et al., 2016; KSH, 2023).

Az Eurostat agrár környezetvédelmi indikátorai szerint az Európai Unió mezőgazdasági területeinek mintegy 11,6%-a közepes vagy súlyos talajerózió kockázatának van kitéve. Magyarországon esetében a Pásztor és munkatársai (2016) által elkészített országos eróziós modellek és térképek igazolják, hogy az intenzív kukoricatermesztés és az energetikai célú szármaradvány eltávolítás egyes térségekben (például Dél-Alföld, Dél-Dunántúl) jelentősen növeli az eróziós veszélyt. A kukorica betakarítás gépesített technológiái szintén okozhatnak talajtömörödést, ami a vízbefogadó képesség csökkenéséhez és a gyökérnövekedés akadályozásához vezet, tovább rontva a talaj fizikai állapotát (Stolte et al., 2016; Madarász, 2015; Pásztor et al., 2016; KSH, 2021; Eurostat, 2024).

A talajtípusok kockázati profilja eltérő, ezért a beavatkozások helyspecifikusak. Homoktalajokon a szélerózió és az alacsony víztartó képesség a fő kockázat, szükséges az egész éves borítás (takarónövény) és legalább 50–60% téli maradványtakarás, kiegészítve szélfogó pufferzónákkal és sekély vagy forgatás nélküli műveléssel. Középkötött vályogtalajokon a 20–40 cm zónában a taposási és művelési tömörödés dominál, ajánlott az állandó nyomsáv, csökkent abroncsnyomás, sávos/no-till és a folyamatos fedettség, zónázott tápanyagellátással. Kötöttebb agyagtalajokon a vízgazdálkodás romlása a fő kockázat, ha a művelés plasztikus állapotban történik, indokolt a szigorú időzítés (optimális nedvességi tartomány), mulcstakarás, vízlevezető és puffer elemek (füvesített vápák, terelő sávok) és a menetszám csökkentése (Birkás et al., 2005; Birkás et al., 2006; Birkás et al., 2015; Madarász, 2015).

A talajkímélő gyakorlatok egyre szélesebb körű alkalmazása képes mérsékelni ezen káros hatásokat. A bioetanol termelés növekedésével párhuzamosan Magyarország mezőgazdasági gyakorlata is fejlődik a fenntarthatóság és a talajvédelem irányába, amely a KAP keretében támogatott talajkímélő művelési módok, vetésforgók és takarónövények alkalmazásában érhető tetten. Az évenkénti és térségi szintű talajdegradációs folyamatok továbbra is kiemelt kutatási területet jelentenek, különösen olyan elemzésekre van szükség, amelyek a bioetanol gyárak által lefedett területeket és a regionális talajtípusokhoz kötött eltéréseket részletesebben vizsgálják (Birkás et al., 2005; Madarász, 2015; Takács et al., 2023).

A bioetanol ellátás kukoricaigénye 2019.–2025. év között hozamtól függően évi 140–250 ezer hektár termőterületet kötött le, aszályos évben azonos feldolgozott tömeghez több hektárra volt szükség, ami térben és időben koncentrált művelési nyomást okozott a fő kukoricaövezetekben. A szármaradványok energetikai célú elhordása a felső 0–20 cm rétegben gyorsíthatja a humuszvesztést, csökken az aggregátum stabilitás, romlik a vízmegtartás és a pufferkapacitás, visszaesik a talajlégzés és az enzimaktivitás, ezek a változások a morzsalékosság romlásában és a szárazságérzékenység növekedésében jelennek meg (Lal, 2006; KSH, 2021; Takács et al., 2023; BIC, 2024).

A mechanizált betakarítás és a nedves talajon végzett műveletek a 20–40 cm mélységben tömör zóna kialakulásához vezethetnek (eketalp), ami csökkenti a beszivárgást, növeli a felszíni lefolyást és lokális vízállásokat okoz, a gyökérzet behatolása korlátozottabb, a tápanyag és vízhasznosulás gyengül, a hozamingadozás nő (Birkás et al., 2005; Birkás et al., 2006; Madarász, 2015).

4.3. A talajfedettség és vízmegtartó képesség összefüggése

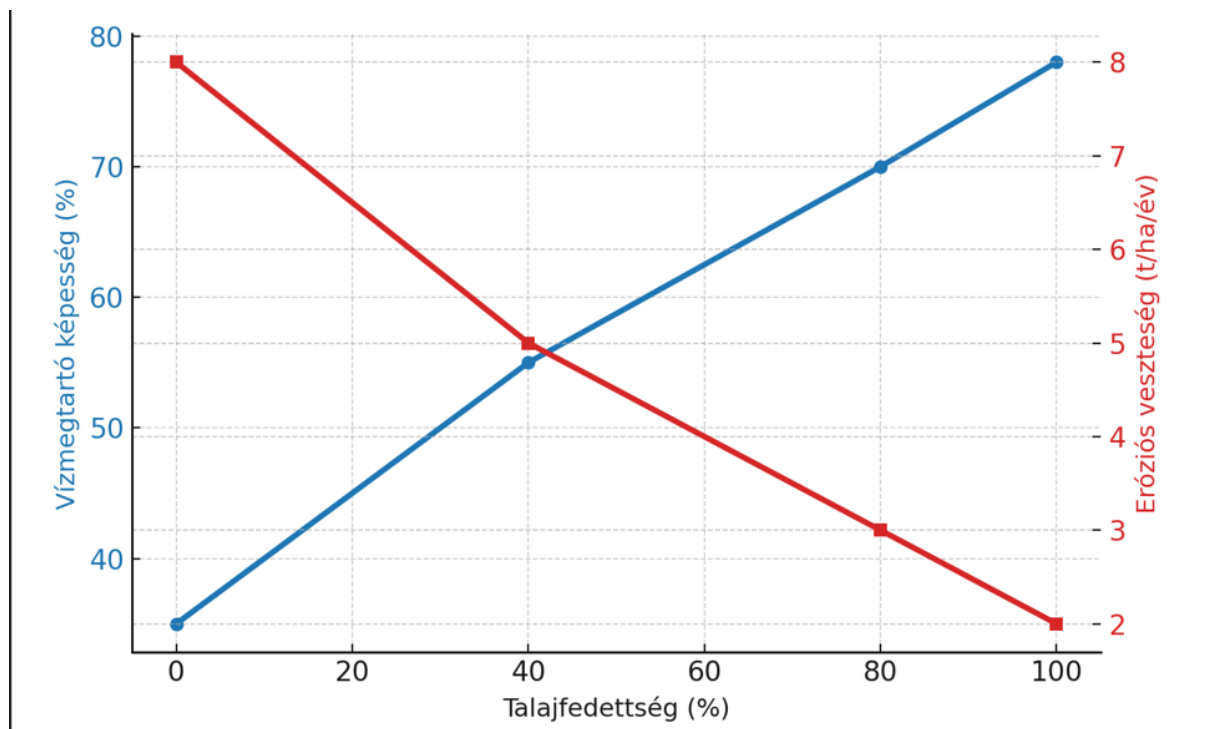
A fedetlen, lejtős, illetve laza szerkezetű táblákon fokozódik a víz és szélerozió, amely jelentős termőréteg veszteséget okozhat a nagy intenzitású csapadékesemények során. Az eróziós kockázat különösen a Dél-Alföld és a Dél-Dunántúl kukoricaintenzív térségeiben emelkedett, ha a tarló és takarónövény borítás hiányzik (Madarász, 2015; Stolte et al., 2016).

A nagy biomasza kivonás következtében nő a nitrogén, foszfor és kálium utánpótlási igény, ugyanakkor aszályos évjáratokban a tápanyagok hasznosulása romlik, így a nem helyspecifikus vagy nem megfelelő időzítésű kijuttatás fokozza a kilúgzási és lemosódási veszteségek kockázatát (Lal, 2006; Takács et al., 2023).

A talajmikrobiológiai állapot a gyakori bolygatás és az alacsony maradványtakarás hatására csökkenő mikrobiális biomaszát és enzimaktivitást mutat, míg takarónövények és minimális művelés mellett ezek a mutatók stabilabbak, az aggregátumstabilitás pedig javul (Birkás et al., 2005; Birkás et al., 2015).

A növényi maradványréteg csökkenti a csapadék becsapódási energiáját, mérsékli a felszíni lefolyást és párolgást, valamint elősegíti a talaj mikroklímájának kiegyenlítődéését. A magasabb fedettségi arány egyben a szervesanyag visszapótlást is támogatja, ami hosszú távon a talajszerkezet javulásához és a vízmegtartó képesség növekedéséhez vezet.

A 7. ábra szemlélteti, hogy a fedettség növelése miként javítja a talaj vízháztartását, miközben csökkenti az eróziós veszteséget kukoricaalapú rendszerekben.



7. ábra: A talajfedettség hatása a vízmeztartó képességre és az eróziós veszteségre (Forrás: Saját szerkesztés Birkás et al., 2005, Madarász, 2015, Stolte et al., 2016, KSH, 2021, Takács et al., 2023 és Eurostat, 2024 adatok alapján.)

A 7. ábra a talajfedettség növekedésének hatását mutatja be a vízmeztartó képesség és az eróziós veszteség függvényében. A trendvonalak alapján a fedetlen, maradvány nélküli felszínek alacsony vízmeztartó képességgel és magas eróziós veszteséggel jellemezhetőek, míg a 80–100%-os fedettségi arány, amelyet takarónövények és a maradványréteg biztosít, közel kétszeres vízmeztartást eredményezhet és az eróziós veszteség 2 t/ha év alá csökkenhet.

Ez az összefüggés jól mutatja, hogy a takarónövény és maradványalapú gazdálkodás a bioetanol alapanyag termelés során nemcsak a talaj vízháztartását és szerkezetét javítja, hanem a talajbiológiai aktivitás és a szervesanyag megtartás szempontjából is fenntarthatóbb megoldást kínál (Birkás et al., 2015; Takács et al., 2023).

A talajtípus érzékenysége eltérő, homoktalajokon a fedetlenség és széldefláció, vályogtalajokon a taposási tömörödés, kötöttebb talajokon pedig a vízgazdálkodás gyors romlása a fő kockázat,

ez indokolja a zónázott (helyspecifikus) művelést és inputmenedzsmentet (Birkás et al., 2005; Stolte et al., 2016).

A maradvány és melléktermék gazdálkodás (szár részbeni visszahagyása 40–60% céltartományban, takarónövény kombinációval) csökkenti az eróziót, javítja a humuszmérleget és a mikrobiális aktivitást, a fermentációs melléktermékek agronómiai visszaforgatása csak környezeti kontroll mellett célszerű (Takács et al., 2023).

A talajkímélő és precíziós technológiák (forgatás nélküli/sávos művelés, állandó nyomsáv, abroncsnyomás kezelés, automata kormányzás, helyspecifikus tápanyag kijuttatás, takarónövények) együttes alkalmazása bizonyult hatékonynak, mérséklék a taposást, növelik a felszíni fedettséget és javítják az input hatékonyságot, az elterjedtség területileg heterogén, ami a talajállapot indikátorokban is tükröződik (Madarász, 2015; Takács et al., 2023).

A 2019.–2025. év közötti magyarországi adatok és ipari közlések alapján a bioetanol célú kukoricatermesztés talajtani hatásai mérhetőek és ok-okozatilag megfeleltethetők a szervesanyag körforgás sérülésének, a fizikai degradációnak (tömörödés, erózió), a tápanyag és vízgazdálkodási zavaroknak, ezek mértéke a művelési rendszer, a borítottság, a vetésforgó, a domborzat és a talajtípus függvénye (Avitabile et al., 2024).

A negatív tendenciák lassításához a maradvány és zöldborítás fenntartása, a talajbolygatás minimalizálása, a taposási nyomás kontrollja, valamint a helyspecifikus tápanyag és vízgazdálkodás együttes, következetes üzemi bevezetése szükséges (Motola et al., 2023).

A rendelkezésre álló és bevont hivatalos adatbázisok és ipari közlések jelenleg a legpontosabb alapot nyújtják a korszerű bioetanol termelés talajtani hatásainak felméréséhez, de az éves bontású, gyárspecifikus területadatok hiánya továbbra is metodikai kihívást jelent, amelyet proxy adatokkal és stabilitásra törekvő becslésekkel kompenzálnak (Takács et al., 2023).

Az előrejelzések szerint a bioetanolipar növekedése miatt a kukoricaterület várhatóan tovább nő, ami fokozott szakmai figyelmet és célzott agrárpolitikai intézkedéseket igényel a talajvédelem és a fenntartható termelés érdekében (European Commission, 2010; KSH, 2021; Takács et al., 2023).

A fenntartható bioetanol előállítás megőrzése érdekében elengedhetetlen a mezőgazdasági technológiák folyamatos fejlesztése, a precíziós gazdálkodási módszerek adaptálása és a talajmunka kímélő megoldások széles körű elterjesztése a hazai termelői gyakorlatban, valamint a tudományos monitorozás és a kutatások megerősítése a talajminőség hosszú távú megőrzése érdekében (Panella & Kaffka, 2010; Birkás et al., 2015; Johnson, 2022; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A dolgozat érinti az ipari és agrárstatisztikai források, valamint a nemzetközi kutatások és hazai agrárpolitikai törekvések komplex összhangját, amely nélkülözhetetlen a bioetanol alapú mezőgazdasági termelés fenntartható jövője megteremtéséhez. Az alábbi táblázat az egész Magyarországon előállított bioetanol mennyiségét mutatja be 2019. és 2025. év között, literben kifejezve, valamint az adott évben a termeléshez szükséges nyersanyagként felhasznált kukoricaterület becsült nagyságát (hektárban). A területbecslések a feldolgozott mennyiség és az adott év hivatalos kukoricahozamai alapján számolták ki. A hazai bioetanol döntően kukoricára alapozott, mint ahogy ezt a táblázat is mutatja:

Év	Magyarország összes bioetanol termelése (millió liter)	Becslés a felhasznált kukoricaterületre (hektár)
2019	kb. 500–550	140 000–220 000 (kukorica)
2020	kb. 550	125 000–167 000 (kukorica)
2021	kb. 560–570	140 000–170 000 (kukorica)
2022	kb. 570	200 000–240 000 (kukorica, aszály miatt alacsonyabb hozam)
2023	kb. 640	140 000–185 000 (kukorica)
2024	kb. 670 (becslés)	140 000–185 000 (kukorica)
2025	kb. 700–750 (becslés)	188 000–250 000 (kukorica, kapacitásnövekedés várható)

1. táblázat: Magyarország bioetanol-termelése és a felhasznált kukoricaterület becslése (2019–2025)

(Forrás: Saját szerkesztés KSH (2021), Takács et al. (2023), BIC (2024), Pannonia Bio Zrt. és a Hungrana Kft. adatai alapján.)

A bioetanol termelés növekedése Magyarországon szoros összefügg a kukorica felhasználásának emelkedésével, amely alapanyagként szolgál az etanolgyártásban, tekintettel arra, hogy hazánkban a bioetanol túlnyomórészt első generációs, kukoricára alapozott etanol (Sebestyén, 2018).

Az országos bioetanol termelés éves szinten 500 millió literről 700 millió liter fölé növekedett a vizsgált időszakban, amely a hazai üzemek, elsősorban a Pannonia Bio Zrt.,

kapacitásbővülését és hatékonyságjavulását tükrözi (Birkás et al., 2005; Energiatudományi Kutatóközpont, 2022; Pannonia Bio Zrt.).

Ez a jelentős mennyiségű bioetanol alapanyag igény megközelítőleg több százezer hektár kukoricaterületet köt le, amelynek pontos meghatározása proxy alapján történik, azonban a termelési volumen, valamint a vidék mezőgazdasági statisztikái alapján hiteles indikátorként szolgálhat (KSH, 2021; Eurostat, 2024; BIC, 2024; KSH, 2024).

A termelés növekedése egyúttal jelentős talajterheléssel is jár, ezért a talajvédelmi és fenntarthatósági intézkedések továbbra is kulcsfontosságúak a hazai bioetanolipar hosszú távú fenntarthatóságához (Takács et al., 2023; Motola et al., 2023).

Magyarország bioetanol termelése 2019. és 2025. év között jelentős növekedést mutatott, amely alapvetően a kukorica alapú bioalapanyagok feldolgozására épül. (Eurostat, 2024)

Magyarországon a talajkímélő művelési gyakorlatok (csökkentett talajforgatás, direktvetés, takarónövények alkalmazása) egyre szélesebb területet fednek le, hozzájárulva a szervesanyag megőrzéséhez és a degradáció mérsékléséhez. A fenntartható talajhasználat iránti törekvéseket az agrárpolitikai támogatások és a tudományos vizsgálatok is erősítik (European Commission, 2010; Takács et al., 2023).

A talajerózió különösen a bioetanolhoz kapcsolódó nagy területeken, így a Dél-Alföldön és Dél-Dunántúlon jelentős probléma, amelyet a gépesített betakarítás során fellépő tömörödés súlyosbít, rontva a talaj vízbefogadó képességét és a növények gyökérfejlődését. A precíziós gazdálkodás és a talajkímélő technológiák szélesebb körű elterjedése ezeknek a káros hatásoknak a mérséklését célozza (Takács et al., 2023; Avitabile et al., 2024).

Összehasonlítva Magyarország bioetanol termelését térségbeli szomszédjával, Ausztriával, látható, hogy Ausztria lényegesen kisebb volumenben, de hozzájárul az EU bioetanol piacához. Ausztriában egy fő bioetanolgyár működik Pischelsdorfban, amely búza és kukorica alapanyagból évente mintegy 250 millió liter bioetanolt állít elő. Ez a mennyiség a magyarországi termelés mintegy 35–40%-a. Ausztria bioenergetikai stratégiája különösen erdőgazdálkodásra és biomassza alapú szilárd bioenergiára épül, így a bioetanol termelés kisebb területeket és diverzifikáltabb alapanyagforrásokat igényel. Ez az összevetés rávilágít Magyarország nagyobb termelési volumenére, ugyanakkor az ország intenzív mezőgazdasági használata jelentős talajvédelmi kihívásokkal jár, amelyek között a szervesanyag veszteség, talajtömörödés és erózió állnak az előtérben. Ausztria diverzifikált biomassza hasznosítása bizonyos mértékben enyhítheti az intenzív mezőgazdasági terhelésből eredő károkat (Bacovsky & Matschegg, 2019; Motola et al., 2023; Avitabile et al., 2024; Bauer et al., 2024).

A bioetanol termelés várható további növekedése Magyarországon a kukoricaterület bővülését eredményezi, amely fokozza a fenntartható talajgazdálkodás jelentőségét. Az osztrák példa is azt mutatja, hogy a bioetanol ipar fejlesztése során nemcsak a termelési volumen, hanem az ökológiai egyensúly megőrzése is alapvető szempont kell legyen. Az adatok és tapasztalatok megosztása az EU szintjén elősegíti a fenntartható bioenergia politikák kialakítását, mely megfelel a magyar agrárpolitikában is helyet kapó fenntarthatósági céloknak, különösen a talajkímélő művelési módok és precíziós technológiák terjesztésében (European Commission, 2010; Magyarország Kormánya, 2021; Motola et al., 2023; Avitabile et al., 2024).

Ez a komplex képlet Magyarország számára stratégiai irányt mutat, hogy miként lehet fenntartható módon fejleszteni a bioetanol termelést, miközben minimalizálják a környezeti károkat, és a mezőgazdasági termelés hosszú távon is biztosítható marad. A fenntartható agrárpolitika és talajajánlások implementálása kritikus szerepet töltenek be ebben a folyamatban (European Commission, 2010; Magyarország Kormánya 2021; Takács et al., 2023).

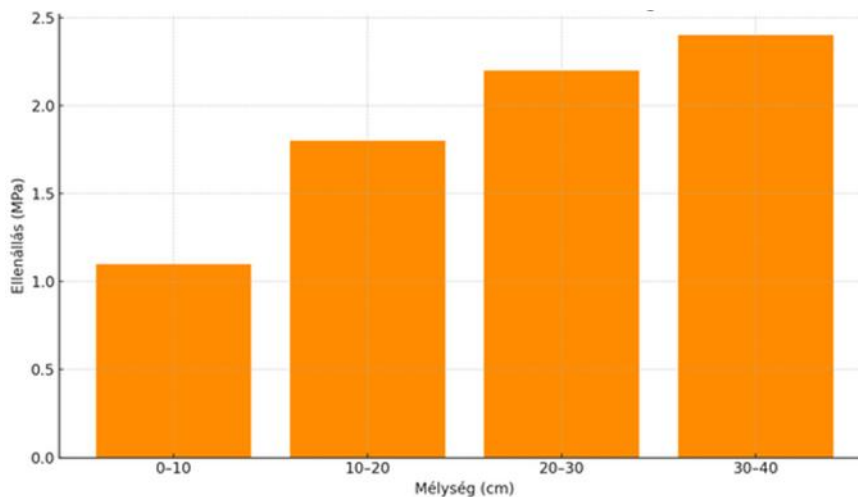
A bioetanol termelés talajtani hatásainak vizsgálata Magyarországon a 2019. és 2025. év közötti időszakban többdimenziós, komplex képet mutat, amelyet a hivatalos források adatainak és tudományos kutatásoknak integrált elemzése képez. Az intenzív kukoricatermesztés és a bioetanol alapanyag előállítása közvetlenül érinti a talaj szervesanyag tartalmát, szerkezetét, termékenységét és vízmegtartó képességét, továbbá befolyásolja az erózió és tömörödés mértékét (Lal, 2006; Birkás et al., 2005; Cherubin, 2018; Takács et al., 2023; KSH, 2023; Eurostat, 2024).

4.4. A talaj fizikai állapotai

A talajtömörödés káros folyamatát Magyarország esetében Birkás és munkatársai vizsgálták részletesen, akik 3,1 millió hektár termőterületre becsülték a mérhető tömörödést (Birkás et al., 2023; Takács et al., 2023).

A mechanizált betakarítást és intenzív művelést gyakorló területeken a talaj fizikai minősége romlik, amely korlátozott gyökérnövekedést, csökkenő vízbefogadást és fokozott felszíni vízgyűjtést eredményez (Lal, 2006; Cherubin, 2018; Birkás et al., 2023).

Ahogy az 8. ábra mutatja, a tömörödés mértéke a talaj mélységével arányosan növekszik, ami jól szemlélteti a felszín alatti rétegek szerkezetromlását és vízgazdálkodási problémáit (Birkás et al., 2023; Avitabile et al., 2024).



8. ábra: Penetrométeres ellenállás a 0–40 cm rétegben

(Forrás: Saját szerkesztés Madarász (2015), KSH (2021), Takács et al. (2023) és Birkás et al., (2023) adatai alapján.)

Az 8. ábra a bioetanol alapanyagként használt kukoricaterületek penetrométeres mérési eredményeit ábrázolja, a talaj ellenállását négy mélységi szinten bemutatva. A felső, 0–10 cm-es rétegben az ellenállás még viszonylag alacsony, 1,1 MPa körüli értéket mutat, ami kedvező lazultságot jelez. A 10–20 cm közötti rétegben azonban az ellenállás hirtelen 1,8 MPa-ra emelkedik, majd a 20–30 cm mélységben eléri a 2,2 MPa-t, a 30–40 cm-es zónában pedig meghaladja a 2,4 MPa-t. Ezek az értékek már a gyökérnövekedést akadályozó szintet jelzik, ami rontja a talaj vízáteresztő képességét és csökkenti a növények számára elérhető vízkészletet. A mérések alapján a tömörödés elsősorban a mélyebb rétegekben jellemző, amit a nagy súlyú betakarítógépek, a nedves talajállapotban végzett műveletek és a hiányos talajpihentetés együttesen okoznak. Az eredmények egyértelműen alátámasztják, hogy a no-till és a sávos művelési rendszerek alkalmazása jelentősen mérsékelheti a talajtömörödést, javítva ezzel a vízbefogadást és a gyökérfejlődés feltételeit (Lal, 2006; Birkás et al., 2023; Takács et al., 2023).

Ebből következően a tömörödés növeli az erózióveszélyt, melyet a Pásztor és munkatársai által (2016) készített országos talajeróziós modellek is alátámasztanak. Az említett modellek szerint a dél-alföldi és dél-dunántúli mezőgazdasági régiók erősen veszélyeztetettek, különösen az intenzív kukoricatermesztés miatt. Az Eurostat 2024. évi adatai pedig az erózió térbeli eloszlását tükrözik, egyértelmű kapcsolatot jelezve a termőterület intenzitása és a talajvesztés között (Pásztor et al., 2016; Eurostat, 2024; Avitabile et al., 2024).

A tápanyagkészlet változását a magyar biogazdasági adatok és a Pannonia Bio Zrt. feldolgozási adatai alapján lehet nyomon követni. Az intenzív kukoricatermesztés alapvetően növeli a

tápanyagkivonást, amihez a műtrágyázás igénye 2019.–2025. év között folyamatosan nőtt. Bár a műtrágyázási szokások alkalmazkodtak az igényekhez, a nem egyenletes és helyspecifikus tápanyagpótlás még mindig problémát jelent, ami egyenetlen tápanyageloszlást, helyenként talajdegradációt eredményezett, amint az, AKI műtrágya felhasználási adatai is igazolják (Hingyi et al., 2006; Pannonia Bio Zrt.).

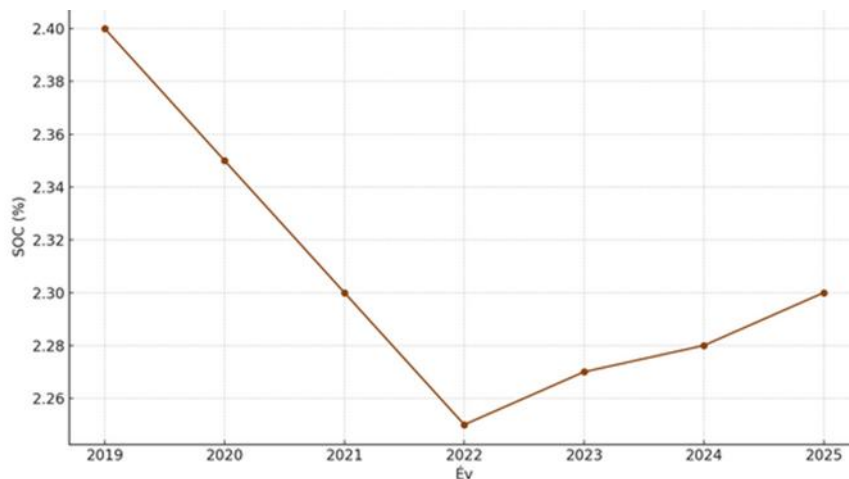
Az agrárpolitikai irányelvek, különösen a Közös Agrárpolitika (KAP) keretébe tartozó támogatások elősegítették a talajvédő gazdálkodási módok, mint a csökkentett talajforgatás, direktvetés és takarónövények előretörését Magyarországon, melyet a KAP 2016. és 2023. év közötti statisztikai súlyoznak. Az érintett területek aránya 10 százalékról 32 százalékra nőtt, amely konkrét területeken már mérsékelte a talajveszteség mértékét, javította a talajbiológiai aktivitást és a szervesanyag gazdálkodást (Magyarország Kormánya, 2021; KSH, 2023; Takács et al., 2023).

A 2019. és 2025. év közötti időszakban a bioetanol előállításához kötődő intenzív kukoricatermesztés folyamatai kimutathatóan befolyásolták a talaj szervesanyag tartalmát és biológiai aktivitását, miközben egyidejűleg fokozott talajtömörödési és eróziós hatásokat eredményeztek, amelyek mértékét a térbeli koncentráció és az alkalmazott agrártechnológiák sajátosságai határozták meg. Ezzel párhuzamosan a vizsgált években egyre hangsúlyosabb szerepet kapott azoknak a gazdálkodási eljárásoknak a körének bővítése és megvalósítása, amelyek célzottan a talajvédő rendszerek terjesztésére, a tápanyag gazdálkodás hatékonyságának növelésére és a talaj fizikai állapotának kedvező irányú befolyásolására irányultak az intenzív termelés környezetében. A rendelkezésre álló adatok együttes értelmezése azt támasztja alá, hogy a talajvédelmi intézkedések és az agronómiai fejlesztések következetes alkalmazása kulcsfeltételként jelenik meg a bioetanol ellátási lánc által érintett mezőgazdasági területek hosszú távú használhatóságának és termőképességének fenntartásában (Lal, 2006; Cherubin, 2018; Takács et al., 2023; Motola et al., 2023; Avitabile et al., 2024).

4.5. A talaj szerves széntartalmának változása

A Központi Statisztikai Hivatal (KSH) 2019.–2025. év közötti talajhasználati adatai, valamint az Agrárgazdasági Kutató Intézet (AKI) jelentései arra világítanak rá, hogy a bioetanolhoz közvetlenül használt kukoricaterületeken a talaj humusztartalma kedvezőtlen irányba változott, ami a szántóföldi művelés intenzitásával és az energetikai célra történő szármadaradvány eltávolítás mértékével szoros összefüggésben van (Hingyi et al., 2006; KSH, 2023)

Ahogy a 9. ábrán látható, a vizsgált időszakban a talaj szerves széntartalma (SOC) folyamatos, bár mérsékelt csökkenést mutat, különösen azon területeken, ahol a kukorica szármaradványokat energetikai célra eltávolították, és nem történt szervesanyag visszapótlás (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).



9. ábra: Talaj szerves széntartalmának (SOC) változása 2019–2025. év között
(Forrás: Saját szerkesztés Madarász, (2015), Birkás et al., (2015), KSH (2021) és Takács et al., (2023) adatai alapján)

A 9. ábra a talaj szerves széntartalmának alakulását szemlélteti a bioetanol termeléshez kapcsolódó kukoricaterületeken. Az adatok alapján a 2019. évben mért átlagos 2,4%-os SOC érték 2025. évre 2,3% alá csökkent, ami a folyamatos szántás, a növekvő géphasználat és a szármaradványok eltávolítása következtében kialakuló szervesanyag veszteségre utal (European Parliament & Council, 2018; Bodolay, 2019; KSH, 2021; Takács et al., 2023; European Parliament & Council, 2023).

A szerves szén mennyisége meghatározó a talaj termékenysége és szerkezeti stabilitása szempontjából, ezért ennek csökkenése hosszú távon a talaj biológiai aktivitásának gyengüléséhez és a vízmegtartó képesség romlásához vezethet. A 60% feletti fedettségű, takarónövényes területeken a SOC értékek ugyanakkor stabilabbnak bizonyultak, ami jól jelzi a növényi maradványok visszahagyásának és a szervesanyag visszapótlásnak a pozitív hatását a talajállapot megőrzésében (European Parliament & Council, 2018; Motola et al., 2023; European Parliament & Council, 2023; Avitabile et al., 2024).

Ez a humuszvesztés csökkentheti a talaj biokémiai aktivitását, rontja a mikrobiális összetételt és gyengíti a talajszerkezet stabilitását, ami kieső vízvisszatartó képességhez és tápanyag felvételhez vezet. A nemzetközi szakirodalom, ideértve Lal (2006) és Cherubin (2018) munkáit,

alátámasztja, hogy az energiaültetvények intenzív művelése következtében visszaeső szervesanyag tartalom jelentős talajszerkezeti és termőképességi romlást idéz elő (Hingyi et al., 2006; Lal, 2006; Cherubin, 2018).

5. Következtetések és javaslatok

A kutatás eredményei alapján egyértelmű, hogy a bioetanol termelés fenntarthatósága Magyarországon elsősorban a talaj állapotától függ. A megfelelő talajvédelem nélkül a kukoricaalapú bioetanol gyártás környezeti előnyei hosszú távon elveszhetnek. A vizsgálatok rávilágítottak arra, hogy a talaj szervesanyag tartalma, szerkezeti állapota és vízgazdálkodása kulcsfontosságú tényezők a fenntartható bioetanol termelésben. Amennyiben a talaj szerves széntartalma csökken, az nemcsak a termőképesség romlását eredményezi, hanem hozzájárulhat a szénkibocsátás növekedéséhez is, ezzel ellentétes hatást váltva ki, mint amit a megújuló energiatermelés célként megfogalmaz (Madarász, 2015; Magyarország Kormánya, 2021; KSH, 2021; Takács et al., 2023).

A technológiai és gazdálkodási gyakorlatok, mint például a túlzott géphasználat, a szármaradványok teljes eltávolítása, valamint a kedvezőtlen időzítésű talajmunkák a tömörödés és az erózió fokozásával hosszú távon veszélyeztethetik a bioetanol ágazat fenntarthatósági alapjait. Ezzel szemben az integrált, precíziós és digitális megközelítések alkalmazása nemcsak a talajvédelemben, hanem az energiahatékonyságban és az ágazati átláthatóságban is előrelépést hozhat. Összességében megállapítható, hogy a bioetanol ágazat talajhasználati és környezeti hatásainak kiegyensúlyozása csak integrált megközelítéssel érhető el. A javasolt intézkedések a szármaradvány visszahagyás, a precíziós művelés, a digitális monitoring és az adat vezérelt döntéshozatal együttesen képesek biztosítani a talajfunkciók megőrzését, miközben megfelelnek az európai fenntarthatósági irányelveknek. Kutatások célja, hogy az itt megfogalmazott javaslatok hozzájáruljanak egy olyan agrárstruktúra kialakításához, amelyben a gazdasági teljesítmény és a környezeti felelősség egymást erősítik, nem pedig kizárják (Lal, 2006; European Parliament & Council, 2018; Birkás et al., 2023; Takács et al., 2023; Motola et al., 2023).

A kutatás eredményei alapján több, egymással szorosan összefüggő javaslat fogalmazható meg, amelyek a talajmegőrzés, a precíziós technológiák alkalmazása, valamint a szakpolitikai és oktatási háttér fejlesztése mentén biztosíthatják a bioetanol termelés hosszú távú fenntarthatóságát. A talaj szerves széntartalma a termékenység és a szénmegkötés egyik legfontosabb mutatója, ezért a kukoricatermesztés során legalább 40–60%-os szármaradvány visszahagyás javasolt. Ez elősegíti a talaj szervesanyag tartalmának megőrzését, mérsékli az eróziót, valamint fenntartja a mikrobiális aktivitást. Az energetikai célú maradványkivonást csak ott szabad engedélyezni, ahol a talaj szervesanyag tartalma hosszabb távon stabil, emellett a takarónövények

használata is kiemelten ajánlott, mivel a téli időszakban védi a felszínt a csapadék okozta szerkezetromlástól (Lal, 2004; Birkás et al., 2023; Takács et al., 2023).

A talaj tömörödésének csökkentése érdekében célszerű a forgatás nélküli és sávos művelési rendszerek elterjesztése, valamint a Controlled Traffic Farming (CTF) rendszer alkalmazása, amely az állandó nyomvonalon történő közlekedéssel mérsékli a tömörödést, javítja a vízátteresztést és elősegíti a gyökérfejlődést. A precíziós technológiák lehetőséget adnak a műveletek időzítésének optimalizálására és a talajállapothoz igazodó, kímélőbb gazdálkodás megvalósítására (Takács et al., 2023; Motola et al., 2023).

Fontos lépés egy országos digitális talajmonitoring rendszer létrehozása, amely valós időben képes követni a legfontosabb talajindikátorokat, mint például a szerves széntartalom, a térfogattömeg és a fedettségi arány. Az ilyen adatgyűjtés összekapcsolható a mezőgazdasági drón és szenzortechnológiákkal, így a gazdálkodók gyors visszajelzést kaphatnak a talaj állapotáról, az adatok pedig egy egységes országos platformon lennének elérhetők, támogatva a döntéshozatalt és az auditálási folyamatokat. A bioetanol beszállítók számára egy egységes, digitális adatbeviteli rendszer kialakítása is javasolt, amely a fenntarthatósági és talajvédelmi mutatók rögzítését segíti elő, és kapcsolatot teremt a feldolgozók, például a Pannonia Bio Zrt. és a Hungrana Kft. ellenőrzési rendszereivel. Ezáltal a megfelelés automatikusan ellenőrizhetővé válna a RED II és ISCC kritériumok szerint, miközben csökkennének az adminisztratív terhek és nőne az átláthatóság (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023; Motola et al., 2023; Hungrana Kft.; Pannonia Bio Zrt.).

A szakpolitikai oldalon javasolt, hogy a hazai agrártámogatási rendszerben jelenjen meg külön támogatási kategóriaként a talajszén megőrzési program, amely ösztönzi a maradványvisszahagyást és a takarónövény használatot. Továbbá indokolt a talajvédelem és a precíziós gazdálkodás témakörének erősítése az agrár felsőoktatásban és a szakmai továbbképzésekben, hogy a jövő agrárszereplői tisztában legyenek a fenntartható termelés technikai, gazdasági és ökológiai vonatkozásaival (Hingyi et al., 2006; Magyarország Kormánya, 2021; Takács et al., 2023; Motola et al., 2023).

6. Összefoglalás

Az értekezés célja annak a bemutatása volt, hogy a magyarországi bioetanol alapanyag termelés, különösen a kukorica termesztés, milyen hatást gyakorol a talajok állapotára, és hogyan illeszthető be ez a gyakorlat az európai uniós fenntarthatósági követelmények rendszerébe. A vizsgálat kulcsfontosságú részét az képezte, hogy a bioüzemanyag termelés klímapolitikai előnyei csak akkor maradhatnak fenn tartósan, ha a termőföldek állapota nem romlik, és a talaj szerves szénkészlete hosszú távon stabil tud maradni. Ennek érdekében az értekezésemben elemeztem a hazai bioetanol ellátási lánc talajhasználati és talajvédelmi összefüggéseit, és vizsgáltam, hogy összhangban vannak-e a RED II, RED III és ISCC irányelvekkel (European Parliament & Council, 2018; European Parliament & Council, 2023).

A vizsgálatok túlnyomó része Magyarország azon térségeire összpontosított, ahol a bioetanol alapanyag termelés jelentős, vagyis a Dél és Észak-Alföldre, valamint a Dunántúl déli részeire koncentráltak. Ezekben a régiókban a kukorica vetésterülete, a talajtípusok és az ipari feldolgozó központok térben és gazdaságilag is összekapcsolódnak, és hatással vannak egymásra. A becslések szerint körülbelül 140–250 ezer hektár közötti termőterület szolgálja közvetlenül a bioetanol termelést, ami a talajhasználat szempontjából jelentős koncentrációt és megterhelést jelent. A vizsgálatok kimutatták, hogy a szerves széntartalom több térségben a stabilitási küszöb alatt marad, ami a talaj szerkezetének romlását és a termékenység csökkenését eredményezi. A vizsgálatok megerősítették, hogy a jelenlegi gazdálkodási gyakorlat beavatkozás nélkül hosszú távon nem fenn tartható. A módszertan kialakítása során egyértelmű célom az volt, hogy a talajhasználat értékelése tudományosan megalapozott, de ugyanakkor gyakorlati szempontból is alkalmazható legyen. Az adatgyűjtés a KSH, AKI, Eurostat, Pannonia Bio Zrt. és Hungrana Kft. által közzétett adatokra épült, amelyet kiegészítettem a nemzetközi szakirodalmi forrásokkal. Az értékelés során az indikátor alapú megközelítést alkalmaztam, amely által lehetővé vált a talajállapot változásainak számszerűsítése. Az irodalmakban vizsgált indikátorok közül a szerves széntartalom, a penetrométeres ellenállás, a fedettségi arány és a mikrobiális aktivitás bizonyultak a legmegbízhatóbb mutatóknak az eredmények összegzése során. Ezek segítségével sikerült feltárni azokat a kockázati tényezőket, amelyek a bioetanol termelés során a talajromláshoz nagyban hozzájárulnak. A kutatás eredményei alapján megfogalmazott javaslatok a fenntartható gazdálkodás erősítését és a modern szabályozásba való beilleszkedést szolgálják. Kiemelt szerepet kap a szármagadvány visszahagyás, a takarónövény használat és a precíziós, forgatás nélküli talajművelés bevezetése az ökológiai lábnyom

csökkentésében. Ezek együttes alkalmazásával elérhető, hosszú távon a talaj szerkezet javítása, de növelheti a szervesanyag tartalmat és csökkentheti a degradáció kockázatát is. A jövőben a digitális monitoring és a valós idejű adatelemzés beépítése elengedhetetlen lesz a bioetanol beszállítói láncban, mivel ez biztosítja a fenntarthatósági követelmények folyamatos ellenőrzését, teljesítését és az auditálhatóságát. Az értekezés tapasztalatai azt mutatják, hogy a gazdasági teljesítmény és a környezeti felelősség nem zárják ki egymást, hanem amennyiben megfelelő az irányítás és a technológiai fejlesztés, akkor abban az esetben egymást erősíthetik. A bemutatott módszertani megközelítés és javaslat rendszer segíthet abban, hogy a hazai bioetanol termelés nemcsak mennyiségében, hanem minőségében és fenntarthatóságában is versenyképes legyen az európai versenyszférával szemben. De a kutatás egyben rávilágított arra is, hogy a talajvédelem nemcsak környezeti kérdés, hanem gazdasági és társadalmi érdek is, hiszen a jövő agrárstratégiájának az alapja minden esetben a termékeny és egészséges talaj.

7. Irodalomjegyzék

1. Avitabile V., Baldoni E., Baruth B., Bausano G., Boysen-Urban K., Caldeira C., Camia A., Cazzaniga N., Ceccherini G., De Laurentiis V., Doerner H., Giuntoli J., Gras M., Guillen Garcia J., Gurria P., Hassegawa M., Jasinevičius G., Jonsson R., Konrad C., Kupschus S., La Notte A., M'barek R., Mannini A., Migliavacca M., Mubareka S., Patani S., Pilli R., Rebours C., Ronchetti G., Ronzon T., Rougieux P., Sala S., Sanchez Lopez J., Sanye Mengual E., Sinkko T., Sturm V., Van Leeuwen M., Vasilakopoulos P., Verkerk P.J., Virtanen J., Winker H. and Zulian G. (2024) Biomass supply and uses in the EU – JRC publication, Publications Office of the European Union, EUR 31727 EN, ISBN 978-92-68-09035-0, DOI 10.2760/368529 (Letöltés dátuma: 2025.08.06.)
2. Bacovsky D. & Matschegg D. (2019) Bioenergy in Austria, Wien, Federal Ministry for Transport, Innovation and Technology, 52/2019 (Letöltés dátuma: 2025.09.01.)
3. Bauer H., Bacovsky D., C Strasser, Sonnleitner A. (2024) Implementation of bioenergy in Austria – 2024 update, IEA Bioenergy, 12/2024 (Letöltés dátuma: 2025.08.30.)
4. Barczy A., Harrach T., Nagy V. (2015) A minimális talajbolygatás jótékony hatása a talajszerkezetre – Egy németországi tanulmányút tapasztalatai. MTA CSFK Földrajz-tudományi Intézet. (Letöltés dátuma: 2025.08.12.)
5. Bera T., Inglett K., Wilkie A. C. (2020) Biofuel: Concepts and Considerations, UF/IFAS Extension, DOI:10.32473/edis-ss688-2020 (Letöltés dátuma: 2025.08.19.)
6. Bio-based Industries Consortium (BIC) (2024) Hungary Country Report. Brussels, BIC (Letöltés dátuma: 2025.09.19.)
7. Birkás M. (2005) A talajhasználat jelentősége a káros klimatikus hatások enyhítésében. „AGRO-21” Füzetek, 41. 114-123. (Letöltés dátuma: 2025.09.17.)
8. Birkás M., Bencsik K., Stingli A. (2007) A talajminőség jelentősége a klímaváltozásokkal összefüggésben. Acta Ovariensis, (Letöltés dátuma: 2025.09.16.)
9. Birkás M., Gyuricza Cs. (2004) A talajhasználat és a klimatikus hatások kapcsolata. In: Talajhasználat–Műveléshatás–Talajnedvesség (Szerk. Birkás M., Gyuricza Cs.), Quality-Press Nyomda & Kiadó, Budapest, pp. 10-45. (Letöltés dátuma: 2025.09.16.)
10. Birkás M., Jolánkai M., Gyuricza C., Percze A., Schmidt R. 2005. Soil quality management for decreasing production loss under extreme climatic conditions. ISTRO Internat. Conf. “Soil-Agriculture, Environment, Landscape”, 29 June-1 July, Brno, Czech Rep. Abstracts (Ed. Badalíková, B.), pp. 53, Proceedings (Ed. Badalíková, B.), ISBN80-86908-01-1, pp. 61-68. (Letöltés dátuma: 2025.09.16.)

11. Birkás M., Kalmár T., Jolánkai M., Nagy E., Szemők A. 2006. Soil quality condition improving in Hungary – steps to decrease the climatic harms. ISTRO 17th Triennial Conference ‘Soil management for sustainability’, Aug. 28th –Sept.3rd, 2006, Christian Albrechts Universitat zu Kiel, Germany ISBN 3-9811134-0-3 CD (Ed. Vogt. B. et al.), pp. 1102-1107. (Letöltés dátuma: 2025.09.17.)
12. Birkás M., Kende Z., Pósa B. (2015) A környezetkímélő talajművelés szerepe a klíma-kár-enyhítésben, MTA CSFK FTI, Bp, p. 32–40. (Letöltés dátuma: 2025.09.17.)
13. Devi A., Bajar S, Kour H., Kothari R., Pant D., Singh A. (2016). Lignocellulosic Bio-mass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach., Bio-energ. Res., DOI: 10.1007/s12155-022-10401-9, (Letöltés dátuma: 2025.09.08.)
14. Donley A. (2023) Pannonia Bio adds barley to its portfolio, World-Gain.com (Letöltés dátuma: 2025.08.06.)
15. Első Magyar Karbongazdálkodási Kft. (2012) Mezőgazdasági emisszió-kibocsátás csökkentés részleges nitrogén műtrágya cserével és talajművelés váltással, Első Magyar Karbongazdálkodási Kft. (Letöltés dátuma: 2025.08.12.)
16. Elless M. P., Levy C, Otwell A. (2023) Bioenergy’s Role in Soil Carbon Storage, U.S. Department of Energy, DOE/EE-2695 (Letöltés dátuma: 2025.09.21.)
17. European Commission (2010) „Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions: The CAP towards 2020: Meeting the food, natural resources and territorial challenges of the future” közleményében (COM2010/672 FINAL), Brussels, 18.11.2010. (Letöltés dátuma: 2025.08.24.)
18. Eurostat (2024): Complete energy balances. Luxembourg: Eurostat. DOI:10.2908/nrg_bal_c (Letöltés dátuma: 2025.08.11.)
19. Európai Bizottság (2019) A megújuló energiáról szóló eredményjelentés, Brüsszel, Európai Bizottság, A Bizottság Jelentése az Európai Parlamentnek, a Tanácsnak, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának, COM (2019) 225 final (Letöltés dátuma: 2025.08.13.)
20. Európai Bizottság (2019) A megújuló energiáról szóló eredményjelentés, Brüsszel, Európai Bizottság, A Bizottság Jelentése az Európai Parlamentnek, a Tanácsnak, az Európai Gazdasági és Szociális Bizottságnak és a Régiók Bizottságának, COM (2019) 225 final (Letöltés dátuma: 2025.09.13.)

21. European Parliament & Council (2018) Directive (EU) 2018/2001 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II), Brussels, Official Journal of the European Union (Letöltés dátuma: 2025.09.29.)
22. European Parliament & Council (2023): Directive (EU) 2023/2413 (RED III) – Amending Directive (EU) 2018/2001 on renewable energy. Official Journal of the EU, L 2023/2413. (Letöltés dátuma: 2025.09.29.)
23. Európai Unió, Európai Számvevőszék (2023) A közlekedésben használt fenntartható bioüzemanyagok uniós támogatása. Luxembourg: ECA. ISBN 978-92-849-1368-8, doi: 10.2865/41980 (Letöltés dátuma: 2025.09.01.)
24. dr. Gyulai I. (2009) A biomassza-dilemma, Budapest, Magyar Természetvédők Szövetsége, ISBN-10: 963-86870-8-8 (Letöltés dátuma: 2025.09.05.)
25. Hingyi H., Kürthy Gy., Radócné Kocsis T. (2006): A mezőgazdasági eredetű folyékony bioüzemanyagok. Budapest, Agrárgazdasági Kutató Intézet, 2006/8 (Letöltés dátuma: 2025.08.28.)
26. Johnson J. M. F. (2022) Impacts of Agricultural Practices on Soil Carbon, US-EPA's Workshop on Biofuel Greenhouse Gas Modeling, (Letöltés dátuma: 2025.08.10.)
27. Koper M., J. van Brusselen, Verkerk H., Nanni S., Henennberg K., Allen B., Alberici S., Toop G., Pfaltzgraff L. (2021) Technical Assistance for the preparation of guidance for the implementation of the new bioenergy sustainability criteria set out in the revised Renewable Energy Directive – REDIIIBIO, European Commission (Letöltés dátuma: 2025.08.22.)
28. Központi Statisztikai Hivatal (2025): STADAT – Mezőgazdasági statisztikák. Budapest: KSH. (Letöltés dátuma: 2025.09.13.)
29. Központi Statisztikai Hivatal (KSH) (2021): Zöldgazdaság, Budapest, KSH (Letöltés dátuma: 2025.09.12.)
30. Központi Statisztikai Hivatal (2021): Zöldgazdaság Magyarországon – Időszaki kiadvány. Budapest: KSH. (Letöltés dátuma: 2025.09.13.)
31. Kumar R., Tabatabaei M., Karimi K., Horváth I. S. (2024). Recent updates on lignocellulosic biomass derived ethanol - A review., Biofuel Research Journal, DOI:10.18331/BRJ2016.3.1.4, (Letöltés dátuma: 2025.09.22.)
32. Lal R. (2006) Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands, Land Degradation & Development, 17(2), p. 197–209. DOI: 10.1002/ldr.696 (Letöltés dátuma: 2025.08.13.)

33. Lal R. (2004) Soil carbon sequestration to mitigate climate change, *Geoderma* 123 (2004) 1–22, doi: 10.1016/j.geoderma.2004.01.032 (Letöltés dátuma: 2025.08.27.)
34. Madarász B. (2015) Környezetkímélő talajművelési rendszerek Magyarországon, Budapest, MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, ISBN 978-963-9545-46-5 (Letöltés dátuma: 2025.08.17.)
35. Magyarország Kormánya (2021) 821/2021. (XII.28.) Korm. rendelet a bioüzemanyagok, folyékony bio-energiához tartozók és biomasszából előállított tüzelőanyagok fenntarthatósági követelményeiről és igazolásáról, Budapest, Nemzeti Jogszabálytár (Letöltés dátuma: 2025.08.30.)
36. Magyarország Kormánya (2021), 68/2021. (XII.30.) ITM rendelet a bioüzemanyagok, folyékony bioenergiához tartozók és biomasszából előállított tüzelőanyagok fenntarthatósági követelményeknek való megfelelésével kapcsolatos üvegházhatású gázkibocsátás elkerülés kiszámításának szabályairól, Budapest, Nemzeti Jogszabálytár (Letöltés dátuma: 2025.09.16.)
37. Motola V., Hurtig O., Scarlat, N., Buffi M., Georgakaki A., Letout S. and Mountraki A. (2023) Clean Energy Technology Observatory: Advanced biofuels in the European Union - 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/672584, JRC135082. (Letöltés dátuma: 2025.09.12.)
38. Panella L. & Kaffka S. R. (2010) Sugar Beet (*Beta vulgaris* L) as a Biofuel Feedstock in the United States, American Chemical Society Washington, DC. DOI:10.1021/bk-2010-1058.ch010 (Letöltés dátuma: 2025.08.08.)
39. Searle S. & Bitnere K. (2017) Review of the impact of crop residue management on soil organic carbon in Europe, International Council on Clean Transportation (Letöltés dátuma: 2025.08.05.)
40. Sebestyén Z., Barta Zs., Jakab E. (2011) Bioetanol – a megújuló energiaforrás. Budapest, MTA Könyvtár és Információs Központ (Letöltés dátuma: 2025.09.25.)
41. Soleymani Angili P., Grześlik K., Rödl A., Kaltschmitt M. (2021). Life Cycle Assessment of Bioethanol Production: A Review of Feedstock, Technology and Methodology., *Energies*, DOI:10.3390/en14102939, (Letöltés dátuma: 2025.08.19.)
42. Stolte J., Tesfai M., Øygarden M., Kværnø S., Keizer J., Verheijen F., Panagos P., Balabio C., Hessel R. (2016), Soil threats in Europe – Status and Perspectives. Luxembourg: Publications Office of the EU., doi:10.2788/828742, ISBN 978-92-79-54019-6 (Letöltés dátuma: 2025.08.29.)

43. Suzan S. (2024) The advanced and waste biofuels paradox, Transport & Environment (Letöltés dátuma: 2025.09.26.)
44. Szabó I., Balázs S., Végső Zs., Michels J., Vajda P. (2015): A forgatás nélküli mulcsos talajművelés, mint a tarlómaradványok mikrobiális lebontásának leghatékonyabb technológiája. MTA CSFK Földrajztudományi Intézet (Letöltés dátuma: 2025.09.27.)
45. Takács E., Mozsgai K., Óvári Cs., Gerencsér I., Miskó K., Szlatényi D., K. M. Ndue (2023) A fenntartható bioüzemanyag-termelés lehetőségei Magyarországon a BIKE projekt eredményei alapján, Gazdálkodás: Agrárökonómiai Tudományos Folyóirat, 67(6), ISSN 0046-5518, p. 497–516 DE (Letöltés dátuma: 2025.08.29.)

Internetes forrás

1. ePURE (2023) European Renewable Ethanol – Key Figures 2023. Brussels: ePURE. (Letöltés dátuma: 2025.09.18.) <https://www.epure.org/wp-content/uploads/2024/09/240904-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2023-WEB.pdf>
2. ePURE (2024) European Renewable Ethanol – Key Figures 2024. Brussels: ePURE. (Letöltés dátuma: 2025.09.18.) <https://www.epure.org/wp-content/uploads/2025/09/250908-DEF-PR-European-renewable-ethanol-Key-figures-2024.pdf>

Weboldal

1. Agrana Beteiligungs-AG weboldal, Keményítő- és bioetanolgyárak Magyarországon. (Letöltés dátuma: 2025.09.05.) <https://www.agrana.com/en/products/all-productportfolios/bioethanol/production-sites>
2. Hungrana Kft. weboldal, (Letöltés dátuma: 2025.09.05.) <https://www.hungrana.hu/>
3. Pannonia Bio Zrt. weboldal, Letöltés dátuma: (2025.09.01.) <https://www.pannoniabiobio.com/about-pannonia-bio>

8. Ábrajegyzék

1. ábra: A bioetanol előállítás generációs fázisai, Bera T., Inglett K., Wilkie A. C. (2020) Biofuel: Concepts and Considerations, 6. oldal
2. ábra: A bioetanol előállítás biokémiai folyamata, Soleymani Angili P., Grześlik K., Rödl A., Kaltschmitt M. (2021). Life Cycle Assessment of Bioethanol Production: A Review of Feedstock, Technology and Methodology., 9. oldal

3. ábra: A második generációs bioetanol üzem technológiai rendszere, Devi A., Bajar S, Kour H., Kothari R., Pant D., Singh A. (2016). Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach, ScienceDirect, DOI:10.1007/s12155-022-10401-9, 11. oldal
4. ábra: Az első és második generációs bioetanol folyamatok összehasonlítása, Kumar R., Tabatabaei M., Karimi K., Horváth I. S. (2024). Recent updates on lignocellulosic biomass derived ethanol - A review. DOI:10.18331/BRJ2016.3.1.4, 12. oldal
5. ábra: Magyarország bioetanol-termelése 2019–2025 között, Saját szerkesztés Eurostat (2019–2023), ePURE (2024) Pannonia Bio Zrt. és Hungrana Kft. adatai alapján, 26. oldal
6. ábra: Kukoricaterület és hozam kapcsolata 2019–2025. év között, Saját szerkesztés KSH (2021), Eurostat (2024), Takács et al. (2023) és BIC (2024) adatai alapján, 29. oldal
7. ábra: A talajfedettség hatása a vízmegetartó képességre és az eróziós veszteségre, Saját szerkesztés Birkás et al., 2005, Madarász B., 2015, Stolte et al., 2016, KSH, 2021, Takács et al., 2023 és Eurostat, 2024 adatok alapján, 33. oldal
8. ábra: Penetrométeres ellenállás a 0–40 cm rétegben, Saját szerkesztés Birkás et al. (2005), Birkás et al. (2007), Madarász B., (2015), KSH (2021), Takács et al. (2023) adatai alapján, 38. oldal
9. ábra: Talaj szerves széntartalmának (SOC) változása 2019–2025. év között, Saját szerkesztés Madarász B., (2015), Birkás et al., (2015), KSH (2021) és Takács et al., (2023) adatai alapján, 40. oldal

9. Táblázat jegyzék

1. táblázat: Magyarország bioetanol-termelése és a felhasznált kukoricaterület becslése (2019–2025), Saját szerkesztés KSH (2021), Takács et al. (2023), BIC (2024), Pannonia Bio Zrt. és a Hungrana Kft. adatai alapján, 35. oldal

MATE Szervezeti és Működési Szabályzat

III. Hallgatói Követelményrendszer

III.1. Tanulmányi és Vizsgaszabályzat

6.13. sz. függelék: A MATE egységes szakdolgozat / diplomadolgozat / záródolgozat / portfólió készítési útmutatója

4.2. sz. melléklete: Nyilatkozat a záródolgozat/szakdolgozat/diplomadolgozat/portfólió nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről (módosítva: 2025. október 16.)

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Varga János Sándor
A Hallgató Neptun kódja: DNYLZY
A dolgozat címe: A magyarországi bioetanol előállítás talajtani vonatkozásainak vizsgálata
A megjelenés éve: 2025
A konzulens intézetének neve: Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Szent István Campus
A konzulens tanszékének a neve: Talajtani Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem. Továbbá kijelentem, hogy a dolgozat elkészítése során alkalmazott mesterséges intelligencia-eszközök (pl. szövegenerálás, nyelvi javítás, fordítás, adatelemzés) használata nem helyettesítette a saját kutatási és alkotói munkámat, azok alkalmazását a források között vagy a módszertani részben feltüntettem, és a szakmai-etikai elvárásoknak megfelelően jártam el.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

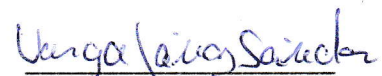
Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: Budapest, 2025 év 11 hó 02 nap


Hallgató aláírása

NYILATKOZAT


Varga János Sándor (hallgató Neptun azonosítója: DNYLZY) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védeésre

javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: 2025 év 11 hó 03 nap



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.

Hallgatók, doktoranduszok nyilatkozata mesterséges intelligencia (MI) alkalmazásáról

1. Általános adatok

Hallgató neve:	Varga János Sándor
Neptun-kódja:	DNYLZY
Képzési szint (a megfelelőt jelölje X-szel):	<input checked="" type="checkbox"/> BSc/BA <input type="checkbox"/> MSc/MA <input type="checkbox"/> Doktori (PhD) <input type="checkbox"/> Egyéb:
Tantárgy neve/kódja*:	Szakdolgozat készítés, KORTU132N
A munka címe:	A magyarországi bioetanol előállítás talajtani vonatkozásainak vizsgálata

* doktori értekezés esetén nem kitöltendő

2. Nyilatkozat az MI használatáról

Alulírott, etikai felelősségem teljes tudatában az alábbi nyilatkozatot teszem:

(Kérjük, válasszon egyet az alábbi lehetőségek közül!)

A) Nem alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Amennyiben ezt jelölte, a további táblázatok kitöltése nem szükséges.)

B) Alkalmaztam mesterséges intelligencia rendszert vagy szolgáltatást.

(Kérjük, töltsse ki a vonatkozó táblázatokat!)

3. A mesterséges intelligencia használatának részletezése

I. TÁBLÁZAT: Asszisztensi vagy kisebb mértékű felhasználás (pl. fordítás, nyelvi korrekció, ötletelés stb.)

(Ezen felhasználások esetében a konkrét promptok és válaszok csatolása nem szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott MI-eszköz neve és verziója	Érintett rész (ha nem a szöveg egészére vonatkozik)
Szakirodalmi szövegek rövid összefoglalása, szakirodalmak keresése és azok áttekintésének segítése a témában, ábrák keresése	Chatgpt 5 verzió	Irodalmi feldolgozás

II. TÁBLÁZAT: Jelentős tartalmi hozzájárulás (pl. egy teljes ábra vagy egy hosszabb szövegrész generálása)

(Ezekben az esetekben a felhasznált kulcsfontosságú promptok és az MI által adott nyers válaszok dokumentálása és a munka mellékletében való csatolása szükséges.)

A felhasználás célja	Alkalmazott eszköz verziója, elérhetősége	MI-neve,	Az érintett fejezet / ábra / táblázat pontos sorszáma	A prompt-naplót tartalmazó melléklet bejegyzésének sorszáma

3/A. Oktató által előírt kiegészítő szabályok (ha vannak)

Amennyiben az adott tantárgy oktatója vagy témavezetője az MI-eszközök használatára vonatkozóan külön szabályokat vagy elvárásokat határozott meg, kérjük, az alábbi mezőben foglalja össze ezeket:

Pl. az MI használatának tilalma bizonyos feladattípusokra; csak konkrét eszköz használata engedélyezett; eltérő hivatkozási elvárások; dokumentációs forma stb.

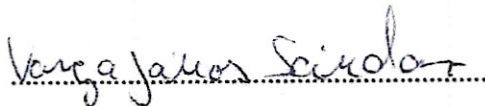
Oktató vagy témavezető által előírt szabályok:

.....
.....
.....
.....

4. Minden hallgatóra vonatkozó nyilatkozat:

Kijelentem, hogy az MI által esetlegesen generált tartalmakat minden esetben kritikailag felülvizsgáltam, szerkesztettem és a munkába illesztettem. A leadott munka minden eleméért, annak eredetiségéért és tudományos helytállóságáért teljes körű felelősséget vállalok. Tudomásul veszem, hogy a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem a benyújtott munkát mesterséges intelligencia detektorral ellenőrizheti, és eljárást kezdeményezhet, amennyiben a nyilatkozatom valótlan vagy hiányos.

Kelt: Budapest, 2025. 11 hó 02 nap



Hallgató aláírása



Konzulens/Témavezető aláírása