



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vegyésmérnöki és Biomérnöki Kar

Talajjavítás bioszénnel – Érés folyamatok modellezése és hatásainak komplex vizsgálata a bioszenek jellemzőire

OTDK dolgozat

Készítette: Lassu Dominika

LCTNK6

Témavezető: Dr. Molnár Mónika, egyetemi docens

Konzulens: Molnár Szabina, PhD hallgató

Budapest

2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés	4
2. Irodalmi áttekintés	5
2.1. A talaj főbb funkciói, jellemzői és védelme	5
2.1.1. A talaj funkciói.....	5
2.1.2. Talajromlási folyamatok és talajvédelem	6
2.1.2.1. Talajjavítás és eljárásai	7
2.2. A bioszén	8
2.2.1. A bioszén előállítása és főbb tulajdonságai	8
2.2.1.1. A bioszén előállítása.....	8
2.2.1.2. A bioszén tulajdonságai.....	9
2.2.2. A bioszén alkalmazási területei.....	11
2.2.3. Bioszén termékek talajjavításra történő hosszú távú alkalmazásának kiemelt eredményei.....	12
2.2.4. Bioszének érési folyamatai és hatásai a bioszén jellemzőire	13
2.2.5. Bioszének érésének modellezése – Laboratóriumi kísérletek	15
2.2.5.1. Fizikai érlelés.....	15
2.2.5.2. Kémiai érlelés	16
2.2.5.3. Biológiai érlelés	16
2.2.6. Bioszének érésének <i>in vivo</i> szabadföldi vizsgálata.....	17
3. Anyagok és módszerek	19
3.1. A kísérletek során alkalmazott talaj és tesztelt bioszének jellemzői	19
3.2. Érlelési kísérletek összeállítása	20
3.2.1. Laboratóriumi érlelés	20
3.2.1.1. Kémiai érlelés hidrogén-peroxiddal.....	20
3.2.1.2. Biológiai érlelés	20
3.2.2. Szabadföldi <i>in vivo</i> érlelés.....	21
3.2.2.1. Hat hónap időtartamú szabadföldi érlelés	21
3.2.2.2. Egy év időtartamú szabadföldi érlelés	21
3.3. A kísérletek követésére alkalmazott módszerek.....	22
3.3.1. Fizikai-kémiai vizsgálatok.....	22
3.3.1.1. Elektromos vezetőképesség és pH meghatározása	22
3.3.1.2. Víztartó kapacitás (WHC) meghatározás	22
3.3.1.3. Izzítási veszteség meghatározása.....	23
3.3.1.4. Permanganáttal oxidálható széntartalom (POXC) meghatározása	24

3.3.1.5.	Elemösszetétel vizsgálata röntgen fluoreszcens spektroszkópiás (XRF) módszerrel..	25
3.3.2.	Biológiai vizsgálatok.....	26
3.3.2.1.	Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám meghatározása.....	26
3.3.3.	Ökotoxicitás vizsgálatok	27
3.3.3.1.	Gyökér- és szárnövekedés-gátlási teszt.....	27
3.3.3.2.	<i>Folsomia candida</i> (Collembola) mortalitás teszt.....	28
3.4.	Az eredmények értékelésére alkalmazott statisztikai módszerek.....	29
4.	Eredmények és értékelésük	30
4.1.	Laboratóriumi mesterséges érlelés	30
4.1.1.	A mesterséges érlelések hatása a kémhatásra	30
4.1.2.	A mesterséges érlelések hatása az izzítási veszteség alakulására	31
4.1.3.	A mesterséges érlelések hatása a víztartókapacitásra.....	32
4.1.4.	A mesterséges érlelések hatása a bioszenek labilis széntartalmára (POXC).....	32
4.1.5.	A bioszenek ökotoxicitásának alakulása a mesterséges érlelések hatására <i>Folsomia candida</i> talajlakó rovarral.....	33
4.1.6.	Aerob heterotróf baktérium- és gombaszámra alakulása a biológiai érlelés hatására .	34
4.2.	Szabadföldi <i>in vivo</i> érlelés hatásai a bioszenekre.....	36
4.2.1.	Elektromos vezetőképesség (EC) és pH változásának alakulása az <i>in vivo</i> érlelés hatására.....	36
4.2.2.	A víztartókapacitás alakulása az <i>in vivo</i> érlelés hatására	37
4.2.3.	Az izzítási veszteség alakulása az <i>in vivo</i> érlelés hatására.....	38
4.2.4.	Bioszenek labilis széntartalmának alakulása az <i>in vivo</i> érlelés hatására.....	39
4.2.5.	Szerves széntartalom mennyiségének-, nitrogén formák előfordulásának-, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom alakulása a szabadföldi érlelés hatására	40
4.2.6.	Aerob heterotróf baktérium- és gombaszámra alakulása a szabadföldi érlelés hatására	41
4.2.7.	Gyökérnövekedés alakulásának vizsgálata a szabadföldi érlelés hatására <i>Triticum aestivum</i> (közönséges búza) tesztorganizmussal	42
4.2.8.	A bioszenek ökotoxicitásának alakulás a szabadföldi érlelés hatására <i>Folsomia candida</i> talajlakó rovarral	43
4.3.	Összehasonlító értékelés	44
5.	Összefoglalás.....	45
6.	Irodalomjegyzék	47

1. Bevezetés és célkitűzés

A talajok romlása globális probléma, amely jelentős hatással van a biodiverzitásra és az ökoszisztéma-szolgáltatásokra. A talajdegradáció következtében csökken a termőképesség, romlik a víztartó kapacitás és a tápanyagellátottság, ami súlyos következményekkel járhat az élelmiszertermelésre és a környezetre nézve. A talaj regenerálására, minőségének javítására egy ígéretes megoldás lehet a bioszén alkalmazása, amely szerves hulladékok és melléktermékek pirolízisével állítható elő. A bioszén nemcsak hozzájárulhat a talaj tápanyag-ellátottságának és vízmegtartó képességének javításához, hanem segítheti a talaj szervesanyag-tartalmának növelését is, ezáltal fokozva a talaj termékenységet. Az elmúlt években egyre több kutatás vizsgálta a bioszén alkalmazhatóságát talajjavításra, ugyanakkor a bioszén éréseéből fakadó változások tulajdonságaiban és ezek hosszú távú hatásai kevésbé kaptak figyelmet.

A kutatásom fő célkitűzése az érési folyamatainak hatására fellépő változások felmérése különböző bioszén termékek jellemzőiben, és hogy ezek hogyan befolyásolják az adott bioszén hosszú távú hatékonyságát a talajban. Kutatásom fő hipotézise, hogy a bioszén érésének hatására megváltoznak annak fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai, amelyek befolyásolják a talajban kifejtett hatásait. E változások előrejelezhetőek a bioszén alapjellemei és a környezeti tényezők függvényében. Kutatásom során három különböző alapanyagból – gabonahéj-szennyvíziszap, gyógynövény és bükkfa – készült bioszenek érési folyamatait vizsgáltam, eltérő pirolízis technikákkal előállítva.

A kísérletek során két fázisban vizsgáltam az érlelési folyamatokat: először laboratóriumi mesterséges érlelési modellek alkalmazásával végeztem kísérleteket, majd rövid és közép távú szabadföldi kísérletek során tanulmányoztam a természetes környezeti hatások által kiváltott változásokat. A friss és érlelt bioszenek összehasonlító vizsgálatát komplex fizikai-kémiai, biológiai és ökotoxikológiai metodikával végeztem, hogy átfogó képet kapjak az érési folyamatokról és azok hatásairól. Ez a kutatás hozzájárulhat a bioszén hosszú távú alkalmazhatóságának és talajra gyakorolt hatásainak jobb megértéséhez, elősegítve a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok fejlesztését és a talajvédelem fokozását.

2. Irodalmi áttekintés

2.1. A talaj főbb funkciói, jellemzői és védelme

2.1.1. A talaj funkciói

A talaj a Föld legkülső, szilárd rétege, amely a növények számára termőhelyet biztosít. Legfontosabb tulajdonsága a termékenység, azaz az a képesség, hogy megfelelő időben és mennyiségben biztosítson vizet és tápanyagokat a rajta élő növények számára, ezzel elősegítve az elsődleges biomassza termelését. (Bidló és mtsai., 2008)

A talaj élőhelyei a mikrokörnyezettől (*niche*) egészen teljes tájakig terjednek, míg a talajbiodiverzitás magában foglalja az összes föld alatti és feletti életformát, amely a talaj élőhelyén él. Ma már elismert tény, hogy a talaj és ezzel együtt a talajbiodiverzitás számos ökoszisztéma-szolgáltatást nyújt, amelyek elengedhetetlenek az emberek és a környezet számára. Ilyenek például a primer produkció támogatása a szerves anyagok és a tápanyagok körforgása révén, az éghajlat szabályozása a szén- és nitrogénáramlások irányításával, a kártevők és betegségek elleni védelem emberek, állatok és növények számára, valamint a környezet megtisztítása. (Brevik és mtsai., 2015)

A talaj feltételesen megújuló természeti erőforrás, amely következetes használat mellett nem változik visszafordíthatatlanul, és minősége nem szükségszerűen csökken. Azonban megújulása nem automatikus; a zavartalan működőképesség és termékenység fenntartása folyamatos és tudatos beavatkozást igényel, amelynek legfontosabb elemei az ésszerű földhasználat, talajvédelem, megfelelő agrotechnika és melioráció.

A talaj a többi természeti erőforrást (például napsugárzás, légkör, felszíni és felszín alatti vízkészletek, geológiai képződmények, biológiai erőforrások) integrálva és átalakítva biztosít élőhelyet a talajban lévő mikroorganizmusoknak, valamint termőhelyet a természetes növényzetnek és a termesztett kultúráknak.

A talaj a növényi biomassza-termelés alapvető közege, valamint a bioszféra elsődleges tápanyagforrása. Víz, levegő és a növények számára hozzáférhető tápanyagok egyidejűleg fordulnak elő ebben a háromfázisú, négydimenziós polidiszperz rendszerben, így a talaj képes többé-kevésbé kielégíteni a mikroorganizmusok és növények talajökológiai feltételeit.

A talaj természetes raktára a hőnek, víznek, növényi tápanyagoknak és potenciálisan káros anyagoknak.

Képes a felszín közeli atmoszféra hőmérsékleti szélsőségeit - bizonyos mértékig - kiegyenlíteni, valamint biztosítani a mikroorganizmusok és növények számára a raktározott készletekből származó víz- és tápanyagellátást még víz- és tápanyag-utánpótlás nélküli időszakokban is.

A talaj a természet szűrő- és detoxikáló rendszere, amely megóvjja a mélyebb rétegeket és a felszín alatti vízkészleteket a talajba kerülő szennyeződésektől. Emellett talaj a bioszféra jelentős pufferkapacitással rendelkező eleme, amely bizonyos mértékig képes enyhíteni a különféle stresszhatásokat. Ilyen hatások lehetnek természetes tényezők (például aszály, túlzott nedvesség, fagy), de egyre fenyegetőbbek az emberi tevékenységből eredő stresszhatások, mint a nehézgépek használata, nagy mennyiségű műtrágya és növényvédő szer alkalmazása, ipari és közlekedési szennyezés, valamint a bányászat. A társadalom egyre inkább igénybe veszi a talaj ezen kiegyenlítő képességét, néha sajnos visszaélve ezzel a lehetőséggel. A talaj a bioszféra jelentős gén-rezervoárja, kulcsszerepet játszik a biodiverzitás fenntartásában, mivel az élő szervezetek jelentős része a talajban él, vagy közvetlenül vagy közvetve kötődik hozzá. Fontos kiemelni, hogy a talaj a korábban felsorolt funkciók mellett a természeti és történelmi örökségek hordozója is. (Stefanovits és mtsai., 1999; Várallyay, 2003; Várallyay, 2016)

2.1.2. Talajromlási folyamatok és talajvédelem

A talaj – tágabb értelemben vett ökoszisztéma funkciói mellett - kiemelkedően fontos szerepet játszik az emberek életében, ugyanis az élelmiszerforrás nagy részét befolyásolja, biztosítja. A nagyobb élelmiszertermelés érdekében a talajt különböző mesterséges folyamatoknak és akár vegyi anyagoknak tesszük ki. Annak érdekében, hogy megőrizzük talajaink egészségét és ezzel együtt biztosítsuk a jó minőségű élelmiszerek előállítását, valamint megőrizzük az életközösségeket, fontos, hogy a talajromlással és a talajvédelemmel kiemelten foglalkozunk. A talajdegradáció és az ezzel együtt járó talajminőség romlása, számos folyamat eredménye lehet, amely során a talaj anyagforgalma számunkra kedvezőtlen irányba változik. Természetes folyamatként írható le, amelyet az emberi beavatkozás felgyorsíthat vagy lassíthat. A talajdegradáció kiváltó tényezői három fő szempont szerint oszthatók fel: a talajok hajlama a degradációra, a fizikai környezeti változások és az emberi tevékenységek. (Chen és mtsai., 2002; Lal, 2022)

A magyarországi jellemző talajdegradációs folyamatok a következők (Várallyay, 2016): víz- és szélrózsió, savanyodás, szikesedés, talajtömörödés, a vízháztartás szélsőségessé válása, szervesanyag készlet csökkenés és a tápanyagforgalom kedvezőtlen változása, pufferkapacitás csökkenése. A talajdegradációnak számos káros következménye van, amelyek közül a

legfontosabbak a következők: a talaj és a termőterület elvesztése vagy feldarabolódása, kedvezőtlen változások a talaj anyagforgalmi folyamataiban, valamint fizikai, vízgazdálkodási, kémiai, biológiai és agronómiai tulajdonságaiban, a talaj termékenységének csökkenése; romló talajökológiai feltételek a természetes növényzet vagy a termesztett növények számára, ami alacsonyabb biomassa hozamot és kisebb termést eredményez; nehezebbé váló mezőgazdasági hasznosítás, növekvő termelési költségek, kockázatos szennyezőanyagok felhalmozódása a talajban, a felszíni és felszín alatti vízkészletekben, valamint a táplálékláncban, és a táj pusztulása. (Várallay, 2016)

Ezek a felsorolt hatások és következmények számos esetben elkerülhetőek, vagy mérsékelhetőek megfelelő agrotechnika módszerek alkalmazásával, az általános környezetvédelmi irányzatok betartásával.

2.1.2.1. Talajjavítás és eljárásai

A talajjavítás fizikai vagy mechanikai, kémiai és biológiai módszerekkel is megvalósítható (Király, 2008). A mechanikai talajjavítás technikái közé tartozik a mélyforgatás, az altalajlazítás, a drénezés és a lecsapolás. Altalajlazításnál a tömődött vízzáró réteg fellazítása történik forgatás nélkül, míg lecsapolás során a felszíni csatornarendszerrel távolítják el a víztöbbletet, ami káros lehet a talajra nézve.

A kémiai talajjavítást különböző adalékanyagok hozzáadásával végzik, célja a talaj kedvezőtlen kémiai tulajdonságainak megszüntetése, illetve jobbá tétele. Ilyen eljárások például műtrágyázás, trágyázás, meszezés vagy gipszezés, altalajterítés és talajtakarás.

A biológiai talajjavítás módszerei közé tartozik a zöldtrágyázás, valamint az olyan növények telepítése, amelyek erőteljes gyökérzetet fejlesztenek. (Feigl, 2013; Stefanovits és mtsai, 1999)

Napjainkra egyre több olyan törekvés tűnik fel, hogy különböző tevékenységek és iparok által termelt melléktermékeket talajjavító adalékként alkalmazzanak. Ezek az innovatív megközelítések (részben) megoldást jelenthetnek a fokozódó hulladék problémára is.

Ujaczki és munkatársai (2016) például az alumínium gyártás melléktermékét, a vörösiszapot vizsgálták, hogy alkalmas lehet-e talajjavító adalékként. Azt találták, hogy már 20%-os adagolás mellett sem mutatott toxikus hatást, ugyanakkor a talaj víztartó kapacitást növelte. Ezeknek a fényében alkalmasnak találták talajjavításra történő alkalmazásra.

Egy másik ígéretes adalék talajaink minőségének javítására a bioszén, amit (hulladék) biomassza pirolízisével hoznak létre. Innovatív adalékként vagy adszorbensként alkalmazható lehet a szennyezéskontroll rendszerekben. (Chen és mtsai., 2022)

2.2. A bioszén

Az utóbbi években a bioszén iránti érdeklődés jelentősen megnőtt különböző környezeti alkalmazások kapcsán, például szennyezőanyagok eltávolítása, szénmegkötés és talajjavítás terén. Számos olyan egyedi tulajdonsággal rendelkezik, amelyek hatékony, költséghatékony és környezetbarát megoldássá teszik a különféle szennyeződések eltávolításában. (Oliveria és mtsai., 2017)

2.2.1. A bioszén előállítása és főbb tulajdonságai

2.2.1.1. A bioszén előállítása

A bioszén a szerves anyagok oxigénszegény vagy oxigén hiányos termokémiai bontásával, pirolízisével előállított anyag. Különböző hulladéktípusok, mint például állati trágya, papírhulladék, szennyvíziszap, valamint számos ipari hulladék is biomasszaként kezelhető, mivel ezek a hulladékanyagok, hasonlóan a természetes biomasszához, szerves és szervetlen vegyületek keverékét tartalmazzák, és energiatermelés céljából feldolgozhatók. (Tomczyk és mtsai., 2020; Tripathi és mtsai., 2016)

A bioszén előállításának alapfolyamata és alkalmazási területei láthatók az *1. ábrán* (Amalina és mtsai., 2022). Az elmúlt évtizedben a pirolízis a biomasszából történő energiatermelés legígéretesebb termokémiai módszerévé vált. A pirolízis során a biomassza kémiai összetevőit hő hatására bontják le, miközben a reakciókörnyezetet inert módon tartják az energia előállítása érdekében. A biomassza pirolízisének három fő terméke van, melyek mindegyike értékes: bioszén, bioolaj és biogáz. (Tripathi és mtsai., 2016)

A pirolízis egy olyan eljárás, amely során oxigénmentes környezetben szerves vegyületek hőbontása történik, általában 250 és 900 °C közötti hőmérsékleten. Ezzel az eljárással a biomassza-hulladékot értékes termékekké, például bioszénné, szintézisgázzá és bioolajjá alakíthatjuk át. A bioszén és a bioolaj szilárd és folyékony termékek, míg a szén-dioxid (CO₂), szén-monoxid (CO), hidrogén (H₂) és szintézisgáz gáz halmazállapotú termékek.

A pirolízist általában lassú, közepes és gyors típusokba sorolják a hőmérséklet és a tartózkodási idő függvényében (Haider és mtsai., 2022). Ezek közül a lassú pirolízis a legelterjedtebb a bioszén előállítására (Haider és mtsai., 2022). Léteznek a pirolízisnek alternatív típusai is, azonban ezekben az esetekben a fő termék nem feltétlenül a bioszén (Tripathi és mtsai., 2016). A bioszén előállításának módszere – technológiai paraméterek változtatásával – lehetővé teszi, hogy annak tulajdonságait úgy alakítsuk, hogy azok optimálisan megfeleljenek adott alkalmazásoknak vagy specifikus körülményeknek. Ezáltal kihasználhatók a kedvező tulajdonságai és növelhető a hatékonysága. (Hamed és mtsai., 2020)

2.2.1.2. A bioszén tulajdonságai

A bioszenet általában olyan biomasszából származó szénnek tekintik, amelyet kifejezetten talajba történő alkalmazásra szántak, tehát a célja szerint definiálják legtöbb esetben. A bioszén egyik jellemzője, ami közös az általános szénnel, hogy főként stabil aromás formájú szerves szenet tartalmaz, amely a pirolízis kiindulási anyagában lévő szénhez képest még kedvező környezeti és biológiai körülmények között sem képes könnyen visszakerülni a légkörbe, például a talajban fennálló körülmények között sem. (Sohi és mtsai., 2010)

A bioszén specifikus környezeti alkalmazásokban különleges adszorpciós tulajdonságokkal rendelkezik. Olyan módon alakítható, hogy jobban megfeleljen a tervezett környezeti alkalmazásnak, például fizikai-kémiai tulajdonságainak, mint a fajlagos felület, a felületi funkciók csoportok és a pórusszerkezetek módosításával. (Hamed és mtsai., 2020)

A bioszén fizikai és kémiai tulajdonságai nagymértékben függenek a termokémiai működési paraméterektől és az alapanyagként felhasznált biomassza tulajdonságaitól. Számos különböző berendezést és reaktort fejlesztettek ki a bioszén előállítására, hogy magasabb hozamot és jobb minőségű célterméket érjenek el. Ezek a reaktorok hasonló elven működnek, de különböznek az oxigén felhasználásában, a fűtési sebességben és a végső hőmérsékletben, amelyek befolyásolhatják a végtermékek minőségét és eloszlását. A különböző reakciókörülmények, különösen a rendelkezésre álló oxigén mennyisége alapján, a bioszén hozama és minősége jelentős mértékben eltérhet az egyes folyamatokban. (Duo és mtsai., 2020)

A bioszén – főként talajjavítás szempontjából – fontos fizikai-kémiai paraméterei közé tartozik többek között a pH, hamutartalom, elemi összetétel, sűrűség, szemcseméret-eloszlás, felület és porozitás, morfológiai jellemzők, elektromos vezetőképesség (EC), felületi funkciók csoportok, valamint a vízmegtartó képesség. (Zhang és mtsai., 2018)

Sűrűség és porozitás

Bármilyen ömlesztett anyag sűrűsége fontos tulajdonság az összes kezelő és feldolgozó létesítmény tervezése és működése szempontjából. Míg a bioszén tömegalapú energiasűrűsége a kezelési hőmérséklettel növekszik, addig a térfogatsűrűség ellenkező tendenciát mutat. Mivel a gázok a pirolízis során kipárolognak a szilárd biomassa szerkezetéből, porózus szemet hagynak maguk után. (Haider és mtsai., 2022)

Felszín és fajlagos felület

A karbonizációs folyamat során a kiáramló illékony gázok hatására a porozitás megváltozik, és így megváltozik a biomassa teljes felülete is. A nagy felület számos más bioszén tulajdonsághoz (például kationcserélő képességhez vagy vízmegtartó képességhez) kapcsolódik, és ezért számos bioszén alkalmazás előfeltétele. A felületet általában Brunauer-Emmett-Teller (BET) -analízissel határozzák meg, amely során a mintát meghatározott gázatmoszférának teszik ki, és megméri az elnyelt gáz mennyiségét. A bioszén jellemzően nagy felülettel rendelkezik, amely 100 és 460 m²/g között mozog (Haider és mtsai., 2022).

Pórustérfogat és pórusméret-eloszlás

A bioszén pórusai több nagyságrendet átívelnek, és makropórusokra (1000–0,05 µm pórusátmérőjű), mezopórusokra (0,05–0,002 µm) és mikropórusokra (0,05–0,0001 µm) oszthatóak. A pórustérfogat meghatározása gyakran N₂-szorpcióval történik, hasonlóan a standard BET-analízishez, és ezért ugyanazok az analitikai korlátok érvényesek. A bioszén pórusszerkezete nagyrészt mikropórusokból áll, amelyek a teljes pórustérfogat több mint 80%-át teszik ki.

Hidrofóbitás és víztartó képesség

A hidrofóbitás a felszíni funkciók csoportok jellemzőivel van összefüggésben, míg a víztartó képesség a bioszén porozitásától is függ. Ezeknek a tulajdonságoknak lehetnek ellentétes vagy átfedő hatásai, ezért néha nem különböztethetők meg egyértelműen egymástól. (Weber és Quicker, 2018; Yadal és mtsai., 2023)

pH

A bioszén pH-értékét a kiindulási alapanyag típusa is befolyásolhatja, ami általában semleges és lúgos közötti értékeket mutat. Ugyanakkor bizonyos alapanyagok és különböző pirolízis körülmények mellett savas pH-értékeket is dokumentáltak. Általánosságban elmondható, hogy a bioszén pH-ja 5 és 12 között mozog, és a pirolízis hőmérsékletének emelkedésével a pH-érték

is növekszik (Haider és mtsai., 2022). Ez a pH növekedés valószínűleg a pirolízis során történő dekarboxilező, illetve a dehidratáció következtében bekövetkező karbonizációs folyamatoknak köszönhető (Ghaffar és mtsai., 2015).

2.2.2. A bioszén alkalmazási területei

A fenntartható környezet- és mezőgazdálkodás kulcsfontosságú a talaj, a víz és a levegő védelme szempontjából az egyre intenzívebb mezőgazdasági gyakorlatok, valamint a nagyszabású ipari és közlekedési tevékenységek során. E kihívások kezelésére ígéretes eszköz lehet a bioszén alkalmazása. (Hamed és mtsai., 2020)

Talajjavítást célzó felhasználása mellett a különböző bioszén termékeket alkalmazzák talajremediációs eljárásokban elsősorban a szennyezőanyagok mobilitásának csökkentését célozva (Beesley és mtsai., 2014), de peszticidekkel szennyezett talajok kockázatsökkentésére is sikeresnek bizonyult (Hagner és mtsai., 2015). Ugyanakkor az utóbbi években a bioszén nemcsak a környezetvédelmi és mezőgazdasági technológiák adalékaként alkalmazzák, hanem egyre több vegyipari és biotechnológiai alkalmazása (például katalizátorként, adszorbensként, energiatárolóként) is ismert (Amalina és mtsai., 2022). A bioszén alkalmazásának nagy előnye a jelenleg alkalmazott adszorbensekkel és katalizátorokkal összehasonlítva, hogy számottevően olcsóbb lehet, és mezőgazdasági hulladékok, illetve ipari melléktermékek pirolízisével vagy elgázosításával előállítható, azaz a hulladékhasznosítás problémájára is megoldást jelenthet.

A bioszén alkalmazására már számos példa elérhető a szakirodalomban (*1. táblázat*), amelyek jól szemléltetik, hogy ha megfelelő módon alkalmazzák, akkor költséghatékony technológia lehet a talajszennyezés csökkentésére, a klímaváltozás mérséklésére és a talajminőség megőrzésére. (Papageorgiou és mtsai., 2021)

1. táblázat. A bioszén alkalmazási területei (Amalina és mtsai., 2022 alapján)

Alkalmazások	Cél	Előnyök	Hátrányok
Katalizátor	Segítség a közvetlen reakciók katalízisében.	Könnyen elérhető, újrahasznosítható/többször felhasználható, rendkívül hatékony, nem mérgező és környezetbarát.	Költséges, csökkentő a hatékonyság.
Energiatároló	Alkalmazás elektród anyagként.	Költséghatékony, stabil, újra használható, hosszú távú alkalmazhatóság, rendkívül hatékony.	Gyenge teljesítmény.
Talajjavító	A talaj termékenységének és minőségének növelése, valamint a szénmegkötés.	Alacsony költség, csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását, segíti a tápanyagok és a víz megtartását, valamint szabályozza a tápanyagvesztést.	A nehézfémekkel és policiklusos aromás szénhidrogénekkel való szennyeződése.
Adszorbens	A szerves és szervetlen szennyeződések eltávolítása a talajból és a vízi rendszerekből.	A minimális költség, a bioszénben található megnövekedett oxigéncsoportok javítják a szennyeződések adszorpcióját.	A szennyeződések eltávolításának hatékonysága korlátozott.
Komposztálás	A mikrobiális populáció szerkezetének javítása és a szén ásványosodásának elősegítése.	Porózus, ami csökkenti az üvegházhatású gázok kibocsátását.	Lehetséges, hogy nehézfémek és más toxinok beszívórognak a talajba.

2.2.3. Bioszén termékek talajjavításra történő hosszú távú alkalmazásának kiemelt eredményei

Gombolá és munkatársai (2022) egy kétéves terepi kísérlet során a bioszén alkalmazásának hatásait vizsgálták a talaj szervesanyag- és oldott szervesanyag-összetételére Olaszországban. A kutatás keretében különböző bioszén dózisokat (15 és 120 t/ha között) alkalmaztak, és a mintavételezést két egymást követő évben végezték el. A talaj szerves szén (TOC) és oldott szerves szén (DOC) tartalmát különféle technikákkal, például UV–VIS spektroszkópiával és

pirolízis-gázkromatográfiás tömegspektrometriával (Py-GC-MS) elemezték. Az eredmények azt mutatták, hogy a bioszén alkalmazása jelentősen növelte a talaj TOC-tartalmát, különösen a legmagasabb dózis esetén, ahol a szerves szén közel megduplázódott a kontroll talajhoz képest; a bioszén alkalmazása jelentős pozitív hatást gyakorolt a talaj szénkörforgására, javítva a szénmegkötést, csökkentve az oldott szerves anyagok kimosódását, és elősegítve a mikrobiális aktivitás növekedését a talajban.

Luo és munkatársai (2020) fa alapanyagú bioszén alkalmazásának hatásait vizsgálták a talaj tulajdonságaira Kína Lősz-fennsíkján. Nyolcéves kísérlet során különböző mennyiségű bioszenet juttattak négy különböző talajtípusra: lőszös, sötét lőszös, Lou¹ és eolikus homoktalajra. Az eredmények azt mutatták, hogy a bioszén jelentősen növelte a talaj szerves széntartalmát és nitrogéntartalmát a 0–40 cm-es talajrétegben, bár hatása a foszforra és a nitrát-nitrogénre talajtípustól és az alkalmazott bioszén-adagtól függ.

Az előbbieken is ismertetett kedvező bioszén tulajdonságok és hatások következményeként számtalan kutatás mutatta a termőképesség növekedését is mezőgazdasági talajokon. Uzoma és munkatársai (2011) szarvasmarhatrágyából gyártott, üvegházi kísérlete során (0, 10, 15, 20 t/ha koncentráció) *Zea mays* (kukorica) terméshozam növekedéséről számol be, míg Doan és munkatársai (2015) azt találták, hogy bivalytrágya alapú bioszén esetében a szerves trágya és a szén keverékét alkalmazva tapasztalható a legjelentősebb terméshozam növekmény. Hall és Bell (2015) búzaszalma és csirketrágya alapanyagokból előállított bioszeneket juttatott be talajba 5 t/ha koncentrációban, ahol közönséges búzát, cirokot és csillagfürtöt termesztettek. Kísérletükben már rövid távon szignifikáns terménynövekményt tapasztaltak. Inal és munkatársai (2015) pedig baromfitrágyából előállított bioszénrel érték el szignifikáns terméshozam növekedést üvegházi kísérleteikben kukorica esetén.

2.2.4. Bioszenek érési folyamatai és hatásai a bioszén jellemzőire

A bioszén előnyös tulajdonságai mellett talajra történő alkalmazása során fontos szem előtt tartani, hogy fizikai-kémiai és egyúttal biológiai és ökotoxikológiai tulajdonságai környezeti kitettség után megváltozhatnak, ami megnehezíti hosszú távú ökoszisztéma-szolgáltatásainak előrejelzését. Ezek a változások a hőmérséklet, a víztartalom, a talajművelés, a trágyázás,

¹ Manural Loessial talaj, Észak-Kínában, a Guanzhong-síkságon, a lőszfennsík déli szélén jellemző talaj (Zhou és mtsai., 2012)

valamint a talajmátrixszal való kölcsönhatások miatt következhetnek be. Sűrűsége és porozitása megváltozhat az ásványi anyagok, gyökerek, szerves anyagok vagy mikrobákkal való kölcsönhatás miatt, ami befolyásolhatja az adszorpciós kapacitást, a talaj hidraulikus vezetőképességét és a vízmegtartást. (Giovambattista és mtsai., 2016)

A bioszén öregedése (érése) természetes csapadék vagy fagy–olvadás események következtében következhet be. Ezek a folyamatok mechanikai töredeezést, felületi oxidációt, oldott szerves anyagok felszabadulását és ásványi anyagok oldódását eredményezhetik. Az ilyen környezeti hatások mesterségesen felgyorsíthatók nedves-száraz ciklusokkal, kémiai oxidációval és fagy–olvadás ciklusokkal. A bioszénen gyökérváladékok adszorpciója savasodást és ásványi anyagok oldódását idézheti elő. Ezeket a folyamatokat kémiai módszerekkel lehet modellezni, illetve szimulálni. A biológiai és fotokémiai folyamatok oxidációt és a labilisszén tartalom felszabadulását okozhatják. (Wang és mtsai., 2020)

A bioszén érése megváltoztatja annak fizikai, biológiai és kémiai tulajdonságait, ami jelentősen befolyásolhatja kölcsönhatását a talajjal és a szerves anyagokkal. Az érési folyamat során a hidrofób vegyületek lebomlása oxigéntartalmú funkciós csoportokat hoz létre a bioszén felületén. Ezek a funkciós csoportok – főként karboxil-, fenol- és laktoncsoportok – természetüknél fogva savas kémhatásúak, ami magas felületi töltéssűrűséget és kationcserélő kapacitást eredményez az érlelt bioszénben. Ennek következtében jelentősen javulhat a tápanyag-megkötés, a biohasznosulás is, ami növeli a növénynövekedést és a termés hozamot. A bioszén érése természetes módon - vagy mesterségesen előidézve is - végbe mehet különböző folyamatok, például oxidáció, hidratálás, kimosás, hidrolízis, fagy-olvadás, nedvesedési és száradási ciklusok, mineralizáció, valamint oldott szerves anyagok bioszén felületére történő adszorpciója révén. (Nyambo és mtsai., 2023)

Mivel a bioszén alkalmazását hosszú távra tervezzük, emiatt a talajra gyakorolt hatásával évekig számolnunk kell (Jiang és mtsai., 2024). Ahhoz, több évre esetleg évtizedre előrelátóan biztonságosan alkalmazzuk a bioszeneket talajjavítás céljából, célszerű modellezni és vizsgálni az érés során fellépő hatásokat. Ilyen szimulációkra több mesterséges érlelési módszer (fizikai, kémiai és biológiai) ad lehetőséget, bár ezek a kutatások még gyerekcipőben járnak. A mesterséges „*in vitro*” érlelés célja, hogy „lerövidítse” a természetes „*in vivo*” érés több évet felölelő időtartamát.

2.2.5. Bioszenek érésének modellezése – Laboratóriumi kísérletek

A hosszú távú szabadföldi kísérletek megbízható bizonyítékokat nyújthatnak a bioszén időbeli fejlődéséről a talaj környezetében. Azonban az időbeli korlátok, és a bioszén visszanyerési problémák miatt a kutatók gyakran mesterséges öregítési módszereket alkalmaznak a természetes érés modellezésére és hatásainak vizsgálatára (Wang és mtsai., 2020).

A három folyamat közül a kémiai mesterséges érlelési módszer a bioszén hosszú távú érését szimulálhatja. Ezzel szemben a fizikai és biológiai érlelési módszerek általában enyhébb környezeti feltételeket szimulálnak. Valójában komplexebb, mesterségesen gyorsított érlelési módszereket kellene kidolgozni, amelyek többféle érési folyamatot kombinálnak, és kvantitatív modellekkel kapcsolhatók a természetes érési folyamatokhoz (Liu és Chen, 2022).

2.2.5.1. Fizikai érlelés

A hőmérséklet és a nedvesség fontos tényezők a fizikai érlelés során. Gyakran alkalmazott fizikai öregítési módszerek a hőmérséklet és páratartalom hatásainak szimulálására a fagy-olvas ciklus és a nedves-száraz ciklus kivitelezése bioszenekkel. A fagy-olvas ciklus vizsgálatok során a választott fagyási hőmérsékletek $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ között változnak általában. Míg az extrém alacsony hőmérsékletek felgyorsíthatják az öregedési folyamatot, általában magasabb fagyási hőmérsékleteket alkalmaznak, hogy jobban tükrözzék a természetes környezetet. A nedves-száraz ciklusok repedéseket okoznak a bioszén felületén, ami megváltoztatja a pórusstruktúrát.

Ugyanakkor a néhány rendelkezésre álló szakirodalom alapján a fagyasztás-olvas és nedves-száraz mesterséges érlelési módszerek nem feltétlenül tükrözik pontosan a természetes öregedési folyamatokat olyan jól, mint a kémiai és biológiai öregítési módszerek. (Wang és mtsai., 2020; Liu és Chen, 2022; Long és mtsai., 2024)

Zeba és munkatársai (2022) a bioszén fizikai érlelésének hatásait vizsgálták, amely során a bioszenet váltakozó fagy-olvas és nedves-száraz ciklusoknak tették ki. Az érlelés célja a bioszén mineralizációjának mélyebb megértése volt. A fizikai érlelés során a hőmérséklet $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ között váltakozott. A kísérlet során megfigyelték, a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on készült bioszén esetében mineralizációjának 103%-os növekedése következett be, míg a $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on készült bioszén nem mutatott jelentős változást. Eredményeik is jól tükrözték, hogy a fizikai érlelés önmagában nem elegendő a természetben lezajló érési folyamatok megbízható szimulálására.

2.2.5.2. Kémiai érlelés

A kémiai érlelés felgyorsítására több megközelítést alkalmaznak, amelyek közül a leggyakoribbak a kémiai oxidáció, a szerves sav által kiváltott érlelés és a fotokatalitikus oxidáció. Ezek a módszerek a szerves ionok, a gyökérváladékok és a napfény sugárzásának bioszénre gyakorolt hatását szimulálják, így jól tükrözik a hosszú távú öregedési folyamatokat. A peroxid (H_2O_2) széles körben használt oxidálószer a természetes oxidációs folyamatok szimulálására a bioszén érlelési vizsgálatok során, és például 5%-os H_2O_2 oldattal, 80 °C-on történő két napos előkezelés hozzávetőlegesen 100 éves természetes érési folyamatot képes szimulálni (Liu és Chen, 2022; Wang és mtsai., 2020). Ezen kívül a nátrium-hidroxid (NaOH) és a peroxid (H_2O_2) is alkalmazható a szikes-lúgos talajok oxidációs reakcióinak modellezésére. A szerves savak, például a citromsav, almasav és etánsav szintén fontos szerepet játszanak a bioszén érésében. (Liu és Chen, 2022; Wang és mtsai., 2020)

Liu és munkatársai (2013) három különböző biomasszából – tölgy, bambusz és rizsszalma - készült bioszén kémiai érlelésének hatásait vizsgálta; céljuk a bioszén felületi tulajdonságainak megváltoztatása és a környezeti hatások elemzése volt. A kísérlet során 65%-os koncentrációjú salétromsav (HNO_3) került alkalmazásra, amelyet 1:10 tömegarányban keverték a bioszénrel. Ez a módszer jelentős változásokat idézett elő a bioszén felületi kémiájában, beleértve a felületi terület, a pórus térfogat, a morfológia és az adszorpciós tulajdonságok jelentős átalakulását. Csökkentek az alifás- és aromás szénecsoportok, miközben a karbonil- és karboxilcsoportok mennyisége növekedett.

2.2.5.3. Biológiai érlelés

A mikroorganizmusok és növények fontos szerepet játszanak a bioszén érésében. Egy megvalósítható biológiai érlelési módszer a talajmikroorganizmusok tenyésztése és felszaporítása, majd ezek közvetlen alkalmazása a bioszén felületein (Wang és mtsai., 2020).

A biológiai érlelési módszerek főként a mikrobiális és növényi kultúrák érlelését foglalják magukban. A mikrobiális kultúra érleléses módszer szimulálhatja a talaj mikroorganizmusainak a bioszén mineralizációjára gyakorolt hatását (Liu és Chen, 2022). A talajban élő mikroorganizmusok, növényi gyökerek és talajlakó állatok aktívan részt vesznek a bioszén érési folyamatában a talajkörnyezetben. Ezt figyelembe véve a mikrobiális érlelési módszerek főként a komposztálási és a mikrobiális társkultúrás érlelési módszert foglalják magukban, hogy szimulálják a bioszén mineralizációját a talaj mikroorganizmusai által (Long és mtsai., 2024).

2.2.6. Bioszenek érésének *in vivo* szabadföldi vizsgálata

Míg a mesterséges fizikai, kémiai és biológiai öregítési módszerek csak a bioszén érésére összpontosítanak, többségében a talaj részvétele nélkül, a bioszén természetes érése egy összetett folyamat, amely magában foglalja a bioszén és a talaj komponensei (pl. talajásványok, szerves anyag és élőlények) közötti kölcsönhatásokat.

Bár a laboratóriumi vizsgálatok könnyebben elvégezhetők a bioszén érési folyamatának nyomon követésére, ezek a módszerek nem feltétlenül adnak pontos előrejelzést, mivel számos környezeti és emberi tényezőt (mint például a napsugárzás, savas eső, talajművelés) figyelmen kívül hagynak. (Long és mtsai., 2024)

A bioszén *in vivo* érlelése azokra a természetes lebomlási és átalakulási folyamatokra utal, amelyek a bioszén talajba juttatása után, hosszú időn át, a környezeti tényezőkkel, mikroorganizmusokkal és a talaj komponenseivel való kölcsönhatás során zajlanak le. Ez az érési folyamat befolyásolja a bioszén fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságait, amely végső soron hatással van a talajjavítóként való hatékonyságára is. (Mukherjee és mtsai., 2014)

Ugyanakkor a bioszén szabadföldi érlelése (érése) egy összetett folyamat, amely megnehezíti és időigényessé teszi hosszú távú hatásainak vizsgálatát a talajra (Liu és mtsai., 2024). Szabadföldi érési folyamatok komplex összehasonlító vizsgálatára kevés példa van a szakirodalomban, és azok is főként néhány kiemelt jellemzőben bekövetkező hatásokat tanulmányoznak, ezekre emelek ki pár példát.

Dong és munkatársainak (2017) eredményei szerint a bioszén egy öt éves kísérleti mezőgazdasági területen 40%-os tömegvesztést szenvedett a 0–20 cm-es rétegben, függetlenül az alkalmazott bioszén mennyiségétől (Dong és mtsai., 2017). Az elemi összetétel változásától eltekintve azonban nem volt kémiai különbség az „érett” és a friss bioszén között, ami arra utal, hogy természetes körülmények között a bioszén viszonylag stabil, legalábbis rövid távon (pl. 5 év).

Jiang és munkatársai (2024) megállapították, hogy a bioszén² alkalmazása hosszú távú hatással van a mezőgazdasági talaj fizikai és kémiai tulajdonságaira. Tanulmányuk kimutatta, hogy a talaj szerves széntartalma (SOC) és a pH-ja jelentősen növelhető, míg a talaj térfogattömege (BD) csökkenthető a bioszén használata során. Az érést vizsgáló tanulmány során a SOC átlagosan 37%-kal nőtt. A bioszén nemcsak stabil aromás szénhidrogénekben gazdag, hanem

² Mezőgazdasági hulladékból/biomasszából, magas hőmérsékleten és oxigénmentes környezetben előállított bioszén

hozzájárult a talaj szénmegkötő kapacitásának növeléséhez is. Általában a bioszén pH-ja magasabb a mezőgazdasági talajokénál a bőséges funkciós csoportok és töltés miatt, amelyek jelentős pufferelő képességet biztosítanak, ami évekig fenntartja a bioszén pH-ra gyakorolt hatását. A tanulmány megerősítette, hogy alkalmazása az első évben 7–8%-kal csökkentette a talaj térfogattömegét (*bulk density*). Ráadásul hosszú távú és tartós hatással volt a talaj térfogattömegére, amely a bioszén erős kémiai inertségének, időjárásállóságának és morfológiai stabilitásának volt köszönhető (Jiang és mtsai., 2024).

Összefoglalva, az *in vivo* érés és hatása kritikus szerepet játszik a bioszén talajjavítóként való hatékonyságának meghatározásában. Ennek vizsgálatára két eltérő megközelítést alkalmaznak napjainkban, a bioszén mesterséges és szabadföldi érlelését és ezen folyamatok hatásvizsgálatát. A mesterséges érlelés laboratóriumi körülmények között zajlik, ahol gyorsított módszerekkel, például kémiai oxidációval vagy fagy-olvadás ciklusokkal, rövid idő alatt lehet szimulálni a bioszén tulajdonságaiban a különböző környezeti tényezők hatására bekövetkező változásokat. Ez lehetővé teszi egy gyors értékelést, de nem feltétlenül tükrözi pontosan a természetes környezetben bekövetkező folyamatokat. Ezzel szemben a szabadföldi érlelés a talajban, évek vagy akár évtizedek alatt zajlik, ahol a bioszén kölcsönhatásba lép a talajban lévő mikroorganizmusokkal, szerves anyagokkal és a különböző környezeti tényezőkkel. Ez a folyamat időben hosszabban zajlik, de komplexebb és realisabb képet nyújt a bioszén talajban való viselkedéséről és annak hosszú távú hatásairól.

Az eddigiek jól tükrözik, hogy bár a bioszén alkalmazása és alkalmazhatóságának vizsgálata talajjavítási céllal egyre nagyobb jelentőséget kap napjainkban, a bioszén öregedése (érése) következtében fellépő változások komplex felmérése és ezek alapján hosszú távú alkalmazhatóságuk előrejelzése kis hangsúllyal szerepel a kutatásokban. A bioszenek minősítésével foglalkozó nemzetközi rendszerek (IBI, 2015; WBC, 2023) előírásai is csak a bioszenek aktuális fizikai és kémiai jellemzőinek vizsgálatát célozzák. Ehhez kapcsolódóan kutatás-fejlesztési munkám fő célja volt, három eltérő alapanyagú és különböző pirolízis technológiával előállított bioszén talajjavítást célzó alkalmazhatóságának jellemzése, valamint az érési folyamatok hatásaira a tulajdonságaikban fellépő változások és azok hatásainak komplex összehasonlító felmérése mind előzetes mesterséges „*in vitro*” eljárásokkal, mind „*in vivo*”, talajban történő érleléssel többlépcsős kísérletekben a labortól a szabadföldre.

3. Anyagok és módszerek

A kutatásomhoz kapcsolódó kísérleti munka keretében három eltérő alapanyagú bioszén termék tulajdonságaiban az érés hatására bekövetkező változásokat vizsgáltam komplex metodikával. Az első fázisban laboratóriumi kémiai (H₂O₂ oxidáció), illetve biológiai mesterséges érlelés, majd félév és 1 év időtartamú *in vivo* szabadföldi természetes érlelés hatásait tanulmányoztam.

3.1. A kísérletek során alkalmazott talaj és tesztelt bioszenek jellemzői

A kísérletek során három, különböző gyártóktól származó bioszén terméket teszteltünk: egy gabonahéj-szennyvíziszap, egy gyógynövény és egy bükkfa alapú bioszenet. Jelölésüket, származási paramétereiket és néhány alapjellemzőjüket az 2. táblázat mutatja. A 3. táblázat szemlélteti a mesterséges biológiai érlelés és a szabadföldi érlelés során alkalmazott karbonátos homoktalaj (származási hely Örbottyán) tulajdonságait.

2. táblázat. Alkalmazott bioszén termékek

Bioszén jele	Bioszén neve	Bioszén előállítója	Bioszén származása	Bioszén alapanyaga	Pirolízis hőmérséklet [°C]	Tartózkodási idő [min]
A1B	Bio Pflanzenkohle	Sonnenerde, Gmbh.	Ausztria	Gabonahéj, papírgyártási szennyvíziszap	500–700	20
H	Herbacarb	Pyreg, Gmbh.	Németország	Gyógynövények	600–700	20
BW	Profood	Profood Zrt.	Magyarország	Bükkfa	450	10

3. táblázat. Örbottyáni homoktalaj fizikai-kémiai paramétere

Tulajdonság	Érték	Tulajdonság	Érték
Arany-féle kötöttség (KA)	27	Higroszkóposság	0,8
Leiszapolható rész % (L%)	14	Szabadföldi víztartó kapacitás	32
Kation cserélő kapacitás (CEC meq/100g)	11	Humusz %	1,0
Homok % (0,05 mm felett)	81	CaCO ₃ %	3,3
Iszap % (0,002–0,05 mm)	13	pH (H ₂ O)	7,7
Agyag % (0,002 mm alatt)	6	pH (KCl)	7,6

3.2. Érlelési kísérletek összeállítása

3.2.1. Laboratóriumi érlelés

3.2.1.1. Kémiai érlelés hidrogén-peroxiddal

A hidrogén-peroxidos érlelési módszer kivitelezésénél Chen (2020) munkáját vettük alapul. A mesterséges oxidációs érlelés során minden bioszén mintából 3-3 párhuzamossal dolgoztunk. A mintákból 30-30 g-ot mértünk 500 ml-es csavaros Schott üvegekbe, majd 300-300 ml 15%-os H_2O_2 oldatot mértünk a mintákra. Ezután a reaktorokat 4 órán keresztül ráztuk $30\text{ }^\circ\text{C}$ -on. Négy óra elteltével szűrtük a mintákat majd többszöri mosási lépést végeztünk desztillált vízzel. Ezt követően a bioszén mintákat egy éjszakán át $50\text{ }^\circ\text{C}$ -on szárítószekrényben szárítottuk.

3.2.1.2. Biológiai érlelés

A biológiai érlelés során a bioszeneket öt héten keresztül érleltük. A biológiai érlelés a mikrobiális folyamatok hatására bekövetkező érést és annak hatásait próbálja imitálni és vizsgálni (Wang és mtsai., 2020). A kísérlet során a legfőbb cél az volt, hogy megvizsgáljuk, hogy talajban specifikus talajra adaptált mikrobiális inokulummal milyen hatásokat eredményez a mikrobiológiai érlelés.

A mesterséges biológiai érlelés során laboratóriumi 1500 mL-es üveg reaktorokba rétegezve helyeztük a bioszeneket és a talajt. A talajokat előzőleg porítottuk és leszártuk, hogy homogének legyenek. Legalulra 200 g talaj került, felé pedig 80 g bioszén. A harmadik és ötödik réteg talaj volt, a negyedik bioszén. A rétegeket egymástól gézlappal választottuk szét. A levegőztetés biztosítása, valamint az oltóanyag egyenletesebb eloszlása érdekében három műanyag csövet helyeztünk a reaktorba. Minden mintát 90 mL nitrát és foszfát tartalmú tápanyaggal nedvesítettük, egyenletesen elosztva a reaktor tetején és alján. NP tápoldat: 50,0 g NH_4NO_3 + 16,6 g Na_2HPO_4 1000 mL csapvízben feloldva. Az oltóanyag előkészítése során 10 g por állagú mikroba inokulomot szuszpendáltunk 1,5 L csapvízben 2 L-es csavaros üvegben, majd 1 órán keresztül 150 rpm-en ráztuk a sejtek rehidratálódásához. Ezután minden reaktorra 100 ml inokulomot pipettáztunk. Oltóanyagként a Biofil Kft. speciális talajoltóanyagát, meszes talajra adaptált talajoltó mikrobákat alkalmaztunk, *Azospirillum*, *Pseudomonas*, *Bacillus* és *Kocuria* nemzetséghez tartozó törzsekkel. Mindegyik bioszén esetén három párhuzamossal dolgoztunk.

Öt hetes érlelést követően reaktoronként szétválogattuk a talajos, illetve a bioszenes részeket, kifejezetten odafigyelve arra, hogy a bioszenes részminták talajszemcséket ne tartalmazzanak.

3.2.2. Szabadföldi *in vivo* érlelés

A szabadföldi érleléses kísérleteket két kísérletsorozatban végeztük, 6 hónap és 1 év időtartammal, mindkettő a HUN-REN ATK Őrbottyáni modellterületén.

3.2.2.1. Hat hónap időtartamú szabadföldi érlelés

A szabadföldi érlelés során minden egyes bioszénből 5-5 párhuzamos mintát készítettünk, kis zsákokba 70-70 g bioszén mintát helyeztünk.

A zsákokat úgy választottuk ki, hogy érvényesüljenek a bioszeneken a környezet hatásai, ugyanakkor ne legyen olyan átjárható, hogy az egyes minták kiszóródjanak. Anyaga finom szövésű poliészter anyag volt. A modellterületen a talajban a zsákokat a talaj felszínétől 15-20 cm mélységben helyeztük el, egymástól 1 m távolságra. A minták szabadföldi érlelése 6 hónapig zajlott.

3.2.2.2. Egy év időtartamú szabadföldi érlelés

A kísérlet összeállítása megegyezett a 6 hónap időtartamú szabadföldi érlelésével, de ebben az esetben 1 éven keresztül hagytuk a talajban a bioszén mintákat. Az Őrbottyáni modellterület (GPS: 47.468955, 18.311116) fotója az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az Őrbottyáni modellterület, ahol a szabadföldi érlelés zajlott

3.3. A kísérletek követésére alkalmazott módszerek

Mind a mesterséges, mind a szabadföldi érlelés hatását fizikai-kémiai, biológiai és ökotoxikológiai módszereket magában foglaló integrált módszeregyüttes alkalmazásával követtem nyomon. Ezzel a kockázatközpontú megközelítéssel az volt a célom, hogy vizsgáljam, hogy az érlelés milyen kedvező vagy esetleg káros változásokat okozott a bioszén tulajdonságaiban.

3.3.1. Fizikai-kémiai vizsgálatok

3.3.1.1. Elektromos vezetőképesség és pH meghatározása

A talajoknak az egyik fontos tulajdonsága a kémhatásuk, ugyanis befolyásolják a talajban lezajló kémia és biokémiai folyamatokat. Mezőgazdaságban ez kifejezetten fontos, mivel a pH befolyásolja, hogy egyes elemek és vegyületek milyen formában vannak jelen a talajban, így a növények számára felvehető tápanyagmennyiséget is meghatározza. A legtöbb mezőgazdasági növénynek 5,5 és 7,5 közti kémhatás a megfelelő (Oshunsanya, 2018). Az elektromos vezetőképesség a 2018). Az elektromos vezetőképesség (EC) a talaj kationcserélő kapacitásával, sótartalmával, tápanyagkoncentrációjával és a textúrával is összefüggésben van.

Mérés menete

A méréseket a MSZ 21470/2-81. magyar szabvány előírása alapján kivitelezttük. A kémhatás meghatározását WTW pH 330 típusú kombinált üvegelektróddal, az elektromos vezetőképesség mérését pedig CONSORT C535 készülékkel végeztük el.

A kémhatás (pH) és vezetőképesség (EC - electrical conductivity) meghatározása egymással párhuzamosan, azonos módon elkészített mintákkal zajlott. 50 mL-es Falcon-csővekbe bemértünk 1 g bioszenet, majd 20 mL desztillált vizet pipettáztunk hozzá. A kapott szuszpenziót 90 percig rázattuk 200 rpm-en. A pH mérőt 4,00 és 7,00 értékű puffer oldatokkal kalibráltuk közvetlenül a mérések előtt. Mérések között az elektródokat desztillált vízzel mostuk le és szárazra töröltük.

3.3.1.2. Víztartó kapacitás (WHC) meghatározás

A víztartó kapacitás a talaj kiemelt jelentőségű vízgazdálkodási tulajdonsága, ami biztosítja azt, hogy a talajba érkező víz egy része hosszabb ideig is raktározódhasson a talajban. A visszatartó képességet a talaj stabilitása, porozitása és termékenysége határozza meg. (Tóth, 2011)

Mérés menete

Mindegyik érlelt bioszén mintából két párhuzamossal dolgoztunk, így összesen 10 párhuzamos mérést végeztünk. 5 g-ot mértünk be a mintákból mindkét oldalán nyitott műanyag hengerekbe, amelyeknek az alja vízáteresztő textillel volt lezárva. Ezután a mintákat 1 órára vízfürdőbe helyeztük, úgy, hogy a víz szintje a minták szintjénél magasabban legyen. Az 1 óra elteltével 3 órára homokágyra helyeztük a mintákat, hogy a felesleges víz elcsepegjen. Amíg a homokágyon voltak a minták, a hozzájuk tartozó porcelán izzító tégelyek tömegét analitikai mérlegen lemértük.

Miután letelt a 3 óra, a mintákból 2 g-ot ($\pm 0,0050$ g) bemértünk az izzítótégelyekbe, majd 24 órára 105 °C-os szárítószekrénybe, végül pedig 1 órára exsikkátorba helyeztük a mintákat. Ezután analitikai mérlegen lemértük a tégelyeket. A víztartó kapacitást a következő összefüggés alapján számoltam ki:

$$WHC\% = \frac{m_n - m_{sz}}{m_{sz}} * 100$$

Ahol: WHC%: víztartó kapacitás [%]; m_n : szárítás előtti tömeg [g]; m_{sz} : szárítás utáni tömeg [g].

3.3.1.3. Izzítási veszteség meghatározása

Az izzítási veszteség a talajban lévő szervesanyag tartalom közelítő meghatározására alkalmas. A szervesanyag tartalmat a minták tömegvesztésével lehet jellemezni, amit magas hőmérsékletre melegítve szenved el. A szerves anyagok magas hőmérsékleten elillannak, lebomlanak, ellentétben az ásványi frakciókkal.

Mérés menete

Ennél a módszernél is 2 párhuzamossal dolgoztunk (10 párhuzamos mérést végeztünk bioszenenként). A porcelán izzítótégelyek tömegét analitikai mérlegen lemértük, majd mindegyikbe 2 g ($\pm 0,0050$ g) bioszén mintát mértünk be. Az izzítótégelyeket 24 órára 105 °C-os szárítószekrénybe helyeztük. Ezt követően 1 órára exsikkátorba helyeztük a tégelyeket, hogy lehűljenek, majd 550 °C-os izzítókemencébe raktuk 6 órára. Ezután ismét 1 órára exsikkátorba helyeztük a tégelyeket, végül analitikai mérlegen mértük a tömegüket. Az izzítási veszteséget a következő egyenlet alapján határoztam meg:

$$IV\% = \frac{m_n - m_i}{m_n}$$

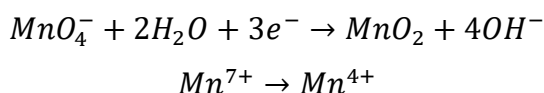
Ahol: IV%: izzítási veszteség [%]; m_n : kiindulási tömeg [g]; m_i : izzítás utáni tömeg [g]

3.3.1.4. Permanganáttal oxidálható széntartalom (POXC) meghatározása

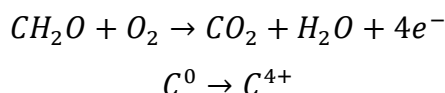
A permanganáttal oxidálható széntartalom, a labilis széntartalomról, a talajban lévő könnyen oxidálható, biológiailag könnyen hozzáférhető szénkészletről ad információt. Ez általában a talajnak az 1–4%-át teszi ki a talajnak (általában 300 és 1000 ppm között van).

POXC mérésnek a célja bioszén mintának labilis széntartalmának a meghatározása. Mérés során a permanganát ionok redukálódnak, a permanganáttal oxidálható szén pedig oxidálódik.

Redox reakció:



Oxidációs reakció:



Mérés menete

A méréshez 1 L-es, 0,2 M-os KMnO_4 törzsoldatot készítettünk. Az elkészült törzsoldatot barna üvegben és sötét helyen tároltuk. Először a standard sort készítettük el KMnO_4 törzsoldatból, amik 0,005; 0,01; 0,015; 0,02 M koncentrációjúak. Ezt követően mindegyik mintából kimértünk 0,5 mL-t 50 mL-es Falcon-csövekbe, majd 4,95 mL desztillált vizet adtunk hozzájuk.

50 mL-es Falcon-csövekbe bemértünk 0,2 g ($\pm 0,05$ g) bioszenet. Mindegyik mintából három párhuzamossal dolgoztunk, és mindegyikhez tartozott egy vak minta is. Rámértünk a mintákra 18 mL desztillált vizet, majd a vak minták kivételével mindegyikhez még 2 mL 0,2 M KMnO_4 oldatot adtunk. Összemérés után két másodpercig mindegyik Falcon-csövet vortexeltük, majd a mintákat 10 percre 120 rpm-n ráztuk sötétben. Rázást követően még 10 percig hagytuk ülepedni a mintákat. Amíg ülepedtek a minták egy második Falcon-csőbe mértünk 49,5 mL desztillált vizet. Amint lejárt a 10 perc ülepedési idő, gyorsan átmértünk 0,5 mL-t a felülúszóból a második Falcon-csövekbe, majd homogenizáltuk a mintákat. Ezek lettek a végső minták, amiknek az abszorbanciáját spektrofotométerrel vizsgáltuk. A permanganát redukálódása során elveszíti sötét lila színét, és halvány rózsaszínű lesz. A színváltozást spektrofotométerrel történő abszorbancia méréssel lehet vizsgálni. 96 cellás mikrotitrátor lemezbe pipettáztunk a mintákból, a vakokból, a standard sorból és desztillált vízből megadott protokoll alapján. Ezután DIALAB EL800 típusú Microplate Reader (LabSystems Multiscan PLUS) leolvasóval

(405 nm, 450 nm, 490 nm, 630 nm) és *FluoSTAR OPTIMA* műszerrel (520-10 nm, 544-ex nm) mértük le az abszorbancia értékeket.

Eredmények kiértékelése

Az oxidált szén mennyisége a redukált permanganát mennyiségének függvénye. Következésképpen minél kisebb a mért abszorbancia érték, annál nagyobb a POXC érték. A következő egyenletet használtam a POXC meghatározásához:

$$\text{POXC (mg kg}^{-1} \text{ bioszén)} = [0,02 \text{ mol/L} - (a + b \times \text{Abs})] \times (9000 \text{ mg C/mol}) \times (0,02 \text{ L oldat/Wt})$$

Ahol: 0,02 mol/L = kezdeti oldat koncentráció; a = a standard görbe metszéspontja; b = a standard görbe meredeksége; Abs = minta abszorbanciája; 9000 = 1 mol $\text{MnO}_4 \text{ Mn}^{7+} - \text{Mn}^{4+}$ redukálásakor keletkezett oxidált szén mennyisége mg-ban kifejezve; 0,02 L = a törzsoldat térfogat; Wt = száraz szénminta súlya kg-ban.

3.3.1.5. Elemösszetétel vizsgálata röntgen fluoreszcens spektroszkópiás (XRF) módszerrel

A minták jellemzésére informatív vizsgálat az elemösszetétel meghatározása is. Napjainkra ez már számos módon és berendezéssel könnyen kivitelezhető. Valamint a kapott adatok értékelése is igen gyorsá vált a korszerű számítástechnikai eszközöknek köszönhetően, melynek eredményeként a mérés során egyből koncentrációkban láthatjuk az egyes minták elemösszetételét. A röntgen fluoreszcens spektroszkópiás (XRF) módszeres mérésnél, a minta elemei, a használt berendezés által kibocsátott folytonos spektrumú röntgensugárzás által gerjesztődnek. Gerjesztésük hatására a különböző elemek, rájuk jellegzetes sugárzást bocsátanak ki melynek paraméterei azonosíthatóak.

Kezdetben minden mintából 3-3 átlátszó polietilén zacskóba kimértem 30–50 g mintát. A méréshez egy Thermo ScientificTM NITON XL3t típusú hordozható berendezést használtam, ami három szűrőt tartalmaz, melyek közül a főszűrő (*main filter*) az átmeneti fémek, a magas szűrő (*high filter*) a nagy rendszámú és az alacsony szűrő (*low filter*) a kis rendszámú elemek mérését teszi lehetővé. A mérés menete a következő volt: 3 szűrő alkalmazásával mérés, egyesével 45-45 másodpercig mért így összesen minden minta analízise 135 másodperc volt.

3.3.2. Biológiai vizsgálatok

3.3.2.1. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám meghatározása

Mikroorganizmusok a bioszférában mindenütt megtalálhatók, alapvető szerepet töltenek be az anyagforgalomban, ezért az ökoszisztémára vonatkoztatott vizsgálatoknak fontos részét képezik a mikrobiális aktivitásra vonatkozó módszerek. Élősejtszám meghatározás során a szaporodni képes mikroorganizmusok számát határoztuk meg, amit olyan tényezők befolyásolnak, mint a hőmérséklet, pH, redoxpotenciál, tápanyagmennyiség, és a jelenlévő potenciálisan toxikus anyagok. A kolóniaképző egységek (CFU- Colony Forming Unit) meghatározásához sejtenyésztes szükséges. Baktériumok tenyésztéshez húslé agart, gombák tenyészetéhez pedig maláta agart használtunk. Ezeknek az összetételét a 4. táblázat mutatja be.

A mintákból készített szuszpenziókból különböző hígítású tagokat készítettünk, majd ezeket bekevertük az előzetesen sterilizett tápagarokba. A tápagarok biztosítják a mikrobák számára szükséges szubsztrátokat. Azok a mikrobák, amelyek az adott táptalajon megélnek, szemmel látható telepeket hoznak létre.

4. táblázat Alkalmazott agarok összetétele

Húslé agar összetétele	Maláta agar összetétele
3 g húskivonat	20 g maláta
5 g pepton	1 g pepton
5 g glükóz	5 g glükóz
22 g agar	22 g agar
1000 mL csapvíz	1000 mL csapvíz
0,5 g NaC	

Mérés menete:

Mindegyik bioszén mintából két párhuzamossal dolgoztunk. Steril 100 mL-es Erlenmeyer-lombikokba bemértünk mindegyik mintából 1 g-ot, majd lamináris fülkében 9 mL steril csapvizet pipettáztunk hozzá. Ezután 30 percen át rázattuk a mintákat 200 rpm-en. Az ezt követő lépéseket mind steril fülkében, steril eszközökkel végeztük a befertőződés elkerülése érdekében. A rázatást követően a mintákból 0,5 mL-t pipettáztunk 4,5 mL steril csapvízhez és négy hígítási tagig hígítottuk azokat. Az utolsó három hígítási tagból, illetve a Herbacarb bioszén mintái esetén az első négy (a kiindulást is beleértve) tagból 100 µL-t pipettáztunk steril, műanyag Petri-csészébe. Amíg a mintákat készítettük elő, addig az előzetesen sterilizett

maláta és húslé agart felolvasztottuk, majd 50 °C-ra állított vízfürdőbe helyeztük őket. Végül a Petri-csészékbe öntöttük a kémcsövekben lévő agart a sejtszuszpenziókra, körkörös mozdulattal homogenizáltuk és egyenletesen eloszlattuk. Majd megdermedés után lefelé fordítva 30 °C-os hőmérsékleten 48–72 óráig inkubáltuk.

Eredmények kiértékelése

48, illetve 72 óra elteltével a Petri-csészében megszámloltuk a kifejlődött telepeket. A telepszám értékeket megszoroztam a hígítási tagnak megfelelő faktorokkal, majd a párhuzamosak eredményeit átlagoltam, és így határoztam meg az eredményt CFU/g bioszén mértékegységben.

3.3.3. Ökotoxicitás vizsgálatok

A hulladékok/melléktermékek, illetve ebből készült adalékok talajra való alkalmazása során nagy jelentőségű az alkalmazott adalék potenciális kockázatának felmérésére. Kiemelt jelentőségű tehát, hogy az adott talajjavítást célzó technológia kidolgozása során a hasznok és kockázatok kimutatására alkalmas metodikával kövessük nyomon a változásokat. Az integrált metodika lényege az, hogy a hulladékokból (melléktermékekből) előállított adalékoknak mind az értékeit, mind a potenciális veszélyeit teszteljük. A potenciális káros hatások felmérésére közönséges búzán (*Triticum aestivum*) végeztünk el gyökér és szár növekedésgátlási tesztet, illetve talajlakó *Collembola* (*Folsomia candida*) ugróvillás organizmussal mortalitási tesztet.

3.3.3.1. Gyökér- és szárnövekedés-gátlási teszt

A *Triticum aestivum* (közönséges búza) ökotoxikológiai növénytesztek kivitelezése során gyakran alkalmazott tesztnövény. A növényteszt során az érlelt bioszén esetleges gátló vagy serkentő hatását vizsgáltuk a gyökér- és szárnövekedésre. A teszt kivitelezésére során irányadónak az ISO 11269-1:1993, MSZ 21976- 17/1988 szabványt vettük. A vizsgálatok során az eredeti és az érlelt bioszén gyökér- és szárnövekedésre gyakorolt hatását vizsgáltuk.

Mérés menete

Közepes méretű üveg Petri-csészékbe bemértünk 3 g bioszenet mindegyik mintából, mindegyik esetében 2 párhuzamossal dolgoztunk. Kontrollnak kiforralt csapvizet, illetve desztillált vizet alkalmaztunk. Ezekből 2,5 mL-t pipettáztunk a Petri-csészékben elhelyezett fényes szűrőpapírokra. A bioszeneket szintén kiforralt csapvízzel nedvesítettük, ezek esetében a nedvesítéshez szükséges vízmennyiséget a WHC 60%-hoz és a növények vízigényéhez

igazítottuk. Ezt követően a nedvesített mintákra búzaszemből 16 db-ot helyeztünk. Végül a csészéket lefedtük és alufóliába csomagolva 3 napon át 22 °C-os termosztátban inkubáltuk őket. 72 óra elteltével lemértük a kifejlődött gyökereket és szárazakat, vonalzóval, mm pontosággal. A búza esetében 3 db gyökér és 1 szár fejlődik ki. Kiértékeléskor átlagoltam az eredményeket, majd az így kapott eredményekből számoltam gátlási százalékot csapvízhez viszonyítva. Vizsgálati végpontnak gyökér- illetve szárhossz növekedést vagy gátlási százalékot adunk meg, amit a következő egyenlettel számolunk:

$$X = \left(\frac{K - M}{K} \right) * 100$$

Ahol: X: gyökér gátlási százalék, illetve szár gátlási százalék [%]; K: kontroll magvak gyökérhossza, illetve szárhossza [mm]; M: kezelt magvak gyökérhossza, illetve szárhossza [mm].

3.3.3.2. *Folsomia candida* (Collembola) mortalitás teszt

A *Folsomia candida*, az ugróvillások (Collembola) rendjébe tartozik. Alkalmas tesztorganizmus szerves, főleg illékony, bőrön át felszívódó szennyezőanyagok jelenlétének a kimutatására, mivel hasi tömlővel lélegzik. A potenciális toxikus hatás felmérésére laboratóriumi akut toxicitás tesztet végeztünk a tesztorganizmussal.

Mérés menete

Kisméretű, 370 mL-es reaktorokba 3 g bioszenet mértünk, mindegyik mintából két párhuzamossal dolgoztunk. Kontrollnak Örbottyánról származó talajt és OECD talajt³ alkalmaztunk, amikből 10-10 g-ot mértünk be. Egyenletesen eloszlattuk a bioszén mintákat és a talajokat az üvegek aljában, majd kiforralt csapvízzel benedvesítettük azokat. Körülbelül 2 mg szárított élesztőt kanalaztunk a mintákra, ezzel biztosítva a tesztorganizmusok számára táplálékot. Egy erre a célra kifejlesztett gyűjtőedény segítségével 10 db tesztorganizmust raktunk minden reaktorba. Az reaktorokat lezártuk, majd 7 napig sötétben inkubáltuk 20 °C-on. Inkubációt követően a reaktorokat csapvízzel felszuszpendáltuk és óvatosan felkavartuk az üveg alján maradt mintákat, hogy az összes tesztorganizmus feljusson a víz tetejére. Az életben maradt tesztorganizmusokat számoltuk. A kapott eredményekből gátlási százalékot számoltam:

$$X = \left(\frac{K - M}{K} \right) * 100$$

³ OECD talaj összetétele: 10% tőzeg, 20% kaolinit anyag, 70% (ipari) kvarc homok

Ahol: X: gátlási százalék [%]; K: a kontrollban életben maradt állatok száma [db]; M: a mintában életben maradt állatok száma [db].

3.4. Az eredmények értékelésére alkalmazott statisztikai módszerek

Az eredmények statisztikai értékeléshez a TIBCO® Statistica programot használtam, a minták és a kezelések közötti szignifikáns különbségek meghatározására, egyutas variancianálízissel (One-Way ANOVA – Analysis of variance). Annak megállapítására, hogy a mérési adatok azonos varianciájú sokaságból származnak-e, Cochran féle Q-próbát végeztem. A próba eredményétől függően, ha szignifikáns volt az eltérés ($p < 0,05$), akkor a kezelések hatékonyságát Fisher féle LSD próbával vizsgáltam, ha pedig nem volt szignifikáns eltérés, akkor Newman-Keuls *post hoc* analízist alkalmaztam. Ezután a homogén csoportok alapján a bioszén mintákat betűjelzésekkel láttam el. A betűjelzéseket növekvő sorrendben rendeltem a különböző bioszén mintákhoz. Az egy homogén csoportba tartozó – szignifikánsan nem eltérő - bioszenek azonos jelzést kaptak.

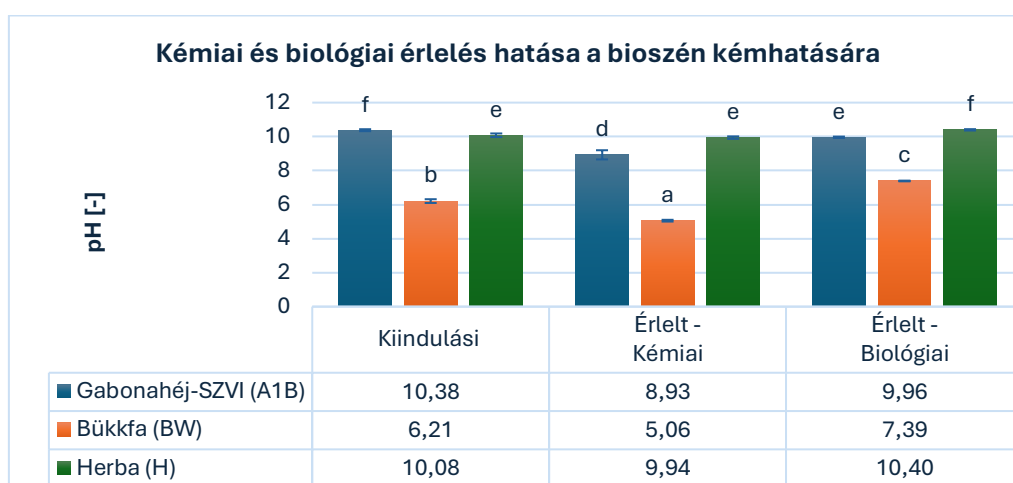
4. Eredmények és értékelésük

4.1. Laboratóriumi mesterséges érlelés

A mesterséges érlelés keretein belül a biológiai és a hidrogén-peroxidos kémiai érlelés hatását vizsgáltam a kiindulási „friss” bioszenekhez képest.

4.1.1. A mesterséges érlelések hatása a kémhatásra

A 2. ábrán látható a kémiai és biológiai érlelés hatása a bioszén kémhatására.



2. ábra. Kémiai és biológiai érlelés hatása a bioszén kémhatására

Az eredmények jól szemléltetik, hogy az eltérő bioszeneken eltérő hatást eredményezett a két érlelés. A gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén esetében szignifikáns változás – csökkenés – történt mindkét érlelés hatására, ennek átlagos mértéke ~ 9% volt.

A bükkfa alapú bioszén kémhatásában is szignifikáns változások történtek, a kémiai érlelés hatására ~ 19%-os csökkenés, míg a biológiai érlelés hatására ~ 19%-os növekedés történt. Ez kedvezőtlen változást a kémiai érlelés esetén jelent, mivel abban az esetben a bükkfa alapú bioszén pH-ja 5-re csökkent.

A gyógynövény alapú H bioszénél a biológiai érlelés következtében történt szignifikáns változás, ~ 3%-os növekedés. A kémiai érlelés hatására a kémhatása pedig ~ 1%-ot csökkent.

Hale és munkatársai (2011) a pH csökkenését a savas hatású karboxil csoportok keletkezésével magyarázta. A szakirodalomban főleg pH-csökkenés található, összhangban a mi legtöbb eredményünkkel is, vagyis a pH-növekedés érlelés hatására nem jellemző változás.

Ugyanakkor ez a pH-csökkenés még alkalmazhatóvá teszi ezeket a bioszén termékeket savanyú homoktalajok esetén.

4.1.2. A mesterséges érlelések hatása az izzítási veszteség alakulására

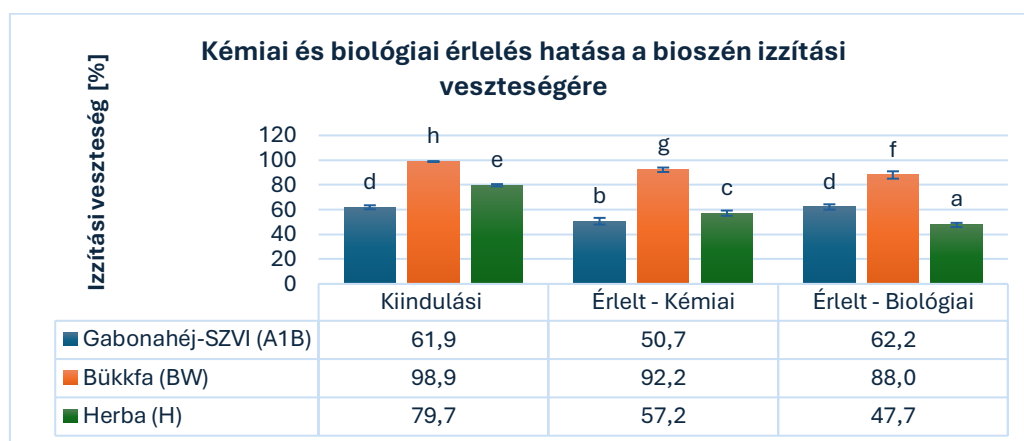
A 3. ábrán látható a kémiai és biológiai érlelésnek a bioszén izzítási veszteség értékeire gyakorolt hatása. Általánosságban elmondható, hogy csökkenés következett be az értékekben mindkét érlelés hatására, kivéve a gabonahéj-szennyvíziszap alapú A1B bioszén biológiai érlelésénél, ahol minimális, de nem szignifikáns növekedés történt. A kémiai érlelés hatására pedig ~ 19%-os csökkenés történt.

A bükkfa alapú BW bioszénnél a kémiai érlelés esetében ~ 7%-os, a biológiai érlelésnél pedig ~ 11%-os csökkenés történt az izzítási veszteség értékekben.

A gyógynövény alapú Herba bioszén esetében a kémiai érlelés ~ 29%-os, a biológiai érlelés pedig ~ 41%-os csökkenést eredményezett.

Összességében elmondható, hogy a biológiai érlelésnél történt a nagyobb mértékű csökkenés a bioszén izzítási veszteség értékeiben.

Eredményeimet alátámasztja Wang és munkatársai (2020) szakirodalma, akik szintén csökkenést érzékelt az izzítási veszteség értékekben az érlelések hatására. Tanulmányukban a csökkenést a mállási és mikrobiális folyamatok felgyorsulásának tulajdonították, ami szintén eredményezhette a csökkenéseket a mi kísérleteinkben is.



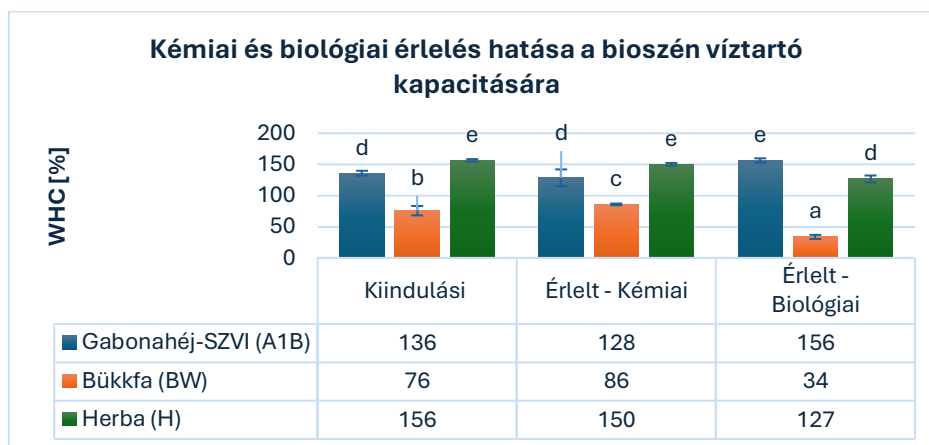
3. ábra. Kémiai és biológiai érlelés hatása a bioszén izzítási veszteség értékeire

4.1.3. A mesterséges érlelések hatása a víztartókapacitásra

A 4. ábrán látható a kémiai és biológiai érlelés hatása a bioszén víztartó kapacitására. A víztartó kapacitás fontos vízgazdálkodási jellemző; megadja, hogy a bioszén milyen mértékben képes a vizet megtartani, ami talajjavítás szempontjából azért fontos, mert a nagy víztartó kapacitással rendelkező talaj hosszabb időn keresztül biztosít a növényeknek vizet és tápanyagot.

Az A1B és H bioszén WHC értékeiben nem történt szignifikáns változás a kémiai érlelés hatására, átlagosan ~ 5%-kal csökkentek a víztartó kapacitás értékek. A kémiai érlelés hatására az A1B bioszén ~ 15%-os növekedést, a H bioszén ~ 19%-os csökkenés történt.

A BW bioszénnél ~ 13%-os növekedés történt a kémiai, és ~ 55%-os csökkenés a biológiai érlelés hatására. Ez utóbbi jelentős csökkenést jelent, de a mezőgazdasági talajoknál így is jelentősen nagyobb vízkapacitás értékekkel rendelkezik a bioszén érés után is.



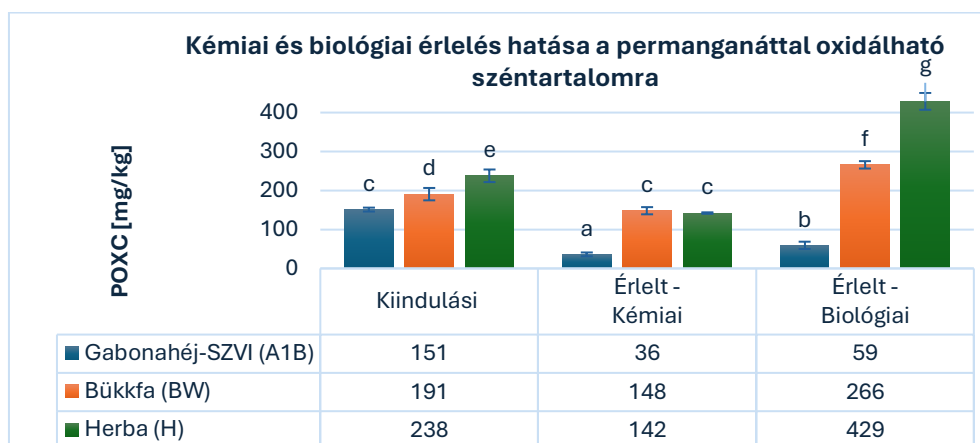
4. ábra. Kémiai és biológiai érlelés hatása a bioszén víztartó kapacitására

A víztartó kapacitás szoros összefüggésben van bioszén fajlagos felületével, porozitásával és sűrűségével (Mukherjee és Lal, 2013). De figyelembe véve azt, hogy az érlelés során a természetben hosszú idő (évtizedek, akár évszázadok) alatt lezajló természetes érési folyamatot modellezzünk, így a csökkenés nem feltétlenül jelenti alkalmazhatóságuk akadályát.

4.1.4. A mesterséges érlelések hatása a bioszenek labilis széntartalmára (POXC)

A 5. ábrán látható a kémiai és biológiai érleléseknek a bioszenek permanganáttal oxidálható labilis széntartalmára gyakorolt hatása. A permanganáttal oxidálható széntartalom a labilis – könnyebben oxidálható - széntartalmat mutatja. Ebben a paraméterben is eltérő változásokat tapasztaltunk mind az érési folyamat, mind a bioszén tekintetében.

A kiindulási gabonahéj-szennyvíziszap alapú A1B bioszén, illetve a kémiailag érlelt bükkfa alapú BW és gyógynövény alapú Herba bioszenek nem térnek el szignifikánsan egymástól. Az A1B bioszénél mindkét érlelés hatására csökkenés következett be (átlagosan ~ 69%). A bükkfa alapú bioszén kémiai érlelésénél ~ 23%-os csökkenés, míg a biológiai érlelés következtében ~ 39%-os növekedés történt. A H bioszén esetében a biológiai érlelés szignifikáns változást mutatott, a kiindulási értékhez képest ~ 80%-os növekedés történt. A kémiai érlelés a POXC értékek ~ 40%-os csökkenését eredményezte.

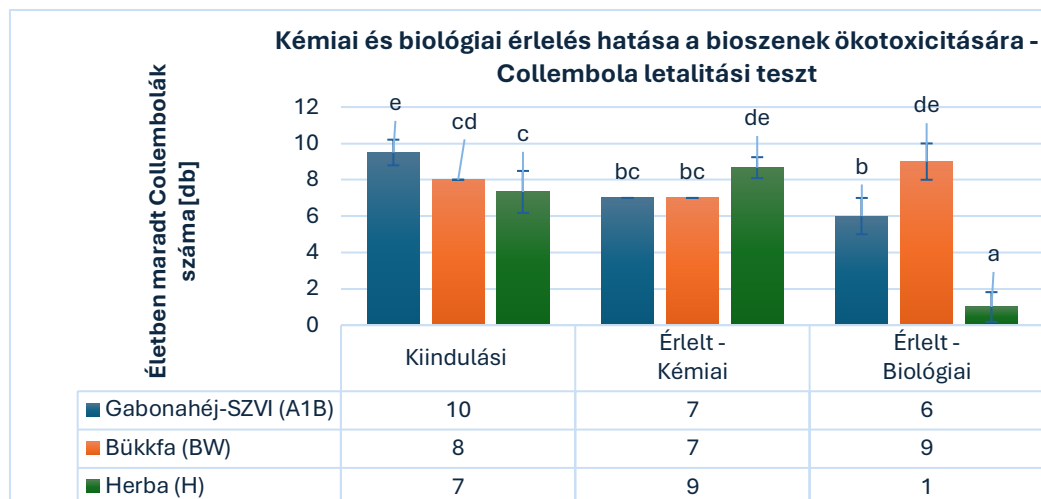


5. ábra. Kémiai és biológiai érlelés hatása a permanganáttal oxidálható széntartalomra

Zhang és munkatársai (2022) is hasonlóan változékony eredményeket kaptak bioszén érlelési kísérletükben, ők a mikrobák eltérő lebontási aktivitásával érveltek. Esetünkben jelentős POXC csökkenést az A1B bioszén mutatott mindkét érlelés hatására. Valószínűleg ennél a bioszénél kevésbé stabil formában van a szén. A másik két bioszén (bükkfa, herba) szervesanyag tartalma stabilabb formában van feltehetőleg a bioszenekben, ami feltehetőleg hosszabb távú szervesanyag utánpótlást tesz lehetővé a talajban.

4.1.5. A bioszenek ökototoxicitásának alakulása a mesterséges érlelések hatására *Folsomia candida* talajlakó rovarral

A 6. ábrán láthatjuk a kémiai és biológiai érleléseknek a bioszenek ökototoxicitására gyakorolt hatását. A gabonahéj-szennyvíziszap alapú A1B bioszén esetében mindkét érlelés hatására közepes mértékű csökkenés következett be az életben maradt Collembolák számában (30 és 40%). A bükkfa alapú BW bioszénél a kémiai érlelés hatására enyhe csökkenés (~ 12%), a biológiai érlelésnél pedig növekedés (~ 12%) mutatkozott a mortalitásban. A gyógynövény alapú Herba bioszén esetében a kémiai érlelés hatására ~ 28%-os növekedés történt, míg a biológiai érlelés hatására drasztikus, ~ 86%-os csökkenés következett be.



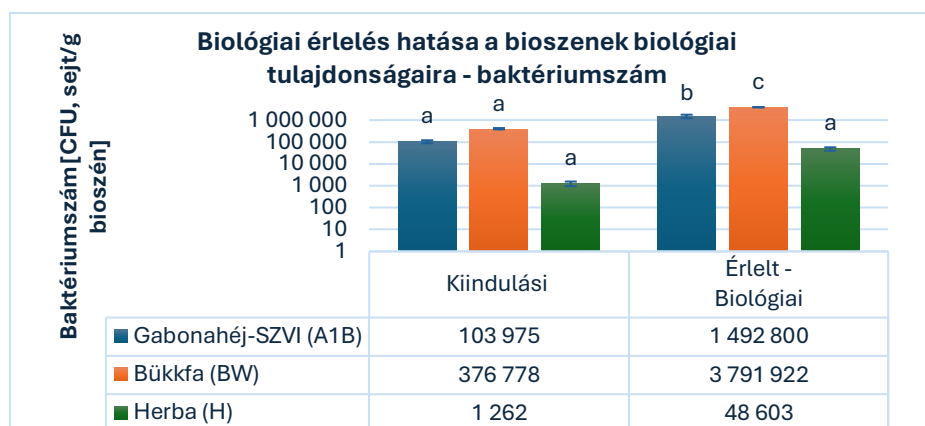
6. ábra. Kémiai és biológiai érlelés hatása a bioszén ökototoxicitására

Oleszczuk és Koltowski (2018) bioszenek érését vizsgáló tanulmányukban a *Folsomia candida* mortalitási teszt során megállapították, hogy az érlelés legtöbb esetben hátrányosan befolyásolta a *Folsomia candida* reprodukcióját, amit a bioszén magas kémhatásának, sótartalmának és PAH-tartalmának tulajdonítottak.

Esetünkben csak a Herba bioszén mutatott az érlelés hatására fellépő gátló hatás növekedést, ami a mikrobiális tevékenység során keletkező toxikusabb termékeknek is lehet köszönhető.

4.1.6. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszámra alakulása a biológiai érlelés hatására

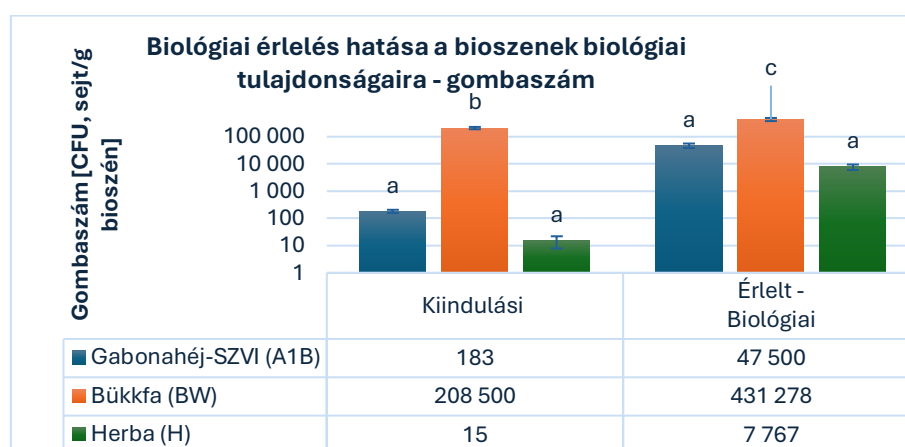
A 7. és 8. ábrán a biológiai érlelésnek a baktérium- és gombaszámra gyakorolt hatását láthatjuk. Az eredmények alapján megállapítható, hogy mindhárom bioszén esetén növekedés történt a telepképzésre alkalmas baktériumok számában, ami pozitív eredmény. Arányosan a legnagyobb növekedés a gyógynövény alapú Herba bioszén esetében történt, a kiindulási bioszénnél mért értékhez képest ~ 39%-kal több volt a képződött telepek száma. A gabonahéj-szennyvíziszap alapú A1B bioszén esetében ez a növekedési arány ~ 14%, a bükkfa alapanyagú bioszénél pedig ~ 10%.



7. ábra. Biológiai érlelés hatása a baktériumszámra

A mikroorganizmusok felelősek a talajban és a talajokban lezajló biológiai és biokémiai folyamatok lezajlásáért, amivel jelentősen befolyásolják a talajok minőségét, így eredményeink egyértelműen pozitív változásokat tükröztek az érlelések hatására.

Zhu és munkatársai (2017) szerint a megnövekedett mikrobaszám a bioszén jó adszorpciós felületként történő hasznosítását is szemlélteti.



8. ábra. Biológiai érlelés hatása a gombaszámra

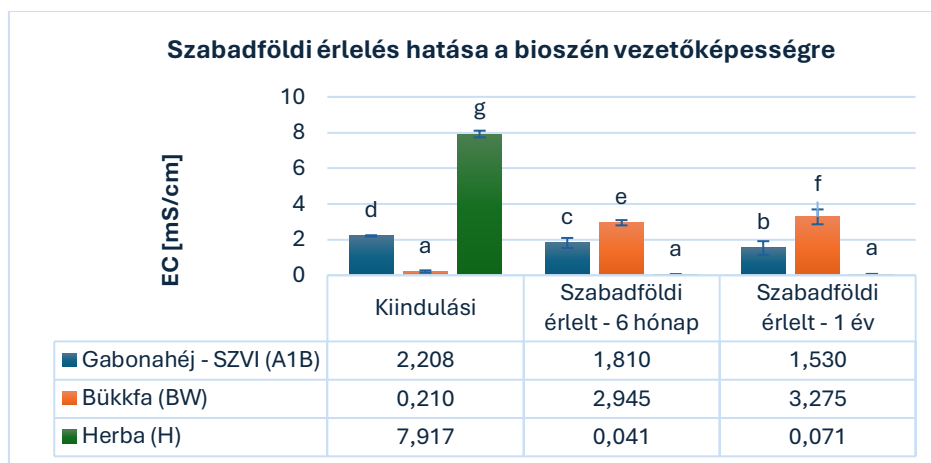
A telepképzésre alkalmas gombák számában is hasonló változásokat tapasztaltunk a mesterséges érlelés hatására, azaz növekedés történt a biológiai érlelés következményeként. Ez a növekedés az A1B és a H bioszén esetében látványosabb volt, az előbbinél ~ 260%-os (183 sejt/g-ról 47 500 sejt/g) volt a növekedés, a gyógynövény alapú bioszénnél pedig ~ 518%-os (15 sejt/g-ról 7 767 sejt/g). A bükkfa alapú bioszénnél a biológiai érlelés hatására megkétszereződött az 1 grammra vetített gombaszám.

4.2. Szabadszíri *in vivo* érlelés hatásai a bioszenekre

A szabadszíri érlelés koncepciója egy környezeti szempontból relevánsabb megközelítése a z érési folyamatok hatásvizsgálatának. Az *in vivo* természetes érlelés keretein belül az örbottyáni modellterületen végzett rövid (6 hónap) - és középtávú (1 év) érlelés eredményeit hasonlítom össze egymással és a kiindulási „friss” bioszenek eredményeivel.

4.2.1. Elektromos vezetőképesség (EC) és pH változásának alakulása az *in vivo* érlelés hatására

A 9. és 10. ábrán láthatók a szabadszíri érlelés hatása a bioszén elektromos vezetőképességére és kémhatára. Mind az elektromos vezetőképesség, mind a kémhatás értékekben a kiindulási bioszén adatokhoz képest szignifikáns változások történtek az érlelések hatására.



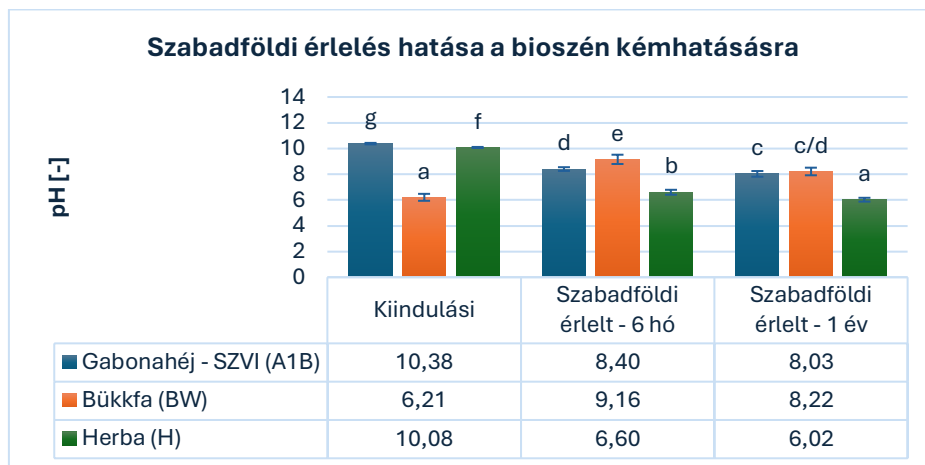
9. ábra. Szabadszíri érlelés hatása a bioszén vezetőképességére

Jelentősen csökkent a gyógynövény alapú bioszén EC értéke mindkét érlelés hatására, 7,9 mS/cm kiindulási értékről a 6 hónapos szabadszíri érlelés hatására 0,041 mS/cm-re, az 1 éves érlelés hatására pedig 0,071 mS/cm-re csökkent. A bükkfa alapú BW bioszén esetében a 6 hónapos érlelés hatására ~ 14-szeres, az 1 éves érlelés következtében pedig ~ 16-szoros növekedés történt az EC értékekben.

A gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszénnél is csökkenés következett be mindkét érlelés hatására: 6 hónapos érlelés után ~ 21%-kal, 1 éves érlelés után ~ 44%-kal csökkentek a kiindulási EC értékek.

A pH eredményei alapján (10. ábra) az A1B bioszén kémhatása átlagosan ~ 21%-kal csökkent mindkét szabadszíri érlelés hatására. A BW bioszén esetében növekedéssel járt mindkét természetes érlelés: a rövid távú ~ 47%-os, a középtávú érlelés ~ 32%-os növekedést

eredményezett. A H bioszénnél csökkenés történt a kiindulási 10,08-as pH-hoz képest. A 6 hónapos érlelésnél ~ 35%-kal, az 1 évesnél ~ 40%-kal csökkentek az értékek.

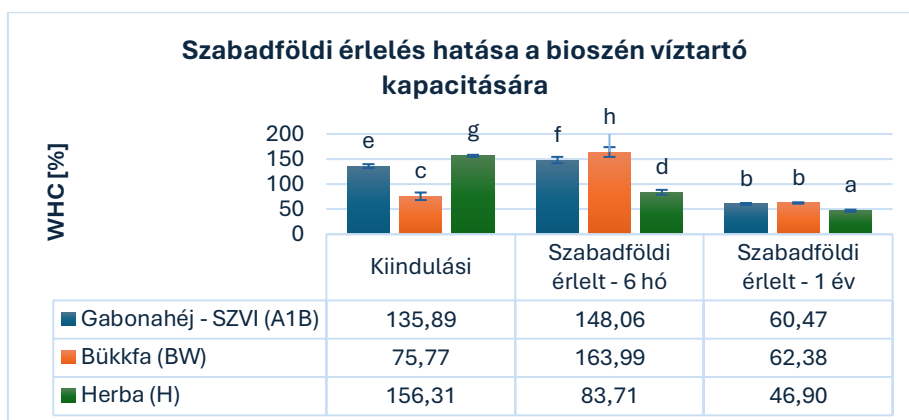


10. ábra. Szabadsföldi érlelés hatása a bioszén kémhatására

A csökkenés a pH-ban egybevág de la Rosa és munkatársainak (2018), Hale és munkatársainak (2011), valamint Sorrenti és munkatársainak (2016) kutatásaival is. A kutatócsoportok a pH csökkenését a bázikus csoportok (pl. karbonátok, oxi-hidroxidok) csökkenésével magyarázzák mállási folyamatok során. De adódhat a csökkenés a savas hatású karboxil csoportok keletkezéséből is az oxidációs folyamatoknak köszönhetően (Hale és mtsai, 2011).

4.2.2. A víztartókapacitás alakulása az *in vivo* érlelés hatására

A 11. ábrán látható a szabadsföldi érlelés hatása a bioszén víztartó kapacitására. Mindkét érlelés következtében szignifikáns változás történt a bioszenek víztartó kapacitásában: a 6 hónapos érlelés hatására növekedés, az 1 évesnél pedig csökkenés történt a mért értékekben, többnyire hasonlóan a mesterséges érlelési kísérlethez.



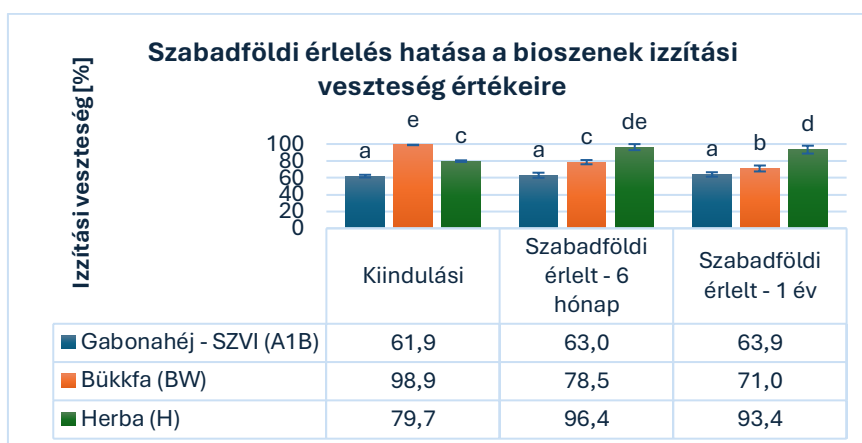
11. ábra. Szabadsföldi érlelés hatása a bioszén víztartó kapacitására

Az A1B bioszén értékei a 6 hónapos érlelés után ~ 9%-kal nőttek, az 1 éves érlelés következtében pedig ~ 55%-os csökkenést mutattak. A BW fa alapú bioszénnél a rövid távú érlelés hatására a WHC értékek kb. kétszeresére nőttek, a középtávú érlelésnél enyhén, ~ 18%-kal csökkentek. A gyógynövény alapú bioszén esetén a rövid távú természetes érlelés következtében ~ 46%-os csökkenés történt, a közép távú érlelésnél a kiindulásihoz képest megközelítőleg a kiindulási érték harmadára csökkentek a WHC értékek.

Ezek a csökkenések arra vezethetők vissza, hogy valószínűleg a szabadföldi érlelés során csökkenhetett a bioszenek pórustérfogata, amit Dong és munkatársai (2017) is tapasztaltak. Sorrenti és munkatársai (2016) szerint a bioszén pórusok két csoportba sorolhatók, felületi és az ún. bulk típusokba, amelyekből a víztartókapacitásért ez utóbbi típus a felelős. Azonban ezek a környezeti hatásokra és a víztelítettség változásaira képesek „összeomlani”, ezzel kisebb mélységű felületi pórusokat alkotva, amely szintén magyarázhatja a jelenséget.

4.2.3. Az izzítási veszteség alakulása az *in vivo* érlelés hatására

A 12. ábrán látható a szabadföldi érlelés hatása a bioszén izzítási veszteség értékeire. A gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén esetében nem történt szignifikáns változás az érlelések hatására (~ 3%-os növekedés). A bükkfa alapú bioszénél csökkenés következett be, a 6 hónapos érlelés hatására ~ 21%-os, az 1 éves érlelés hatására ~ 28%-os csökkenés. A gyógynövény alapú bioszén kémhatása növekedést mutatott mind a 6 hónapos, mind az 1 éves érlelés következtében.



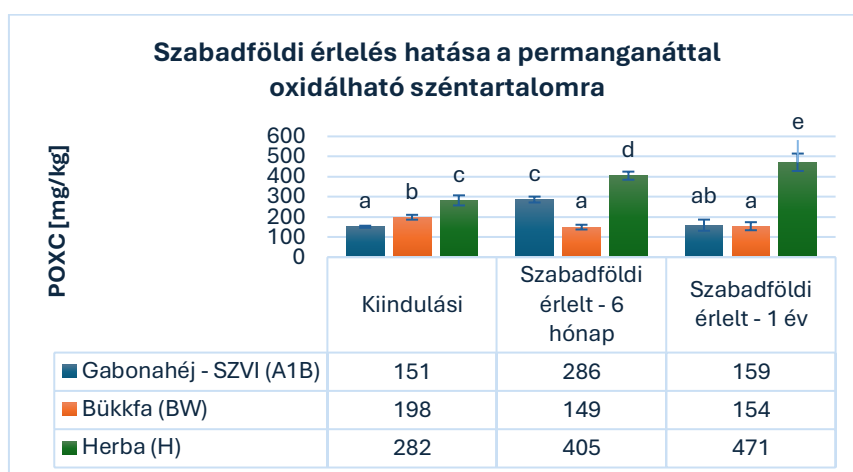
12. ábra. Szabadföldi érlelés hatása a bioszén izzítási veszteség értékeire

A növekvő értékek mikrobiális folyamatok felgyorsulásával értelmezhető, azaz a mikrobiális lebontásnak köszönhetően csökkent feltehetően az izzítási veszteség.

4.2.4. Bioszenek labilis széntartalmának alakulása az *in vivo* érlelés hatására

A 13. ábrán látható a szabadföldi érlelés hatása a bioszén POXC értékeire.

Az A1B bioszén esetében az 1 éves érlelés hatására nem történt szignifikáns változás (~ 5% növekedés), a 6 hónapos érlelés következtében azonban jelentős ~ 89%-os növekedést tapasztaltunk. A bükkfa alapú bioszénnél mindkét érlelés hatására – átlagosan ~ 23%-os – csökkenés következett be az értékekben. A két, eltérő ideig természetes körülmények között érlelt bioszenek eredményei nem mutattak szignifikáns különbséget. A gyógynövény alapú bioszén labilis széntartalom eredményei szignifikánsan eltértek az érlelések hatására: a rövid távú érlelés hatására ~ 44%-os, a közép távú érlelés hatására pedig ~ 67%-os növekedés történt.



13. ábra. Szabadföldi érlelés hatása a permanganáttal oxidálható széntartalomra

Érdekes változásokat mutatnak a POXC eredmények. Míg a kezdeti nagyobb POXC értékkel rendelkező herba bioszén esetén egyértelmű növekedést mértünk a biológiai érlelés hatására, addig a bükkfa bioszén esetén jelentős csökkenést kaptunk a POXC-ben a biológiai érlelés hatására. Feltehetően itt rendelkezésre állt az a labilis szénfrakció, amit a mikróbák tudtak hasznosítani, és tevékenységüknek köszönhetően csökken a POXC koncentráció.

Mindezek – a többi vizsgálathoz hasonlóan - alátámasztják, hogy a bioszén termékek talajra történő alkalmazása előtt *char by char* alapon szükségesek vizsgálatok.

4.2.5. Szerves széntartalom mennyiségének-, nitrogén formák előfordulásának-, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom alakulása a szabadföldi érlelés hatására

A kiindulási és *in vivo* 1 évig érlelt bioszenekből a következő fizikai-kémiai paramétereket határozták meg partnereink- a megadott szabványmódszerekkel- az Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani és Agrokémiai Intézetben (ATK TAKI):

- Szerves széntartalom: MSZ 21470-52: 1983;
- felvehető kálium- és foszfortartalom: MSZ 20135: 1999;
- Össz N [%] Kjeldahl módszer: ISO 11261: 1995;
- NH₄-N és NO₃-N KCL-os extraktumból: MSZ 20135: 1999.

Az 5. táblázat foglalja össze a szerves széntartalom, a különböző nitrogén formák, illetve a hozzáférhető foszfor- és káliumtartalom alakulását a szabadföldi érlelések hatására.

5. táblázat. Szerves széntartalom, nitrogén formák, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom mennyisége a bioszénben

		Szerves-C	AL-P ₂ O ₅	AL-K ₂ O	NH ₄ -N	NO ₃ +NO ₂ -N	Sum-N
		[m/m %]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[m/m %]
Kiindulási	<i>Bükkfa (BW)</i>	47 ^b	139 ^a	1 989 ^b	0,93 ^a	0,93 ^{ab}	0,23 ^a
	<i>Herba (H)</i>	43 ^{ab}	7 475 ^e	45 580 ^g	1,17 ^a	0 ^a	1,31 ^c
	<i>Gabonahéj - SZVI (A1B)</i>	22 ^{ab}	3 594 ^d	12 798 ^f	1,60 ^a	3,20 ^{ab}	1,04 ^b
Szabadföldi érlelt - 6 hó	<i>Bükkfa (BW)</i>	34 ^{ab}	2 710 ^b	5 547 ^e	0,44 ^a	2,12 ^{ab}	1,30 ^c
	<i>Herba (H)</i>	44 ^b	33 ^a	803 ^a	0,98 ^a	0,98 ^{ab}	0,22 ^a
	<i>Gabonahéj - SZVI (A1B)</i>	20 ^a	3 278 ^c	3 467 ^c	1,43 ^a	1,43 ^{ab}	0,98 ^b
Szabadföldi érlelt - 1 év	<i>Bükkfa (BW)</i>	44 ^b	2 832 ^b	4 477 ^d	0,99 ^a	4,73 ^b	1,37 ^c
	<i>Herba (H)</i>	46 ^b	27 ^a	635 ^a	1,76 ^a	1,76 ^{ab}	0,20 ^a
	<i>Gabonahéj - SZVI (A1B)</i>	21 ^a	3 127 ^c	2 406 ^b	0,98 ^a	3,98 ^{ab}	1,01 ^b

A szerves széntartalomról elmondható, hogy nem mutatott szignifikáns eltérést egyik mintában sem az érlelés hatására az adott bioszenek esetén.

Ugyanakkor a hozzáférhető foszfor mennyisége csökkent, a hozzáférhető kálium mennyisége pedig növekedett a bükkfa alapú bioszénnél mindkét érlelés hatására.

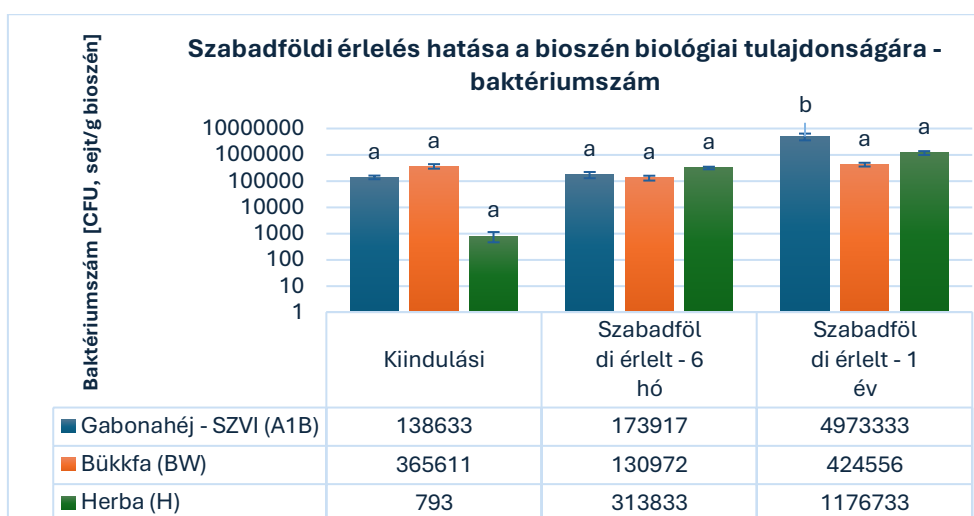
A gabonahéj-szennyvíziszap alapú A1B bioszén és a Herba bioszén esetén ezek a minták egymáshoz képest számottevően különböző mennyiségű hozzáférhető foszfort és káliumot

tartalmaztak, de mind a hozzáférhető foszfor, mind pedig a hozzáférhető kálium mennyisége csökkent mindkét érlelés következtében ezeknél a bioszén termékeknél.

Ez megnövekedett biológiai aktivitás következménye is lehet. Az összes nitrogéntartalom és a nitrogén formák viszont nem mutattak szignifikáns változást egyik érlelés hatására sem.

4.2.6. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszámra alakulása a szabadföldi érlelés hatására

A 14. és 15. ábrán látható a szabadföldi érlelés hatása a bioszén biológiai aktivitását is jelző aerob heterotróf baktérium- és gombaszámra.



14. ábra. Szabadföldi érlelés hatása a bioszén biológiai tulajdonságára - baktériumszám

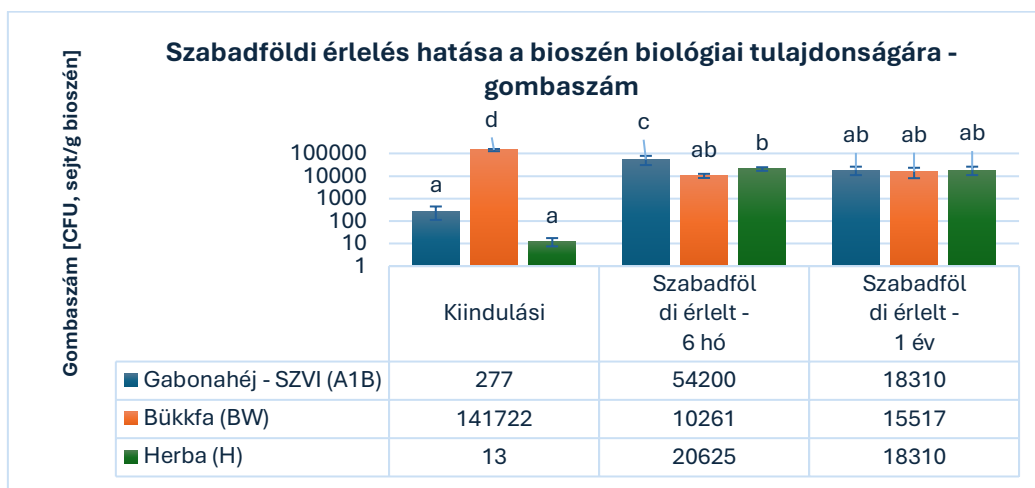
A telepkepző baktériumok mennyiségének tekintetében szignifikáns eltérést – növekedést - mutatott az A1B bioszén 1 éves érlelés után a többi mintához képest. Növekedést mutatott a baktériumszámban a Herba bioszén is, de ez nem volt szignifikáns.

Összességében elmondható, hogy az 1 éves érlelés hatására mindhárom bioszénnél növekedés történt a mért értékekben. Arányaiban tekintve ez a növekedés az A1B és a Herba bioszénnél volt a legjelentősebb. A hozzáférhető kálium és foszfor is összhangban van ezekkel az eredményekkel. A megnövekedett mikrobaszám Quan és munkatársai (2020) és Zhu és munkatársai (2017) szerint a bioszén jó adszorpciós felületként való hasznosításából fakadhat, illetve könnyen hasznosítható tápanyagokat (C, N, P, K) biztosít a baktériumok számára.

A telepkepzésre képes gombák mennyiségét (34. ábra) tekintve az A1B és Herba bioszenek esetében mindkét érlelés hatására növekedés történt. A BW bükkfa bioszén gombaszám értékei

viszont csökkentek az érlelések hatására. A gombaszámok esetében is elmondható, hogy a legjelentősebb növekedés a H bioszén esetében történt.

A középtávú érlelésen átesett bioszenek gombaszámában nem volt szignifikáns eltérés.



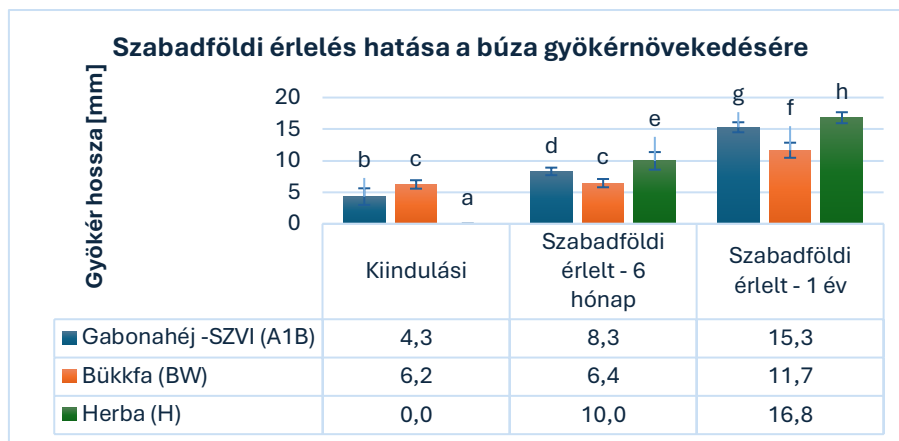
15. ábra. Szabadföldi érlelés hatása a bioszén biológiai tulajdonságára - gombaszám

4.2.7. Gyökérnövekedés alakulásának vizsgálata a szabadföldi érlelés hatására *Triticum aestivum* (közönséges búza) tesztorganizmussal

A 16. ábrán látható a bioszén hatása a közönséges búza gyökérnövekedésére. Kiemelten pozitív eredmény, hogy gyakorlatilag mindegyik bioszén érlelés után kedvezőbb hatást gyakorolt a növénynövekedésre, mint a friss bioszenek.

Az A1B bioszénél kapott értékek a 6 hónapos érlelés után ~ 93%-os, míg az 1 éves érlelés következtében pedig ~ 3,5-szeres növekedést mutatnak. A BW bioszén a 6 hónapos érlelés hatására nem mutatott szignifikáns eltérést, az 1 éves érlelés hatására viszont ~ 89%-os növekedés történt az gyökérhossz értékekben.

A Herba bioszénél mindkét érlelés hatására jelentős növénynövekedés történt. A „friss” bioszénnel végzett kísérletek során nem tapasztaltunk gyökérnövekedést, a rövid távú érlelés hatására, mutatva a bioszén toxicitását. Ugyanakkor a kiindulásihoz képest 10-szeres, az 1 éves érlelésnél pedig ~ 17-szeres növekedés történt a gyökérhossz növekedésben. Ez mutathatja a bioszén ökotoxicitásában történt csökkenést a szabadföldi érlelés hatására.

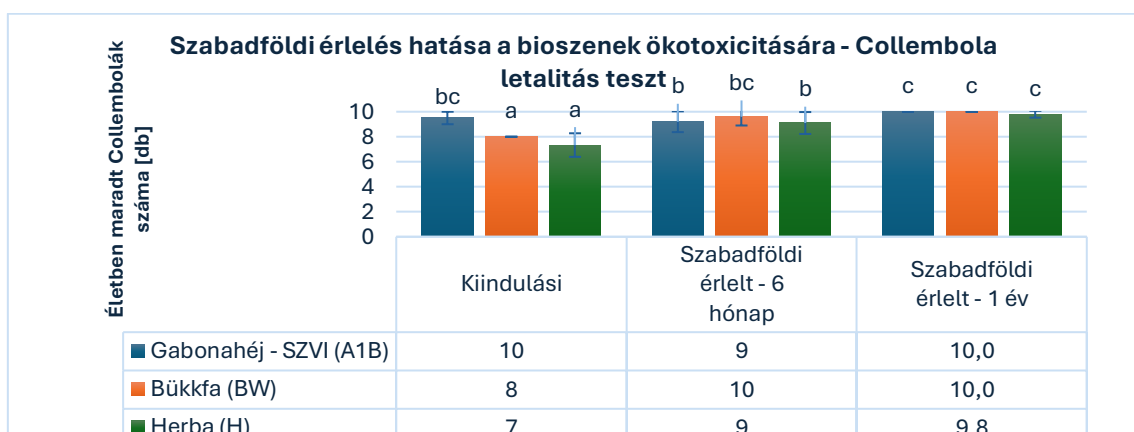


16. ábra. Szabadföldi érlelés hatása a búza gyökernövekedésére

4.2.8. A bioszenek ökototoxicitásának alakulása a szabadföldi érlelés hatására *Folsomia candida* talajlakó rovarral

A 17. ábrán látható a szabadföldi érlelés hatása a bioszén ökototoxicitására, az élő ugróvillás állatok számával jellemezve a hatások alakulását a talajlakó organizmus esetén.

Hasonlóan a növényteszt eredményekhez itt is kiemelendő pozitív eredmény, hogy minden tesztelt bioszén érlelés után kedvezőbb hatást gyakorolt a talajlakó állatra, mint a friss bioszenek. Az A1B bioszén érlelés előtt sem mutatott káros hatást, és nem történtek szignifikáns változások a kiindulási értékhez képest egyik érlelés hatására sem. A BW bükkfa alapú bioszén esetében mindkét érlelés hatására ~25%-os növekedés történt az élő állatok számában. A Herba bioszénél a 6 hónapos érlelés hatására ~29%-os, az 1 éves érlelés következtében pedig ~40%-os szignifikáns növekedés tapasztaltunk.



17. ábra. Szabadföldi érlelés hatása a bioszén ökototoxicitására

Összességében megállapíthatjuk, hogy a szabadföldi természetes érési folyamatok egyik bioszén esetén sem eredményeztek kedvezőtlen változást toxicitás szempontjából, sőt legtöbb esetben kedvező hatása volt az *in vivo* érlelésnek.

4.3. Összehasonlító értékelés

Fontos kiemelni, hogy a csökkenés a pH esetén nem jelent feltétlenül kedvezőtlen változást, mivel például az A1B és a Herba bioszén kiindulási pH értéke magas (pH~10).

Az eredmények alapján jól látható, hogy az eltérő bioszenekben az eltérő érlelések különböző változásokat eredményeztek. A mesterséges érlelés eredményei közül inkább a mesterséges biológiai érlelés hatása mutatott az *in vivo* érlelés hatásaihoz hasonló eredményeket. A legtöbb fizikai-kémiai, biológiai paraméterben kedvező változásokat tapasztaltunk minden bioszén esetén az érlelések hatására. Kivételt főként a víztartó kapacitás mutatta, de csak az 1 éves *in vivo* érlelés során. Ugyanakkor még az 1 érlelés után a bioszenek víztartó kapacitására kapott értékek is jelentősen meghaladják például a magyarországi homoktalajok jellemző víztartó kapacitását (25–35%), ami jól mutatja, hogy így is előnyös lehet alkalmazásuk vízgazdálkodási szempontból. A kockázatot jellemző toxicitási tesztek eredményei sem mutattak az érlelés hatására fellépő jelentős negatív változásokat és hatásokat.

5. Összefoglalás

A talaj komplex rendszere a többi természeti erőforrás hatásainak integrálásával és transzformálásával biztosít életteret, ezért kiemelkedő szerepe van a Föld ökoszisztémájának fenntartásában. Ugyanakkor az emberi tevékenység hatására talajaink minősége is jelentősen romlott, ami nem csak az ökoszisztéma fenntartásában jelent problémát, de a mezőgazdaságban és élelmiszeriparban is. A talajromlás és az ezzel együtt járó talajfunkciók romlásának kedvezőtlen következménye lehet például az alacsony szervesanyag- és tápanyagtartalom, rossz víztartóképeség, a talajok savanyodása, valamint az ezekkel is együtt járó csökkenő biomasszahozam. A hagyományos talajjavítási eljárások ma már egyre inkább háttérbe szorulnak, s helyüket átveszik az innovatív technológiák, melyeknek célja a fenntartható és környezetbarát eljárások kidolgozása a megfelelő hatékonyság biztosításával. A szerves hulladékok és/vagy melléktermékek hasznosítása egyaránt csökkentheti a környezetszennyezés és a természetes erőforrások felhasználásának mértékét, ezen felül energiamegtakarítással járhatnak.

A szerves hulladékokból és melléktermékekből pirolízissel előállított bioszén termékek talajra történő alkalmazása egyre nagyobb jelentőséget kap napjainkban, mind talajjavítási mind talajremediációs céllal. Ugyanakkor a bioszenek érése következtében fellépő változások komplex – környezeti hatásoktól is függő - felmérése, és ezen érési folyamatok következményeinek jellemzése, továbbá az erre alapuló alkalmazhatóságuk előrejelzésére csak néhány példa van a szakirodalomban.

Kutatásom során ehhez kapcsolódóan három eltérő alapanyagból – gabonahéj-szennyvíziszap, gyógynövény és bükkfa –, pirolízissel előállított bioszén termék érési folyamatait vizsgáltam mesterséges és természetes körülmények között. A kísérletek során két fázisban tanulmányoztam az érlelési folyamatok hatásait. Az első léptékben laboratóriumi *in vitro* mesterséges érlelési modellek alkalmazásával végeztem kísérleteket, majd 6 hónap és 1 év időtartamú szabadföldi *in vivo* kísérletek során tanulmányoztam a természetes környezeti hatások által kiváltott változásokat. A friss és érlelt bioszenek összehasonlító vizsgálatára integrált - fizikai-kémiai, biológiai és ökotoxikológiai módszereket magában foglaló – módszeregyüttest alkalmaztam, átfogó statisztikai értékeléssel.

A komplex metodika eredményei világosan tükrözték, hogy az érés során bekövetkező átalakulások egyértelműen meghatározzák a bioszén termékek hosszú távú hatásait, funkcionalitásukat a talajban és ezzel együtt alkalmazhatóságukat.

Az eredmények tükrözték azt is, hogy az érési folyamatok eredményeit mind a bioszén típusa, mind az érési folyamat befolyásolja.

Az alkalmazott mesterséges *in vitro* érlelés célja volt, hogy „lerövidítse” a természetes *in vivo* érés több évet felölelő időtartamát, és előre jelezhessük vele a bioszén termékek hosszú távú alkalmazhatóságát. A mesterséges *in vitro* és a természetes *in vivo* érlelések eredményeinek összesítése alapján ugyanakkor kijelenthető, hogy csak néhány olyan bioszén tulajdonság volt kutatásunkban, ami hasonló változást mutatott az eltérő érlelések hatására adott bioszeneknél. A mesterséges érlelés eredményei közül inkább a biológiai érlelés mutatott az *in vivo* érlelés hatásaihoz hasonló összefüggéseket és változási irányokat. Eredményeink alapján viszont önmagában sem a kémiai sem a biológiai érlelés nem ad egyértelmű és megbízható előrejelzést a bioszenek hosszú távú érési folyamatairól. Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy laboratóriumi körülmények között – a jelenlegi mesterséges érlelési metodikákkal – csak korlátozottan lehet a természetes hatásokat szimulálni, bár néhány esetben a biológiai érlelés jó megközelítést mutatott a természetes érlelés eredményeivel, de ez is csak adott bioszenek esetén.

Javaslatunk, komplex – kémiai, fizikai, biológia eljárásokat kombináló – mesterséges érlelési metodika kifejlesztése és beillesztése a bioszenek minősítési rendszerébe, ami hozzájárulhat a bioszén megbízható hosszú távú alkalmazhatóságának felméréséhez és előrejelzéséhez. Hasznos információkkal szolgálhat, és relevánsabb eredményeket adhat, ha az egyes bioszén termékeket egymás után több különböző érleléseknek alávetve teszteljük, valamint a monitoring metodika kibővítése is javasolt részletesebb fizika-kémiai vizsgálatokkal, például a fajlagos felület, porozitás tesztelésével.

Mivel a tanulmányozott bioszenek alapanyaga és előállítási technológiája jelentősen eltér egymástól, ez eredményezheti az eltérő érlelések hatására fellépő különböző változásokat. Ezért is szükséges az adott bioszenek talajra való alkalmazása előtt a *bioszénről-bioszénre* történő felmérés, „*char by char*” alapú vizsgálat.

Kutatásunk további kiemelt eredménye, hogy az érési folyamatok nem eredményeztek a bioszenek esetén jelentős kedvezőtlen - megbízható hosszú távú alkalmazhatóságukat akadályozó – hatásokat.

6. Irodalomjegyzék

1. Amalina, F., Razak, A. S. A., Krishnan, S., Zularisam, A. W., Nasrullah, M. (2022) A comprehensive assessment of the method for producing biochar, its characterization, stability, and potential applications in regenerative economic sustainability – a review. *Cleaner Materials* 3, 100045.
2. Beesley, L., Inneh, O. S., Norton, G. J., Moreno-Jiménez, E., Pardo, T., Clemente, R., Dawson, J. J. C. (2014) Assessing the influence of compost and biochar amendments on the mobility and toxicity of metals and arsenic in a naturally contaminated mine soil. *Environmental Pollution*, 186, 195–202.
3. Bidló, A., Bíró, B., Tombácz, E., Füleky, Gy., Horváth, E., Michéli, E., Pápay, L., Farsang, A. (2008) Talajvédelem, talajtan. Pannon Egyetem, *Környezetmérnöki Tudástár* 3.
4. Chen, B. (2020) Pyrolytic biochar stability assessed by chemical accelerating aging method. Kith Royal Institute of Technology. Degree Project in Materials Science and Engineering. Stockholm, Sweden 2020.
5. Chen, J., Chen, J-Z., Tan, M-Z., Gong, Z-T. (2002) Soil degradation: a global problem endangering sustainable development. *Journal of Geographical Sciences* 12(2), 243–252.
6. Chen, Y., Wu, Q., Tang, Y., Liu, Z., Ye, L., Chen, R., Yuan, S. (2022) Application of biochar as an innovative soil ameliorant in bioretention system for stormwater treatment: a review of performance and its influencing factors. *Water Science & Technology* 86 (5), 1232–1252.
7. de la Rosa, J. M., Rosado, M., Paneque, M., Miller, A. Z., Knicker, H. (2018) Effects of aging under field conditions on biochar structure and composition: Implications for biochar stability in soils. *Science of the Total Environment*, 613–614, 969–976.
8. Doan, T.T., Henry-Tes-Tureaux T., Rumpel, C., Janeau, J.L., Jouquet, P. (2015) Impact of compost, vermicompost and biochar on soil fertility, maize yield and soil erosion in Northern Vietnam: a three-year mesocosm experiment. *Science of the Total Environment*, 514, 147–154.
9. Dong, X., Li, G., Lin, Q., & Zhao, X. (2017) Quantity and quality changes of biochar aged for 5 years in soil under field conditions. *Catena*, 159, 136–143.
10. Duo, W., Peikun, J., Haibo, Z., Wenqiao, Y. (2020) Biochar production and applications in agro and forestry systems: a review. *Science of The Total Environment* 723, 137775.
11. Brevik, E. C., Creda, A., Mataix-Solera, J., Pereg, L., Quinton, J. N., Six, J., Van Oost, K (2015) The interdisciplinary nature of soil. *SOIL* 1, 117–129.
12. Feigl, V. (2013) Talajjavítás hulladékokkal. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem: Alkalmazott Biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék, Budapest.
13. Ghaffar, A., Gosh, S., Li, F., Dong, X., Zhang, D., Wu, M., Li, H., Pan, B. (2015) Effect of biochar aging on surface characteristics and adsorption behaviour of dialkyl phthalates. *Environmental Pollution* 206, 502–509.
14. Giovambattista, S., Caroline, A. M., Brandon, D., Moreno, T. (2016) Biochar physico-chemical properties as affected by environmental exposure. *Science of the Total Environment* 563-564, 237–246.
15. Gombolá, A. G., Torri, C., Vassura, I., Venturi, E., Reggiani, R., Fabbri, D. (2022) Effect of biochar amendment on organic matter and dissolved organic matter composition of agricultural soils from a two-year field experiment. *Science of the Total Environment* 812, 151422.
16. Hagner, M., Hallman, S., Jauhiainen, L., Kemppainen, R., Rämö, S., Tiilikkala, K., Setälä, H. (2015) Birch (*Betula spp.*) wood biochar is a potential soil amendment to

- reduce glyphosate leaching in agricultural soils. *Journal of Environmental Management*, 164, 46–52.
17. Haider, F. U., Coulter, J. A., Cai, L., Hussain, S., Cheema, S. A., Wu, J., Zhang R. (2022) An overview on biochar production, its implications, and mechanisms of biochar induced amelioration of soil and plant characteristics. *Pedosphere* 32(1), 107–130.
 18. Hale, S. E., K., Hanley, J., Lehmann, A. R. Zimmermann, G., Cornelissen (2011) Effects of chemical, biological, and physical aging as well as soil addition on the sorption of pyrene to activated carbon and biochar. *Environmental Science and Technology* 45, 10445–10453.
 19. Hall, D.J.M, Bell R.W. (2015) Biochar and Compost Increase Crop Yields but the Effect is Short Term on Sandplain Soils of Western Australia, *Pedosphere* 25, 720–728.
 20. Hamed, K. S. P., Mona, D., Yong, S. O., Abdul-Sattar, N., Benyamin, K., Solange, I. M., Mortaza, A., Mesiam, T., Su, S. L. (2020) A comprehensive review of engineered biochar: production, characteristics, and environmental applications. *Journal of Cleaner Production* 270, 122462.
 21. IBI (2015) Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in Soil. <https://biochar-international.org/>
 22. Inal, A., Gunes, A., Sahin, O., Taskin, M.B., Kaya, E.C. (2015) Impacts of biochar and processed poultry manure, applied to a calcareous soil, on the growth of bean and maize. *Soil Use and Management*, 31, 106–113.
 23. Jiang, Y., Li, T., Xu, X., Sun, J., Pan, G., Cheng, K. (2024) A global assessment of the long-term effects of biochar application on crop yield. *Current Research in Environmental Sustainability* 7, 100247.
 24. Király, Cs. (2008) Talajjavítás és talajvédelem. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, Budapest.
 25. Liu, C., Ye, J., Lin, Y., Wu, X., Prince, G. W., Wang, Y. (2024) Effect of natural aging on biochar physicochemical property and mobility of Cd (II). *Scientific Reports* 14, 22214.
 26. Liu, Y., Chen, J. (2022) Effect of aging on biochar properties and pollutant management. *Chemosphere* 292, 133427.
 27. Liu, Z., Demisie, W., Zhang, M. (2013) Simulated degradation of biochar and its potential environmental implications. *Environmental Pollution* 179, 146–152.
 28. Long, X., Yu, Z., Liu, S., Gao, T., Qiu, R. (2024) A systematic review of biochar aging and the potential eco-environmental risk in heavy metal contaminated soil. *Journal of Hazardous Materials* 472, 134345.
 29. Luo, C., Yang, J., Chen, W., Han, F. (2020) Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: Result from field experiments. *Geoderma* 369.
 30. Mukherjee A, Lal R. (2013) Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy* 3(2):313–339.
 31. Mukherjee, A., Zimmerman, A. R., Hamdaan, R., Cooper, W. T. (2014) Physicochemical changes in pyrogenic organic matter (biochar) after 15 months field-aging. *Solid Earth Discuss* 6, 731–760.
 32. Nyambo, P., Motsi, H., Chiduza, C., Malobane, M. E. (2023) Biochar ageing improves soil properties, growth and yield of red radish (*Raphanus sativus*) in a Haplic Cambisol, *PLoS ONE* 18(7).
 33. Oleszczuk, P., Koltowski, M. (2018) Changes of total and freely dissolved polycyclic aromatic hydrocarbons and toxicity of biochars treated with various aging processes. *Environmental Pollution* 237, 65–73.

34. Oliveria, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., Lu, H., Khanal, S. K. (2017) Environmental application of biochar: current status and perspectives. *Bioresource Technology* 246, 1110–122.
35. Oshunsanya, S. O. (2018). *IntechOpen*. Elérhető: Introductory Chapter: Relevance of Soil pH to Agriculture: <https://www.intechopen.com/chapters/64810>
36. Papageorgiou, A., Azzi, E. S., Enell, A., Sundberg, C. (2021) Biochar produced from wood waste for soil remediation in Sweden: carbon sequestration and other environmental impacts. *Science of the Total Environment* 776, 145953.
37. Quan, G., Fan, Q., Zimmerman, A. R., Sun, J., Cui, L., Wang, H., Gao, B., Yan, J. (2020) Effects of laboratory biotic aging on the characteristics of biochar and its water-soluble organic products. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121071.
38. Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., Bol, R. (2010) A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* 105, 47–82.
39. Sorrenti, G., Masiello, C. A., Dugan, B., & Toselli, M. (2016) Biochar physico-chemical properties as affected by environmental exposure. *Science of the Total Environment*, 563–564, 237–246.
40. Stefanovits, P., Filep, Gy., Füleky, Gy. (1999) Talajtan, Mezőgazda Kiadó, Budapest, Magyarország.
41. Tripathi, M., Sahu, J. N., Ganesan, P. (2016) Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, 467–481.
42. Tomczyk, A., Sokolowska, Z., Boguta, P. (2020) Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* 19, 191–215.
43. Ujaczki, É., Feigl, V., Molnár, M., Vaszita, E., Uzinger, N., Erdélyi, A., Gruiz, K. (2016) The potential application of red mud and soil mixture as additive to the surface layer of a landfill cover system. *Journal of Environmental Sciences* 44, 189–196.
44. Uzoma, K.C., Inoue, M., Andry, H., Fujimaki, H., Zahoor, A., Nishihara, E. (2011) Effect of cow manure biochar on maize productivity under sandy soil condition. *Soil Use and Management*, 27, 205–212.
45. Várallyay, György (2003) A talajok környezeti érzékenységeinek értékelése. *Tájökológiai lapok* 1 (1), 45–62.
46. Várallyay, György (2016) A talaj multifunkcionalitása és korlátozó tényezői. *Magyar Tudomány* 10, 1162–1174.
47. WBC (2023): World Biochar Certificate – Guidelines for a Sustainable Production of Biochar and its Certification. Carbon Standards International, Frick, Switzerland, (<http://www.european-biochar.org>), version 1.0 from 15th September 2023
48. Wang, L., O'Connor, D., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Shen, Z., Hou, D. (2020) Biochar aging: mechanisms, physicochemical changes, assessment and implications for field applications. *Environmental Science and Technology* 54(23), 14797–14814.
49. Weber, K., Quicker, P. (2018) Properties of biochar. *Fuel* 217, 240–261.
50. Zeba, N., Berry, T.D., Panke-Buisse, K., Whitman, T. (2022) Effects of physical, chemical, and biological ageing on the mineralization of pine wood biochar by a *Streptomyces* isolate. *PLoS ONE* 17(4).
51. Zhang, C., Liu, L., Zhao, M., Rong, H., Xu, Y. (2018) The environmental characteristics and applications of biochar. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 21525–21534.
52. Zhou, J., Liang, B., Yan, J., Zhao, W. (2012) „Lou soil”, a fertile anthropogenic soil with thousands of years of cultivating history. American Geophysical Union, Fall Meeting.

53. Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., Xing, B. (2017) Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental Pollution* 227, 98–115.