

# **Bioszenek érési viselkedésének komplex vizsgálata és jellemzése labortól a szabadföldi alkalmazásig**

## **Diplomamunka**

**Készítette:**

**Király Mihály Botond**

**Témavezető:**

**Dr. Molnár Mónika**

**Konzulens:**

**Molnár Szabina PhD hallgató**

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Vegyésszmérnöki és Biomérnöki Kar  
Alkalmazott biotechnológia és Élelmiszertudományi Tanszék

2023

# Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés.....	5
2. Irodalmi áttekintés .....	6
3. A talaj .....	6
3.1. A talaj fogalma és funkciói.....	6
3.2. A talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai .....	7
3.2.1. Fizikai tulajdonságok .....	7
3.2.2. Kémiai tulajdonságok .....	7
3.2.3. Biológiai tulajdonságok .....	8
3.3. Talajromlás, talajvédelem és talajjavítás .....	9
3.3.1. Talajromlás- természetes és mesterséges kiváltó tényezők .....	9
3.3.2. Talajjavítás hagyományos eljárásai .....	10
3.3.3. Talajjavítás innovatív eljárásai.....	12
4. A bioszén .....	12
4.1. A bioszén alapanyagától és pirolízis technológiától függő jellemzői .....	13
4.2. Bioszén tulajdonságai .....	15
4.3. Bioszenek felhasználási területei .....	15
4.4. Bioszén alkalmazása talajvédelemben.....	16
4.5. Talajjavítás bioszénrel a labortól a szabadföldre .....	17
4.5.1. A bioszén termékek talajjavítást célzó alkalmazásának főbb releváns eredményei.....	17
4.5.2. Minősítési rendszerek – a bioszén talajra alkalmazásának szabályozása .....	22
4.6. Bioszenek érése - érési folyamatok és következményeik.....	23
4.7. Bioszén érésének modellezése.....	23
4.7.1. Mesterséges érlelési módszerek típusai .....	23
4.8. Természetes érés és mesterséges érlelés - összehasonlító értékelés a szakirodalom alapján .....	26
5. Anyagok és módszerek.....	27
5.1. A kísérletek során vizsgált bioszenek és talajok tulajdonságai .....	27
5.2. Laboratóriumi érlelés.....	28
5.2.1. Fizikai érlelés .....	28
5.2.2. Kémiai érlelés hidrogén-peroxiddal.....	28
5.3. Szabadföldi érlelés.....	28
5.4. Az érlelés során alkalmazott monitoring módszerek.....	29
5.5. Fizikai-kémiai vizsgálati módszerek .....	30

5.5.1. Kémhatás és vezetőképesség meghatározása vizsgálat .....	30
5.5.2. Elemösszetétel vizsgálata röntgen fluoreszcens spektroszkópiás (XRF) módszerrel	30
5.5.3. Szerves széntartalom mennyiségének-, nitrogén formák előfordulásának-, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom mértékének vizsgálata.....	31
5.5.4. Izzítási veszteség meghatározása .....	32
5.5.5. Permanganáttal oxidálható szén meghatározása .....	32
5.5.6. Vízartó kapacitás (WHC) meghatározása .....	34
5.6. Biológiai vizsgálati módszerek.....	34
5.6.1. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám meghatározása lemezöntéssel (CFU meghatározás).....	34
5.7. Ökotoxikológiai-ökológiai vizsgálati módszerek .....	35
5.7.1. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Triticum aestivum</i> és <i>Sinapis alba</i> tesztnövényel .....	35
5.7.2. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata <i>Folsomia candida</i> rovarral.....	36
5.8. Az eredmények értékelésére alkalmazott statisztikai módszerek .....	36
6. Eredmények és értékelés .....	37
6.1. Mesterséges kémiai érlelés eredményei .....	37
6.1.1. pH és vezetőképesség alakulása a kémiai érlelés hatására .....	37
6.1.2. Elemtartalom alakulása a kémiai érlelés hatására.....	39
6.1.1. Izzítási veszteség alakulása a kémiai érlelés hatására.....	40
6.1.2. Vízartó kapacitás (WHC) alakulása a kémiai érlelés hatására.....	40
6.1.3. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Triticum aestivum</i> tesztnövényel a kémiai érlelés hatására .....	41
6.1.4. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata <i>Folsomia candida</i> rovarral a kémiai érlelés hatására .....	42
6.2. Mesterséges fizikai érlelés eredményei .....	43
6.2.1. pH és vezetőképesség alakulása a fizikai érlelés hatására .....	43
6.2.2. Elemtartalom alakulása a fizikai érlelés hatására .....	45
6.2.3. Izzítási veszteség alakulása a fizikai érlelés hatására .....	46
6.2.4. Vízartó kapacitás (WHC) alakulása a fizikai érlelés hatására .....	47
6.2.5. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám alakulása a fizikai érlelés hatására ..	47
6.2.6. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Triticum aestivum</i> tesztnövényel	49
6.2.7. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata <i>Folsomia candida</i> rovarral.....	50
6.3. Szabadföldi érlelés eredményeinek kiértékelése .....	51

6.3.1. pH és vezetőképesség alakulása a szabadföldi érlelés hatására.....	51
6.3.2. Elemtartalom alakulása a szabadföldi érlelés hatására .....	53
6.3.3. Szerves széntartalom mennyiségének-, nitrogén formák előfordulásának-, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom alakulása a szabadföldi érlelés hatására	54
6.3.1. Vízretartó kapacitás (WHC) alakulása a szabadföldi érlelés hatására .....	56
6.3.2. Izzítási veszteség alakulása a szabadföldi érlelés hatására .....	57
6.3.3. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám alakulása a szabadföldi érlelés hatására .....	58
6.3.4. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Sinapis alba</i> tesztnövényvel a szabadföldi érlelés hatására .....	60
6.3.5. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Triticum aestivum</i> tesztnövényvel	61
6.3.6. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata <i>Folsomia candida</i> rovarral.....	62
7. A szabadföldi és mesterséges érlelés eredményeinek összehasonlítása .....	64
8. Összefoglalás .....	67
9. Irodalomjegyzék .....	69
Melléklet.....	73

## 1. Bevezetés és célkitűzés

A Föld népességének növekedésével együtt jár a növekvő élelemiszerszükséglet, ami talajkészleteink intenzív és felelőtlen használatát, ezáltal talajaink minőségének romlását eredményezi. Az antropogén hatások okozta leromlott talajminőség javítására és egyúttal a hulladékhasznosítás mértékének növelésére is megoldást jelenthetnek a szerves hulladékokból és melléktermékekből pirolízissel előállított bioszén termékek (angol nyelvű szakirodalomban „*biochar*”). A bioszén talajban való alkalmazásának számos kedvező hatása lehet, ilyen például a szervesanyagtartalom és a tápanyagellátottság, valamint a talaj víztartó képességének javulása, és a termés hozam növekedése. A bioszén kedvező talajjavító képességének köszönhetően megnőtt a bioszénrel kapcsolatos kutatások száma, ugyanakkor ezek közül számos hívja fel a figyelmet olyan területekre, amelyek további részletes felméréseket igényelnek. A szakirodalom például ezek kapcsán kiemeli a szisztematikus megközelítés hiányát; miszerint lépcsőzetes kísérlettervezés és hosszú távú szabadföldi vizsgálatokra alapozva valósíthatók meg a későbbi hatékony és megbízható szabadföldi alkalmazások. Továbbá azt is kiemeli néhány felmérés, hogy a különböző bioszenek alkalmazhatóságát esetről esetre „*char by char*” alapon kell vizsgálni és értékelni. Emellett az éveken át tartó talajban történő öregedés (érés) során felléphetnek olyan változások a bioszenek jellemzőiben, amelyek az eredetileg kedvező tulajdonságok elvesztését eredményezik, emellett a talaj élővilágára nézve is kedvezőtlenek lehetnek. Ahhoz, több évre esetleg évtizedre előrelátóan biztonságosan alkalmazzuk a bioszén termékeket talajjavítás céljából, célszerű modellezni és vizsgálni az érés során fellépő hatásokat.

Kutatásom fő célkitűzése ezekhez a témakörökhöz kapcsolódva a bioszenek tulajdonságaiban az érés során bekövetkező változások komplex vizsgálata volt, mind „*in vitro*” laboratóriumi mesterséges gyorsított érleléssel, mind „*in vivo*” szabadföldi körülmények között. Tudományos munkám során azt is tanulmányoztam, hogy laboratóriumi mesterséges érleléssel megbízhatóan szimulálhatók-e a természetes érés során lezajló folyamatok. Komplex kísérletsorozatokban három eltérő bioszén termékkel, mind laboratóriumi körülmények között - modellezve a környezeti hatásokat -, mind szabadföldi (természetes érlelési) kísérletben elemeztem az érési folyamatok hatására bekövetkező változásokat a bioszén termékek jellemzőiben. A „friss” és „érlet” bioszenek összehasonlító vizsgálatát átfogó fizikai-kémiai, biológiai és ökotoxikológiai metodikával végeztem.

## 2. Irodalmi áttekintés

### 3. A talaj

#### 3.1.A talaj fogalma és funkciói

A talaj a földkéreg legfelső szilárd burka. A földkéreg felszínén levő kőzeteket különféle hatások formálják. Ilyen hatások lehetnek az élővilág talajformálása, az éghajlat, a vízrajzi adottságok és az emberi tevékenységek (Stefanovits et al., 1999). Ez a komplex képződmény egy négyfázisú diszperz rendszert alkot, amely a felszínen levő kőzetek fizikai aprózódása, kémiai mállása és biológiai átalakulása révén jön létre. A talaj a természeti környezet része, mely élőhelyet biztosít különféle organizmusok számára emellett természetes újrahasznosító rendszert alkot. Az újrahasznosításban a növények is nagy szerepet játszanak, ahogy az 1. ábra is szemlélteti.



1. ÁBRA A TALAJRA ÉRKEZŐ ENERGIA HASZNOSÍTÁSA (A KERTI TALAJ JAVÍTÁSA, 2017)

A talaj hatékony természetes „szűrőként” is működik, mely detoxikáló rendszerként is működik. Biztosítja az anyagok biológiai körforgását, továbbá képes felfogni és tárolni a rá érkező anyagok és energia egy részét (Éva Farkas, 2020), ennek köszönhetően a számos élőlény számára tápanyag forrásként is szolgál. A talaj számos kedvező tulajdonságát (pl. termőképesség) igyekeznek az ember is minél jobban kihasználni. Ezt különféle beavatkozások kíséretében végzi, aminek a hatására a talaj változásokon megy keresztül. Ezek a változások lehetnek időlegesek vagy tartósok, illetve kedvezőek vagy kedvezőtlenek (Stefanovits et al., 1999). A talaj egy széles zónát fed le, melynek alsóbb részei szinte érintetlenek, míg a felsőbb szinteket egyre nagyobb mértékben zsákmányolja ki az ember, mivel a gyarapodó népességnek egyre nagyobb a biomassza igénye. Ezért fontos felmérni a talaj állapotát, és szükség esetén javítani azt hatékony környezetbarát módszerekkel (Banwart et al., 2019).

## **3.2.A talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai**

### **3.2.1. Fizikai tulajdonságok**

A talaj biológiai és kémiai folyamataira nagy hatást gyakorolnak a talaj fizikai tulajdonságai. Ilyen, talajra jellemző fizikai paraméterek a szemcseösszetétel, szín, szerkezet, porozitás, térfogattömeg, sűrűség, vízgazdálkodási jellemzők, valamint levegő és hőgazdálkodási jellemzők. Ezek a jellemzők meghatározó szerepet töltenek be a talaj termőképességének alakításában. A talaj szilárd, folyékony és légnemű halmazállapotú alkotórészekből áll. A szilárd alkotórészek mérete a 0,002 mm-től egészen 2 mm-nél is nagyobb méretű lehet. A szilárd részecskék összetételét mechanikai összetétellel szokás jellemezni. A részecskék között járatok jönnek létre, ennek köszönhetően kialakul a hajszálcsovesség, amely a talaj vízellátottságában játszik nagy szerepet (Hartman, 2010).

### **3.2.2. Kémiai tulajdonságok**

A talajban mindig található a szemcsék között vízben kisebb-nagyobb mértékben oldódó vegyületek. Ezek a vegyületek víz segítségével tudnak áramlani a talajban, és jelenlétükkel befolyásolják a talaj összetételét, szerkezetét és termőképességét is. Ezek a vegyületek kétféleképpen oldódhatnak, egyrészt fizikai oldás útján, valamint kémiai oldás útján. Fizikai oldódás során az oldódó vegyület szerkezete nem változik meg míg kémiai oldódás során a vegyület szerkezete megváltozik és egy új anyag keletkezik (Stefanovits et al., 1999).

Szintén fontos kémiai jellemző a talajvízben oldott sókészletek tömegszázalékban megadott értéke, a vizes talajkivonatok elektromos vezetőképessége (EC) (Chodak et al., 2015a). Az elektromos vezetőképesség a talaj számos egyéb tulajdonságával összefüggésben van, így például a talaj agyagásvány összetételével, a humusz és mész tartalmával, kémhatásával és víztartalmával is (Kocsis et al., 2021). A talaj vezetőképességének mértéke nagyban összefügg a sótartalommal. Túl magas vezetőképesség indikálhatja, hogy túl sok só található az adott termőtalajban, ami a növények fejlődését gátolhatja. Ugyanakkor túl alacsony elektromos vezető képesség pedig éppen azt jelezheti, hogy nincs megfelelő mennyiségű só a talajban a növények számára (Measho et al., 2022).

A talaj fontos kémiai tulajdonsága a kémhatás. Egész pontosan nem a talajok pH-ját szoktuk vizsgálni, hanem a talaj oldatok pH-ját.

A pH-t befolyásolja a talajoldatok összetétele, illetve a bennük zajló kémiai és biológiai folyamatok és ezáltal megszabja, hogy mely organizmusok képesek megjelenni (Chodak et al., 2015b). A megfelelő növényi és mikrobiológiai folyamatoknak az 5,5 és 8,8 közötti pH tartomány kedvez legjobban. A pH befolyásolja a szerves anyag beoldódását. A beoldódás folyamatának a 6-os pH fölötti értékek segítik elő. A savasabb közeg a gombák fejlődésének kedvez, míg a bázikusabb közeg a baktériumok fejlődésének (Neina, 2019).

A talaj tulajdonságait nagyban befolyásolja a jelen levő kolloid rendszerek. Ezek két-három fázisú rendszerek, amikben a részecskék 1–500 nm nagyságúak. Ez talajkolloidok esetén 2  $\mu\text{m}$  is lehet. A részecskék mérete szerint megkülönböztetünk homo, illetve polidiszperz rendszereket. Homodiszperz rendszer esetén a benne levő részecskék azonos méretűek, míg polidiszperz rendszer esetén a benne levő részecskék különböző méretűek. A talajkolloidok mindig polidiszperz rendszerek. A talajkolloidok fő szerepe a víz és tápanyag gazdálkodás, a talaj fizikai tulajdonságainak kialakítása. A talajkolloidok gyakran pufferként szolgálnak, ez lehet mind sav-bázis mind pedig környezeti puffer. Ezek a pufferek képesek tompítani a talaj kémiai egyensúlyát érő káros hatásokat. A talaj kémiai egyensúlyára két tényező jelent nagy veszélyt. Az egyik a talaj tápanyag tartalmának pótlás nélkül történő kinyerése (Chodak et al., 2015b). A másik pedig a különféle nehézfémek által okozott szennyezések, melyek már kis mértékben is képesek az egyes biokémiai folyamatokat befolyásolni és ezáltal felborítani az egyensúlyt (Pan et al., 2020). Ezen veszélyek elkerülése és kiküszöbölése elengedhetetlen a termékeny talaj fenntarthatóságának érdekében.

### **3.2.3. Biológiai tulajdonságok**

A fizikai és kémiai tulajdonságok befolyásolják, hogy milyen élőlények képesek megélni a talajban. A talajban megjelenő élet az egészen apró mikroorganizmusoktól, a gombákon és növényeken át, az állatokig számos formában jelenik meg. A különféle élőlények jelentős szerepet játszanak az anyagkörforgásban és ezzel hatással vannak a fizikai és kémiai tulajdonságokra is. Ideális esetben egy egyensúly áll fel a fizikai kémiai és biológiai tulajdonságok között. A talajok fizikai és kémiai tulajdonságai teremtik meg az életfeltételeit a talaj élő részének, a „talajbiotának”. Ugyanakkor számos esetben felborul az egyensúly, ami talajdegradációhoz, a talaj minőségének romlásához vezethet.

Az egyensúly felbomlásának okait és hátterét a következő *Talajromlás- természetes és mesterséges kiváltó tényezői* fejezetben mutatom be.



### **3.3. Talajromlás, talajvédelem és talajjavítás**

#### **3.3.1. Talajromlás- természetes és mesterséges kiváltó tényezők**

A talajok állandó degradációs folyamatoknak vannak kitéve. Ezek a degradációs folyamatok lehetnek a természeti erők hatásai, vagy ember által előidézett degradációs hatás is (Takács, 2015).

A természeti erők hatása nagyban különbözhet a Föld egyes pontjain. Az éghajlat egy szignifikáns befolyásoló tényezője a természetes talajerózió mértékének. Általánosan elmondható, hogy a legfőbb természetes talajeróziót előidéző tényező a szél és a csapadék. Ezek hatásait ellensúlyozni tudja az adott éghajlatra jellemző növény és állatvilág jelenléte vagy éppenséggel a hiánya, valamint a környezet hőmérséklete és annak ingadozása is (Takács, 2015). A szélerózió, más néven defláció a világ számos pontján komoly problémát jelent. Ez igaz Magyarország több pontjára is. Szűkebb értelemben ezt úgy is meg lehet fogalmazni, hogy a defláció nem más, mint a földfelszín szél által történő letarolása. Az ilyen jellegű erózió legnagyobb hatását a lazább szerkezetű talajokon képes kifejteni, mint például a löszös vagy homoktalajok (Takács, 2015).

A defláció legfőbb okai a talajt takaró növényzet hiánya. Ez jelentheti mind az erdősávok hiányát mind pedig a gyepes területek hiányát. A szélerózió mértékét meghatározó tényezők közé tartozik a szél sebessége és örvénylése, ezen felül fontos számításba venni a deflációs terület kitétségét is (Takács, 2015).

A víz által okozott erózió nagyobb, illetve rendszeres esőzések során képes kifejteni a pusztító hatását. Ez a fajta erózió a talajt lassan károsítja. Normális esetben ezt a folyamatot kiegyensúlyozza a talajképződés folyamata, ám megfelelő növényzet és élővilág hiányában az egyensúly eltolódik az erózió irányába. Vízerózió során három folyamat együttes munkájáról beszélhetünk. Az esőzések hatására fellazul a talaj felső rétege. A fellazulást követően elegendő víz jelenlétében a talajszemcsék egy része elszállítódik a víz által kialakított vízereken keresztül, ilyen vízerek láthatóak a 2. ábrán is. Valamint a fellazított részecskék másik része pedig a vízzel együtt a földkéreg alsóbb részébe szállítódik, és ott a földréteg összetömörödik. Az összetömörödés hatására a talajszemcsék között kevesebb víz, illetve levegő maradhat meg, ezáltal rontva a talaj termőképességét (Abiot Ketema & G. S. Dwarakish, 2019).



2. ÁBRA A VÍZ ÉS A SZÉL ERÓZIÓS HATÁSA (A VÍZ ROMBOLÓ EREJE: ERÓZIÓ - NÉBIH)

A különféle emberi tevékenységek akár olyan mértékű talajeróziót is okozhatnak, amely visszafordíthatatlan változásokkal jár. Ez járhat azzal, hogy a talaj szerkezete, illetve a funkciója megváltozik, szélsőséges esetben akár a teljes talajréteg elvesztése is bekövetkezhet. Ezek olyan fizikai, kémiai és biológiai hatások lehetnek melyek meghaladják a talaj stressztűrő képességét. Az ilyen változásokat állandónak tekinthetjük, ha a talaj nem képes évtizedek alatt magától regenerálódni. Ilyen esetben tudatos emberi közbelépés szükséges, amely segítségével az erózió hatásai megállíthatóak, vagy ideális esetben még vissza is fordíthatóak (*1. Talaj Fogalma, Funkciói, Tulajdonságai (A) - 1. Talaj Fogalma, Funkciói, Tulajdonságai (A) A - Studocu*)

### 3.3.2. Talajjavítás hagyományos eljárásai

Abban az esetben, ha az adott méretű földterületünk veszít a termőképességéből nem fog megoldást nyújtani számunkra, ha újabb földterületeket fogunk be mezőgazdasági célokra. Termőképesség romlása esetén meg kell próbálnunk regenerálni a talajt, a termőterületet, egyedül csak ez nyújthat fenntartható megoldást.

A talajjavító technológiák, másnéven meliorációs technikák célja a talajok termőképességének megőrzése, fenntartása és javítása. Ezen felül a kedvezőtlen természeti tényezők kiküszöbölése. Kedvezőtlen természeti tényező lehet például az elsavasodás, talajtömörödés, beiszapolódás, belvív, illetve az aszály. Az alábbi műveletek sorolhatók a meliorációs, vagy talajjavítási műveletek közé (Dr. Hajdú József, 2018):

- Rigolozásos talajforgatás: Ezen módszer során rigol ekével 50–60 cm mély szántást végeznek. Ennek eredményeül a felső humuszban gazdagabb réteg a mélyebb rétegekbe forgatódik át, ahol majd később a növények gyökérzete lesz jelen (Szentés, 2022).
- Mélyítő szántás, lazító szántás: Mélyítő szántást abban az esetben alkalmazunk, amikor eddigi szántás fajtákkal még nem sikerült áttörni a talaj vízzáró rétegét. Ezzel a módszerrel a talaj vízháztartásának javítása a cél (Dr. Hajdú József, 2018). A mélyítő szántás kivitelezése látható az alábbi 3. ábrán.



3. ÁBRA A MÉLYÍTŐ SZÁNTÁS KIVITELEZÉSE A GYAKORLATBAN (DR. HAJDÚ JÓZSEF, 2018)

- Mélylazítás, talajjavító szerek és műtrágyák kijuttatása: Mélylazítás műveletét abban az esetben szokták alkalmazni, amikor a művelt földterület hajlamos tömörödéssre és beiszapolódásra, ezen felül rossz a vízbefogadó képessége (Fizikai És Kémiai Talajjavító Eljárások | Pannon Enciklopédia | Kézikönyvtár).
- Mészszórás, meszezés: A mésszórás egy tipikus talajjavítási módszer, amely során az elsavanyodott talajokra magas kalcium tartalmú meszet juttatnak ki. Ezt a meszet beledolgozzák a talajba ezáltal befolyásolva a talaj pH-ját (Király, 2008).
- Ideiglenes és tartós vízvezető árok nyitása: Rossz szerkezetű talajokon, vagy olyan területeken, ahol mély a tábla fekvése, egy nagyobb esőzés, vagy a tavaszi olvadás során megjelenhet a talajvíz. Ilyen területeken szoktak vízvezető árkokat létrehozni mely elvezeti a felgyülemllett talajvizet.
- Alagsövezés a felesleges talajvíz elvezetésére, aszály esetén a talaj vízfeltöltésére: Az alagsövezés egy olyan technológia melynek kialakításkor nagy precizitás, valamint a művelni kívánt terület pontos 3 dimenziós ismerete szükséges. Ez a módszer képes túl magas talajvíz esetén elvezetni a vizet egy gyűjtő árokba vezeti. Ugyanakkor aszály során a vizet a gyűjtőárokából vissza képes vezetni a földekre ezáltal megóvni a talajt a kiszáradástól (Dr. Hajdú József, 2018).

### 3.3.3. Talajjavítás innovatív eljárásai

A talajjavítás innovatív eljárásainak gyakran áll a középpontjában különféle hulladékok hasznosítása. Ilyen innovatív eljárás például a vörösiszap segítségével történő talaj kezelés. Egyes kutatások megállapították, hogy kis koncentrációjú vörösiszap elősegítheti a kedvezőtlen adottságú talajok víztartó kapacitásának javulását. Sőt a foszforra és különféle tápanyagokra mobilizáló hatással lehet, valamint az ionos toxikus fémekre pedig stabilizáló hatással lehet (Ujaczki, 2012). Más kísérletek során széntüzelésű erőművi pernyét, komposztált szennyvíziszapot és nyers, préselt szennyvíziszapot alkalmaztak, mint potenciálisan talajjavításra alkalmas hulladékot. Ezen kísérletsorozatok eredménye azt mutatta, hogy a komposztált és a nyers szennyvíziszap is alkalmas lehet a talaj kálium, foszfor, nitrogén és humusz tartalmának növelésére. Ahhoz, hogy ezt a technológiát hatékonyan és kockázatmentesen alkalmazni tudjuk és megértsük a lezajló folyamatokat alapos felmérés és tervezés szükséges (Böröndi et al., 2012).

Manapság egyre elterjedtebbnek számít különféle bioszenek alkalmazása talajjavítás és talajremediációs célokból. A talajjavítás keretében, a talajok minőségének és termékenységének szempontjából kedvező stratégia a bioszenek alkalmazása (Bacsárdi et al, 2015). A bioszén, illetve bioszén termékek tulajdonságainak és alkalmazhatóságának vizsgálatával foglalkoztam én is kutatásom során. A következő fejezetekben a talajjavítást célzó bioszén alkalmazást háttérét ismertetem, kiemelt hangsúlyt fektetve a bioszén termékek jellemzőire.

## 4. A bioszén

A bioszén nagy széntartalmú finomszemcsés, porózus, nagy felülettel rendelkező, hulladékokból és melléktermékekből pirolízissel előállított termék. A bioszén elnevezése az angol szakirodalomban *biochar*. Alapanyaga általában valamilyen hulladék biomassza, melynek összetétele rendkívül sokféle lehet. Az esetek többségében ez valamilyen növényi alkotórész, de előfordulnak olyan bioszenek melynek alapanyaga állati eredetű (Gábor Szöllősi, 2018). Állati eredetű alapanyag tehéntrágya is, mely a pirolízisnek köszönhetően talajjavításra alkalmas anyaggá alakul át (4. ábra).

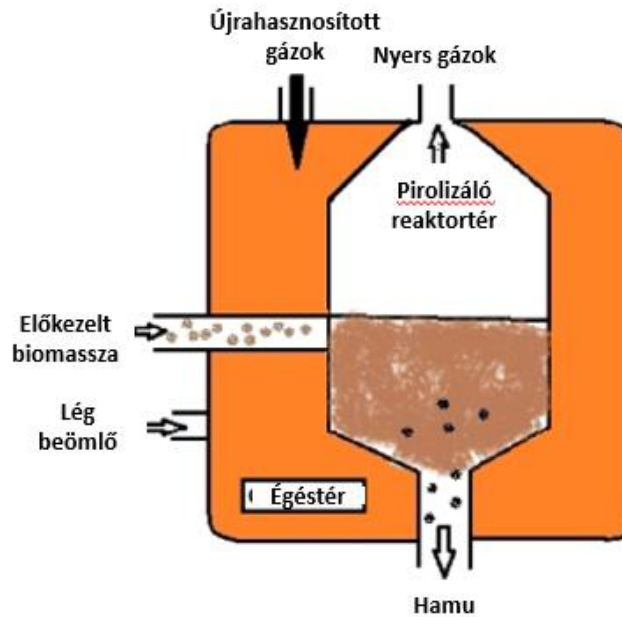


4. ÁBRA A BIOSZÉN A MEZŐGAZDASÁG CSODASZERE? (SZIMPATIKA – TEHÉN-MASZKKAL CSÖKKENTENÉK A METÁNSZENNYEZÉST)

#### 4.1.A bioszén alapanyagától és pirolízis technológiától függő jellemzői

A bioszén terméke előállításának kulcs művelete a pirolízis. A pirolízishez olyan speciális reaktorra van szükség (5. ábra), amely fűthető, és a benne lévő anyagot képes az oxigéntől elzárni. Az egész folyamat célja, hogy a hulladéknak számító biomasszát vissza lehessen forgatni a szén körforgásába, úgy, hogy közben a környezet számára is hasznos terméket nyerhessünk. Alapanyagtól függően változhatnak a pirolizáló berendezés egyes részei, valamint a pirolízis folyamatának körülményei, de a folyamat elve ugyanaz marad (Al-Rumaihi et al., 2022).

A folyamat során a lignocellulóz komponensei, így a cellulóz, hemicellulóz és a lignin, depolimerizálódnak, hasadnak és egymással keresztkötéseket hoznak létre. A folyamat végére szilárd, folyékony és légnemű termékeket kaphatunk, a technológia beállításaitól függően különböző arányokban. Folyékony termékek például az egyes biolajok, légnemű a szén-dioxid, szén-monoxid és a szintézis gáz, valamint számunkra legfontosabb a szilárd termék, ami a bioszén. A különféle halmazállapotú termékek mennyisége és összetétele nagyban függ attól, hogy milyen jellegű alapanyaggal történik a pirolízis, valamint attól is, hogy mekkora hőmérsékleten történik a folyamat kivitelezése. Általánosságban elmondható, hogy a magasabb hőmérsékleten történő pirolízis során csökken a bioszén formájú termék keletkezése, és nagyobb mértékben fog termelődni a szintézis gáz (Shrivastava et al., 2021).



5. ÁBRA EGY PIROLIZÁLÓ BERENDEZÉS ÁLTALÁNOS FELÉPÍTÉSE (YAASHIKAA ET AL., 2020 ALAPJÁN)

A folyamat sebességét tekintve megkülönböztetünk gyors és lassú pirólízist. A gyors pirólízis folyamata során a fűtési sebesség nagyobb mint  $100^{\circ}\text{C}/\text{percel}$  történik, ezen felül a felfűtött anyag kevés időt tölt magas hőmérsékleten ( $400\text{-}600^{\circ}\text{C}$ ). A folyamat célja minél több anyagot gázhalmazállapotba hozni, majd ennek a gáznak a gyors lehűtésével jó minőségű bio olajat lehet kinyerni. Lassú pirólízis során a fűtési sebesség közel  $5\text{-}7^{\circ}\text{C}/\text{percel}$  történik és az anyag is több időt tölt el a felfűtött hőfokon, ez több órát is jelenthet. A lassú pirólízis folyamata a bioszén formájú termék keletkezésének kedvez (Yaashikaa et al., 2020).

Alapanyagot tekintve megkülönböztetünk fás és nem fás biomasszát. A Fás biomassza alapvetően fahulladékokat és erdészeti maradványokat foglal magában. Az ilyen jellegű biomasszára az alacsony nedvességtartalom, a kevés idegen anyag, a kisebb mértékű üregesség a nagyobb sűrűség és a magasabb fűtőérték jellemző. A nem fás biomassza általában állati, valamint ipari és mérőgazdasági hulladékokból áll össze. A nem fás biomassza jellemzői magasabb idegenanyag tartalom, magas nedvesség, nagyobb mértékű üregesség, alacsonyabb sűrűség és alacsonyabb fűtőérték jellemző. Elmondható, hogy az alacsonyabb nedvesség tartamú anyag a kedvezőbb, mivel így a pirólízis során történő fűtéshez kisebb mértékű a befektetendő energia mértéke (Yaashikaa et al., 2020).

## 4.2. Bioszén tulajdonságai

Az egyes bioszenek változatos fizikai és kémiai tulajdonságokkal rendelkezhetnek annak függvényében, hogy milyen alapanyagból, valamint milyen körülmények között történt az előállításuk. Általánosságban elmondható, hogy a bioszénrel kezelt talajoknál víztartókapacitás növekedést, valamint a talaj levegőtartalmának a növekedését tapasztalhatjuk. Ennek mértékét az adott bioszén fizikai tulajdonságai befolyásolhatják, ilyen például a porózus szerkezet, aminek köszönhetően adszorbensként is viselkedik a bioszén. Szignifikáns jelentőséggel bírhat a bioszén olyan talajok esetén melyek kolloidban szegények, mivel a pórusok élőhelyet nyújthatnak különféle mikroorganizmusok számára ezáltal lehetőség nyílik egy biofilm réteg kialakulására (Kocsis Tamás & Dr. Biró Borbála, 2018.).

A legfontosabb és meghatározó kémiai tulajdonságai közé tartozik a pH, a funkciós csoportok (-COO; -OH; -CO; -R-OH) jellege, tápanyagtartalma, a szénmegkötés és kation cserélő kapacitás mértéke (Reményi Marietta, 2019.). A pH beállítása céljából főképpen savas kémhatású talajokhoz szokták ajánlani a bioszenet. Ennek oka, hogy a pirolízis folyamata során savas jellegű funkciós csoportok eliminálódnak, és így a megmaradó szilárd forma bázikus jellegűvé válik. Ezáltal képes a talaj kémhatásának megnövelésére. A kation adszorpciónak köszönhetően képes javítani a talaj tápanyagmegtartó képességét, így előnyösen növelheti annak termékenységét (Kocsis Tamás & Dr. Biró Borbála, 2018.).

## 4.3. Bioszenek felhasználási területei

Ahogy az előző *Bioszén tulajdonságai* fejezetben ismertettem, a bioszenek fizikai és kémiai tulajdonságait nagyban befolyásolja, hogy milyen alapanyagból készültek. Felhasználásuk és alapanyagaik tekintetében napjainkban már találhatunk előírásokat. Az Európai Unió területén az EU 2019/1009 jelű rendelet alapján meg van határozva a CMC14 összetevő kategória szerint, hogy milyen alapanyagból készülő termékből lehet bioszenet előállítani. Ezek alapján csupán az a termék nevezhető bioszénnek, ami az élelmiszerfeldolgozó iparból származó növényi hulladékot és a cellulóz előállításából származó olyan szálas növényi hulladékot tartalmaz melyeket vegyi úton nem kezelték. Ezen felül a szintén felhasználható alapanyagok a biodízel és bioetanol gyártásból származó feldolgozási maradék, valamint felhasználható a 2008/98/EK irányelv 3. cikkének 4. pontja szerinti biohulladék, amely a keletkezési helyén elkülönítetten gyűjtött (Nutrient Management and Nutrient Recovery Thematic Network [www.Nutriman.Net](http://www.Nutriman.Net), 2020.).

Mára már számos ágazatban használnak bioszenet, beleértve az ipart, a mezőgazdaságot, és a környezetvédelmet is. A mezőgazdaságban fontos szerepet játszik, mint talajjavító alapanyag. Így nem csak a talaj fizikai tulajdonságai válnak előnyösebbé, de a termékenységének mértéke is nőhet. Egyre elterjedtebbé válik, mint építőipari alapanyag. A rossz hővezetési tulajdonságának köszönhetően kiválóan használható szigetelésként. Ezen felül levegőszűrőnek, valamint páramegkötő anyagként is szokták használni. A jelentős és változatos mérettartományokban megjelenő szűrő és adszorpciós képességét vizek tisztítására is szokták alkalmazni. Alkalmazznak bioszenet szennyvíztisztító telepeken is. Kis méretű mikroszűrők formájában pedig a háztartásokban jelenhetnek meg, mint csapvíz szűrő berendezés töltete. (Schmidt HP & Wilson K, 2014).

Ugyanakkor fő alkalmazási területe a kedvezőtlen adottságú talajok javítása, amit a következő fejezetben mutatok be részletesebben.

#### **4.4. Bioszén alkalmazása talajvédelemben**

Bioszenes talajjavítás során az a célunk, hogy bioszén segítségével javítsuk a talaj fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságait. Általánosságban elmondható, hogy a bioszénrel kevert talajoknak csökken a sűrűsége. Ennek az az oka, hogy a bioszénnek jóval kisebb a sűrűsége, mint általában a talajnak, ezáltal könnyebb a talajon áthatolni, így a növények gyökérzete könnyebben és nagyobb mértékben képes a növekedésre. Szintén egy kedvező hatás a talaj porozitásának és fajlagos felületének a növekedése. A pórusoknak és a nagyobb felszínnek köszönhetően, a kezelt talajok szignifikánsan nagyobb víz megtartó képességet mutatnak a kezeletlen talajokhoz képest. Ez nem csak abban nyilvánul meg, hogy több vizet képes a talaj megtartani, hanem abban is, hogy a kiszáradás folyamata sokkal lassabb. Ez a megkötött víz nem feltétlenül elérhető a növények számára, mert azt nem képesek kinyerni a szén apró pórusaiból, viszont a talaj szerkezetének stabilitásában számottevő szereppel rendelkezik ez a megkötött talajnedvesség tartalom. Ugyanakkor a 450 °C alatt pirolizált bioszenekben visszamaradhatnak olyan szerves vegyületek melyek hidrofób tulajdonságot eredményeznek. Ez megnövelheti a kezelt talajban történő vízáramlás mértékét, ezáltal megnőhet az erózió, a tápanyag és az ionok kimosódásának a mértéke (Brassard et al., 2019).

A legtöbb esetben megfigyelhető, hogy a talajhoz hozzáadott bioszén a talaj-pH emelkedését okozza. Ennek mértéke függ a bioszén kation tartalmától, mint például a nátriumion, kalciumion és magnéziumion.



A kationok a felületen található karboxil és fenolos jellegű funkció csoportoknak köszönhetően képesek jelen lenni. A pH emelkedését az is okozhatja, hogy alumínium és a hidrogén képes a bioszén felületén adszorbeálódni. A pH változást fontos nyomon követni, mert nagy mértékben képes befolyásolni a növények számára fontos tápanyagok elérhetőségét (Brassard et al., 2019).

Több kutatás alátámasztja, hogy a bioszenes kezelés hatására megnőtt a talaj mikroorganizmusok számára könnyebben hozzáférhető szén tartalma. Ez annak köszönhető, hogy lelassult a talajban található szén mineralizációja. Ezen felül azt is kimutatták számos kutatásban, hogy az alacsonyabb hőfokon pirolizált bioszenek nagyobb mértékben képesek szerves szénvegyületeket juttatni a talajba (Brassard et al., 2019).

## **4.5. Talajjavítás bioszénrel a labortól a szabadföldig**

Ebben a fejezetben olyan kutatási eredményekből mutatok be néhányat, melyek megegyeznek az általunk is alkalmazott és tesztelt bioszén termékek alapanyagaival. Ezen bioszenek közé tartozik a bükkfa alapanyagú, a gabonahéj és szennyvíziszap, valamint a gyógynövény keverék alapú bioszén.

### **4.5.1. A bioszén termékek talajjavítást célzó alkalmazásának főbb releváns eredményei**

#### **4.5.1.1. Bükkfa alapú bioszenek alkalmazásának eredményei**

Egyes kutatások a talaj Cu(II) és Cd(II) tartalmának megkötését vizsgálták bükkfából készült bioszén segítségével. A vizsgálat során több pirolízis paramétert is teszteltek annak céljából, hogy nyomon tudják követni, mely célhőmérséklet és mely fűtési sebesség eredményezi a legjobb karakterisztikákkal rendelkező bioszenet. Célhőmérsékletnek a 400, 500, 600 és 700 °C értékeket vizsgálták, míg fűtési sebesség szempontjából a 2K/min és a 10 K/min értékeket. A különféle célhőmérsékletek és felfűtési sebességek nem befolyásolták szignifikánsan a megkötött Cd(II) mennyiségét. Az átlagosan megkötött Cd(II) mértéke közel 0,08–0,09 mmol/g volt. A végső hőmérséklet változtatása nem okozott szignifikáns változást a Cu(II) megkötés mértékében sem. Ugyanakkor a lassabb melegítés nagyobb Cu(II) megkötést eredményezett (Štefelová et al., 2017).

A különféle anyagok megkötése szempontjából kritikus paraméter a nagyobb felület. Minél több pórusal rendelkezik az adott bioszén, annál nagyobb felülettel rendelkezik. Ezek alapján arra lehetne következtetni, hogy a nagyobb felülettel arányosan nő az adszorpció mértéke. Ezt viszont cáfolta Štefelová és munkatársai kutatása. Eredményeik alapján azt a következtetést vonták le, hogy a több pórus csupán abban az esetben eredményezhet nagyobb hasznos abszorpcióra alkalmas felületet, ha ezen pórusok mérete megfelelő nagyságú és hozzáférhető az abszorbeálandó anyag számára (Štefelová et al., 2017).

Mikajlo és munkatársai célul tűzték ki, hogy bioszén segítségével növelni szeretnék a talaj termékenységét. A vizsgálatokhoz a talaj a cseh dél moráviai Brezová nad Svitavou területéről származó homokos vályogtalaj volt. Ennek kezelésére bükkfából készült bioszenet, bakteriális inokulomot (Bactofil és Novaferm), valamint nitrogén tartalmú tápanyagnövelő szert alkalmaztak. A bioszén pirolízise 470 °C-on történt. A tesztet 800 g talajmintával végezték, laboratóriumi körülmények között. Öt különféle kísérleti kialakítást hoztak létre: (1) kontroll, (2) bioszén és Bactofil inokulum, (3) bioszén, Bactofil inokulum és ammónium nitrát, (4) bioszén és Novaferm inokulum, (5) bioszén, Novaferm inokulum és ammónium nitrát. A bioszenet 6,5%-ban keverték a talajba. Mindegyik cserépbe fejes salátát ültettek. Azt tapasztalták az első növekedési ciklust követően, hogy a 2-es és 4-es kezelés nem eredményezett szignifikánsabb jobb eredményeket a kontrollhoz képest, ugyanakkor a 3-as és 5-ös kezelés szignifikáns biomassza növekedést mutatott. A második növekedési ciklust követően pedig a 3-as, 4-es és 5-ös esetben tapasztaltak szignifikáns biomassza növekedést. Összes nitrogéntartalom szempontjából mindössze az 5-ös összeállításnál találtak a kontrollhoz képest számottevő eltérést. Szerves széntartalom szempontjából egyik esetben sem találtak lényegesen kiugró értéket. Kutatásuk konklúziója szerint további kutatások szükségesek, annak bizonyításában, hogy a kedvező eredmények csupán az inokulum és műtrágya bejuttatásnak tudható be vagy esetleg a bioszén elősegítette azok hatásait. Ezen felül további vizsgálatok szükségesek, hogy megbizonyosodjanak a bioszén érésének hatásairól (Mikajlo et al., 2022).

#### **4.5.1.2. Gabonahéj szennyvíziszap alapú bioszenek alkalmazásának eredményei**

Számos kutatás középpontjában áll különféle gabonák héjából készült bioszenek alkalmazása. Egyik előnye ennek az alapanyagának a könnyű beszerezhetősége, másik pedig, hogy a pirolízis végterméke nagy felületű bioszén.

Wolde Mekuria és munkatársai rizshéjból készült bioszén segítségével a helyi talajterületek termőképességének javítását tűzték ki célul. A vizsgálatokat a laoszi Vientiane város melletti Veunkham és Naphok területén végezték el. A területre trópusi monszun időjárás jellemző, aminek köszönhetően a talaj csapadék utánpótlása számottevő és rendszeres. Ezen felül a talaj pH-ja savas. Céljuk a talaj N, P tartalmának növelése, a talaj pH és a kation tartalmának növelése volt. A talaj termelékenységének nyomon követésére a kezelt és kontroll területek kukorica termését hasonlították össze. A kísérlet keretein belül nem csupán bioszénnel hanem organikus talajjavítókkal (tehén trágya) és magas agyagtartalmú anyaggal, valamint ezen három keverékével is kísérleteztek (Mekuria et al., 2014). Mindegyik kezelés növelte az első évi termőképességét a talajnak a kontrollhoz képest, amely viszont csökkent a második évre. Viszont abban az esetben, amelynél mindhárom anyag keverékét tesztelték, ott kisebb mértékű volt a termelékenység visszaesése (Mekuria et al., 2014).

Simansky és munkatársai (Šimanský & Klimaj, 2017) nyomon követték, hogy a papírgyártási szennyvíziszap és gabonahéj alapú bioszén valamint N-tartalmú műtrágya milyen hatással van a talaj pH-jára. A vizsgálathoz homokos vályog talajt használtak. Az egyes mérésekhez 0, 10 és 20 t/ha mennyiségben keverték bioszén, valamint 0, 40 és 80 kg/ha mennyiségben keverték műtrágyát a talajmintákhoz, így összesen 7 kísérleti elrendezést kaptak. A kísérlet során arra a következtetésre jutottak, hogy minden egyes kísérleti elrendezés növelte a talaj pH értékét. Arra a következtetésre jutottak, hogy a nagyobb mértékű bioszén és a nagyobb mértékű műtrágya adagolás együttes hatására (B20N40, B10N80, B20N80) szignifikáns volt a pH növekedés, viszont ez a hatás nem állt fenn hosszú távon. Ezért ezt a módszert a talaj kémhatásának tartós emelésére nem találták megfelelőnek (Šimanský & Klimaj, 2017).

Tarnik és munkatársai, hasonló módon papírgyártási szennyvíziszappal kevert gabonahéjból készült bioszénnel végeztek kísérleteket. A bioszén ebben az esetben is 550 °C-on pirolizálódott 30 percen keresztül. Vizsgálatuk középpontjában a talaj víztartó képességének növelése állt. A vizsgált talaj a szlovákiai Malanta területén található homokos vályogtalaj volt. Itt két kísérleti kialakítást hoztak létre a kontroll mellett. Az egyik ilyen kialakítás során 20 t/ha dózisban juttattak bioszén egyszer a talajba, a másik kialakítás során ugyanekkora mennyiségű bioszén juttattak a talajba, de 4 év múlva megismételték a bekeverést. A vizsgálatok eredménye azt mutatta, hogy a bioszén növeli a talaj víztartó képességét. A kontroll és az egyszeri dózisban kezelt minták között szignifikáns eltérés volt tapasztalható.

Viszont érdekes eredmény volt, hogy amikor ismétlődő kezelés is történt, nem tértek el szignifikánsan az eredmények a kontrollhoz képest. Továbbá ezen kutatásnak az érdekes megfigyelése volt, hogy a kezelés hatására hidegebb időszakokban nagyobb mértékű volt a talajon a növények növekedése. Ez annak tudható be, hogy a talaj színe sötétebb lett ezáltal jobban magába tudta szívni a napfényből érkező energiát (Tarnik, 2019).

Szintén a talaj víztartó képességének növelésével kísérleteztek Vitkova és munkatársai (Vitkova et al., 2017). A talaj, amin a kísérleteiket végezték megegyezik Tarnik és mtsai (Tarnik, 2019), valamint Simansky és mtsai (Šimanský & Klimaj, 2017) által használttal. Úgyszintén megegyező paraméter volt az ezen kísérlet során használt bioszén és annak előállítási paraméterei is. A vizsgálat kialakítása során 5–10 cm-es mélységbe 20 t/h bioszén juttattak a talajba, míg a kontroll esetén nem volt bioszén bekeverés. Vizsgálataikat 1 és 2 év elteltével is elvégezték. Azt tapasztalták, hogy az első év elteltével a bioszénrel kezelt talaj vízmegtartó képessége romlást mutatott a kontroll eredményekhez képest. A második évi eredmények pedig nem mutattak szignifikáns eltérést a kontrollhoz képest, eltekintve pár értéktől melyek heves esőzések után lettek lemérve (Vitkova et al., 2017). Ezen tapasztalatok magyarázatára több hipotézist is felvázoltak. Egyrészt vázolták, hogy a bioszén jellemzői (alapanyaga és a pirolízis körülmények miatt) nem voltak megfelelőek a célhoz, valamint a növénytakaró típusa is befolyásolhatja az eredményeket. Érdekes eredmény volt a területen nőtt növényi biomasszát tekintve, hogy míg egy év után nem volt jelentős változás, addig a második évre szignifikáns biomassza növekedés volt tapasztalható. A felszín fölötti biomassza értéke 8,8 t/ha-ról 10,1 t/ha-ra emelkedett, valamint a termés hozam 2,4 t/ha-ról 3,3t/ha-ra emelkedett. A fent említett eredmények azt bizonyítják, hogy a bioszénrel történő víztartó képesség alakulása nem egy egyértelmű folyamat; alapos és hosszú távú vizsgálatokat igényel, hogy egyértelmű képet kapjunk a folyamatról (Vitkova et al., 2017).

Horel és munkatársai kutatásának középpontjában a talaj nitrogén fixációjának mértéke, valamint a talaj tápanyagtartalmát adó anyagok ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , összes N,  $\text{K}_2\text{O}$  és  $\text{P}_2\text{O}_5$ ) dinamikus változása volt (Horel et al., 2019). A kísérlet kialakítása során agyagos vályogtalajba keverték be 0, 0,5%, 2,5% és 5,0% mennyiségben bioszén. A használt bioszén alapanyaga szintén papírgyártásból származó iszap volt, amit gabonahéjjal keverték. A pirolízis folyamatát 600 °C-on végezték 20 percen keresztül. A növekedési kísérletben *Capsicum annuum* (közönséges paprika) tesztnövényt alkalmaztak. A kísérlet 86 napon keresztül zajlott mely során mintavételezés történt a 3., 6., 10. és 12. héten.

A kutatás eredménye egyértelműen kimutatta, hogy az összes nitrogén mennyisége a talajban csupán csekély változást mutatott. Ezen felül a bioszén adagolásának mértékétől függetlenül nem lehetett szignifikáns növénynövekedést, illetve fejlődést tapasztalni. A bioszén adagolás hatására megváltoztak a talaj kémiai tulajdonságai. Általánosan tapasztalat volt, hogy megnövekedett a talaj pH értéke. Kutatásuk során bizonyították, hogy a talaj szerves N-tartalma csökkent a kezelés hatására. A talaj K-tartalma is csökkent a növények növekedésével, ugyanakkor sosem érte el azt a szintet, hogy az gátolja a növények fejlődését. A kutatás során kiemelték, hogy a bioszén mennyiségének növelése nem egyenesen arányos a kedvező hatásokkal. A 2,5% és 5,0%-os keverési aránnyal rendelkező minták hasonló értékeket produkáltak a növények növekedésének szempontjából. (Horel et al., 2019).

#### **4.5.1.3. Gyógynövény alapú bioszenek alkalmazásának eredményei**

A gyógynövény alapú gyógyszergyártás során szignifikáns szén kerülhet ki a szén körforgásából. Ennek oka, hogy a gyártásból visszamaradt alapanyag maradvány, gyakran kezeletlenül kerül ki a földekre, vagy elégetik azokat, esetleg átmeneti gyűjtőket hoznak létre tárolási céllal. Ezen módszerek – alkalmazástól függően – károsítják a környezetet. Ezen problémának a megoldása lehet bioszén előállítása ezekből az alapanyagokból. Ilyen módon javítani lehetne az egész gyógyszergyártási művelet energetikai hatékonyságán, mivel nagyobb haszonnal lehetne a maradék anyagot felhasználni, mindemellett alacsonyabbá válna a környezetszennyezés mértéke. (Deng et al., 2023).

A gyógynövény maradványoknak magas a cellulóz, hemicellulóz és lignin tartalma ezért kiváló bioszén alapanyagok lehetnek. Ezen felül a pirolízis során keletkező gázok és bioolajok felhasználhatók bioüzemanyagként (Lian et al., 2014).

Manapság az antibiotikumok egyre gyakrabban megtalálhatóak vizeinkben és a talajban. Ez nagy veszélyt rejthet magában, mert lehetőséget ad antibiotikum rezisztens baktériumok létrejöttének. A szulfametoxazol (SMX) egy mára már elterjedt antibiotikumnak számít, amit humán és állatgyógyászatban szintén előszeretettel alkalmaznak (Ifthikhar et al., 2022). Lian és munkatársai egy kutatás keretein belül azt vizsgálták meg, hogy gyógynövényből készült bioszénnel, mekkora hatékonysággal képes a szulfametoxazol megkötése (Lian et al., 2014). A bioszén előállításához az úgynevezett vörösgyökerű zsályát alkalmazták, amely egy Kínában igen elterjedt gyógyhatású növény. Több bioszenet is előállítottak melyek között a különbség a pirolízis hőmérséklete volt.

A beállított hőmérsékletek az alábbiak voltak: 250, 400, 600, és 800 °C. A mérés során azt várták, hogy a magasabban előállított bioszén nagyobb felületének köszönhetően nagyobb mennyiségű SMX-t lesz-e képes megkötni, ám ez nem feltétlenül így történt. A megkötött SMX mennyisége a következő sorrendben alakult:

250 °C > 800 °C > 600 °C > 400 °C ~ kontroll.

A 250 °C-on pirolizált szén esetében az a jelenség léphetett fel, hogy míg ez rendelkezik a legkisebb porozitással és felülettel, közben az alacsony hőmérsékletnek köszönhetően megmaradhattak olyan vegyületek, amik oxocsoportban gazdagok és ilyen módon képesek az SMX megkötésére. Kutatásuk konklúziója volt, hogy a gyógynövény alapanyagú bioszenek, különösen az alacsony hőfokon előállítottak, kiváló lehetőséget nyújthatnak ionizálható szennyeződések megkötésére (Lian et al., 2014).

#### **4.5.2. Minősítési rendszerek – a bioszén talajra alkalmazásának szabályozása**

A bioszenek alkalmazhatóságának előrejelzése, ehhez minősítésük a jellemzőik alapján kiemelt jelentőségű lehet biztonságos felhasználásukhoz. Farkas és munkatársai (2020) ezért célul tűzték ki egy multikritériumos döntéstámogató rendszer létrehozatalát a kiválasztott bioszenek minősítésére. A kísérlet során 14 különféle bioszenet vizsgáltak, metodikájukban olyan fizikai, kémiai, biológiai, és ökotoxikológiai végpontokkal, amelyek fontosak lehetnek a talajjavítás szempontjából. Kidolgoztak egy olyan értékelő rendszert melyben az egyes tulajdonságaikra -5 és +5 pontokat kaphatnak annak függvényében, hogy az egyes bioszenek milyen mértékben képes a savanyú és meszes homoktalaj tulajdonságait javítani. A Multikritériumos Döntéstámogató Rendszer megalkotása során olyan talaj paraméterek kerültek fókuszba, melyek javítása szükséges egy homokos talajon. Ilyen megoldandó talaj degradációt okozó problémák lehetnek például a gyenge víztartó képesség, alacsony tápanyag- és szervesanyag-tartalom, a pH érték csökkenése. Az egyes hatások befolyásolásának mértékét az EBC és IBI irányelvek alapján értékelték (Éva Farkas, 2020). Az EBC előírások célja, hogy korlátozzák a bioszén felhasználásának kockázatait és segítsék a bioszenek biztonságos előállítását és alkalmazását (The European Biochar Certificate (EBC)). Az IBI rendszer célja, hogy a hasznosítani kívánt bioszenek előállítási és felhasználási technológiái szabványosítva legyenek. Ez magában foglalja az előállításához használható alapanyagokat, eszközöket és a felhasználás módjait is (International Biochar Initiative, 2022).

Farkas és munkatársai (2020) minősítési rendszerükben technológiai hatékonyság szempontjából a következő paramétereket pontozták: pH, víztartó képesség, összes szerves széntartalom, összes nitrogén tartalom, C/N arány, hozzáférhető P és K mennyisége, hamutartalom, összes pórus mennyisége és BET fajlagos felület (Éva Farkas, 2020). A pontozás határértékei és a hozzá tartozó pontszámok a melléklet 1. táblázatában található.

## **4.6. Bioszenek érése - érési folyamatok és következményeik**

Általános jelenség a bioszenek tulajdonságainak megváltozása a felhasználásuk során, amit érésnek vagy öregedésnek nevezünk. A bioszén szerkezetét és tulajdonságait nagyban képesek olyan folyamatok befolyásolni, mint például a hőingadozás, a kiszáradás, majd újra benedvesedés, vagy akár a különféle mikrobiológiai folyamatok (Wang et al., 2020a). Ezen folyamatok hatása még kevésbé ismert ezért egyre több és több kutatás foglalkozik ezen témával (Liu & Chen, 2022). A szabadföldön történő érlelés vizsgálata egy igen időigényes folyamat, mivel a minták érlelése beletelhet hónapokba vagy akár évekbe is. A bioszén érlelését el lehet végezni laboratóriumban is a természetes folyamatok mesterséges módon történő előidézésével (Li et al., 2019).

## **4.7. Bioszén érésének modellezése**

### **4.7.1. Mesterséges érlelési módszerek típusai**

A bioszén a talajba juttatva a környezeti behatásoknak köszönhetően megváltozik. Ekkor az eredeti állapotától eltérő fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságokat vehet fel, melyek nem feltétlenül előnyösek számunkra. A stabilitás megváltozásának, valamint a tulajdonságok mértékének megváltozása nehezen jelezhető előre (Rechberger et al., 2017). Ezen változások kiderítése természetes érlelés folyamatával igen időigényes folyamat. Annak érdekében, hogy következtetni tudjunk a bioszén tulajdonságainak megváltozására, laboratóriumi körülmények között kivitelezhető annak fizikai, kémiai és biológiai érlelése.

Tipikus fizikai érlelési módszerek a fagyasztási és olvasztási ciklusok, valamint a nedvesítési és szárítási ciklusok alkalmazása (Zeba et al., 2022). Fizikai érlelés során a hangsúly a magas hőingadozáson van, valamint a hőingadozás ciklusainak számán.

Ez jól megfigyelhető Hale és munkatársai (Hale et al., 2011) által végzett fizikai érlelésen, ahol a hőingadozás  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$  (5 órán keresztül) és  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (19 órán keresztül) között zajlott. Ezt a ciklust 42 alkalommal ismételték meg. Az ilyen mértékű hőingadozás ugyan felgyorsítja az érés folyamatát, ugyanakkor nem tükröz környezethez hű változásokat, Így előfordulhat, hogy idegen módon változik meg a bioszén szerkezete. (Hale et al., 2011).

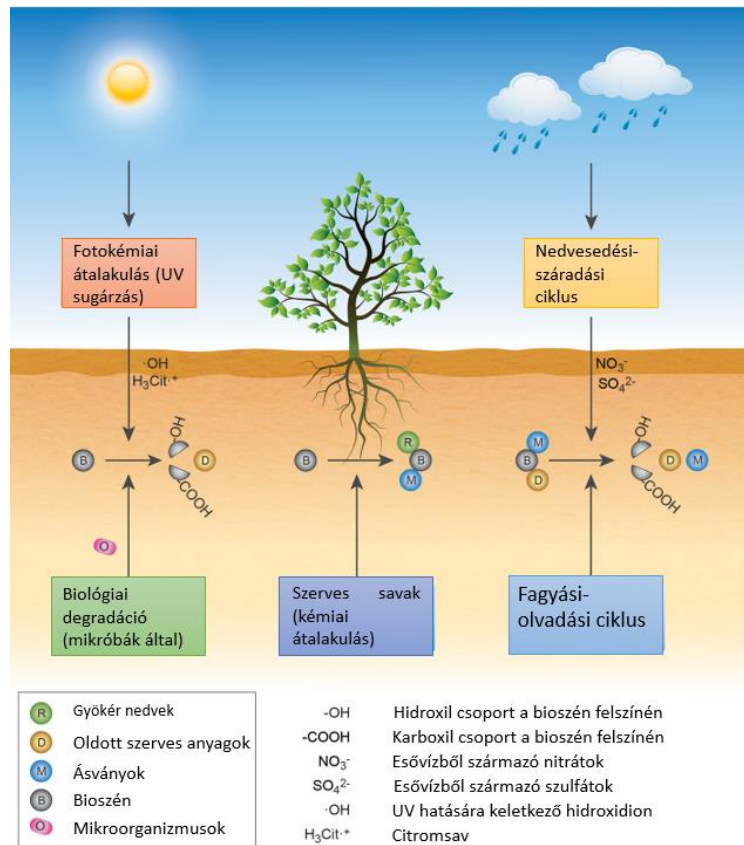
A kémiai folyamatok általi érés folyamatát legjobban kémiai oxidációval és fotokatalitikus oxidációval lehet szimulálni. A kémiai mesterséges érlelés célja, hogy rövidebb időn belül modellezni tudjuk a talaj organizmusai által keltett oxidatív környezet hatását. Ilyen oxidatív környezet például a növényi gyökerek környezetében is fellelhető, ezen kívül kémiai változásokat okoznak a szervetlen ionok és a napfény energiája is. A természetben történő kémiai éréshez képest laboratóriumi körülmények között már pár óra alatt el lehet érni ugyanakkora mértékű változást.

Ugyanakkor előfordulhatnak nem kívánatos reakciók is melyek a valóságban nem valósulnának meg (Li et al., 2019). Kémiai érlelés hatására a bioszeneknek általában csökken a hamutartalma, valamint megnő a savasságának a mértéke. Az érlelés során erős oxidáló szereket szoktak alkalmazni, ilyen például a  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{HNO}_3$  és  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (Li et al., 2019).

Biológiai érlelés folyamatában kulcsszerepet játszanak a mikroorganizmusok, valamint a növények. Egyes kutatások még a földigilisztát vizualizálják, mint lehetséges biológiai érlelésben részt vevő organizmust, ugyanakkor ez még vitatott. Az egyes mikroorganizmusok képesek bejutni a bioszén pórusaiba, és ott a hozzáférhető szénforrásnak köszönhetően képesek szaporodni. Szintén vitatott, hogy mennyi idő alatt lehet elvégezni egy sikeresnek mondható biológiai érlelést. Az érlelés hossza függ attól, hogy a beoltáshoz használt inokulumban milyen mikroorganizmus található, valamint, hogy maga a bioszén mekkora pórusméretű és mennyi a hozzáférhető széntartalma. Ha az említett két paraméter alacsony, akkor a mikroorganizmusok nem lesznek képesek hatást gyakorolni a bioszén szerkezetére ezáltal nem lesz sikeres az érlelés (Wang et al., 2020a).

A 6. ábra szemlélteti, hogy milyen hatások érik (érhetik) a bioszén termékeket a természetben talajra történő alkalmazásuk során. Ezeknek a folyamatoknak a modellezését célozza néhány kutatás napjainkban, mesterséges érlelési módszerekkel.





6. ÁBRA A BIOSZÉNT ÉRŐ TERMÉSZETES HATÁSOK (WANG ET AL., 2020B ALAPJÁN).

#### 4.7.2. Természetes érlelési módszerek

A bioszén fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságai a talajban történő hosszú idejű alkalmazása során számos változáson mehetnek keresztül. Ezekre a változásokra viszont csak következtetni lehet, pontos adatokhoz méréseket kell végezni. Általánosan elmondható, hogy a bioszenek az érés hatására gyorsítják az ásványi anyagok mineralizációját a felszínükön. Ennek köszönhetően csökkenhet a fajlagos felületük mivel a szerves és ásványi anyagok eltömíthetik a bioszén felszínén található repedéseket és pórusokat (Wang et al., 2021). Emellett a talajban élő organizmusok is szignifikánsan képesek befolyásolni a bioszén jellemzőit. Ezek a hatások is nagymértékben eltérhetnek a talaj jellemzőinek függvényében.

Yuan és munkatársai munkájuk során különféle szárazföldi érlelési kísérleteket végeztek, és hasonlítottak össze (Yuan et al., 2021). Kísérleteiket több szempont szerint csoportosították. Ilyen például a kísérlet léptéke (szabadföldi vagy laboratóriumi cserépben történő érlelés) (Yuan et al., 2021). A laboratóriumi kísérlet könnyebben kontrollálható volt, kisebb volt a helyigénye. Ugyanakkor hátránya, hogy nem szimulálta valósan a környezetet (Wang et al., 2020b).

A bioszén dózis szempontjából 4 kezelést alkalmaztak: kis dózis (< 30 t/ha), közepes alkalmazási mennyiség (31–70 t/ha), nagy dózis (71–200 t/ha) és extra nagy dózis (>200 t/ha). A talaj pH is hatását is 4 csoportba kategorizálták. <6,00 pH, 6,00–6,99 pH, 7,00–7,99 pH, valamint >8,00 pH. Megállapították, hogy a természetes érlelés, bár nagyobb helyigényű módszer, de környezeti relevanciája, és megbízhatósága sokkal jobb (Yuan et al., 2021).

#### **4.8. Természetes érés és mesterséges érlelés - összehasonlító értékelés a szakirodalom alapján**

A bioszén természetben történő változásának nyomon követése egy kulcsfontosságú feladat a technológia jövőjének szempontjából. Mivel a szabadföldi vizsgálatok túl sok időt vesznek igénybe, nagy törekvés indult annak irányába, hogy a változásokra laboratóriumi mérések segítségével következtetni tudjunk, előrejelzést tudjunk adni. Ennek viszont egyetlen módja a két érlelési típus párhuzamosan történő vizsgálata, és összehasonlító értékelése.

Li és munkatársai egy metaanalízis keretein belül vizsgálták meg, hogy mennyire közeli eredményeket produkál egymáshoz képest a laboratóriumi körülmények között történő érlelés, valamint a természetes körülmények között történő érlelés. A metaanalízisük során 42 tanulmány eredményét elemezték annak érdekében, hogy kémiai oxidáció és fagyasztási-olvasztási ciklusok hasonló módon befolyásolják-e a bioszén tulajdonságait, mint a természetes érlelések (Li et al., 2019). Azt az eredményt kapták, hogy mind a természetes érlelés mind pedig a kémiai érlelés hatására csökkent a bioszén felszínén a C-tartalom és nőtt az O-tartalom. Ugyanakkor a természetes érlelés esetén megnövekedett a felszíni H- és N-tartalom is. Ez abból következhet, hogy az alkalmazott oxidálószeres túlzott mértékben eltolták a folyamatokat az oxidáció irányába. Véleményük szerint természetes körülmények között sokkal enyhébbek oxidációs folyamatok, valamint a mikroorganizmusoknak köszönhetően más reakciók is lezajlanak. Ezen felül a túl erős oxidáció tönkre teheti a bioszén pórusait. Ezek a pórusok a természetes érlelés közben akár el is tömődhetnek a talaj szemcséinek köszönhetően, így nem feltétlenül oxidálódik ugyanakkora mértékben a bioszén felülete. Vizsgálatuk konklúziója az volt, hogy a tesztelt módszerekkel nem lehetséges tökéletesen szimulálni a természetes érés folyamatait, a módszerek fejlesztése szükséges. Ugyanakkor egyértelműen megállapították, hogy más-más szerkezetű és kémiai összetételű bioszén másképpen reagálhat az érlelésre (Li et al., 2019).

## 5. Anyagok és módszerek

Kutatásom fő célkitűzése a bioszenek tulajdonságaiban az érés során bekövetkező változások komplex vizsgálata volt, egyrészt laboratóriumi mesterséges gyorsított érleléssel (fizikai és kémiai érlelést alkalmazva), valamint szabadföldi természetes érleléssel. Ezeket az eljárásokat és a kísérletek monitoringjára alkalmazott komplex metodikát ismertetem a következő fejezetekben.

### 5.1.A kísérletek során vizsgált bioszenek és talajok tulajdonságai

A kísérletek során három különböző bioszénnel végeztem érlelési kísérleteket. Ezek adatai az 1.táblázatban láthatóak.

1. TÁBLÁZAT A KÍSÉRLETEK SZORÁN VIZSGÁLT BIOSZÉN MINTÁK

Bioszén jele	Bioszén neve	Bioszén előállítója	Bioszén származása	Bioszén alapanyaga	Előállítási hőmérséklet	Tartózkodási idő
<b>A1B</b>	Bio Pflanzenkohle	Sonnenerde, Gmbh.	Ausztria	Gabonahéj+papírgyártási szennyvíziszap	500-700	20
<b>BW</b>	Profood	Profood Zrt.	Magyarország	Bükkfa	450	20
<b>Herba</b>	Herbacarb	Pyreg, Gmbh.	Németország	Gyógynövény	600-700	20

A kísérletek és a monitoring során kontroll mintának 3 eltérő talajt alkalmaztunk. Az őrbottyáni, OECD és orosz lányi talajt. Ezek tulajdonságait a 2–3 táblázatok szemléltetik.

2. TÁBLÁZAT AZ ŐRBOTTYÁNI TALAJ TULAJDONSÁGAI

Tulajdonság	Érték
pH [H <sub>2</sub> O]	7,7
Homok% [0,05mm>]	81
Iszap% [0,002-0,05 mm]	13
Agyag% [<0,002 mm]	6
Humusz%	1,0
Arany-féle kötöttség [KA]	27

3. TÁBLÁZAT AZ OECD TALAJ ÖSSZETÉTELE

Alapanyag	Érték [%]
Tőzeg	10
(Ipari) kvarchomok	70
Kaolinit anyag	20

## **5.2.Laboratóriumi érlelés**

### **5.2.1. Fizikai érlelés**

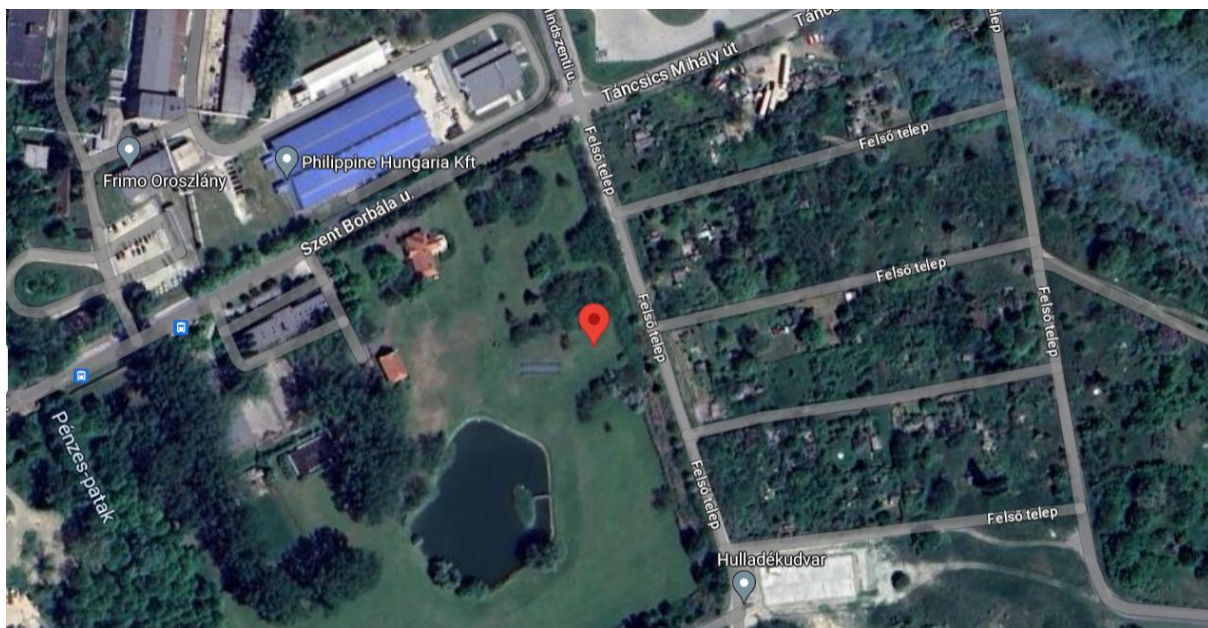
A fizikai érlelés során mindegyik bioszén mintával 3-3 párhuzamossal végeztük el a kezelést. Az egyes mintákból 100-100 grammot mértünk műanyag tasakokba. Ezt követően 24 óránként váltakozó fagyás-felengedés ciklusokat alkalmaztunk. A fagyás során  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  lett beállítva, felengedés során pedig  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  hőmérséklet. Ez a ciklikus folyamat 5 héten keresztül zajlott.

### **5.2.2. Kémiai érlelés hidrogén-peroxiddal**

A hidrogén-peroxidos érlelés során minden egyes mintából 3-3 párhuzamoson végeztük el a műveletet. Minden bioszén mintából 30-30 grammot mértünk 500 ml-es csavaros Schott üvegekbe. Minden egyes üvegbe 300 ml 15%-os  $\text{H}_2\text{O}_2$  oldatot mértünk. Ezt követően az reaktorokat  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os termosztált szobában 4 órán keresztül rázattuk. A 4 óra elteltével minden egyes mintát átszűrtünk textilzsákok és üvegtölcsérek segítségével. A minták megtisztítása érdekében desztillált vízzel többszöri mosási lépést végeztünk. Ezt követően minden egyes bioszén mintát  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on szárítószekrényben szárítottunk egy éjszakán keresztül.

## **5.3.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 „függöny” anyag. Három érlelést készítettünk elő, két rövidebb távú, és egy hosszabb távú kísérletet, két eltérő modellterületen (Órbottyán, Oroszlány). Kutatómunkámban a rövid távú kísérlet, az oroszlányi modellterületen elhelyezett és érlelt minták eredményeit elemzem és hasonlítom össze a laboratóriumi mesterséges módszerek eredményeivel. A talajban a zsákok 1 m távolságban vannak egymástól és 15–20 cm mélységben vannak a talajfelszíntől. A minták szabadföldi érlelése 6 hónapig zajlott. A minták elhelyezésének pontos helye az 7. ábrán látható.



7. ÁBRA A BIOSZÉN MINTÁK ELÁSÁSÁNAK A HELYE (47.468955, 18.311116, GOOGLE MAPS)

## 5.4. Az érlelés során alkalmazott monitoring módszerek

Mind a mesterséges érlelések, mind a szabadföldi természetes érlelések mintáinak vizsgálatára komplex (fizikai, kémiai, biológiai és ökotoxikológiai módszereket is magában foglaló) metodikát alkalmaztam, amit a következő ábra szemléltet (8. ábra).

Fizikai-kémiai vizsgálati módszerek	Biológiai vizsgálati módszerek	Ökotoxikológiai-ökológiai vizsgálati módszerek
<ul style="list-style-type: none"> <li>• pH, vezetőképesség (EC)</li> <li>• Elemtartalom (XRF)</li> <li>• Szerves széntartalom</li> <li>• Hozzáférhető foszfortartalom</li> <li>• Hozzáférhető káliumtartalom</li> <li>• Nitrogénformák</li> <li>• Izzítási veszteség</li> <li>• Labilis széntartalom (POXC)</li> <li>• Vízretartó kapacitás (WHC)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerob heterotróf baktériumszám</li> <li>• Aerob heterotróf gombaszám</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Sinapis alba</i> teszt növényvel</li> <li>• Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Triticum aestivum</i> teszt növényvel</li> <li>• Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata <i>Folsomia candida</i> rovarral</li> </ul>

8. ÁBRA A MINTÁKON ELVÉGZETT VIZSGÁLATOK CSOPORTOSÍTÁSA

## **5.5. Fizikai-kémiai vizsgálati módszerek**

### **5.5.1. Kémhatás és vezetőképesség meghatározása vizsgálat**

A talaj kémhatása és vezetőképessége fontos jellemzők, melyek nagy hatással vannak a talajban lezajló kémiai és biokémiai folyamatokra. Ezáltal befolyásolják a talaj tápanyagtartalmát, ennek hozzáférhetőségét, ez pedig kulcsfontosságú tényező. Így a kémhatás és vezetőképesség nyomon követése fontos a természet megóvásának és a mezőgazdaság fenntartható fejlődésének az érdekében.

A két fizikai-kémiai paraméter meghatározását egymás után végeztük el. Minden egyes mintából 3-3 párhuzamossal végeztük a kísérletet. Falcon-csövekbe bemértünk 1-1 g bioszenet, erre pedig pipettával ráértünk 20-20 ml desztillált vizet. Kontroll mintaként desztillált vizet használtunk. Az elkészült szuszpenziókat a lezárt Falcon-csövekben 90 percig 200 rpm fordulatszámon ráztuk. Majd kalibráltuk a műszereket és megmértük az egyes minták pH-ját és a vezetőképességét. A pH mérőt 4,00 és 7,00 pH értékű pufferoldatokkal kalibráltuk közvetlenül a mérés előtt. A pH mérést egy WTW pH330 típusú kombinált üvegelektrod segítségével végeztük. A vezetőképességet egy CONSORT C535 készülékkel mértük. Minden egyes mérést követően a készülékeket desztillált vízzel öblítettük és törlőpapírral szárazra töröltük. A mérés a MSZ 21470/2-81. magyar szabvány előírása alapján történt.

### **5.5.2. Elemösszetétel vizsgálata röntgen fluoreszcens spektroszkópiás (XRF) módszerrel**

A minták vizsgálatánál egy igen fontos és informatív vizsgálat az elemösszetétel meghatározása. 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. Az 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 annyi mintát, hogy a mérést hiba nélkül el lehessen végezni. Ez közel 30–50 g mintát jelentett. A pontos mennyiség nem számít, ugyanakkor ügyelni kell, hogy túl kevés minta vizsgálata esetén a sugárzás nem csak a minta összetételét vizsgálná, hanem az alatt levő tartóét is és ez torzítaná a mérés eredményét. A méréshez egy Thermo Scientific™ NITON XL3t típusú berendezést használtam. A berendezés konfigurációja a következő volt: 3 szűrő, egyesével 45-45 másodpercig mért így összesen minden egyes minta analízise 135 másodpercig tartott. A 3 szűrő, egy főszűrőt, egy magas szűrőt valamint egy alacsony szűrőt jelentett. Így képesek voltunk detektálni az átmeneti fémeket, valamint a magas és alacsony rendszámú elemeket.

### **5.5.3. Szerves széntartalom mennyiségének-, nitrogén formák előfordulásának-, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom mértékének vizsgálata**

A kiindulási és érlelt bioszenekből a szabadföldi érleléshez kapcsolódóan 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;
- NH<sub>4</sub>-N és NO-N KCL-os extraktumból: MSZ 20135: 1999.

A szabadföldi érlelés modellterületének (Oroszlány) talajvizsgálatát a következő módszerekkel végezték az ATK TAKI munkatársai:

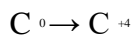
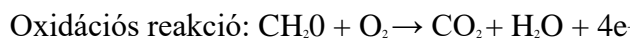
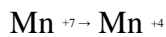
- pH és EC: MSZ 21470-2: 1981;
- Arany-féle kötöttség (Buzás, 1993)
- Talajtextúra (Buzás, 1993)
- Szerves széntartalom: MSZ 21470-52: 1983;
- Felvehető kálium- és foszfortartalom: MSZ 20135: 1999;
- Össz N [%] Kjeldahl módszer: ISO 11261: 1995;
- NH<sub>4</sub>-N és NO-N KCL-os extraktumból: MSZ 20135: 1999
- CaCO<sub>3</sub> tartalom: HS-08-0206/2: 1978.

#### 5.5.4. Izzítási veszteség meghatározása

Az izzítási veszteség mérés során minden egyes bioszén mintákból és az oroszlányi talaj mintából 4-4 párhuzamos mérést végeztünk. Porcelán tégelyekbe bemértünk minden mintából 2 g-ot. A mérés analitikai mérleggel történt és a bemérés során az izzító tégelyekhez csupán fém csipesszel értünk hozzá ezzel is ügyelve arra, hogy esetlegesen a kezünkről a tégelyre ne kerüljön szennyeződés, ami befolyásolná a mérést. A bemérést követően a tégelyeket 105 °C-os szárítós szekrénybe helyeztük. 24 óra elteltével minden mintát exszikátorba tettünk és megvártuk amíg szobahőmérsékletűre hűltek. Majd egy következő izzítás keretein belül 6 órán keresztül 550 °C-on izzítókemencében kezeltük a mintákat. A 6 óra elteltével ismét egy exszikátoros hűtési lépés következett. A minták visszamérése mindkét hűtési lépést követően elvégeztük.

#### 5.5.5. Permanganáttal oxidálható szén meghatározása

A bioszén széntartalmának egy bizonyos részét a permanganát képes oxidálni. Ekkor a permanganát ionok redukálódnak míg a szén oxidálódik. A lezajló reakciók egyenlete az alábbi:



A méréshez szükséges  $\text{KMnO}_4$  törzsoldat készítése: 1 liter 0,2 M-os törzsoldatot az alábbi módon készítettük el. Egy 1000 ml-es főzőpohárba bemértünk 147 g  $\text{CaCl}_2$ -ot. Majd hozzáöntöttünk 900 ml desztillált vizet. Mágneses keverő segítségével addig kevertettük, míg fel nem oldódott az anyagunk. Ezt követően egy 1000 ml-es mérőlombikba öntöttük át az oldatot majd desztillált vízzel jelig töltöttük. Egy másik 1000 ml-es főzőpohárba bemértünk 31,6 g  $\text{KMnO}_4$ -ot, amihez 900 ml  $\text{CaCl}_2$ -ot öntöttünk. Majd mágneses keverő segítségével szintén teljes feloldódásig kevertettük a rendszert. Feloldódást követően beállítottuk az oldat pH-ját 7,2-re. Ehhez 0,1 M-os  $\text{NaOH}$  oldatot és kalibrált pH mérő berendezést alkalmaztunk. A megfelelő pH beállítását követően 1000 ml-es mérőlombikba töltöttük az oldatot és  $\text{CaCl}_2$  oldattal jelig töltöttük. A kész oldatot barna üvegben tároltuk, mivel így sokkal lassabb a bomlási folyamat.



A méréshez szükséges egy  $\text{KMnO}_4$  oldatból alkotott standard sor melynek az összetétele az 4. táblázatban látható.

4. TÁBLÁZAT A  $\text{KMnO}_4$  OLDAT HÍGÍTÁSI SORÁNAK TAGJAI

Koncentráció	$\text{KMnO}_4$ törzsoldat térfogata	Desztillált víz térfogata
<b>0,005 M</b>	0,25 ml	9,75 ml
<b>0,01 M</b>	0,5 ml	9,5 ml
<b>0,015 M</b>	0,75 ml	9,25 ml
<b>0,02 M</b>	1,0 ml	9,0 ml

A hígítási sor minden egyes tagjából 0,5 ml-t kivettünk és 49,5 ml desztillált vízhez adtunk, amiket előre kimértünk 50 ml-s Falcon csövekbe.

A bioszén és oroszlányi talajminták előkészítése során kezdetben Falcon csövekbe kimértünk megfelelő mennyiségű szilárd mintát. Ez bioszén esetén 0,2 g-ot, míg az oroszlányi talaj esetén 2,5 g-ot jelentett. Ezen felül összeállítottunk bioszén- és talaj-vak mintát is. Így összesen mintánként 4 párhuzamossal végeztük el a tesztet, plusz a bioszén- és talaj-vak minta, tehát összesen mintánként 5 Falcon csőre volt szükség. Minden szilárd mintára ráértünk 18 ml desztillált vizet és 2 ml 0,2M  $\text{KMnO}_4$  oldatot. A bioszén- és talaj- vak mintákra csupán a 18 ml desztillált vizet mértük rá. Három Falcon csőbe elkészítettük a VAK mintákat, amikbe 18 ml desztillált víz és 2 ml 0,2M  $\text{KMnO}_4$  oldat került. A Falcon csöveket 10 percig 120 rpm-en ráztuk sötétben. Ezután a mintákról levettük a kupakot és hagytuk 10 percig ülepedni az elegyeket. A minták ülepedési ideje alatt kimértünk a mintákkal megegyező számú Falcon csőbe 49,5 ml desztillált vizet. Az ülepedési idő letelte után minden minta felülúszójából átmértünk 0,5 ml-t a hozzá tartozó 49,5 ml desztillált vizet tartalmazó Falcon csőbe. Az imént leírt folyamatnál attól a ponttól, hogy a szilárd mintákat tartalmazó oldatok érintkeznek a  $\text{KMnO}_4$  oldattal kulcs fontosságú tényező az idő és a gyorsaság. Mindenképpen el kell kerülni azt az eshetőséget, hogy egyes minták oxidációja tovább tartson, mint más mintáké, mivel ez az eredmények torzulását okozná.

Majd a mellékletben látható M1-M3. ábrán bemutatott protokollok alapján összeállítottuk a mikrotitrátor lemezeket. Az összeállítást követően egy DIALAB EL800 típusú Microplate Reader (Labsystem Multiscan PLUS) leolvasóval 405, 450, 490, és 630 nm-en, valamint egy FluoSTAR OPTIMA műszerrel 520-10 nm-en és 544-ex nm-en megmértük az egyes minták abszorbancia értékeit.

### **5.5.6. Vízartó kapacitás (WHC) meghatározása**

A talaj vízartó képességétől számos tényező függ, ilyen például a természetes vegetáció és a termesztett növények vízellátottsága. Ezen felül fontos befolyásoló szereppel játszik a talaj levegő- és hőháztartásában, valamint a biológiai aktivitás mértékében (Tóth, 2010).

A vízartó kapacitás (WHC) meghatározáshoz minden mintából 5 g-ot mértünk ki és helyeztük műanyag hengerekbe, amiknek egyik vége textillel volt fedve. A tégelyeket 1 órára 20°C-os vízfűdőbe helyeztük. Ezt követően 3 órán keresztül homokágyon hagytuk pihenni, hogy a felesleges víz lecsepegjen. Izzító tégelyek tömegét lemértük és minden mintából analitikai mérleggel 2 g-ot mértünk be. Az izzító tégelyekhez fém csipesszel nyúltunk, hogy elkerüljük annak lehetőségét, hogy a kezünkről tégelyre kerülő szennyeződéssel torzítsuk a mérés eredményét. Majd 105 °C-os szárítószekrénybe helyeztük a mintákat 24 órára. Az idő leteltével visszamértük a minták tömegét.

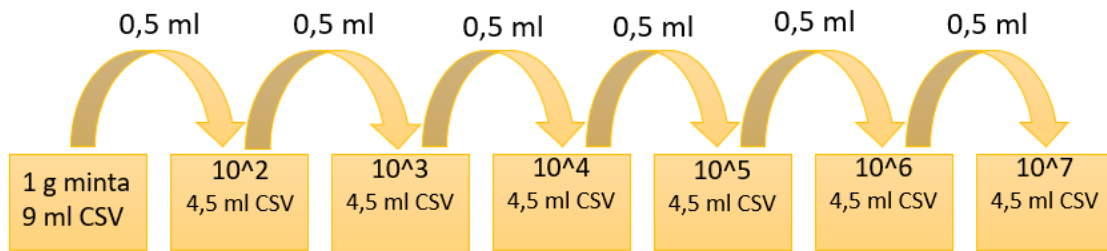
## **5.6. Biológiai vizsgálati módszerek**

### **5.6.1. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám meghatározása lemezöntéses eljárással (CFU meghatározás)**

A Colony Forming Unit (CFU) azaz a telep képzésre alkalmas egység azt mutatja meg, hogy az adott mintában mennyi telepképző mikroorganizmus van. Az alapfeltételezés, hogy egy telepet egy mikroorganizmus hoz létre. A kiindulási mintákat gyakran hígítással szokták előkészíteni, hogy a későbbiekben a leolvasás során megszámlálható mennyiségű telep keletkezzen. A hígítás mértékével korrigálva pedig következtetni lehet a kiindulási mintákban található csíraszám mennyiségére. Mindegyik bioszénből és az oroszlanai talajmintából is 4-4 párhuzamos mérést végeztünk. A kísérlethez előkészítettünk 16 steril Erlenmeyer-lombikot valamint 16\*5, 4,5 ml steril vízzel feltöltött kémcsövet.

A hőlégmenterilezett 100 ml-es Erlenmeyer-lombikokba kimértünk 1-1 g mintát. Majd ezekhez kimértünk 9 ml steril csapvizet elszívófülke alatt. Az Erlenmeyer-lombikokat ezután 30 percre 200 rpm-en feltettük rázatni.

Rázataást követően elszívó fülke alatt elkészítettük a hígítási sort. A hígítási sor egyes tagjai a 9. ábrán láthatóak.



9. ábra A lemezöntéshez használt minták hígítási sora

A szükséges hígítási tagokból 100-100  $\mu\text{L}$  mintát pipettáztunk steril fülke alatt steril műanyag Petri-csészékbe. Minden minta két petri-csészébe lett kimérve, mivel a lemezöntés során a minták egyik fele maláta agarral lett megöntve, a másik fele pedig húslé agarral. Ezek összetétele a mellékletben M2. táblázatban láthatóak. Az inkubálás 28 °C-on történik 48- és 72 óráig amiket követően leolvastuk, hogy milyen jellegű és hány darab telep keletkezett.

## 5.7. Ökotoxikológiai-ökológiai vizsgálati módszerek

### 5.7.1. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Triticum aestivum* és *Sinapis alba* tesztnövényvel

A csíranövekedés teszthez a közönséges búza (*Triticum aestivum*) és a fehér mustár (*Sinapis alba*) vetőmagokat bioboltból szereztük be. A tesztnövények a szennyezőanyagok széles skálájára érzékenységeket mutatnak, ezért kiválóan alkalmazhatók ökotoxikológiai vizsgálatok elvégzéséhez. A kísérlet során Petri-csészékbe kimértünk 3 bioszén esetén 3 g, talaj esetén 5 g mintát. Kontroll mérésnek oroszlányi földet, valamint steril desztillált vízzel nedvesített szűrőpapírt használtunk. Mindegyik kialakítási formából 3-3 párhuzamos mérést végeztünk el. A szilárd mintákat kiforralt csapvízzel megnedvesítettük, a víztartó kapacitásuk 60%-ig. Majd ráhelyeztük a búza és mustármagokat a mintákra. Búzából 16 db, mustárból pedig 20 db került bele egy Petri-csészébe. Ezt követően a csészéket alufóliával becsomagoltuk és 72 órára 21°C-os termosztátba helyeztük. 72 óra elteltével megmértük a növekedett gyökerek és szárak méretét.

Búza esetén 3 gyökér és 1 szár növekedése tapasztalható, míg mustárnál 1 szár és 1 gyökér növekedése tapasztalható. A mérést vonalzó segítségével végeztük.

### **5.7.2. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata *Folsomia candida* rovarral**

A *Folsomia candida* faj az Isotomidae-k családjába, a Collembolák (ugróvillások) alosztályába tartozik. Ezek a kis állatkák nagyon aprók közel 3-4 mm hosszúságúakra képesek megnőni. Ezen talajban élő fehér kis állatkák hasi oldalukon ugróvillával rendelkeznek. Ennek hátracsapásával tudnak a levegőbe emelkedni. Ökotoxikológiai jelentőségük, hogy hasi oldalukon található tömlővel lélegeznek ebből kifolyólag érzékenyen reagálnak a különféle talajgőzökre.

A teszt kialakítása során minden mintával 3 párhuzamos mérést végeztünk el. Kontroll mintának oroszlányi talajt, valamint OECD-t alkalmaztunk. A bioszenes mintákból 3-3 g-ot, a kontroll mintákból 10-10 g-ot mértünk be csavaros üvegbe. Majd minden mintát megnedvesítettünk kiforralt csapvízzel. Majd speciális szívóka segítségével 10-10 db Collembollát helyeztünk mindegyik üveg bioreaktorba. A bioreaktorokat kartondobozba helyeztük majd sötét és hűvös helyen 7 napig inkubáltuk. Az inkubációt követően vízzel felöntöttük a mintákat és megszámloltuk az életben maradt egyedeket.

### **5.8. Az eredmények értékelésére alkalmazott statisztikai módszerek**

A fizikai, kémiai, biológiai és ökotoxikológiai kísérletek eredményeit egyutas varianciaanalízissel (One-Way ANOVA- Analysis of variance) hasonlítottam össze TIBCO™ Statistica program alkalmazásával. Cochran féle Q-próbával ellenőriztem, hogy a mérési adatok azonos varianciájú sokaságból származnak-e. Ezt követően Fischer-féle LSD-próba (Least Significant Difference) segítségével határoztam meg azt, hogy a mért paraméterek szignifikáns ( $p < 0,05$ ) eltérést mutatnak-e az érleletlen bioszénhez viszonyítva. Ezt követően homogén csoportokat figyelembe véve (melyek nem különböznek szignifikánsan egymástól), betűjelzésekkel láttam el a bioszén mintákat. A betűjelzéseket nagysági sorrendben rendelttem a bioszenekhez, és azonos jelzést kaptak azon minták, melyek egy homogén csoportba tartoztak. A diagramokon az oszlopok felett kisbetűvel jelöltem, hogy melyik kezeléstől különbözik szignifikánsan egy adott paraméter.

## **6. Eredmények és értékelés**

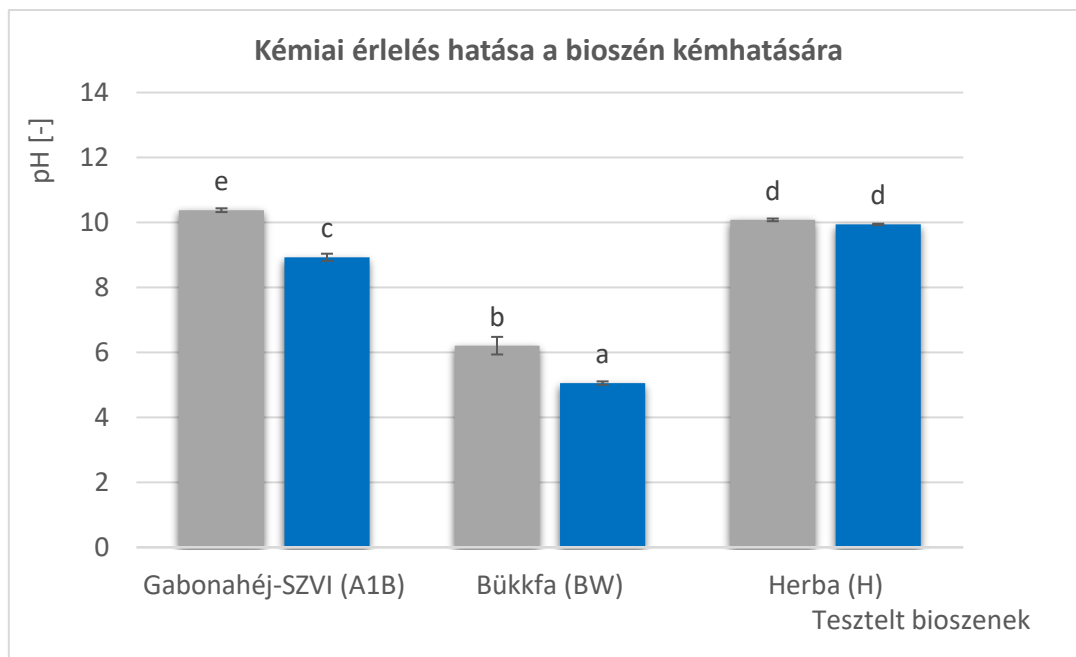
A szerves hulladékokból és melléktermékekből pirolízissel előállított bioszén termékek talajra történő alkalmazása egyre nagyobb jelentőséget kap napjainkban, mind talajjavítási mind talajremediációs céllal. Ugyanakkor a bioszenek öregedése/érése következtében fellépő változások komplex – környezeti hatásoktól is függő - felmérése, és ezen érési folyamatok következményeinek jellemzése, továbbá az erre alapuló alkalmazhatóságuk előrejelzése nem szerepel a szakirodalomban, pedig ezek az érés során bekövetkező átalakulások egyértelműen meghatározzák a bioszén termékeknek a hosszú távú hatásait, funkcionalitásukat a talajban és ezzel együtt alkalmazhatóságukat.

A kutatásom fő célkitűzése volt az érés (öregedés) során a bioszenek tulajdonságaiban bekövetkező változások felmérése eltérő módszerekkel, mesterséges és természetes érlelési módszerekkel. A következő fejezetekben először a mestersége érlelések (kémiai és fizikai érlelés), majd a természetes szabadföldi érlelés kísérleti eredményeit értékelem. Majd egy összehasonlító fejezetben, elemzem a hasonlóságokat és az eltéréseket az egyes bioszenek és az eltérő jellemzők esetén.

### **6.1.Mesterséges kémiai érlelés eredményei**

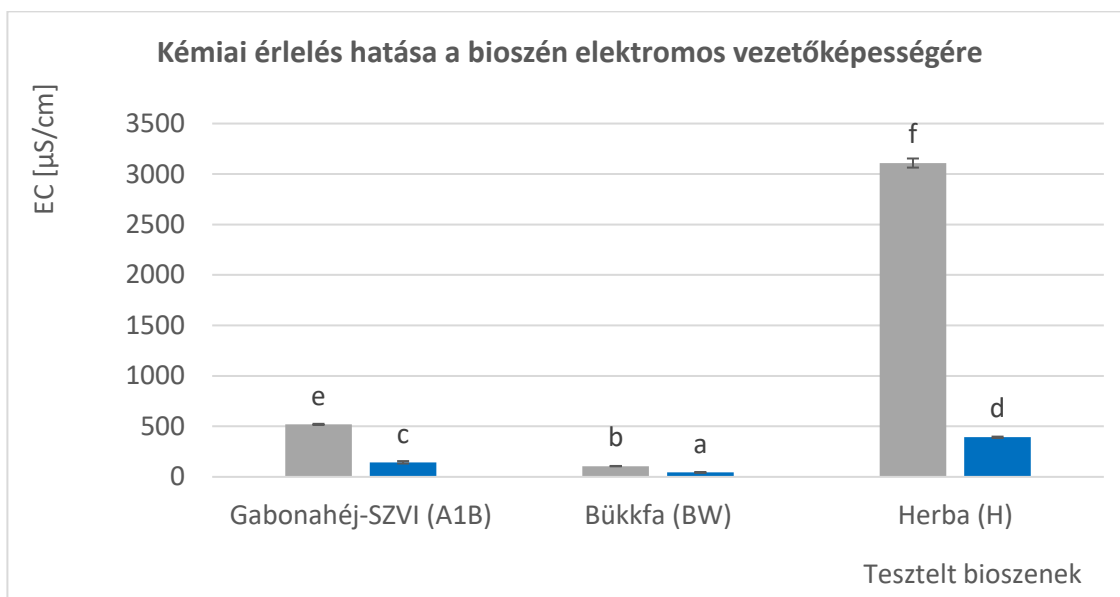
#### **6.1.1. pH és vezetőképesség alakulása a kémiai érlelés hatására**

A 10. ábrán a pH mérés eredményei láthatóak. Egyértelműen megállapítható, hogy minden esetben a pH értékének csökkenését tapasztaltuk az érlelést követően. A gyógynövény alapú minta esetén nem tapasztalható szignifikáns csökkenés, míg a másik két bioszén esetén szignifikáns volt a változás. Legnagyobb csökkenés az A1B (gabonahéj és papírgyártási szennyvíziszap alapú) minta esetén volt tapasztalható. Ez egy közel 1,45 mértékű pH csökkenést jelent. Legkisebb csökkenés a gyógynövény minta esetén volt tapasztalható, ami esetén mindössze 0,14 értékű pH csökkenésről beszélhetünk. Az eltérő bioszenek különböző mértékű pH változást mutattak, amely az eltérő alap felületi jellemzőkből és összetételekből adódhattak. Hasonlóan a mi eredményeinkhez, Sorrenti és munkatársai (2016) azt tapasztalták, hogy érlelés hatására csökken a fa alapanyagból származó bioszén kémhatása, ami feltehetőleg a bázikus csoportok, mint karbonátok vagy oxi-hidroxidok csökkenése idézett elő a kémiai érlelés során.



10. ÁBRA A KÉMIAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA BEKÖVETKEZŐ PH VÁLTOZÁS AZ EGYES MINTÁKBAN

A bioszén elektromos vezetőképességének változása jól követhető a 11. ábrán.



11. ÁBRA A KÉMIAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA BEKÖVETKEZŐ ELEKTROMOS VEZETŐKÉPESSÉG ÉRTÉKEINEK VÁLTOZÁSA AZ EGYES MINTÁKBAN

Mindhárom esetben a vezetőképesség csökkenése figyelhető meg. Ez a csökkenés minden esetben szignifikánsnak tekinthető; a legnagyobb mértékű változás a Herba (gyógynövény) minta esetén figyelhető meg, ahol 3109 µS/cm -ről 392 µS/cm -re csökkent a mért érték. A másik két esetben nem volt ilyen jelentős a csökkenés.

Az A1B esetén 519,75  $\mu\text{S/cm}$  -ről 144,60  $\mu\text{S/cm}$  -ra, míg a BW esetén 106,40  $\mu\text{S/cm}$  -ről 44,18  $\mu\text{S/cm}$  -ra változott az elektromos vezetőképesség értéke az érlelés hatására. Az elektromos vezetőképességet a bioszén termékekben jelenlévő ionos formájú mikro-tápelemek okozzák, ami kiemelkedően nagy a gyógynövény alapú bioszén esetén. Ugyanakkor ez is jelentős mértékben oxidálódott mindkét kémiai érlelés következtében.

### 6.1.2. Elemtartalom alakulása a kémiai érlelés hatására

Az 5. táblázatban a kémiai érlelés hatása látható a minták elemösszetételére. A BW bükkfa alapú bioszén minta esetén egyedül a cink összetételben volt megfigyelhető szignifikáns növekedés. Az A1B (gabonahéj-szennyvíziszap alapú) minta esetén elmondható, hogy a cink, réz és a kén tartalomnál nem volt szignifikáns változás. Ugyanakkor a vas és kalcium tartalom esetén jelentős növekedés, míg a kálium tartalom esetén jelentős csökkenést eredményezett a kezelés. A Herba mintánál azt lehetett megfigyelni, hogy csupán a vas és kén tartalomnál nem jelentkezett szignifikáns változás. Minden más elem esetén (cink, réz, kalcium és kálium) szignifikáns növekedés következett be.

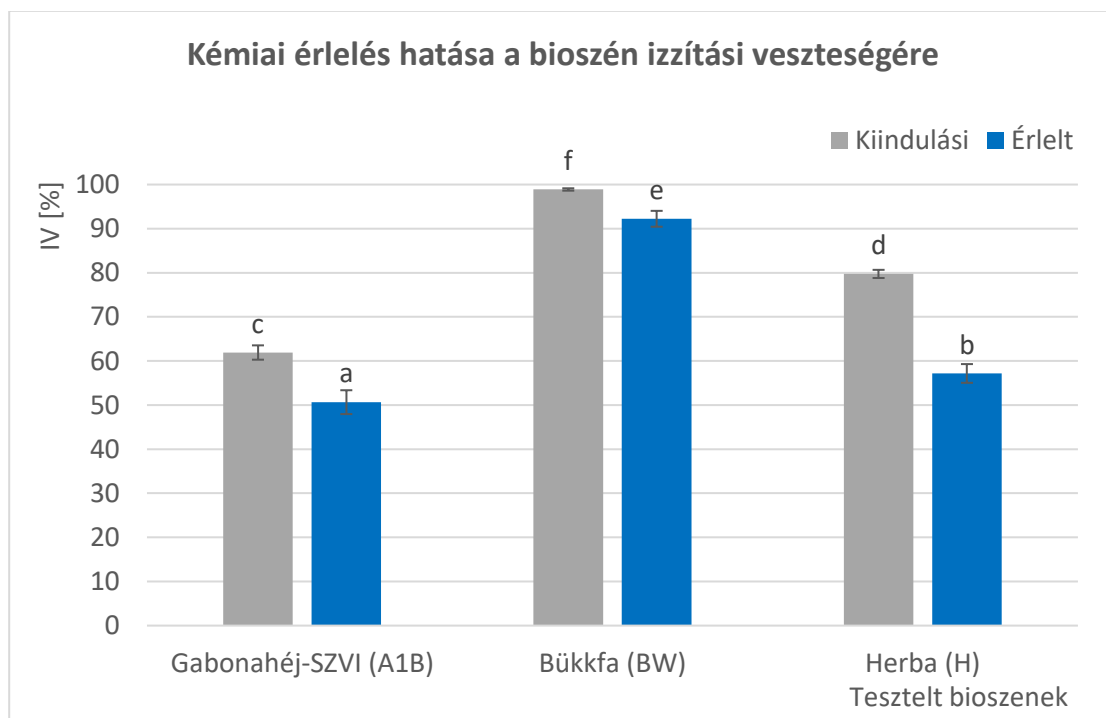
5. TÁBLÁZAT ELEMTARTALOM A KIINDULÁSI ÉS A KÉMIAI ÉRLELT BIOSZENEBEN

	Elemtartalom a kiindulási és a kémiai érlelt bioszenekben					
	Zn	Cu	Fe	Ca	K	S
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
BÜKKFA (BW) - Kiindulási	< LOD <sup>a</sup>	10 <sup>a</sup> (± 1)	< LOD <sup>a</sup>	6518 <sup>a</sup> (± 392)	4940 <sup>a</sup> (± 212)	469 <sup>a</sup> (± 63)
GH-SZVI (A1B) - Kiindulási	94 <sup>c</sup> (± 7)	55 <sup>b</sup> (± 3)	731 <sup>b</sup> (± 65)	13807 <sup>b</sup> (± 293)	37230 <sup>c</sup> (± 689)	1647 <sup>b,c</sup> (± 75)
HERBA (H) - Kiindulási	93 <sup>c</sup> (± 3)	82 <sup>c</sup> (± 2)	949 <sup>b,c</sup> (± 119)	10198 <sup>a,b</sup> (± 568)	135736 <sup>e</sup> (± 1874)	1857 <sup>c</sup> (± 16)
BÜKKFA (BW) - Érlelt	21 <sup>b</sup> (± 3)	18 <sup>a</sup> (± 2)	< LOD <sup>a</sup>	8762 <sup>a,b</sup> (±365)	1860 <sup>a</sup> (±97)	511 <sup>a</sup> (±81)
GH-SZVI (A1B) - Érlelt	91 <sup>c</sup> (± 9)	49 <sup>b</sup> (± 5)	1596 <sup>d</sup> (±243)	25688 <sup>d</sup> (±5017)	23547 <sup>b</sup> (±1466)	1468 <sup>b</sup> (±196)
HERBA (H) – Érlelt	126 <sup>d</sup> (± 10)	115 <sup>d</sup> (± 9)	1014 <sup>c</sup> (±92)	20408 <sup>c</sup> (±1169)	69651 <sup>d</sup> (±5362)	1697 <sup>c</sup> (±101)
<i>Kimutatási hatás (LOD)</i>	15	25	75	330	A/S	A/S

Szintén H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kezelést alkalmaztak Huff & Lee (2016), fenyőfa biomasszából előállított bioszénnel, majd ők is elemanalízist végeztek. Azt tapasztalták, hogy a minták elemi összetétele általánosságban nem változott.

### 6.1.1. Izzítási veszteség alakulása a kémiai érlelés hatására

A 12. ábrán az egyes minták kémiai érlelés hatására megváltozott izzítási veszteség értéke látható. Mind a három esetben a mért érték csökkenése figyelhető meg, (azaz a hamutartalom növekedése). Minden minta esetén szignifikáns a csökkenés mértéke. Az érlelés előtt a BW esetén 99%-os, a H esetén 80%-os, az A1B esetén pedig 62%-os izzítási veszteség volt mérhető. Ez a sorrend az érlelést követően is megmaradt a BW esetén 92%-os, a H esetén 57%-os az A1B esetén pedig 51%-os veszteségről beszélhetünk. Az eredmények egyértelműen jelzik a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-érlelés hatására bekövetkező erőteljes oxidálását a szerves anyagoknak.



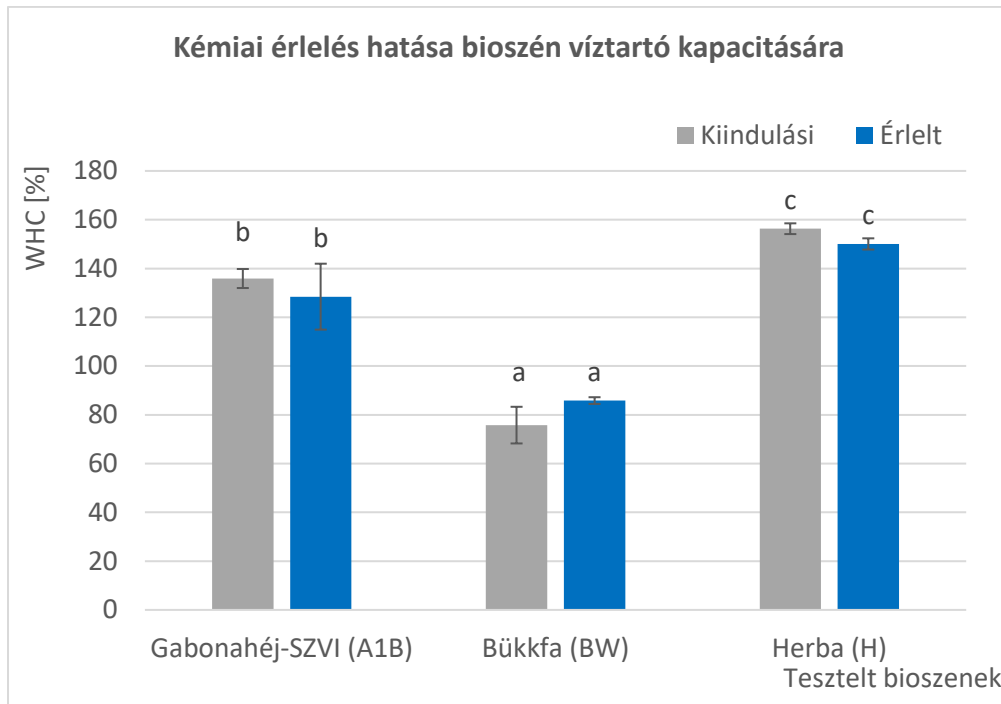
12. ÁBRA AZ EGYES MINTÁK ESETÉN TAPASZTALT IZZÍTÁSI VESZTESÉG MÉRTÉKE AZ EGYES MINTÁKBAN

### 6.1.2. Vízretartó kapacitás (WHC) alakulása a kémiai érlelés hatására

Az alábbi ábra szemlélteti a vízretartó kapacitás változását (12. ábra). Megállapítható, hogy az A1B és a Herba esetén csökkent, míg a BW esetén nőtt a vízretartó kapacitás.



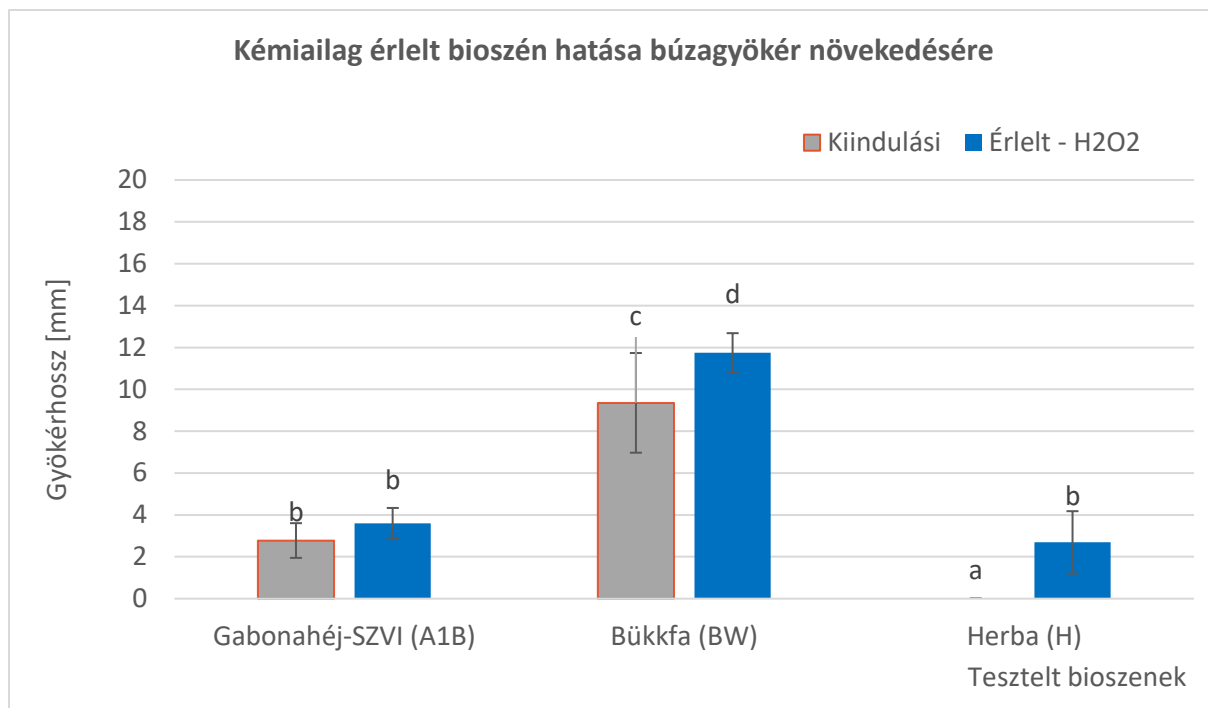
Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy ez a változás egyik esetben sem tekinthető szignifikánsnak. Az érlelést követően a Herba bioszén rendelkezett a legnagyobb mért értékkel (150%) míg a BW a legkisebb mért értékkel (86%).



13. ÁBRA A KÉMIAI ÉRLELÉS HATÁSA AZ EGYES MINTÁK VÍZTARTÓ KAPACITÁSÁNAK MÉRTÉKÉRE

### 6.1.3. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Triticum aestivum* tesztnövényen a kémiai érlelés hatására

A 14. ábrán a kémiai érlelés hatásai jól nyomon követhetők a búza gyökérhosszának alakulásában. A BW bükkfa alapú minta esetén növekedést lehet megállapítani, ami a gyökér átlagos hosszúságát érinti. Ez a hosszúság növekedés szignifikáns mértékű volt. A BW esetén az átlagos 9,4 mm hossz érlelés hatására 11,7 mm-re növekedett. A Herba minta esetben is szignifikáns növekedés figyelhető meg. A kiindulási mintáról megállapítható, hogy gátolta a gyökerek növekedését, mivel itt esetek többségében nem nőttek ki a gyökerek (0 mm). Az érlelést követően az figyelhető meg, hogy az átlagos gyökér méret már elérte a 2,7 mm-t. Az A1B esetén nem volt tapasztalható szignifikáns változás. A kezdeti gyökérhossz a kémiai érlelést követően 3,6 mm-re változott meg.

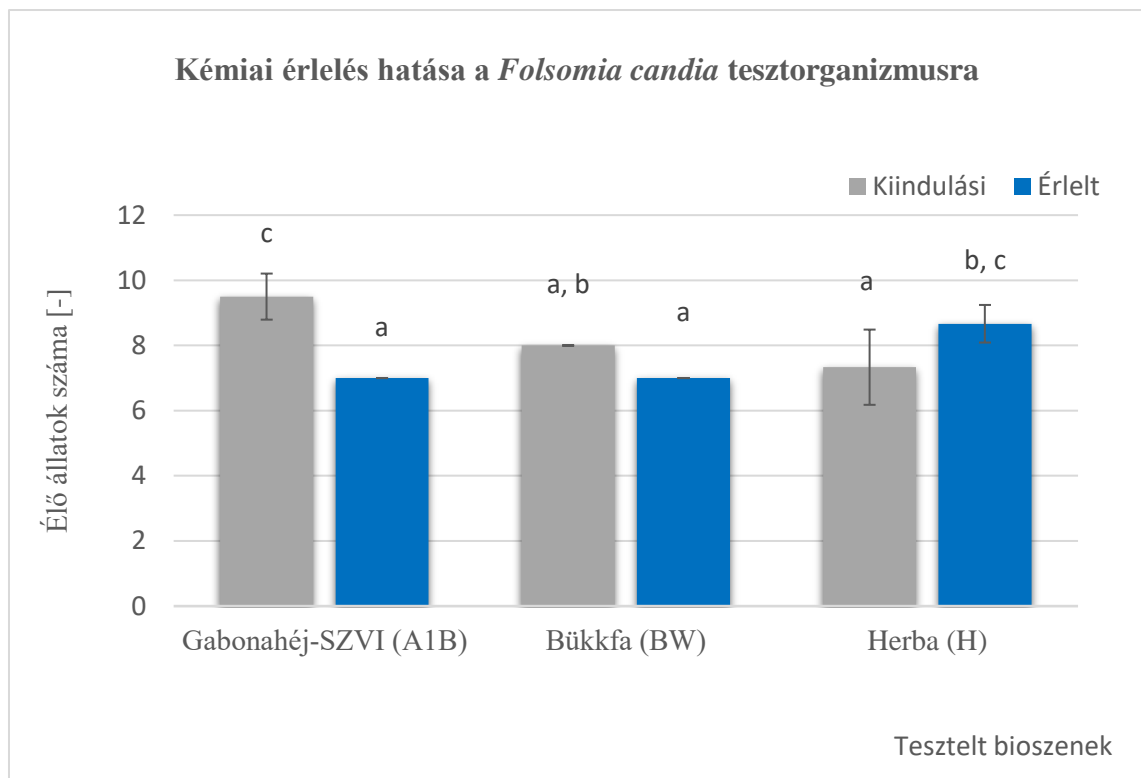


**14. ÁBRA** A KÉMIAI ÉRLELÉS HATÁSA *TRITICUM AESTIVUM* GYÖKÉRHOSSZÁNAK NÖVEKEDÉSÉRE

#### **6.1.4. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata *Folsomia candida* rovarral a kémiai érlelés hatására**

A *Folsomia candida* rovar mortalitás vizsgálatának eredményei a 15. ábrán követhetőek nyomon. A kémiai érlelést követően elmondható, hogy a BW minta esetén nem mutatott az ANOVA varianciaanalízis szignifikáns eltérést. Az átlagosan életben maradt állatok száma 8-ról 7-re csökkent.

Az A1B minta közepes enyhe hatást mutatott az érlelés hatására; az élősejtszám csökkenést mutatott, a kezdeti 10 élőlényből az érlelést követően átlagosan 7 db maradt életben. Ugyanakkor a Herba minta esetén növekedést figyelhettünk meg, méghozzá ennek a mértéke szignifikáns volt. A kiindulási 7 életben maradt állat száma az érlelést követően 9 db-ra emelkedett.



Tomczyk és munkatársai (2021) szennyvíziszap alapú bioszenekkel végeztek laborkísérleteket, amelyek során az ökototoxicitás alakulását is vizsgálták. Az ökotoxikológiai vizsgálatokat különböző növényvel - *Lepidium sativum* és ugróvillás rovarral - *Folsomia candida*) is elvégezték. Eredményeik alapján az érési folyamatok során az alkalmazott bioszén termékek gátló hatása csökkent az összes vizsgált organizmussal szemben, és serkentő hatással volt a *Folsomia candida* szaporodási képességére. A kerti zsásza növény esetén az érés során az eredeti enyhe csírázásgátló hatás megszűnt.

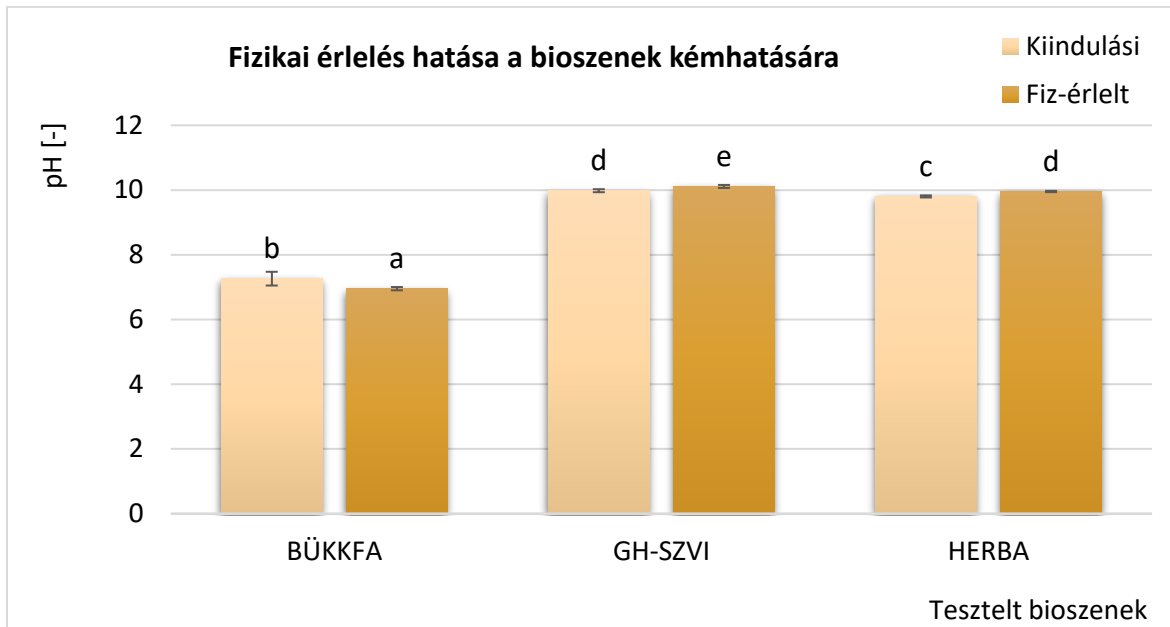
Kutatásainkban a növényteszt hasonló kedvező hatást mutatott, ugyanakkor a Collembola állati mortalitási teszt esetén enyhe kedvezőtlen változás lépett fel a gabonahéj és szennyvíziszap alapú bioszén esetén. Ennek felderítése még további vizsgálatokat igényel.

## 6.2. Mesterséges fizikai érlelés eredményei

### 6.2.1. pH és vezetőképesség alakulása a fizikai érlelés hatására

A 16. ábrán a fizikai érlelés hatására bekövetkező pH változás figyelhető meg. Elmondható, hogy minden esetben szignifikáns változás tapasztalható. A BW esetén ez a változás egy pH csökkenés mely során a mért érték 7,26-ról lecsökkent 6,95-re. Az A1B és a H esetén a változás a pH értékének növekedésével járt.

Az A1B esetén 9,98-ról 10,11-re nőtt, míg a H esetén 9,80-ról 9,96-ra nőtt a mért érték. Határozottan megállapítható az is, hogy a BW minta pH-ja volt mind érlelés előtt mind pedig érlelés után a legalacsonyabb.

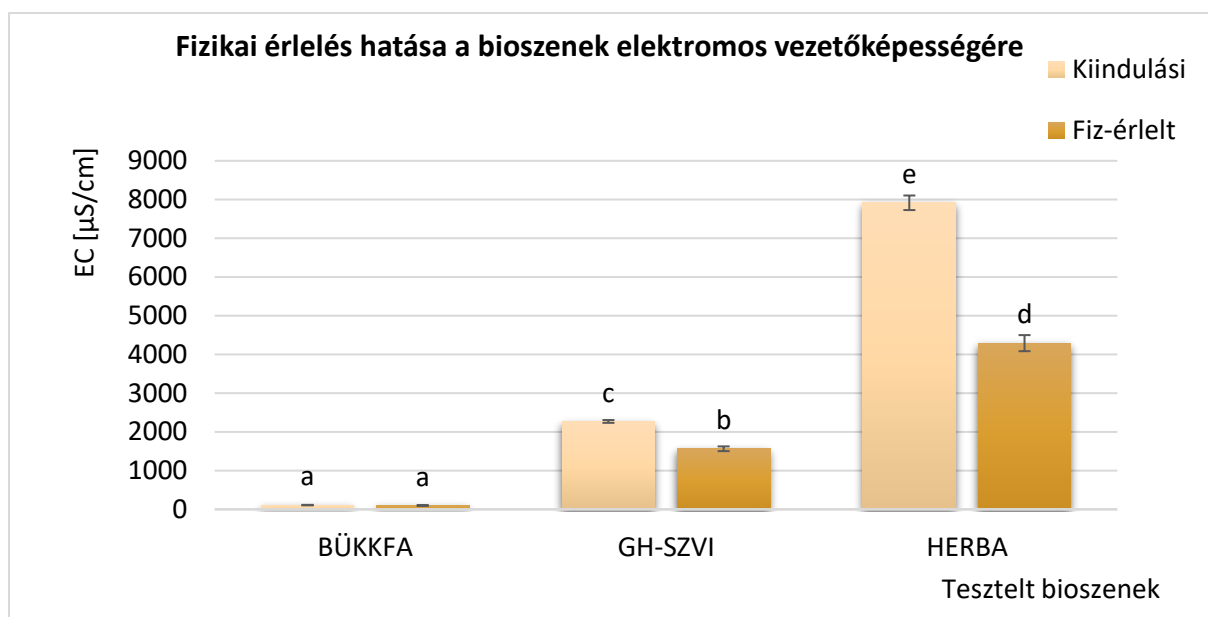


15. ÁBRA AZ EGYES MINTÁK PH ÉRTÉKÉNEK VÁLTOZÁSA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

A vezetőképesség tendenciájának alakulásában hasonló eltéréseket tapasztaltunk, mind a kémiai érlelés esetén.

A BW minta esetén elmondható, hogy határozottan a legkisebb elektromos vezetőképességgel rendelkezik a minták közül. Érlelés előtt 110  $\mu\text{S}/\text{cm}$  érték volt mérhető és érlelés után, pedig mindössze 99  $\mu\text{S}/\text{cm}$  érték volt mérhető. Kijelenthető, hogy az érlelés nem járt szignifikáns csökkenéssel.

Ugyanakkor a vezetőképesség csökkenése figyelhető meg az A1B és a H minták esetén. Ezeknél viszont jóval nagyobb (szignifikáns) a változás mértéke. Előbbi esetén 2270  $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ről 1565  $\mu\text{S}/\text{cm}$ -re történő, míg utóbbi esetén 7917  $\mu\text{S}/\text{cm}$ -ről 4292  $\mu\text{S}/\text{cm}$ -re történő vezetőképesség csökkenés volt mérhető. Ezeket szemlélteti a 16. ábra.



16. ÁBRA AZ EGYES MINTÁK ELEKTROMOS VEZETŐKÉPESSÉGÉNEK VÁLTOZÁSA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

### 6.2.2. Elemtartalom alakulása a fizikai érlelés hatására

A minták elemösszetételének változása (XRF módszerrel) az érlelés hatására a 6.táblázatban figyelhető meg.

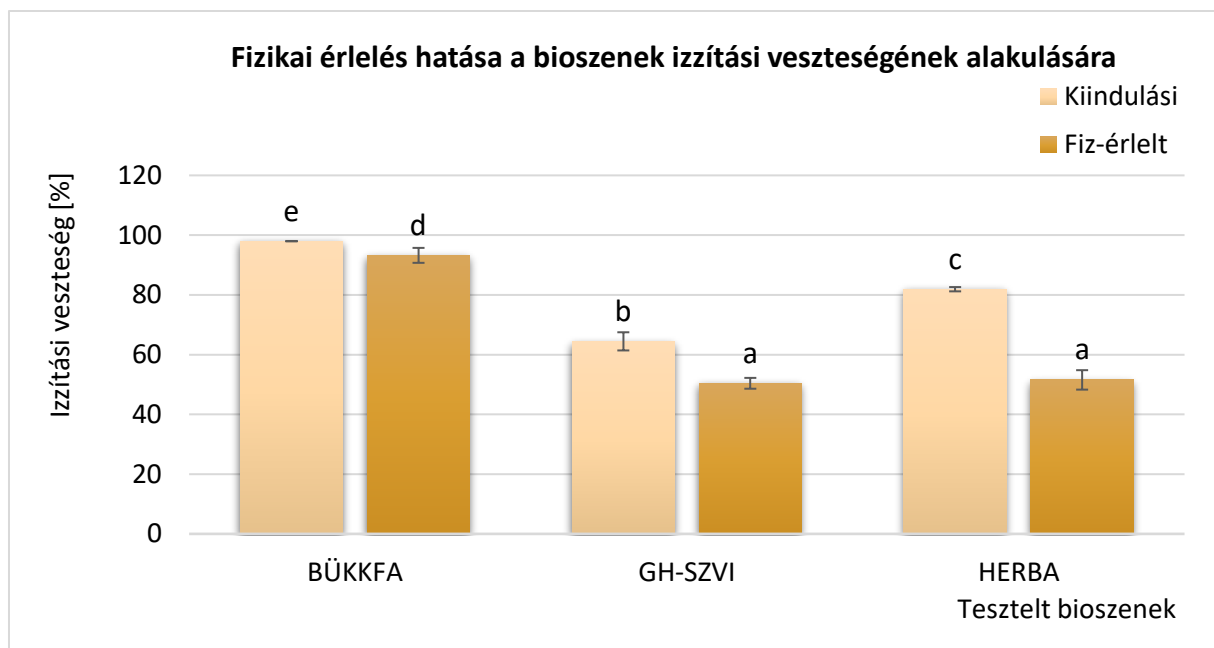
6. TÁBLÁZAT A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSA AZ EGYES MINTÁK ELEMÖSSZETÉTELÉRE

	<b>Elemtartalom a kiindulási és a fizikai érlelt bioszenekben</b>					
	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Ca</b>	<b>K</b>	<b>S</b>
	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>
BÜKKFA (BW) - Kiindulási	< LOD <sup>a</sup>	24 <sup>a</sup> (± 2)	85 <sup>a</sup> (± 8)	6239 <sup>a</sup> (± 1091)	6784 <sup>a</sup> (± 316)	354 <sup>a</sup> (± 69)
GH-SZVI (A1B) - Kiindulási	64 <sup>b</sup> (± 6)	54 <sup>b</sup> (± 0)	382 <sup>b</sup> (± 3)	11303 <sup>c</sup> (± 930)	35402 <sup>b</sup> (± 1999)	755 <sup>b</sup> (± 140)
HERBA (H) - Kiindulási	85 <sup>c</sup> (± 9)	81 <sup>c</sup> (± 4)	889 <sup>c</sup> (± 26)	9076 <sup>b</sup> (± 953)	101609 <sup>d</sup> (± 12730)	1539 <sup>c</sup> (± 306)
BÜKKFA (BW) - Érlelt	11 <sup>a</sup> (± 2)	25 <sup>a</sup> (± 3)	73 <sup>a</sup> (± 14)	7771 <sup>a, b</sup> (± 1111)	7929 <sup>a</sup> (± 415)	604 <sup>a, b</sup> (± 47)
GH-SZVI (A1B) - Érlelt	109 <sup>d</sup> (± 9)	81 <sup>c</sup> (± 9)	393 <sup>b</sup> (± 70)	13648 <sup>d</sup> (± 923)	57660 <sup>c</sup> (± 2421)	1239 <sup>c</sup> (± 82)
HERBA (H) – Érlelt	110 <sup>d</sup> (± 3)	95 <sup>d</sup> (± 4)	830 <sup>c</sup> (± 26)	10661 <sup>c</sup> (± 726)	119446 <sup>d</sup> (± 20963)	1999 <sup>d</sup> (± 320)
<i>Kimutatási hatás (LOD)</i>	<i>15</i>	<i>25</i>	<i>75</i>	<i>330</i>	<i>A/S</i>	<i>A/S</i>

A BW minta esetén elmondható, hogy az érlelés egyik elem mennyiségét sem befolyásolta szignifikánsan. Az A1B minta esetén egyedül a vas tartalomnál nem volt tapasztalható szignifikáns változás, minden más elemnél megfigyelhető volt. Minden más elemnél, így a cink, réz, kalcium, kálium, és kén esetén is lényeges növekedés volt észlelhető. A H minta esetén hasonló tapasztalatokat lehet elmondani, mint az A1B esetén. A különbség, hogy nem csupán a vas esetén nem volt szignifikáns az érlelés hatása, de a kén tartalom esetén sem. Minden más elemnél, így a cink, réz, kalcium és kén esetén is növekedést okozott a fizikai érlelés.

### 6.2.3. Izzítási veszteség alakulása a fizikai érlelés hatására

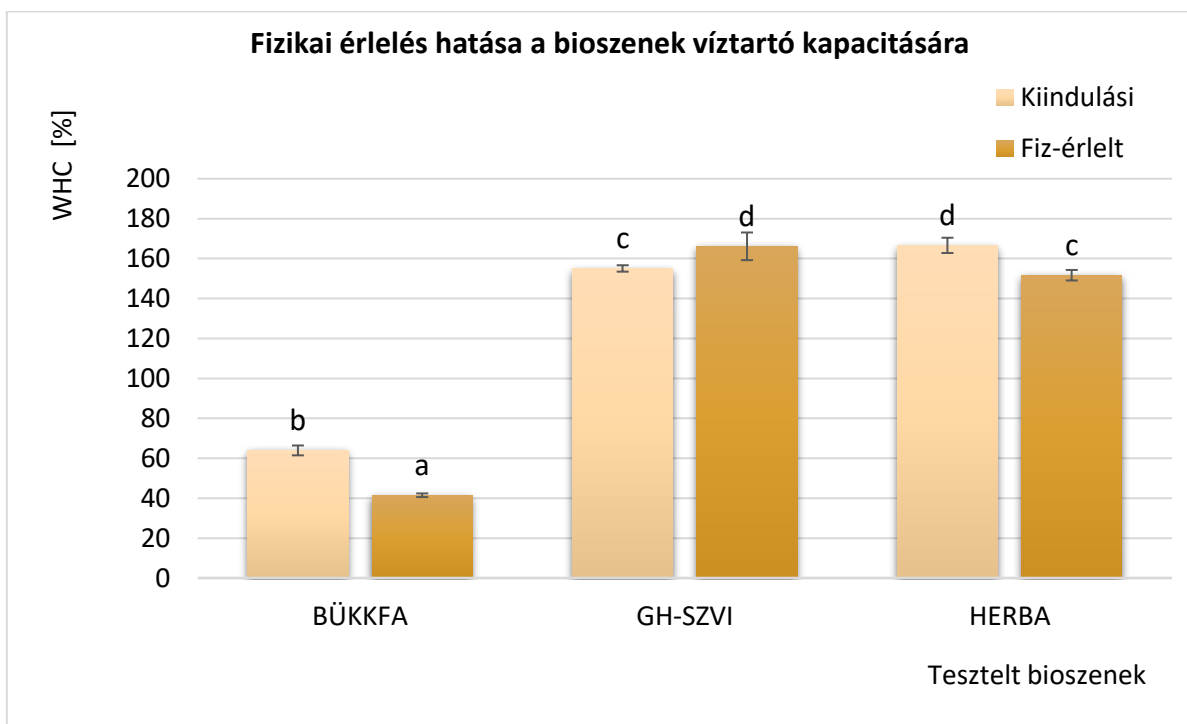
A vizsgált bioszenek izzítási veszteségére minden esetben szignifikánsan hatott a fizikai érlelés (17. ábra). Az egyes minták esetén a vizsgált paraméter csökkenését lehetett észlelni. Mind az érlelés előtt (~64%) és érlelés után (~50%) is az A1B jelű bioszén esetén volt mérhető a legalacsonyabb izzítási veszteség. Ezt követte a Herba minta melynél a kezdeti ~82%-os veszteség az érlelés után ~52%-ra esett vissza. A többihez képest legkisebb változás a BW bioszénél volt tapasztalható, ahol a kezdeti ~98%-os veszteség mindössze ~93%-ra esett vissza.



17. ÁBRA AZ EGYES MINTÁK IZZÍTÁSI VESZTESÉGÉNEK VÁLTOZÁSA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

#### 6.2.4. Víztartó kapacitás (WHC) alakulása a fizikai érlelés hatására

A víztartó kapacitás vizsgálat változatos eredményeket hozott (18. ábra). A három közül határozottan a bükkfa alapanyagú bioszén rendelkezett a legkisebb víztartó képességgel. Az eleve kis kiindulási értékre (~64%) szignifikánsan negatív hatással volt az érlelés, a WHC értéke 42%-ra csökkent. A kezdetileg legnagyobb víztartó kapacitással rendelkező H minta (167%) értéke a BW-hez hasonlóan szignifikánsan csökkent (152%) az érlelés hatására. Egyedül az A1B minta esetén mutatott a kezelés (fizikai érlelés) pozitív hatást. Az figyelhető meg, hogy 155%-ról a vizsgált érték 166%-ra növekedett, ami szignifikánsnak mondható.

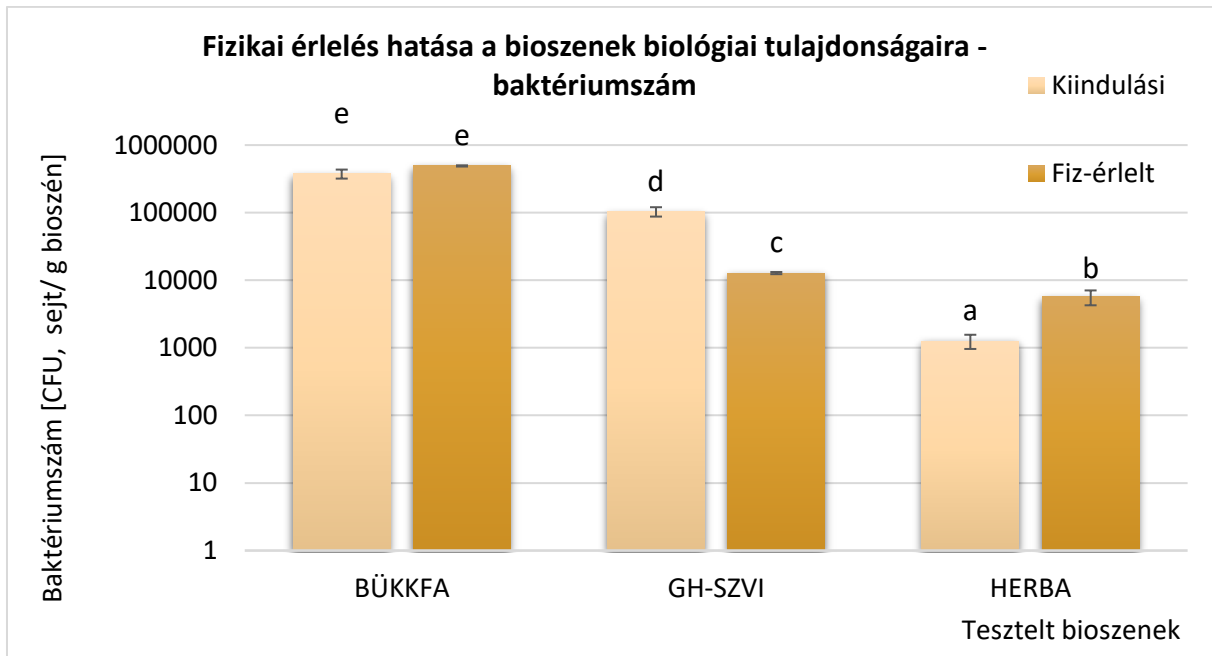


18. ÁBRA AZ EGYES MINTÁK VÍZTARTÓ KÉPESSÉGÉNEK VÁLTOZÁSA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

#### 6.2.5. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám alakulása a fizikai érlelés hatására

A fizikai érlelés hatása a baktérium- és gombaszám változására a 19. és 20. ábrán látható. Legnagyobb számban a BW minta esetén lehetett mind az érlelés előtt és az érlelés után telepképzésre alkalmas baktériumokat találni. Ezen mintánál szignifikáns növekedés volt megfigyelhető, mely során a kezdeti átlagos 376 778 sejt/g bioszén érték 491583 sejt/g-ra nőtt. Ezt követte az A1B minta aminek esetén szignifikáns csökkenés volt megfigyelhető ami a telepképzésre alkalmas baktériumokat érinti.

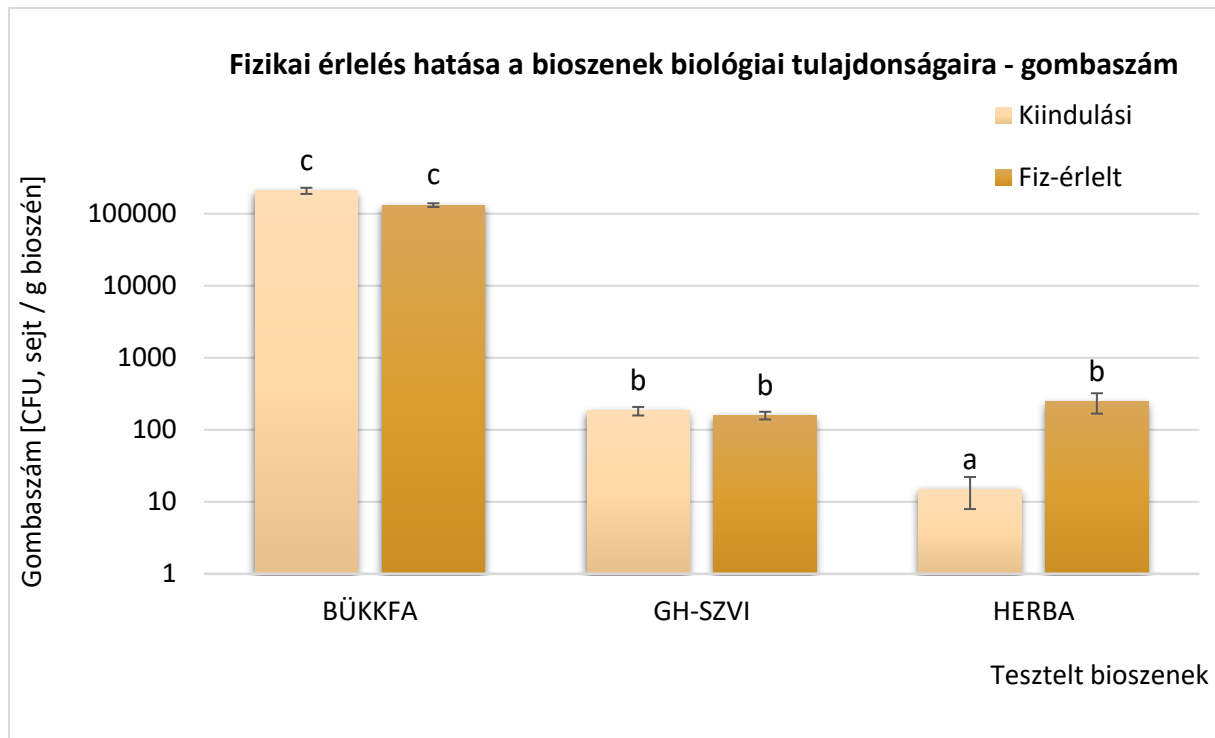
Itt 103975 sejt/g-ról 12770 sejt/g-ra történő csökkenést tapasztaltunk. Végül a HERBA minta baktériumokra értendő CFU értéke szintén egy jelentős növekedést mutatott, ahol a kezdeti 1262 sejt/g értéket a kezelés 5667 sejt/g-ra növelte meg.



19. ÁBRA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSA A BAKTÉRIUMSZÁMRA

A telepképzésre alkalmas gombaszámok vizsgálatánál az figyelhető meg, hogy a BW rendelkezett kimagaslóan a legnagyobb értékkel mind a fizikai érlelés előtt (208500 sejt/g) és után (131833 sejt/g) is. Erre a mintára a kezelés nem hatott szignifikánsan. Ugyanez elmondható az A1B mintáról is, ahol 183 sejt/g-ról 158 sejt/gram-ra változott a sejtszám. A Herba esetén már egy szignifikáns növekedés mutatkozott, ahol 15 sejt/g-ról szignifikáns mértékben emelkedett a telepképzésre alkalmas gombák száma, méghozzá 244 sejt/g-ra.





20. ÁBRA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSA A GOMBASZÁMRA

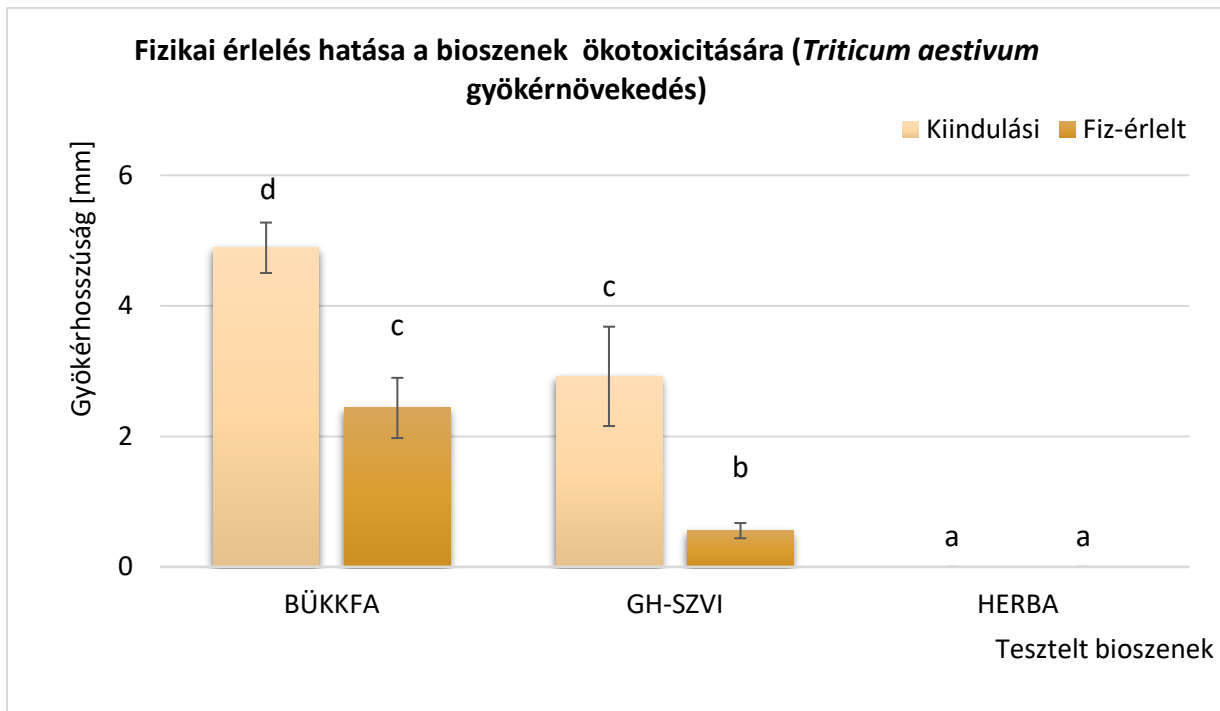
#### 6.2.6. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Triticum aestivum* tesztnövényen

A 21. ábrán látható a *Triticum aestivum* azaz a közönséges búzára gyakorolt hatása a fizikai érlelésnek.

Kiemelendő eredmény, hogy a Herba bioszén esetén mind az érlelés előtt, mind pedig érlelés után teljes gátlást eredményezett. A BW és az A1B esetén is elmondható, hogy a kezelés után lényegesen visszaesett a kifejlődő gyökérkezdemények hossza.

A BW esetén az átlagos 4,9 mm-ről 2,4 mm-re esett vissza a mért hossz. Ez az A1B esetén 2,9 m-ről 0,6 mm-re történő csökkenést jelentett.

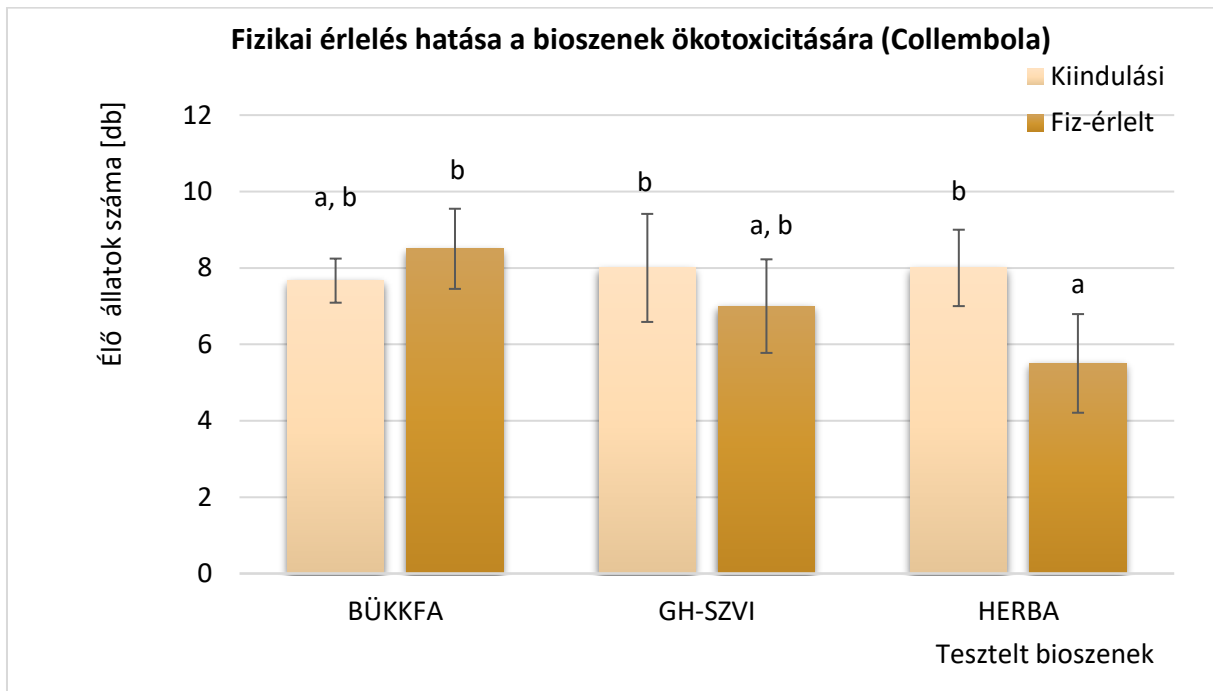
Összességében a fizikai érlelés kedvezőtlen hatást gyakorolt a búza növekedésére. Ugyanakkor kiemelendő, hogy a búza tesztnövény kimagasló érzékenységgű tesztorganizmus az ökotoxikológiai vizsgálatokban.



21. ÁBRA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSA *TRITICUM AESTIVUM* GYÖKÉRHOSSZÁNAK NÖVEKEDÉSÉRE

### 6.2.7. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata *Folsomia candida* rovarral

A *Folsomia candida* talajlakó állat mortalitás vizsgálatának eredményei a 22. ábrán láthatóak.



22. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA ÉLETBEN MARADT TESZTORGANIZMUSOK SZÁMA

Egyedül a Herba minta estén volt tapasztalható szignifikáns változás a kezelést követően. Ezen esetben az átlagosan 8 életben maradt állat száma 5,5-re esett vissza. Szintén csökkenést mutatott az A1B minta ahol az életben maradt állatok darab száma 8-ról 7-re esett vissza. Egyedül a BW bioszén minta esetén volt megfigyelhető kedvező hatás.

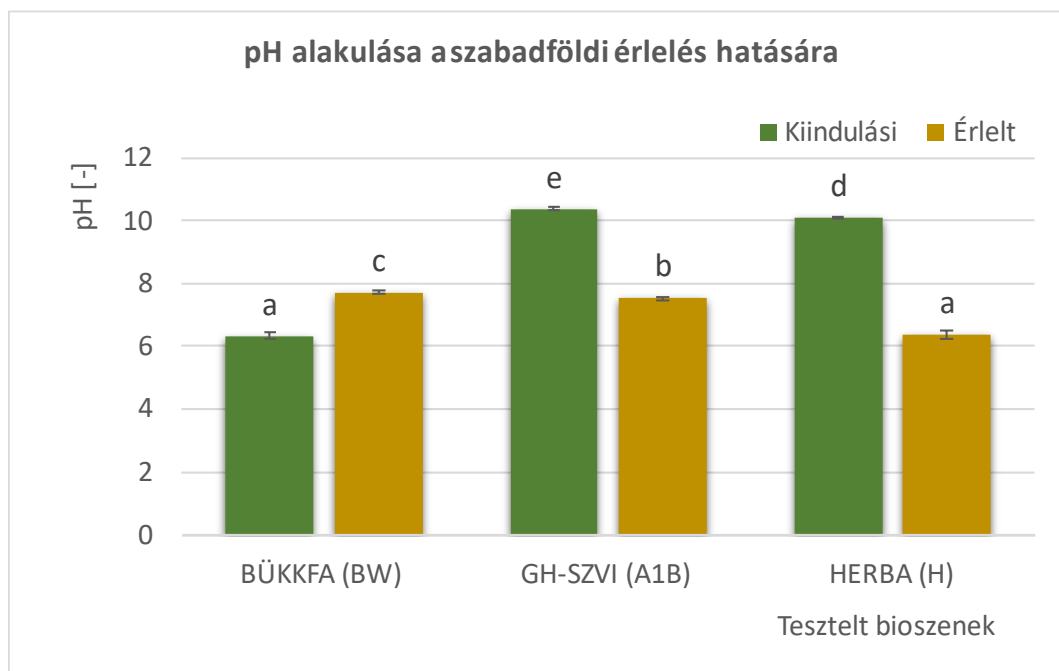
A komplex metodika szükségességét jól igazolják az előzőekben bemutatott ökotoxikológiai eredmények, hiszen az eltérő tesztrendszerek eltérő hatásokat szemléltettek.

### 6.3.Szabadföldi érlelés eredményeinek kiértékelése

A következőkben bemutatott mérések esetén is a BW-vel a bükkfából-, A1B-vel a gabonahéj szennyvíziszapból-, H-val a gyógynövényből készült bioszén mintákat jelöltem.

#### 6.3.1. pH és vezetőképesség alakulása a szabadföldi érlelés hatására

A pH mérés eredményeit a 23. ábra mutatja.

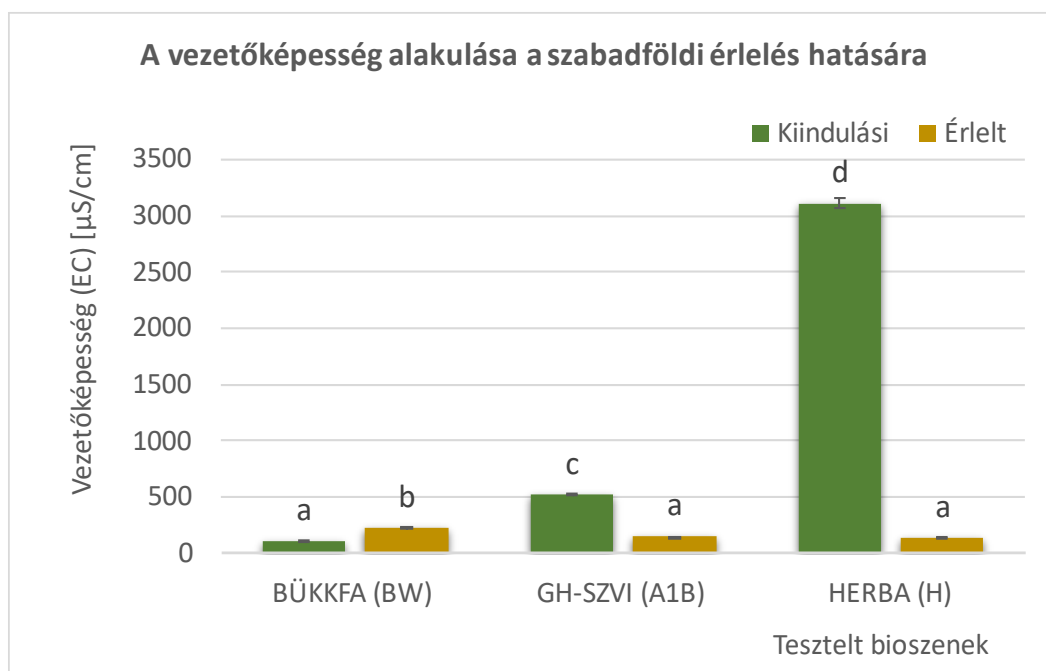


23. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSA A BIOSZENEK KÉMHAJTÁSÁRA

Az ábrán jól látható, hogy a pH értékei közel 6 és 10 között ingadoztak. Nem csupán a különféle minták között volt szignifikáns különbség, hanem az azonos minták esetén a kiindulási és érlelt minták között is.

Egyedül a kiindulási BW mintából és az érlelt H mintából mért pH esetén tapasztaltunk nem szignifikáns különbséget. A legmagasabb pH értéket a kiindulási A1B minta (10,38) esetén-, míg legalacsonyabbat pedig a kiindulási BW minta (6,34) esetén mértünk. Mind az A1B mind pedig a H esetében a pH szignifikáns csökkenését tapasztaltuk a kezelés hatására, ám ez a BW esetén nem volt megfigyelhető. Az A1B és H minták esetén tapasztalt pH csökkenés egybe esik Li és munkatársai eredményeivel mivel természetes érlelés hatására szintén pH csökkenést állapítottak meg. Ennek oka az lehet, hogy a bioszén felületén levő funkciócsoportok az érés során oxidálódnak, melynek eredményeként  $H^+$  szabadulnak fel és ezáltal csökken a pH értéke.

A vezetőképesség mérés (EC) eredményei a 24. ábrán láthatóak.



24. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSA A BIOSZENEK VEZETŐKÉPESSÉGÉRE

A kiindulási BW, valamint az érlelt A1B és érlelt H értékek nem tértek el egymástól számottevően. Viszont ezektől szignifikánsan eltértek a többi minták eredményei. Ez különösen igaz a kiindulási H értékre (3115 µS/cm) mely az összes mintánál többszörösen magas értéket mutat.

A legkisebb EC értéket pedig a kiindulási BW minta (106  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) esetén mértünk. Az A1B valamint a H minta esetén szignifikáns EC csökkenést, míg a BW minta esetén pedig szignifikáns EC növekedést tapasztaltunk kezelés hatására. Chen és munkatársai arra a következtetésre jutottak, hogy a vezetőképesség csökkenésnek az lehet az oka, hogy a bioszén felületén található vízdoldható sók leváltak a felszínről. Ez nagy valószínűséggel vízzel történő leoldódás folyamatának az eredménye. (Chen et al., 2021)

### 6.3.2. Elemtartalom alakulása a szabadföldi érlelés hatására

Az elemtartalom vizsgálat (XRF módszerrel) eredményeit a 7. táblázatban foglaltam össze.

7. TÁBLÁZAT AZ ELEMTARTALOM VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

	Elemtartalom a kiindulási és az érlelt bioszenekben					
	Zn	Cu	Fe	Ca	K	S
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
BÜKKFA (BW) - Kiindulási	< LOD <sup>b</sup>	10 <sup>a</sup> ( $\pm 1$ )	85 <sup>b</sup> ( $\pm 8$ )	6518 <sup>d</sup> ( $\pm 392$ )	4940 <sup>a</sup> ( $\pm 212$ )	469 <sup>a</sup> ( $\pm 63$ )
GH-SZVI (A1B) - Kiindulási	94 <sup>a</sup> ( $\pm 7$ )	55 <sup>c</sup> ( $\pm 3$ )	731 <sup>d</sup> ( $\pm 65$ )	13807 <sup>a, b</sup> ( $\pm 293$ )	37230 <sup>d</sup> ( $\pm 689$ )	1647 <sup>b</sup> ( $\pm 75$ )
HERBA (H) - Kiindulási	92 <sup>a</sup> ( $\pm 3$ )	81 <sup>b</sup> ( $\pm 2$ )	949 <sup>a</sup> ( $\pm 119$ )	10198 <sup>c</sup> ( $\pm 568$ )	135736 <sup>e</sup> ( $\pm 1874$ )	1857 <sup>b</sup> ( $\pm 16$ )
BÜKKFA (BW) - Érlelt	101 <sup>a</sup> ( $\pm 10$ )	82 <sup>b</sup> ( $\pm 8$ )	1254 <sup>e</sup> ( $\pm 109$ )	23059 <sup>e</sup> ( $\pm 1887$ )	14355 <sup>c</sup> ( $\pm 1185$ )	1406 <sup>d</sup> ( $\pm 142$ )
GH-SZVI (A1B) - Érlelt	59 <sup>c</sup> ( $\pm 9$ )	18 <sup>a</sup> ( $\pm 4$ )	1019 <sup>a</sup> ( $\pm 114$ )	16349 <sup>b</sup> ( $\pm 1889$ )	6608 <sup>b</sup> ( $\pm 551$ )	850 <sup>c</sup> ( $\pm 102$ )
HERBA (H) - Érlelt	25 <sup>b</sup> ( $\pm 12$ )	19 <sup>a</sup> ( $\pm 2$ )	315 <sup>c</sup> ( $\pm 33$ )	13322 <sup>a</sup> ( $\pm 1120$ )	4306 <sup>a</sup> ( $\pm 339$ )	586 <sup>a</sup> ( $\pm 44$ )
<i>Kimutatási hatás (LOD)</i>	15	25	75	330	A/S	A/S

A teszt során a cink, réz, vas, kalcium, kálium és kén tartalmát vizsgáltuk meg az egyes mintáknak. A BW minta esetén elmondható, hogy az érlelés hatására minden vizsgált elem tartalma szignifikánsan megemelkedett a kiindulási értékekhez képest. Az A1B jelű minta esetén a cink, a réz, a kálium és a kén tartalom szignifikáns csökkenést mutatott, míg a vas tartalom szignifikáns növekedést mutatott. Egyedül a kalcium tartalom volt az ami nem mutatott szignifikáns változást.

A H minta esetén pedig a kalcium tartalom esetén szignifikáns növekedést tapasztaltunk, míg minden más elem esetén szignifikáns csökkenést tapasztaltunk az érlelés hatására.

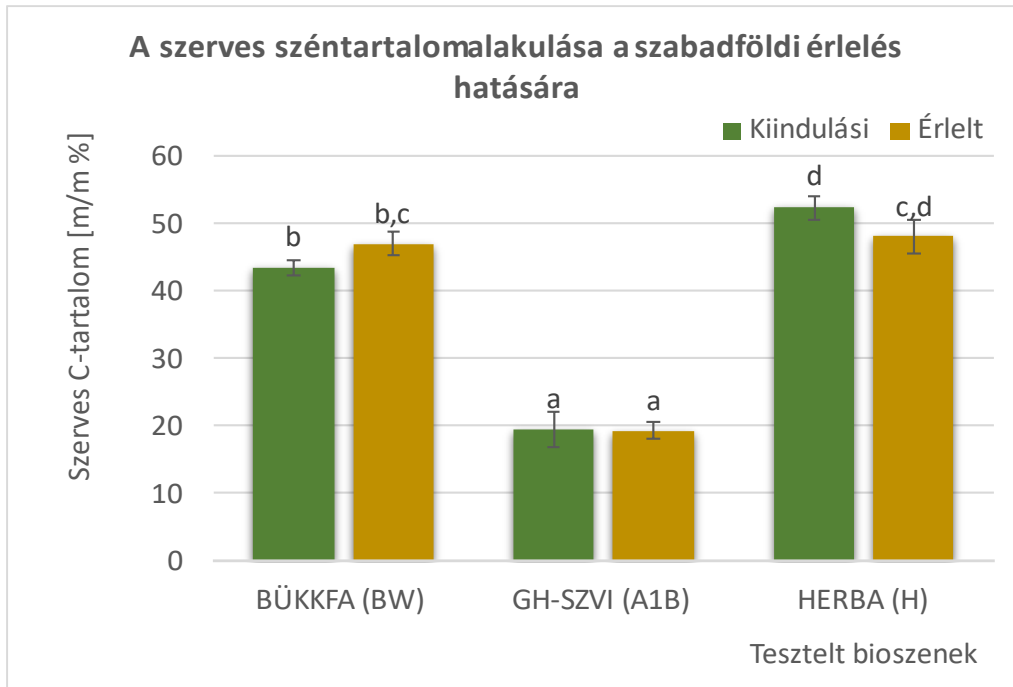
### 6.3.3. Szerves széntartalom mennyiségének-, nitrogén formák előfordulásának-, hozzáférhető foszfortartalom és káliumtartalom alakulása a szabadföldi érlelés hatására

A különböző mintákban található nitrogéntartalom a 8. táblázatban látható. Az összes nitrogéntartalomról elmondható, hogy minden minta esetén csökkent az érlelés hatására, ugyanakkor ez a csökkenés a BW minta esetén nem volt szignifikáns. Az ammónium formában jelen levő nitrogén tartalom minden minta esetén szignifikáns növekedést mutatott. A nitrit és nitrát formában megjelenő nitrogén tartalom a BW minta esetén szignifikáns csökkenésen esett át, míg az A1B és a H minta esetén szignifikáns növekedésről beszélhetünk.

8. TÁBLÁZAT AZ EGYES NITROGÉNFORMÁK ELŐFORDULÁSA AZ EGYES MINTÁKBAN

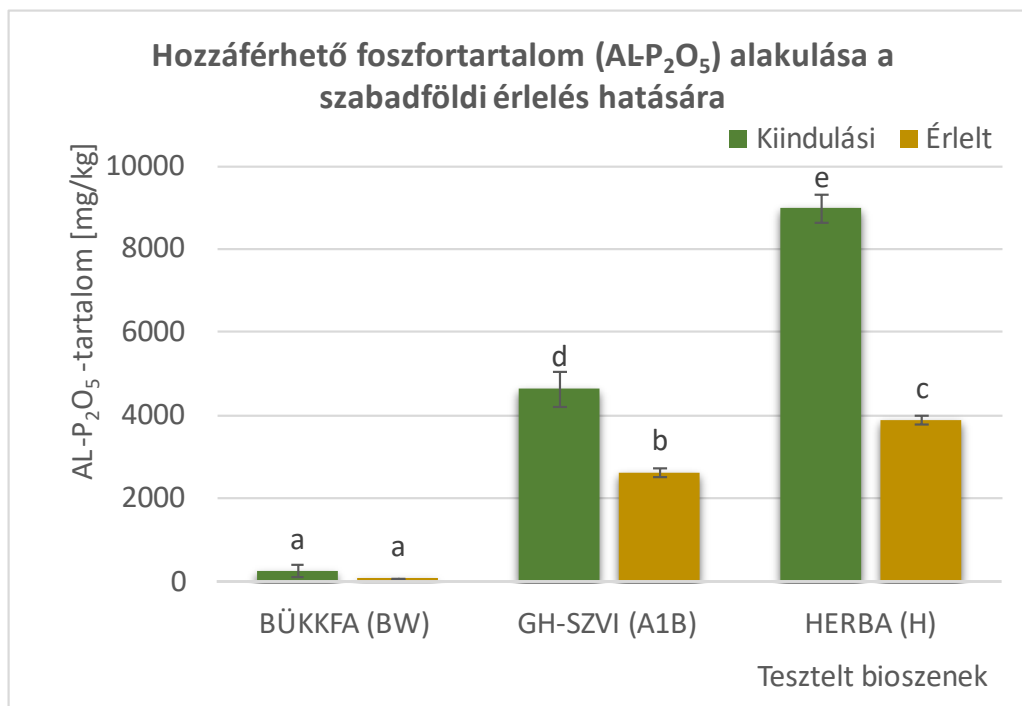
	Nitrogéntartalom a bioszenekben		
	Össz. N%	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> -N
	<i>m/m%</i>	<i>mg/kg</i>	<i>mg/kg</i>
BÜKKFA (BW) - Kiindulási	0,14 <sup>a</sup> (±0,01)	1,75 <sup>b</sup> (±0,09)	4,91 <sup>c</sup> (±0,18)
GH-SZVI (A1B) - Kiindulási	0,93 <sup>c</sup> (±0,03)	0,00 <sup>a</sup> (±0,00)	3,01 <sup>b</sup> (±0,10)
HERBA (H) - Kiindulási	1,16 <sup>e</sup> (±0,04)	0,00 <sup>a</sup> (±0,00)	2,02 <sup>b</sup> (±0,07)
BÜKKFA (BW) - Érlelt	0,15 <sup>a</sup> (±0,01)	6,64 <sup>d</sup> (±1,09)	0,62 <sup>a</sup> (±1,07)
GH-SZVI (A1B) - Érlelt	0,59 <sup>b</sup> (±0,04)	4,94 <sup>c</sup> (±0,12)	6,46 <sup>d</sup> (±0,51)
HERBA (H) - Érlelt	0,98 <sup>d</sup> (±0,01)	1,64 <sup>b</sup> (±0,16)	8,22 <sup>e</sup> (±0,81)

Az egyes mintákban tapasztalható szerves széntartalom alakulása a természetes érlelés hatására a 25. ábrán követhető nyomon. A kapott eredmények variancia analízisét követően kijelenthető, hogy az egyes minták kiindulási és érlelt eredményei között nincs szignifikáns eltérés. A BW és a H jelű minták értékei ~43 és ~52% között találhatóak, ugyanakkor ezektől sokkal alacsonyabb a gabonahéj és szennyvízalapú bioszén szerves széntartalma; 19,5- és 19,3 m/m% szerves széntartalommal rendelkezik.



25. ÁBRA A MINTÁKBAN MÉRHETŐ SZERVES SZÉNTARTALOM VÁLTOZÁSA AZ ÉRLELÉS HATÁSÁRA

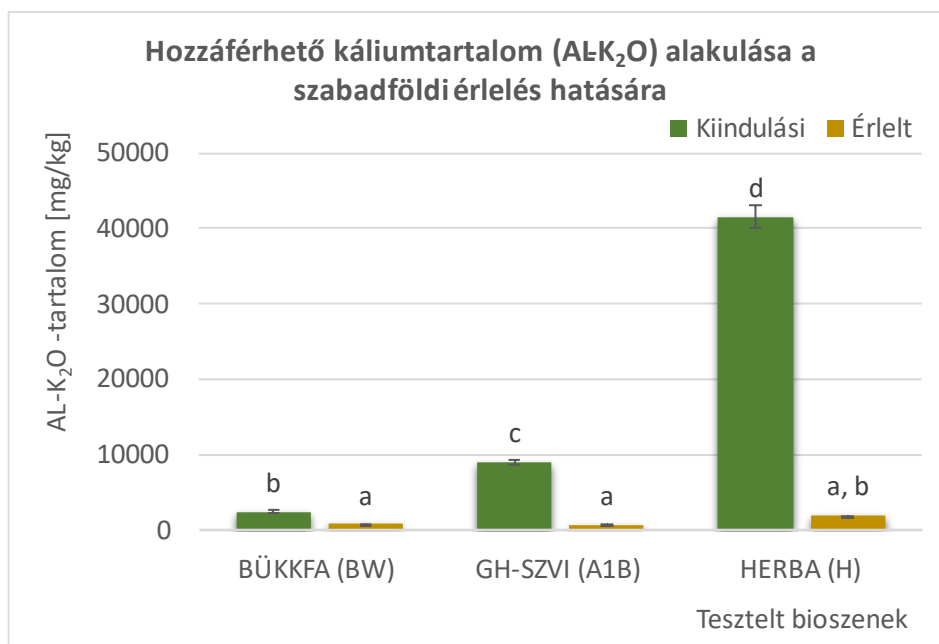
A 26. ábrán a különféle minták hozzáférhető foszfortartalma követhető nyomon.



26. ÁBRA A MINTÁKBAN MÉRHETŐ HOZZÁFÉRHETŐ FOSZFORTARTALOM VÁLTOZÁSA AZ ÉRLELÉS HATÁSÁRA

Egymáshoz képest az egyes minták számottevően különböző mennyiségű hozzáférhető foszfort tartalmaznak. Elmondható, hogy minden esetben a mért értékek csökkentek az érlelés hatására, feltehetően a mikrobiológiai aktivitás hatására. A BW minta kivételével a másik két minta az érlelést követően lényegesen kisebb mennyiségű hozzáférhető foszfort tartalmaz. Az A1B minta esetén 2010 mg/kg a H minta esetén pedig 5108 mg/kg mértékű foszfortartalom csökkenést lehet megfigyelni A BW minta esetén ez a jelenség nem tekinthető szignifikánsnak, mindössze 177 mg/kg a csökkenés mértéke.

A vizsgált minták hozzáférhető kálium tartalmának változása követhető a 27. ábrán. Mindegyik esetben elmondható, hogy a hozzáférhető káliumtartalom is szignifikánsan csökkent az érlelés hatására, szintén a mikrobiális tevékenységnek köszönhetően. A legnagyobb változás a Herba minta esetén figyelhető meg, ahol 41539 mg/kg -ról 1925 mg/kg -ra csökkent a kálium mennyisége. A többi esetben nem volt tapasztalható ilyen nagy mértékű csökkenés. A BW esetén 1689 mg/kg míg az A1B esetén 8227 mg/kg a csökkenés mértéke.



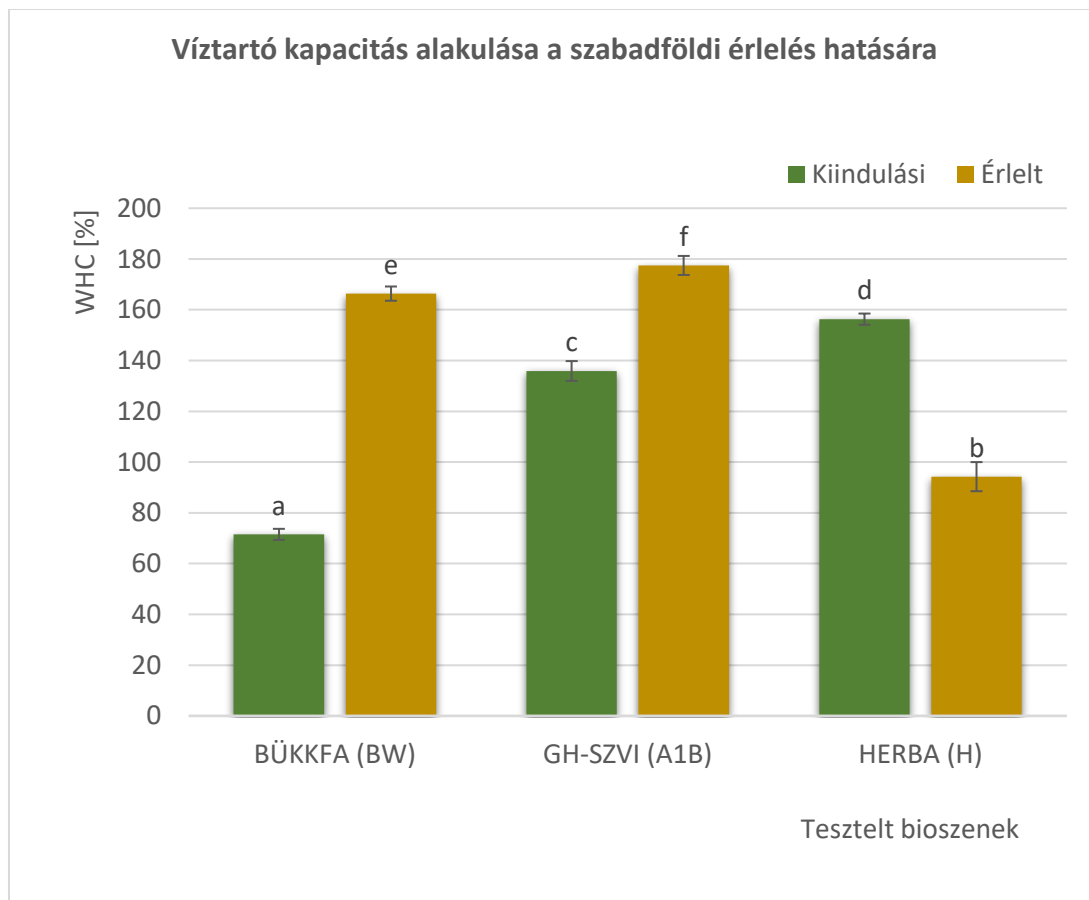
27. ÁBRA A MINTÁKBAN MÉRHETŐ HOZZÁFÉRHETŐ KÁLIUMTARTALOM VÁLTOZÁSA AZ ÉRLELÉS HATÁSÁRA

### 6.3.1. Vízrető kapacitás (WHC) alakulása a szabadföldi érlelés hatására

A 28. ábrán a vízrető kapacitás változásának mértéke lett ábrázolva.



Elmondható az eredmények alapján, hogy nagy különbségeket lehet felfedezni az egyes minták víztartó kapacitása között. Ezen felül az is kijelenthető, hogy mindegyik mintára lényeges hatást gyakorolt az érlelés a bioszenek ezen tulajdonságára. A legkisebb WHC-val a kiindulási BW minta- (71,53 %), míg a legnagyobb értékkel az érlelt A1B minta (177,47 %) rendelkezik. A BW és az A1B minták esetén észrevehető, hogy a kezelés hatására megnőtt a WHC mértéke. Ez a növekedés a BW esetén 94,85%-os, az A1B esetén pedig 41,58%-os. Adhikari és munkatársai arra a következtetésre jutottak, hogy a víztartó kapacitás mértékét legjobban a bioszenek felületének nagyságától függ. Ezért a víztartó kapacitás változása jelezheti, a bioszén felületének a változását (Adhikari et al., 2023)

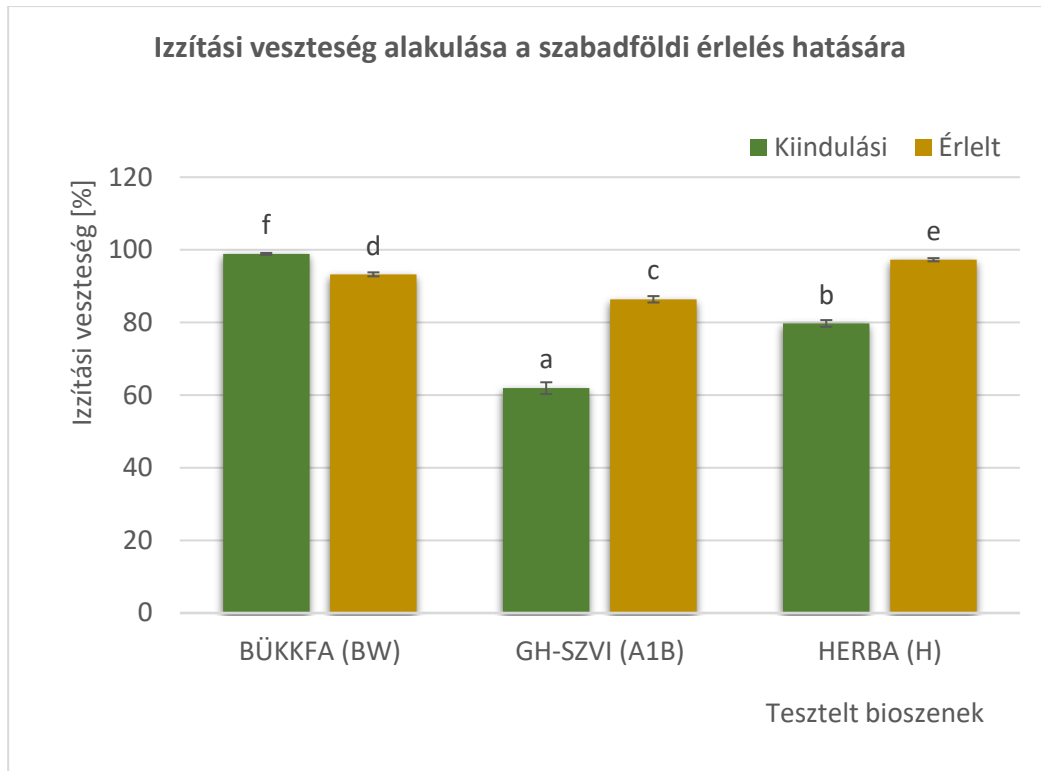


28. ÁBRA A SZADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA TAPASZTALT VÍZTARTÓ KAPACITÁS ALAKULÁSÁNAK ÉRTÉKEI

### 6.3.2. Izzítási veszteség alakulása a szabadföldi érlelés hatására

Az izzítási veszteség alakulása a 29. ábrán követhető nyomon. Mindegyik minta esetén elmondható, hogy az érlelés hatására szignifikánsan megváltozott az izzítási veszteség mértéke.

A BW esetén ahol 99%-ról 93%-ra változtak az értékek, csökkenésről beszélhetünk. A másik két esetben azonban növekedés figyelhető meg. Az A1B esetén az izzítási veszteség 62%-ról 86%-ra növekedett. Ennél kisebb mértékű növekedés volt tapasztalható a H minta esetén ahol 79%-ról 97%-ra növekedett a mért érték.

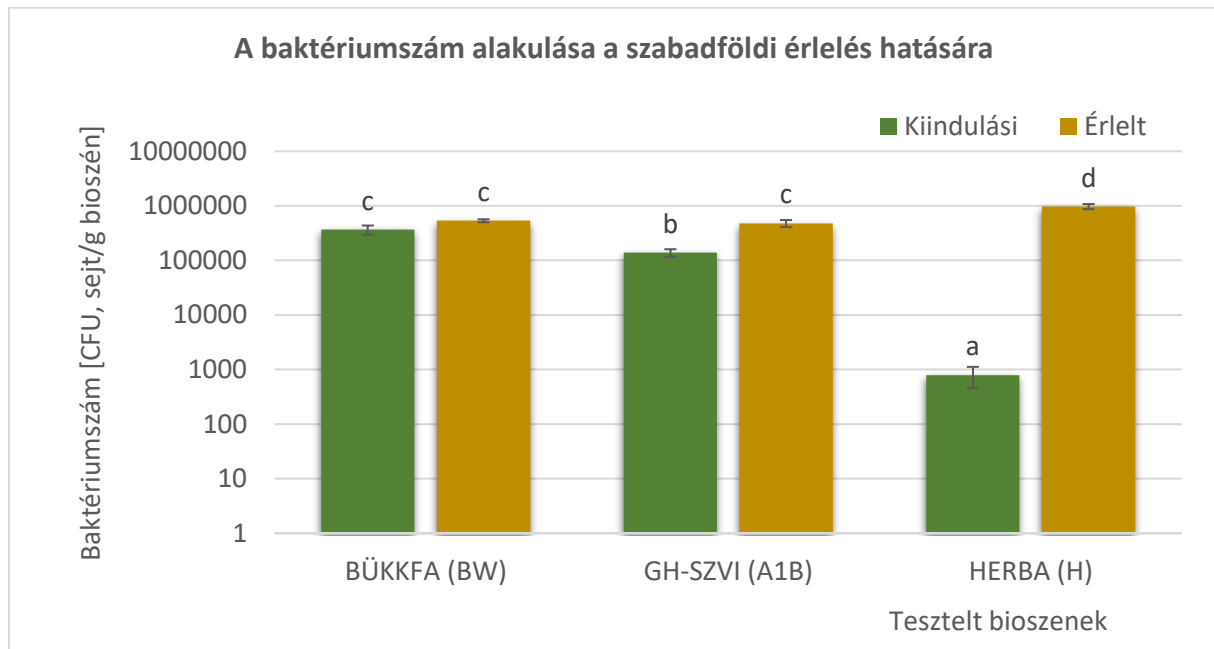


29. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA TÖRTÉNŐ IZZÍTÁSI VESZTESÉGEK VÁLTOZÁSA

### 6.3.3. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám alakulása a szabadföldi érlelés hatására

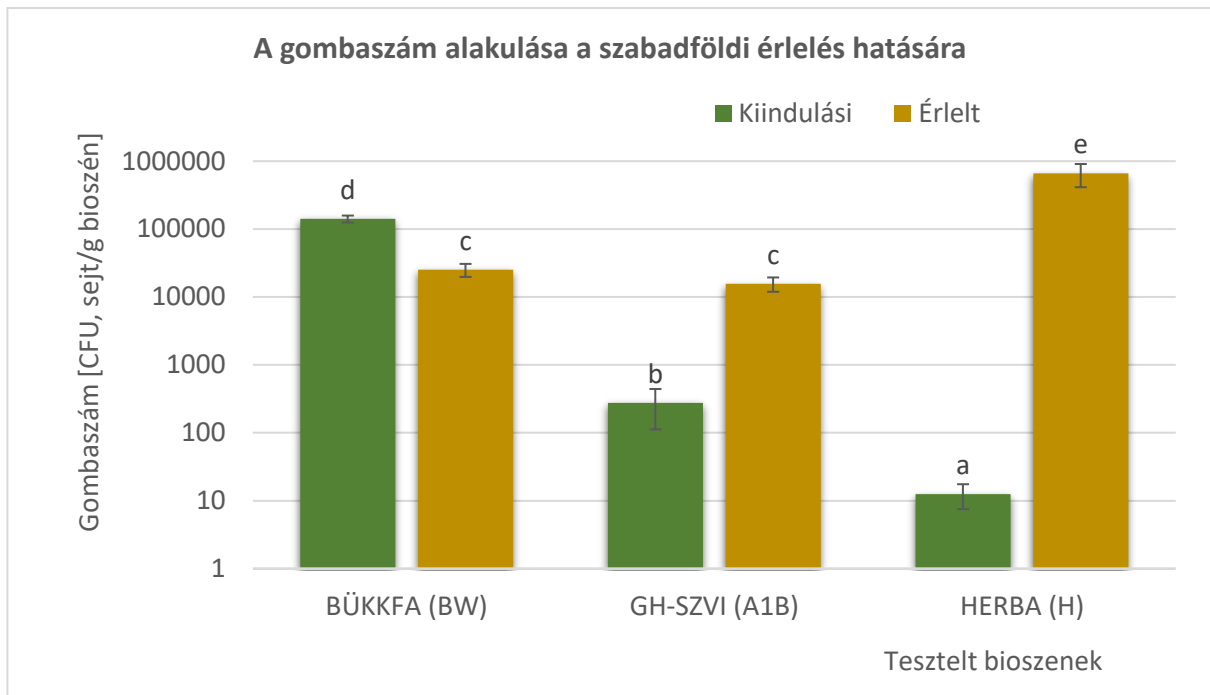
A baktériumszám meghatározásának eredményei a 30. ábrán láthatóak. Elmondható, hogy minden esetben megnövekedett a sejtek száma az érlelés hatására. A BW esetén nem beszélhetünk szignifikáns növekedésről. A másik két minta esetén már szignifikánsnak számít a növekedés mértéke. A BW esetén átlagosan 365611 sejt/g-ról 534167 sejt/g-ra növekedett a mért érték. Ennél látványosabb változást mutat az A1B ahol 138633 sejt/g-ról 478333 sejt/g-ra változott meg a mért érték. A legnagyobb változás a Herba minta esetén tapasztalható, mivel az érlelés előtt ezen mintánál volt a legkisebb a CFU értéke (793 sejt/g). Viszont kezelés után pedig ezen mintánál volt tapasztalható a legnagyobb CFU érték (974333 sejt/gramm).

Mindenképpen pozitív eredmény, hogy mindegyik bioszén esetén növekedést mértünk az érlelés hatására a baktériumszámban.



**30. ÁBRA A TELEPKÉPZÉSRE ALKALMAS BATRÉRIUMOK SZÁMÁNAK VÁLTOZÁSA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA**

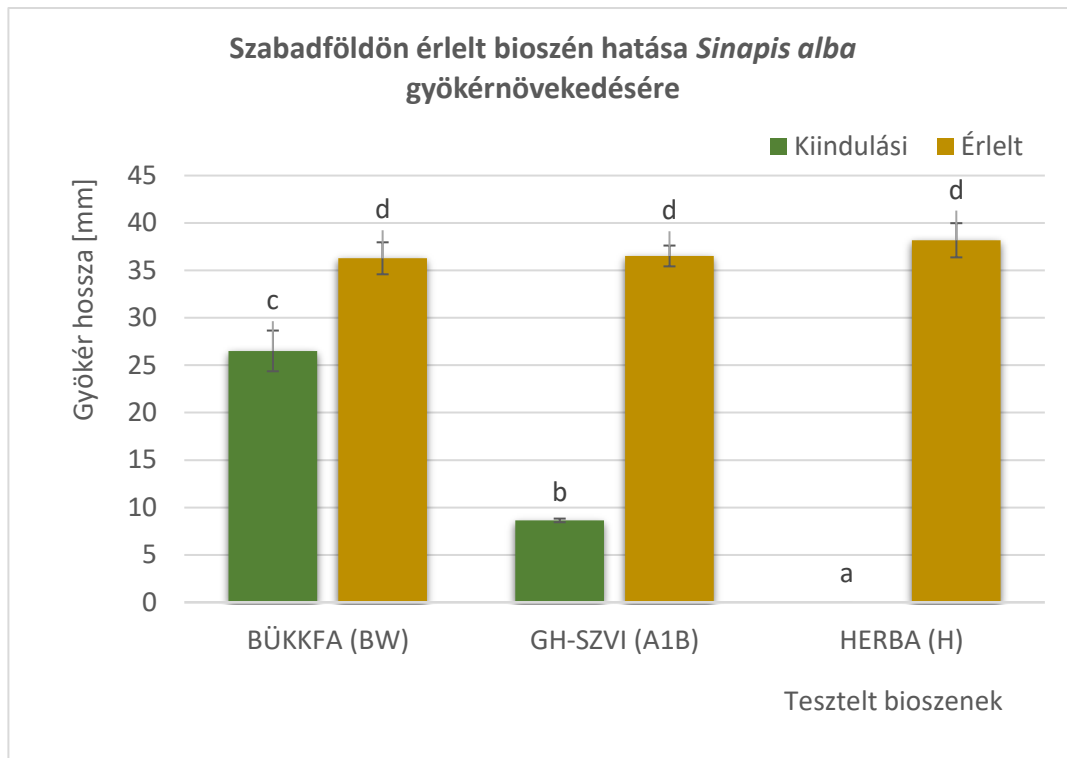
A gombaszám alakulásának mértéke a 31. ábrán követhető nyomon. Az A1B és a H minták esetén a baktériumszám változáshoz hasonlóan szignifikáns növekedés tapasztalható. Ezen felül szintén a H minta esetén tapasztalható a legnagyobb mértékű változás (13 sejt/g-ról 661111 sejt/gramm-ra). Az A1B minta esetén ez a változás mindössze 277 sejt/g-ról 15667 sejt/gramm-ra változott. A BW esetén az előző eredményektől eltérően egy szignifikáns csökkenés figyelhető meg a gombaszám változásában. A kiindulási 141722 sejt/g gombaszám az érlelést követően mindössze 25238 sejt/g értéket érte el.



31. ÁBRA A TELEPKÉPZÉSRE ALKALMAS GOMBÁK SZÁMÁNAK VÁLTOZÁSA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

#### 6.3.4. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Sinapis alba* teszt növényvel a szabadföldi érlelés hatására

A *Sinapis alba* azaz a fehér mustár gyökérnövekedésére gyakorolt hatását lehet nyomon követni a 32. ábrán. Minden egyes minta esetén kijelenthető, hogy az érlelés pozitív hatást gyakorolt a gyökér növekedésre. A pozitív hatás mértéke minden esetben szignifikáns. A H minta esetén a leginkább szembeűnő a serkentő hatás, ahol érlelés előtt a bioszén gátolta (0 mm), míg érlelést követően serkentette (38,2 mm) a mustár gyökerének a növekedését. A BW minta esetén 26,5 mm-ről 36,3 mm-re, míg az A1B esetén 8,6 mm-ről 36,5 mm-re nőtt az átlagos gyökérhosszúság.

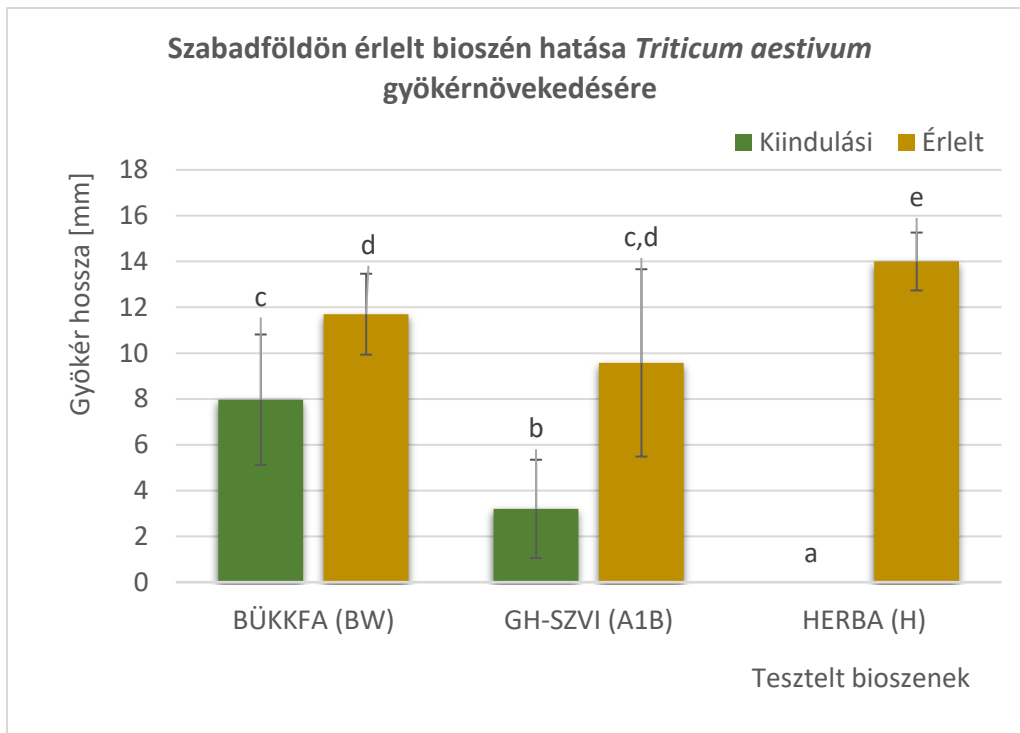


32. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSA A *SINAPIS ALBA* GYÖKÉRNOVEKEDÉSÉRE

### 6.3.5. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Triticum aestivum* tesztnövényvel

A *Triticum aestivum* azaz a közönséges búza gyökérnövekedésére gyakorolt hatását lehet nyomonkövetni a 33. ábrán. Minden esetben pozitív hatást gyakorolt a növekedésre az érlelés. A pozitív hatás mindegyik minta esetén szignifikáns.

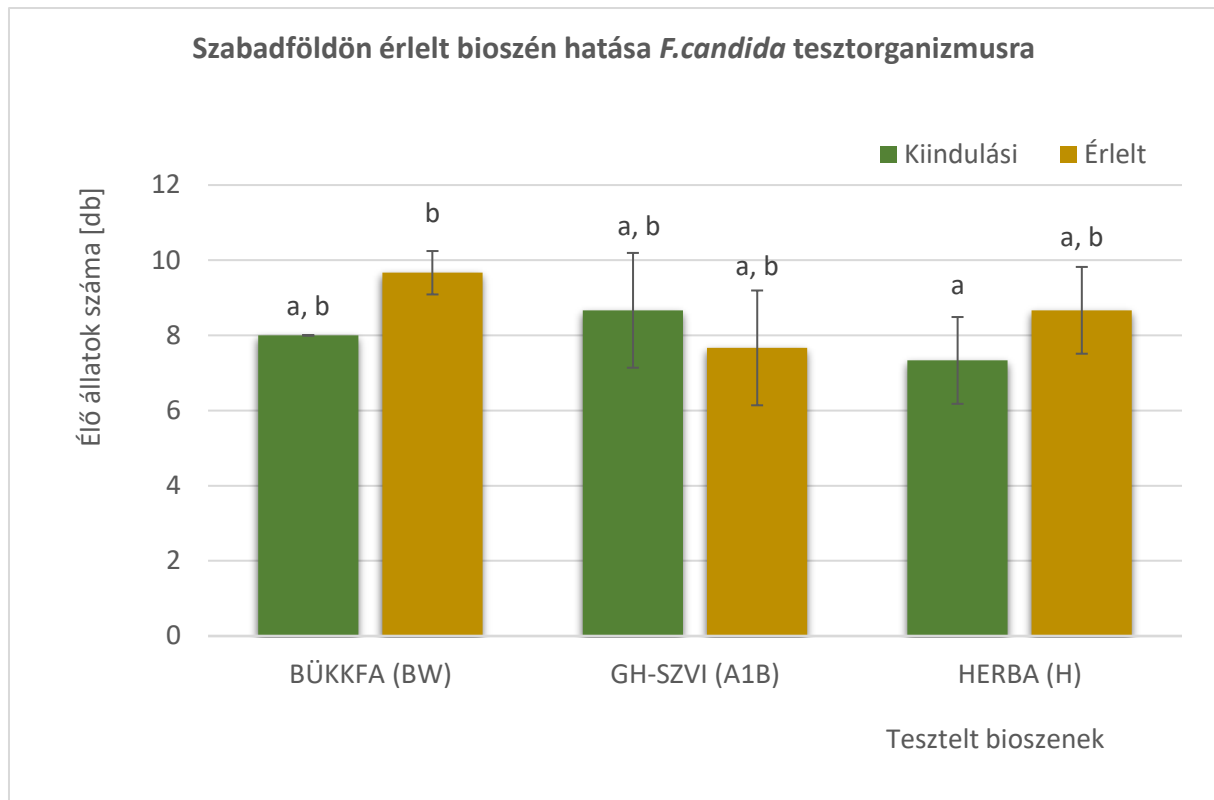
Ez a H minta esetén a legjelentősebb, ahol az érlelés előtt teljes mértékig gátolta a növekedést míg érlelést követően 14 mm hosszúra nőttek a gyökerek. A többi minta esetén viszont nem volt ilyen mértékű a serkentő hatás. A BW esetén 8,0 mm-ről 11,7 mm-re, míg az A1B esetén 3,2 mm-ről 9,6 mm-re változott az átlagos gyökérméret.



33. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELT BIOSZÉN HATÁSA A *TRITICUM AESTIVUM* GYÖKÉRNOVEKEDÉSÉRE

### 6.3.6. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata *Folsomia candida* rovarral

A *Folsomia candida* mortalitás vizsgálat eredményei a 34. ábrán vannak összefoglalva. Minden kialakított reaktor esetén 10-10 organizmussal indult a vizsgálat. Kijelenthető, hogy átlagosan egyik esetben sem pusztult el 3-nál több élőlény a vizsgálatok során. A varianciaanalízis elvégzését követően elmondható, hogy az érlelt BW és a kiindulási H minta tért el egymástól szignifikánsan. Ugyanakkor egyik minta sem tért el ezektől számottevően. A vizsgálat alapján elmondható, hogy sem a kiindulási, sem az érlelt bioszenek nem jelentettek környezeti kockázatot a vizsgált tesztorganizmusokra.



34. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA ÉLETBEN MARADT TESZTORGANIZMUSOK SZÁMA

Összességében megállapíthatjuk, hogy a szabadföldi természetes érési folyamatok egyik bioszén esetén sem eredményeztek kedvezőtlen változást. Ez mindenképpen kiemelendő pozitív eredmény, mivel a hulladékokból és melléktermékekből előállított bioszén termékek kockázatközpontú biztonságos alkalmazásához elengedhetetlen, hogy hosszú távon se eredményezzen az adott adalék káros hatást.

Szintén fontos kihangsúlyozni, hogy a kezdetben jelentős toxicitással rendelkező gyógynövény alapú bioszén toxicitása is lecsökkent. Feltehetően a kezdetben a bioszén terméken lévő toxikus csoportok bontására képesek voltak a mikroorganizmusok, így ennek köszönhető a kedvező irányú változás.

## **7. A szabadföldi és mesterséges érlelés eredményeinek összehasonlítása**

A számos elvégzett mérés eredményei közül az 9. táblázatban kiemelt vizsgálatok eredményeit mutatom be. Az ábrán a piros lefele mutató nyíl a kiindulási értékhez képest szignifikáns csökkenést jelöli míg a piros felfelé mutató nyíl szignifikáns növekedést. A sárga oldalra mutató nyíllal ábrázoltam, hogy az adott érlelés hatására végbemenő változás nem volt szignifikáns a kiindulási értékekhez képest. Ahogy az összefoglaló táblázat is mutatja, az összehasonlítás változatos eredményeket mutatott. A kémhatás vizsgálata során egyedül az gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén esetén egyezett meg a kémiai érlelés eredménye a szabadföldi érlelés eredményével. A többi esetben vagy ellentétes vagy nem egyező eredmények születtek, kivételt képez az izzítási veszteség a bükkfa alapú bioszén esetén, ahol minden érlelési módszer szignifikáns negatív hatást eredményezett. Az elektromos vezetőképesség vizsgálata során elmondható, hogy mind a gabonahéj-szennyvíziszap alapú és a gyógynövény alapú bioszén minták esetén a mesterséges érlelések eredményei megegyeznek a természetes érlelés végkimenetelével. A bükkfa alapú bioszén esetén pont ellenkező hatást mutatott a két érlelés típus. A víztartó kapacitás esetén megfigyelhető volt, hogy a kémiai érlelés nem befolyásolta mintákat. Ugyanakkor a fizikai érlelés mind a gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén mind pedig a gyógynövény alapú bioszén minta esetén a természetes érlelési móddal megegyező hatást fejtett ki. Az izzítási veszteség esetén mindössze a bükkfa alapú bioszén esetén volt megfigyelhető az érlelési módok között egyezés, a másik két minta esetén ellentétes eredmények alakultak. Az elemvizsgálat során mind a vas mind pedig a kálium esetén, csupán a gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén kémiai és szabadföldi érlelési eredményei között lehetett hasonló kapcsolatot felfedezni. Az is megállapítható, hogy ezen elemekre a fizikai érlelés nagy részt nem fejtett ki szignifikáns hatást. Mind a gomba- mind pedig a baktériumszám esetén elmondható, hogy a gyógynövény alapú bioszén esetén megegyezett a fizikai és szabadföldi érlelés hatása. Ugyanakkor ez nem mondható el a többi minta esetén. A búza növény gyökérnövekedésének vizsgálata esetén a kémiai érlelés két mintánál is (gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén és gyógynövény alapú bioszén) egyezést mutatott a szabadföldi érlelésen átesett minták változásával. A fizikai érlelés ugyanakkor teljesen eltérő eredményeket produkált. A Collembola mortalitás vizsgálat során a gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszén minta esetén minden érlelés hasonló eredményeket produkált. Míg a bükkfa alapú bioszén esetén a csupán a fizikai érlelés mutatott hasonlóságot a szabadföldi érleléssel.



9. TÁBLÁZAT A KÜLÖNFÉLE MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÖSSZESÍTŐ TÁBLÁZATA

	BÜKKFA (BW)	GH-SZVI (A1B)	HERBA (H)
<b>Bioszén alapanyaga</b>	<b>Bükkfaforgács</b>	<b>Gabonahéj és papírgyártási szennyvíziszap</b>	<b>Gyógynövények</b>
<b>Érlelés típusa</b>	<b>Kémhatás (pH)</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↓	↓	↔
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↓	↑	↑
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↑	↓	↓
	<b>Elektromos vezetőképesség (EC)</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↓	↓	↓
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↔	↓	↓
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↑	↓	↓
	<b>Víztartó kapacitás (WHC)</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↔	↔	↔
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↓	↑	↓
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↑	↑	↓
	<b>Izzítási veszteség (IV)</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↓	↓	↓
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↓	↓	↓
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↓	↑	↑
	<b>Elemtartalom - kálium (K)</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↔	↓	↑
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↔	↑	↔
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↑	↓	↓
	<b>Elemtartalom - vas (Fe)</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↔	↑	↑
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↔	↔	↔
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↑	↑	↓
	<b>Baktériumszám</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	n.m.	n.m.	n.m.
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↑	↓	↑
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↔	↑	↑
	<b>Gombaszám</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	n.m.	n.m.	n.m.
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↔	↔	↑
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↓	↑	↑
	<b>Növénynövekedés - búza gyökernövekedés</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↔	↑	↑
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↓	↓	↔
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↑	↑	↑
	<b>Talajlakó állatra gyakorolt hatás - Collembola teszt</b>		
<i>Mesterséges kémiai érlelés</i>	↓	↔	↑
<i>Mesterséges fizikai érlelés</i>	↔	↔	↓
<i>Természetes szabadföldi érlelés</i>	↔	↔	↔

Kísérleteim főbb következtetéseit az összehasonlító értékelés során a következők szerint foglalom össze:

- Egyik mesterséges érlelés hatásai sem mutattak szoros összefüggést a természetes érlelés hatásaival;
- A kémiai peroxidos érlelés alkalmazása a nagymértékű oxidációs folyamatokkal nem releváns a szabadföldi érlelés modellezésére;
  - o Kevésbé erős oxidálószer alkalmazása javasolt;
- A szabadföldi érlelés mutatta a legkedvezőbb változásokat, ami mindenképpen pozitív eredmény, mivel ez mutatja a legrelevánsabban a természetben zajló folyamatokat és azok következményeit;
- Javasolt laboratóriumban kivitelezett talajban történő biológiai érlelés kivitelezése a talajban zajló mikrobiális tevékenység relevánsabb jellemzésére;
- Javasolt a szabadföldön is eltérő talajokkal modellezni az érési folyamatokat. Ilyen kísérleteink már folyamatban vannak eltérő modellterületeken.
- Minden esetben bioszénről-bioszénre, illetve talajról-talajra történő felmérések szükségesek az egyedi és specifikus hatások megbízható jellemzéséhez.
- Célszerű a szabadföldi érlelési metodika bevonása a minősítési rendszerekbe továbbfejlesztés után.

## 8. Összefoglalás

Kutatás-fejlesztési munkám fő célkitűzése volt a bioszenek tulajdonságaiban a különböző érési/érlelési folyamatok során bekövetkező változások komplex felmérése és jellemzése, egyrészt „*in vitro*” mesterséges érleléssel (fizikai és kémiai eljárásokkal), másrészt „*in vivo*” szabadföldi körülmények között történő érleléssel. Három különböző alapanyagú és eltérő pirolízis technológiával előállított bioszén termékkel tanulmányoztam az érési folyamatokat és következményeiket. A „friss” és „érlelt” bioszenek összehasonlító vizsgálatát átfogó fizikai-kémiai, biológiai és ökotoxikológiai metodikával végeztem.

A szabadföldi és két mesterséges érlelés eredményeinek összesítését követően kijelenthető, hogy vannak olyan bioszén paraméterek melyek hasonló változást mutattak az érlelések hatására. Ebből arra lehet következtetni, hogy laboratóriumi körülmények között van lehetőség bizonyos hatásokat szimulálni. Ilyen tulajdonság például az elektromos vezetőképesség is. Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy nem minden bioszén mintára hatottak ugyanúgy a különféle érlelési módszerek. Erre példa a víztartóképesség mérés eredménye ahol a gabonahéj-szennyvíziszap alapú bioszénre mind a fizikai mind a szabadföldi érlelés serkentő módon hatott míg a gyógynövény alapú bioszén minta esetén gátló hatást gyakorolt. Több bioszén jellemző esetén is elmondható, hogy az adott érlelési folyamat nem befolyásolta számottevően az adott paraméter alakulását. Ez figyelhető meg a kémiai érlelés és a víztartó kapacitás esetén, illetve a Collembola teszt és a gombaszám vizsgálatánál a fizikai érlelést követően. Egyes vizsgálatoknál az volt tapasztalható, hogy a mesterséges érlelést követően ellentétes hatások voltak megfigyelhetőek, viszont a természetes érlelés esetén nem tapasztaltunk szignifikáns változást. Ilyen folyamatot lehet megfigyelni a Collembola teszt esetén a gyógynövény alapú bioszénnél. Ez arra engedhet következtetni, hogy a különféle hatások kiegyenlíthetik egymást, viszont ezt az állítást további kísérletekkel kell alátámasztani.

A kutatás egyik fontos eredményeként kiemelem, hogy az érlelések eredményei egyik bioszén esetén jeleztek hosszú távú alkalmazhatóságukat akadályozó hatásokat.

Fontos megemlíteni, hogy az általunk elvégzett kísérlet sorozat nem tartalmazott biológiai érlelést, mely tovább tudná árnyalni a szabadföldi érés szimulációjának a lehetőségét. Ezen felül fontos megemlíteni, hogy az egyes minták alapanyaga eltér egymástól, ez is eredményezhette azt, hogy a különféle mintáknál az azonos kezelés más eredményt hozott, ezért is szükséges a „*char by char*” alapú vizsgálat, ahogy azt korábban is kiemeltem.

Annak érdekében, hogy teljesebb képet kaphassunk arról, hogy a bioszenek természetes érlelése milyen módon és mértékben szimulálható laboratóriumi körülmények között, célszerű lenne hasonló alapanyagú bioszenek összehasonlító vizsgálata. Ezen felül célszerű a kísérlet sorozatba bevinni a biológiai érlelést is. Továbbá hasznos információkkal szolgálhat, és relevánsabb eredményeket adhat, ha az egyes mintákat egymás után több különböző érleléseknek is alávetjük. Ezáltal meg lehetne győződni afelől, hogy az különböző érlelési módok ellentétes hatásai képesek lennének-e kiegyenlítődni. Továbbá célszerű lenne a vizsgálati metodikarendszert bővíteni, hogy a lezajló érési folyamatokat részletesebben megértsük és modellezni tudjuk a várható változásokat.

## 9. Irodalomjegyzék

1. Talaj fogalma, funkciói, tulajdonságai (A) - 1. Talaj fogalma, funkciói, tulajdonságai (A) A - Studocu. Retrieved April 1, 2023, from <https://www.studocu.com/hu/document/szegedi-tudomanyegyetem/talajtan/1-talaj-fogalma-funkcioi-tulajdonsagai-a/2370505>
2. Abiot Ketema, & G. S. Dwarakish. (2019). *Water erosion assessment methods: a review. ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 1–8 | 10.1080/09715010.2019.1567398.
3. Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., Mckay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 167).
4. Bacsárdi, S., & Máté, R. (2015). *Innovatív talajjavítás bioszénnel - laboratóriumtól a szabadföldi alkalmazásig.*
5. Banwart, S. A., Nikolaidis, N. P., Zhu, Y. G., Peacock, C. L., & Sparks, D. L. (2019). Soil functions: Connecting earth's critical zone. In *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* (Vol. 47).
6. Brassard, P., Godbout, S., Lévesque, V., Palacios, J. H., Raghavan, V., Ahmed, A., Hogue, R., Jeanne, T., & Verma, M. (2019). Biochar for soil amendment. In *Char and Carbon Materials Derived from Biomass: Production, Characterization and Applications* (pp. 109–146).
7. Buzás, I. (1993). *Talaj és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv INDA 4231 Kiadó, Budapest.*
8. Chodak, M., Gołębiewski, M., Morawska-Płoskonka, J., Kuduk, K., & Niklińska, M. (2015a). Soil chemical properties affect the reaction of forest soil bacteria to drought and rewetting stress. *Annals of Microbiology*, 65(3).
9. Chodak, M., Gołębiewski, M., Morawska-Płoskonka, J., Kuduk, K., & Niklińska, M. (2015b). Soil chemical properties affect the reaction of forest soil bacteria to drought and rewetting stress. *Annals of Microbiology*, 65(3), 1627–1637.
10. Deng, Q., Li, A., Luo, L., Wu, Y., Tang, H., & Zhang, T. (2023). Herbal biochar preparation and its application as soil amendment: Is such disposal of traditional Chinese medicine residue cost-efficient towards carbon neutrality? *Journal of Cleaner Production*, 419, 138233.
11. Dr. Hajdú József. (2018). *A meliorációs technológiák gépei - Agro Napló - A mezőgazdasági hírportál.* <https://www.agronaplo.hu/szakfolyoirat/2018/09/gepesites/a-melioracios-technologiak-gepei>
12. Takács Enikő. (2015). *Szélerózió elleni védekezés bioszenes kezeléssel.*
13. Farkas Éva. (2020). *Complex assessment and evaluation of the long-term effects of biochar to improve sandy soils -from laboratory to field application-*

14. Ujaczki, É. (2012). *Vörösiszappal kevert talajok környezettoxikológiai elemzése mikrokozmosz kísérletekben.*
15. *Fizikai és kémiai talajjavító eljárások | Pannon Enciklopédia | Kézikönyvtár.* Retrieved October 6, 2023, from <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/pannon-pannon-enciklopedia-1/magyarorszag-foldje-1D58/ember-es-kornyezete-3032/talajvedelem-papp-sandor-30F8/fizikai-es-kemiai-talajjavito-eljarasok-30FE/>
16. Gábor Szöllősi. (2018). *Bioszén - A mezőgazdaság forradalma?!* <https://www.agrofutura.hu/post/biosz%C3%A9n-a-mez%C5%91gazdas%C3%A1g-forradalma>
17. Hale, S., Hanley, K., Lehmann, J., Zimmerman, A., & Cornelissen, G. (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(24), 10445–10453.
18. Horel, Á., Gelybó, G., Potyó, I., Pokovai, K., & Bakacsi, Z. (2019). Soil nutrient dynamics and nitrogen fixation rate changes over plant growth in temperate soil. *Agronomy*, 9(4).
19. Iftikhar, N., Zafar, R., & Hashmi, I. (2022). Multi-biomarkers approach to determine the toxicological impacts of sulfamethoxazole antibiotic on freshwater fish *Cyprinus carpio*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 233.
20. International Biochar Initiative. (2022). *IBI BIOCHAR STANDARDS - International Biochar Initiative.* <https://biochar-international.org/ibi-biochar-standards/>
21. Király, C. (2008). *M U N K A A N Y A G Mezőgazdasági alapismeretek Talajjavítás és talajvédelem. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet. Budapest.*
22. Kocsis, M., Menyhárt, L., Benő, A., & Hermann, T. (2021). Correlations between soil conductivity and soil properties of crop management zones. *Agrokémia Es Talajtan*, 70(1), 45–64.
23. Kocsis Tamás, & Dr. Biró Borbála. *Bioszén és bioeffektor kombinációk hatása homoktalajok biológiai tulajdonságaira.*
24. Li, H., Lu, X., Xu, Y., & Liu, H. (2019). How close is artificial biochar aging to natural biochar aging in fields? A meta-analysis. In *Geoderma* (Vol. 352, pp. 96–103).
25. Lian, F., Sun, B., Song, Z., Zhu, L., Qi, X., & Xing, B. (2014). Physicochemical properties of herb-residue biochar and its sorption to ionizable antibiotic sulfamethoxazole. *Chemical Engineering Journal*, 248.
26. Liu, Y., & Chen, J. (2022). Effect of ageing on biochar properties and pollutant management. *Chemosphere*, 292.
27. Mátyás Hartman. *Fizika, kémia és biológia a talajban. Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet. Budapest.*

28. Measho, S., Li, F., Pellikka, P., Tian, C., Hirwa, H., Ning, X., Qiao, Y., Khasanov, S., Kulmatov, R., & Chen, G. (2022). Soil Salinity Variations and Associated Implications for Agriculture and Land Resources Development Using Remote Sensing Datasets in Central Asia. *Remote Sensing*, 14(10).
29. Mekuria, W., Noble, A., Sengtaheuanghoung, O., Hoanh, C. T., Bossio, D., Sipaseuth, N., McCartney, M., & Langan, S. (2014). Organic and Clay-Based Soil Amendments Increase Maize Yield, Total Nutrient Uptake, and Soil Properties in Lao PDR. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38(8), 936–961.
30. Mikajlo, I., Pourrut, B., Louvel, B., Hynšt, J., & Záhora, J. (2022). Plant-soil nitrogen, carbon and phosphorus content after the addition of biochar, bacterial inoculums and nitrogen fertilizer. *Journal of Plant Nutrition*, 46(4).
31. Neina, D. (2019). The Role of Soil pH in Plant Nutrition and Soil Remediation. In *Applied and Environmental Soil Science* (Vol. 2019). Hindawi Limited.
32. *Nutrient Management and Nutrient Recovery Thematic Network* [www.nutriman.net](http://www.nutriman.net). Retrieved September 3, 2023, from [https://nutriman.net/farmer-platform/product/id\\_1571](https://nutriman.net/farmer-platform/product/id_1571)
33. Pan, X., Zhang, S., Zhong, Q., Gong, G., Wang, G., Guo, X., & Xu, X. (2020). Effects of soil chemical properties and fractions of Pb, Cd, and Zn on bacterial and fungal communities. *Science of the Total Environment*, 715.
34. Rechberger, M. V., Kloss, S., Rennhofer, H., Tintner, J., Watzinger, A., Soja, G., Lichtenegger, H., & Zehetner, F. (2017). Changes in biochar physical and chemical properties: Accelerated biochar aging in an acidic soil. *Carbon*, 115.
35. Reményi Marietta. (2019). *Bioszén hatása a talaj aktivitására-Összefüggések a bioszén termékek fizikai-kémiai jellemzői és talajbiológiai hatásai között.*
36. Schmidt HP, & Wilson K. (2014). *55 Uses of Biochar including Agriculture | Biochar*. <https://biochar.co.uk/55-uses-of-biochar/>
37. Shrivastava, P., Kumar, A., Tekasakul, P., Lam, S. S., & Palamanit, A. (2021). Comparative investigation of yield and quality of bio-oil and biochar from pyrolysis of woody and non-woody biomasses. *Energies*, 14(4).
38. Šimanský, V., & Klimaj, A. (2017). How does biochar and biochar with nitrogen fertilization influence soil reaction? *Journal of Ecological Engineering*, 18(5), 50–54.
39. Stefanovits, T., Filep, P., & Füleky, G. (1999). *Talajtan.*
40. Štefelová, J., Zelenka, T., & Slovák, V. (2017). Biosorption (removing) of Cd(II), Cu(II) and methylene blue using biochar produced by different pyrolysis conditions of beech and spruce sawdust. *Wood Science and Technology*, 51(6), 1321–1338.
41. Szentés, D. (2022). *Talajjavítás: rigolírozás, mélyítő szántás, mélylazítás.* <https://agroforum.hu/szakcikkek/talajmuveles/talajjavitas-rigolirozas-melyito-szantas-melylazitas/>
42. Böröndi, T., Gruiz, K., & Klebercz, O. (2012). *Talajjavítás hulladékokkal Szabadföldi kísérletek természetközeg kialakítására a gyáli regionális hulladéklerakó részein.*

43. Tarnik, A. (2019). Impact of Biochar Reapplication on Physical Soil Properties. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(2).
44. *The European Biochar Certificate (EBC)*. Retrieved October 8, 2023, from <https://www.european-biochar.org/en>
45. Tóth, B. (2010). *Talajok víztartó képességét becslő módszerek*.
46. Vitkova, J., Kondrlova, E., Rodny, M., Surda, P., & Horak, J. (2017). Analysis of soil water content and crop yield after biochar application in field conditions. *Plant, Soil and Environment*, 63(12), 569–573.
47. Wang, L., Gao, C., Yang, K., Sheng, Y., Xu, J., Zhao, Y., Lou, J., Sun, R., & Zhu, L. (2021). Effects of biochar aging in the soil on its mechanical property and performance for soil CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. *Science of the Total Environment*, 782.
48. Wang, L., O'Connor, D., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Shen, Z., & Hou, D. (2020a). Biochar Aging: Mechanisms, Physicochemical Changes, Assessment, and Implications for Field Applications. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 54, Issue 23, pp. 14797–14814). American Chemical Society.
49. Wang, L., O'Connor, D., Rinklebe, J., Ok, Y. S., Tsang, D. C. W., Shen, Z., & Hou, D. (2020b). Biochar Aging: Mechanisms, Physicochemical Changes, Assessment, and Implications for Field Applications. In *Environmental Science and Technology* (Vol. 54, Issue 23, pp. 14797–14814). American Chemical Society.
50. Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. In *Biotechnology Reports* (Vol. 28).
51. Yuan, C., Gao, B., Peng, Y., Gao, X., Fan, B., & Chen, Q. (2021). A meta-analysis of heavy metal bioavailability response to biochar aging: Importance of soil and biochar properties. In *Science of the Total Environment* (Vol. 756).
52. 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 April).



## Melléklet

M1. TÁBLÁZAT A MULTIKRITÉRIUMOS PONTOZÁSI RENDSZER ÉRTÉKEI

Multikritériumos pontozási rendszer										
Bioszén tulajdonság – Technológiai hatékonyság										
Pontszám	Hamutartalom (%)	WHC (%)	BET (m <sup>2</sup> /g)	TOC (%)	Sum N (%)	Pórus méret	Al-P	Al-K	pH1	pH2
5		200<	150<	85<		0,16<	15000<	15000<	8<	
3	35<	101-200	101-150	71-85		0,13-0,16	10001-15000	10001-15000	7,1-8	
1	25,1-35	71-100	81-100	61<70	>1	0,10-0,13	5001-10000	5001-10000		
0	15,1-25	51-70	51-80	51<80	0,3-0,99	0,07-0,10	3001-5000	3001-5000	6,1-7	6,1-8
-1	5-15	31-50	31-50	31<50	0-0,29	0,04-0,07	2001-3000	2001-3000		
-3	<5	11-30	11-30	11-30		0,01-0,04	1000-2000	1000-2000	5-6	5-6
-5		<10				<0,01	<1000	<1000	<5	<5,9
Megjegyzés			EBC Guideline alapján (150 m <sup>2</sup> /g)						Savanyú talaj esetén	Semleges talaj esetén

M210. TÁBLÁZAT A HASZNÁLT ÁPTALAJOK ÖSSZETÉTELE

Összetevők	Húslé agar	Maláta agar
húskivonat	3 g	-
maláta	-	20 g
pepton	5 g	1 g
glükóz	5 g	5 g
agar	22 g	22 g
Csapvíz	1000 ml	1000 ml
NaCl	0,5 g	-

No1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0,005M KMnO4	0,005M KMnO4	0,005M KMnO4	0,01 M KMnO4	0,01 M KMnO4	0,01 M KMnO4	0,015 M KMnO4	0,015 M KMnO4	0,015 M KMnO4	0,02 M KMnO4	0,02 M KMnO4	0,02 M KMnO4
B	DV	A1B1	A1B1	A1B1	A1B2	A1B2	A1B2	A1BV	A1BV	A1BV	DV	DV
C	DV	A1B1	A1B1	A1B1	A1B3	A1B3	A1B3	A1BV	A1BV	A1BV	DV	DV
D	DV	A1B1	A1B1	A1B1	A1B3	A1B3	A1B3	A1BV	A1BV	A1BV	DV	DV
E	DV	A1B2	A1B2	A1B2	A1B3	A1B3	A1B3	A1BV	A1BV	A1BV	DV	DV
F	DV	A1B2	A1B2	A1B2	A1BV	A1BV	A1BV	A1BV	A1BV	A1BV	DV	DV
G	0,005M	0,005M	0,005M	0,01 M	0,01 M	0,01 M	0,015 M	0,015 M	0,015 M	0,02 M	0,02 M	0,02 M
H	VAK1	VAK1	VAK1	VAK1	VAK2	VAK2	VAK2	VAK2	VAK3	VAK3	VAK3	VAK3

M1. ÁBRA A PERMANGANÁTTAL OXIDÁLHATÓ SZÉN MEGHATÁROZÁSHOZ TARTOZÓ 1. PLATE ELRENDEZÉS

No2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0,005M	0,005M	0,005M	0,01 M	0,01 M	0,01 M	0,015 M	0,015 M	0,015 M	0,02 M	0,02 M	0,02 M
B	DV	H1	H1	H1	H2	H2	H2	HV	HV	HV	DV	DV
C	DV	H1	H1	H1	H3	H3	H3	HV	HV	HV	DV	DV
D	DV	H1	H1	H1	H3	H3	H3	HV	HV	HV	DV	DV
E	DV	H2	H2	H2	H3	H3	H3	HV	HV	HV	DV	DV
F	DV	H2	H2	H2	HV	HV	HV	HV	HV	HV	DV	DV
G	0,005M	0,005M	0,005M	0,01 M	0,01 M	0,01 M	0,015 M	0,015 M	0,015 M	0,02 M	0,02 M	0,02 M
H	VAK1	VAK1	VAK1	VAK1	VAK2	VAK2	VAK2	VAK2	VAK3	VAK3	VAK3	VAK3

352. ÁBRA A PERMANGANÁTTAL OXIDÁLHATÓ SZÉN MEGHATÁROZÁSHOZ TARTOZÓ 2. PLATE ELRENDEZÉS

No3	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A	0,005M	0,005M	0,005M	0,01 M	0,01 M	0,01 M	0,015 M	0,015 M	0,015 M	0,02 M	0,02 M	0,02 M
B	DV	BW1	BW1	BW1	BW2	BW2	BW2	BWV	BWV	BWV	DV	DV
C	DV	BW1	BW1	BW1	BW3	BW3	BW3	BWV	BWV	BWV	DV	DV
D	DV	BW1	BW1	BW1	BW3	BW3	BW3	BWV	BWV	BWV	DV	DV
E	DV	BW2	BW2	BW2	BW3	BW3	BW3	BWV	BWV	BWV	DV	DV
F	DV	BW2	BW2	BW2	BWV	BWV	BWV	BWV	BWV	BWV	DV	DV
G	0,005M	0,005M	0,005M	0,01 M	0,01 M	0,01 M	0,015 M	0,015 M	0,015 M	0,02 M	0,02 M	0,02 M
H	VAK1	VAK1	VAK1	VAK1	VAK2	VAK2	VAK2	VAK2	VAK3	VAK3	VAK3	VAK3

M336. ÁBRA A PERMANGANÁTTAL OXIDÁLHATÓ SZÉN MEGHATÁROZÁSHOZ TARTOZÓ 3 MIKROTITRÁTOR LEMEZ ELRENDEZÉS