

Bioszenek érési viselkedésének komplex vizsgálata és jellemzése labortól a szabadföldi alkalmazásig

TDK Dolgozat

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

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 előre látóan 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. 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) igyekszik az ember is minél jobban kihasználni. 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 hajszálcsővesség, 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 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). 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 (Measho et al., 2022).

A talaj fontos kémiai tulajdonsága a kémhatás. 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 befolyásolják a jelen levő kolloid 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.

3.2.3. Biológiai tulajdonságok

A fizikai és kémiai tulajdonságok befolyásolják, hogy milyen élőlények képesek megélni a talajban. A talajban megjelenő élet a mikroorganizmusoktól, a gombákon és növényeken át, az állatokig számos formában jelenik meg. A különféle élőlények jelentős szerepet játszanak az anyagkörforgásban, így 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.

3.3. Talajromlás, talajvédelem és talajjavítás

3.3.1. Talajromlás- természetes és mesterséges kiváltó tényezői

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. Általánosan elmondható, hogy a legfőbb természetes talajeróziót előidéző tényező a szél és a csapadék. A szélerózió, más néven defláció a világ számos pontján komoly problémát jelent. 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 víz által okozott erózió nagyobb, illetve rendszeres esőzések során képes kifejteni a pusztító hatását. Normális esetben ezt a folyamatot kiegyensúlyozza a talajképződés folyamata, ám megfelelő növényzet és élővilág hiányában az egyensúly eltolódik az erózió irányába. 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 1. ábrán is. A fellazított részecskék másik része pedig a vízzel együtt a földkéreg alsóbb részébe szállítódik, és ott a földréteg összetömörödik. (Abiot Ketema & G. S. Dwarakish, 2019).



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

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. Az alábbi műveletek sorolhatók a meliorációs, vagy talajjavítási műveletek közé (Dr. Hajdú József, 2018):

- Rigolirozásos talajforgatás: Ezen módszer során rigol ekével 50–60 cm mély szántást végeznek. Ennek eredményeül a felső humuszból gazdagabb réteg a mélyebb rétegekbe forgatódik át (Szentés, 2022).
- Mélyítő szántás, lazító szántás: Mélyítő szántást (2. ábra) 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).



2. 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 tömörödni és beiszapolódásra, ezen felül rossz a vízbefogadó képessége (Pannon Enciklopédia).
- Mészszórás, meszezés: A mészszórás 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 vízelvezető árok nyitása: Rossz szerkezetű talajokon, vagy olyan területeken, ahol mély a tábla fekvése, vízelvezető árkokat szoktak létrehozni mely elvezeti a felgyülemlett talajvizet.
- Alagsövezés: Ez egy olyan technológia melynek kialakításakor 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. (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 (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).

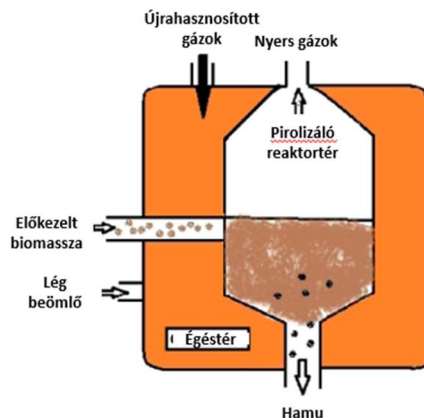
4. A bioszén

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; 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.

4.1.A bioszén alapanyagtól és pirolízis technológiától függő jellemzői

A bioszén előállításának kulcs művelete a pirolízis. Ehhez olyan speciális reaktorra van szükség (3. ábra), amely fűthető, és a benne lévő anyagot képes az oxigéntől elzárni. Alapanyagtól függően változhatnak a pirolizáló berendezés egyes részei, valamint folyamatának körülményei, de az elve ugyanaz marad (Al-Rumaihi et al., 2022). A folyamat végére szilárd, folyékony és légnemű termékeket kaphatunk, a technológia beállításaitól függő arányokban. Folyékony termékek például az egyes bioolajok, légnemű a szén-dioxid, szén-monoxid és a szintézis gáz, valamint 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. (Shrivastava et al., 2021).



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

A folyamat sebességét tekintve megkülönböztetünk gyors és lassú pirolízist. A gyors pirolízis folyamata során a fűtési sebesség nagyobb mint $100^{\circ}\text{C}/\text{perccel}$ 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 pirolízis során a fűtési sebesség közel $5\text{-}7^{\circ}\text{C}/\text{perccel}$ történik és az anyag is több időt tölt el a felfűtött hőfokon, ez több órát is jelenthet. (Yaashikaa et al., 2020)

Alapanyagot tekintve megkülönböztetünk fás és nem fás biomasszát. A fás biomassza alapvetően fahulladékokat és erdészeti maradványokat foglal magában. A nem fás biomassza általában állati, valamint ipari és mezőgazdasági hulladékokból áll össze. A nem fás biomassza jellemzői magasabb idegenanyag tartalom, magas nedvesség, nagyobb mértékű üregeesség, alacsonyabb sűrűség és alacsonyabb fűtőérték jellemző. (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 növelésére. 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 élelmiszer-feldolgozó iparból származó növényi hulladékot és a cellulóz előállításából származó olyan szálal 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, 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. A rossz hővezetési tulajdonságának köszönhetően kiválóan használható szigetelésként.

Ezen felül levegőszűrőnek, valamint páramegkötő anyagként is szokták használni. (Schmidt HP & Wilson K, 2014). Ugyanakkor fő alkalmazási területe a kedvezőtlen adottságú talajok javítása.

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 bioszénnel 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 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. 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).

4.5.Talajjavítás bioszénnel 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. A hőmérséklet változtatása nem okozott szignifikáns változást a Cu(II) megkötés mértékében sem. (Štefelová et al., 2017).

Mikajlo és munkatársai célul tűzték ki, hogy bioszén segítségével növelni szeretnék a talaj termékenységet. 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. A második növekedési ciklust követően a 3-as, 4-es és 5-ös esetben tapasztaltak szignifikáns biomassa növekedést. 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. (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 alapanyagnak 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 savas pH-jú talajon. 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.

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 bioszenet, valamint 0, 40 és 80 kg/ha mennyiségben keverték műtrágyát a talajmintákhoz. A kísérlet során arra a következtetésre jutottak, hogy minden egyes kísérleti elrendezés növelte a talaj pH értékét. Továbbá 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. (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 bioszenet egyszer a talajba, a másik kialakítás során ugyanekkora mennyiségű bioszenet juttattak a talajba, de 4 év múlva megismételték a bekeverést. Eredményeik azt mutatták, hogy a bioszén növeli a talaj víztartó képességét.

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 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).

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. 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. 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 előállításhoz használható alapanyagokat, eszközöket és a felhasználás módjait is (International Biochar Initiative, 2022).

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).

4.7. Bioszén érésének modellezése

4.7.1. Mesterséges érlelési módszerek típusai

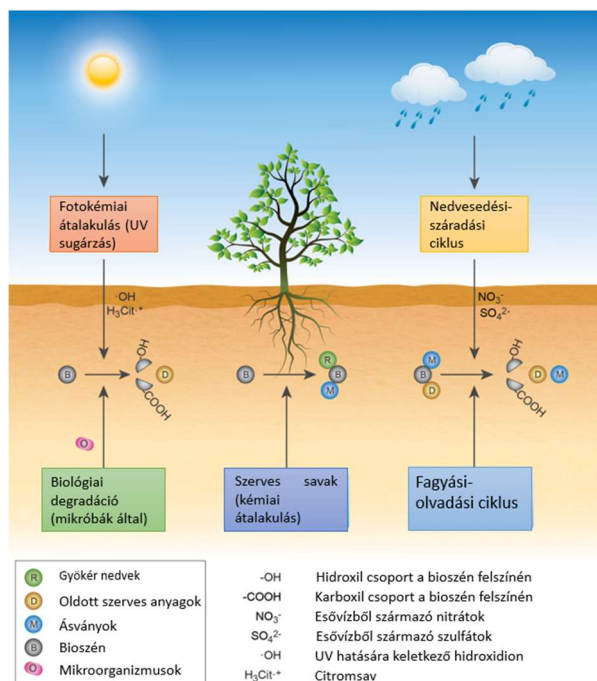
A bioszén a talajba juttatva a környezeti behatásoknak köszönhetően megváltozik. Ekkor az eredeti állapotától eltérő fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságokat vehet fel, melyek nem feltétlenül előnyösek számunkra. A stabilitás megváltozásának, valamint a tulajdonságok mértékének megváltozása nehezen 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 szervesetlen 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. Kémiai érlelés hatására a bioszeneknek általában csökken a hamutartalma, megnő a savasságának a mértéke. Az érlelés során erős oxidáló szereket szoktak alkalmazni, ilyen például a H_2O_2 , HNO_3 és H_2SO_4 (Li et al., 2019).

Biológiai érlelés folyamatában kulcsszerepet játszanak a mikroorganizmusok, valamint a növények. 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 4. ábra szemlélteti, hogy milyen hatások érik (érhetik) a bioszén termékeket a természetben talajra történő alkalmazásuk során.



4. ÁBRA A BIOSZENET 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).

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. 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 SORÁN VIZSGÁLT BIOSZÉN MINTÁK

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

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

2. TÁBLÁZAT AZ ŐRBOTTYÁNI TALAJ TULAJDONSÁGAI

Tulajdonság	Érték
pH [H ₂ 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

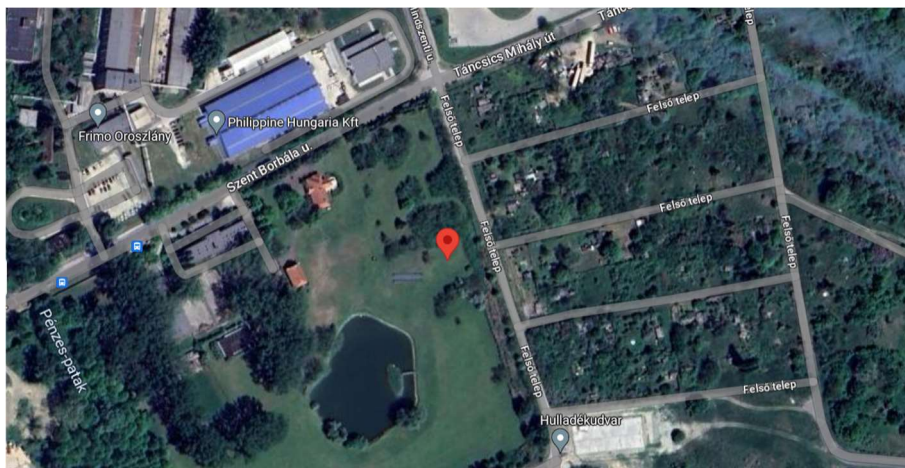
A fizikai érlelés során mindegyik bioszén mintával 3-3 párhuzamossal végeztük el a kezelést. Az egyes mintákból 100-100 grammot mértünk műanyag tasakokba. Ezt követően 24 óránként váltakozó fagyás-felengedés ciklusokat alkalmaztunk. A fagyás során -18 °C lett beállítva, felengedés során pedig 30 °C hőmérséklet. 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 H₂O₂ oldatot mértünk. Ezt követően az reaktorokat 30 °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 °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 (Örbottyán, 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 5. ábrán látható.



5. 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 (6. ábra).

Fizikai-kémiai vizsgálati módszerek	Biológiai vizsgálati módszerek	Ökotoxikológiai-ökológiai vizsgálati módszerek
• pH, vezetőképesség (EC) • Elemtartalom (XRF) • Szerves széntartalom • Hozzáférhető foszfortartalom • Hozzáférhető káliumtartalom • Nitrogénformák • Izzítási veszteség • Labilis széntartalom (POXC) • Víztartó kapacitás (WHC)	• Aerob heterotróf baktériumszám • Aerob heterotróf gombaszám	• Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Sinapis alba</i> teszt növényrel • Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata <i>Triticum aestivum</i> teszt növényrel • Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata <i>Folsomia candida</i> rovarral

6. 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. A két fizikai-kémiai paraméter meghatározását egymás után végeztük el. Minden egyes mintából 3-3 párhuzamossal végeztük a kísérletet. Falcon-csővekbe bemértünk 1-1 g bioszenet, erre pedig pipettával ráértünk 20-20 ml desztillált vizet. Az elkészült szuszpenziókat a lezárt Falcon-csővekben 90 percig 200 rpm fordulatszámon rázattuk. Majd kalibráltuk a műszereket és megmértük az egyes minták pH-ját és a vezetőképességét.. A pH mérést egy WTW pH330 típusú kombinált üvegelektrod segítségével végeztük. A vezetőképességet CONSORT C535 készülékkel mértük. 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. Az XRF módszeres mérésnél, a minta elemei, a használt berendezés által kibocsátott folytonos spektrumú röntgensugárzás által gerjesztődnek. 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 méréshez egy Thermo ScientificTM 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.

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;
- $\text{NH}_4\text{-N}$ 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)
- Szerves szénttartalom: MSZ 21470-52: 1983;
- Felvehető kálium- és foszfortartalom: MSZ 20135: 1999;
- Össz N [%] Kjeldahl módszer: ISO 11261: 1995;
- $\text{NH}_4\text{-N}$ és NO-N KCL-os extraktumból: MSZ 20135: 1999
- CaCO_3 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 bemérést követően a tégelyeket 105 °C-os szárítós szekrénybe helyeztük. 24 óra elteltével minden mintát exsziátorba 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 exsziátoros hűtési lépés következett. A minták visszamérése mindkét hűtési lépést követően elvégeztük.

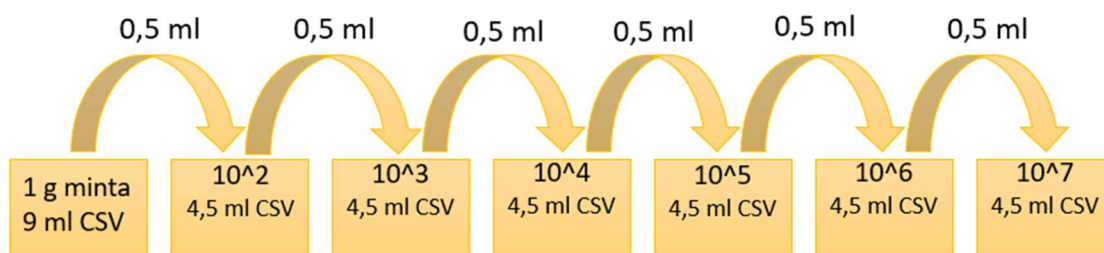
5.5.5. Víztartó kapacitás (WHC) meghatározása

A talaj víztartó 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 víztartó kapacitás (WHC) meghatározáshoz minden mintából 5 g-ot mértünk ki és helyeztük műanyag hengerekbe. A tégelyeket 1 órára 20°C-os vízfürdőbe helyeztük. Ezt követően 3 órán keresztül homokágyon hagytuk pihenni, hogy a felesleges víz lecsepegjen. Izzító tégelyek tömegét lemértük és minden mintából analitikai mérlegen 2 g-ot mértünk be. 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 lemezöntéssel (CFU meghatározás)

A Colony Forming Unit (CFU) azaz a telep képzésre alkalmas egység azt mutatja meg, hogy az adott mintában mennyi telepképző mikroorganizmus van. Mindegyik bioszénből és az oroszlányi 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 hőlégsterilizált 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. Rázást követően elszívó fülke alatt elkészítettük a hígítási sort. A hígítási sor egyes tagjai a 7. ábrán láthatóak.



7. ábra A lemezöntéshez használt minták hígítási sora

A szükséges hígítási tagokból 100-100 μL 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* teszt növényekkel

A csíranövekedés teszthez a közönséges búza (*Triticum aestivum*) és a fehér mustár (*Sinapis alba*) vetőmagokat bioboltból szereztük be.

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 72 órára 21°C-os termosztátba helyeztük. 72 óra elteltével megmértük a növekedett gyökerek és száruk méretét.

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. 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 sötét és hűvös helyen 7 napig inkubáltuk. Az inkubációt követően 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, 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.

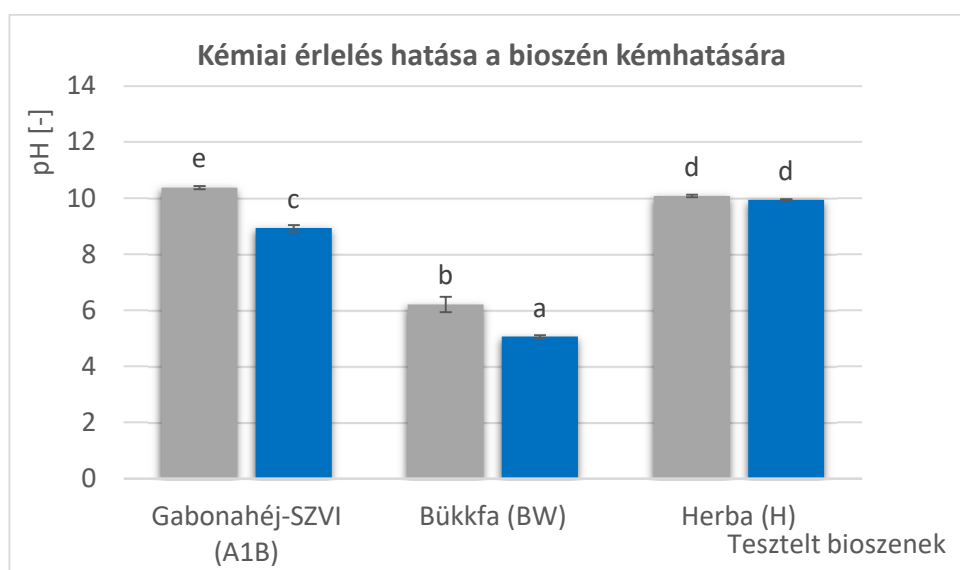
6. Eredmények és értékelés

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), utána 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

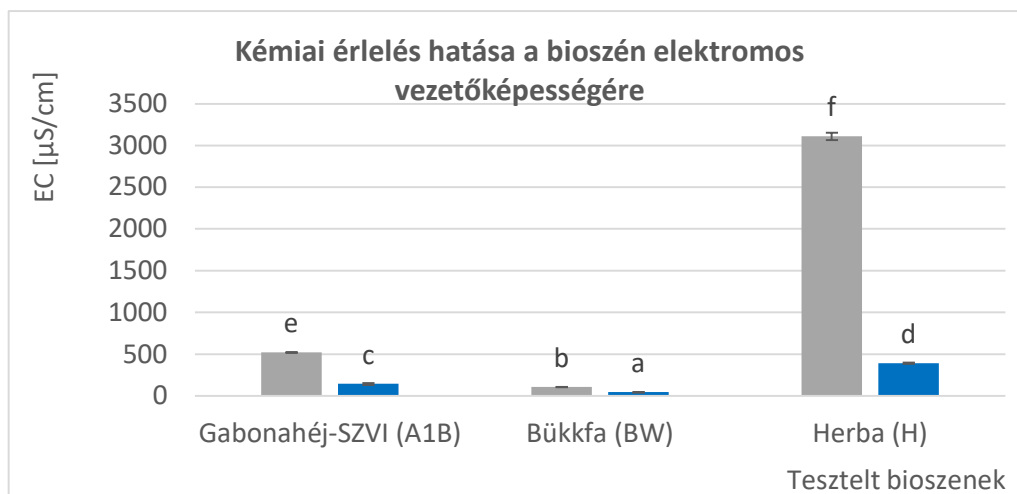
A 8. ábrán a pH mérés eredményei láthatóak. Egyértelműen megállapítható, hogy minden esetben a pH értékének csökkenését tapasztaltuk az érlelést követően. A gyógynövény alapú minta esetén nem tapasztalható szignifikáns csökkenés, míg a másik két bioszén esetén szignifikáns volt a változás. Legnagyobb 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.



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

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 bioszenek elektromos vezetőképességének változása jól követhető a 9. ábrán.



9. 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 µS/cm -ről 144,60 µS/cm -ra, míg a BW esetén 106,40 µS/cm -ről 44,18 µS/cm -ra változott az elektromos vezetőképesség értéke az érlelés hatására.

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.

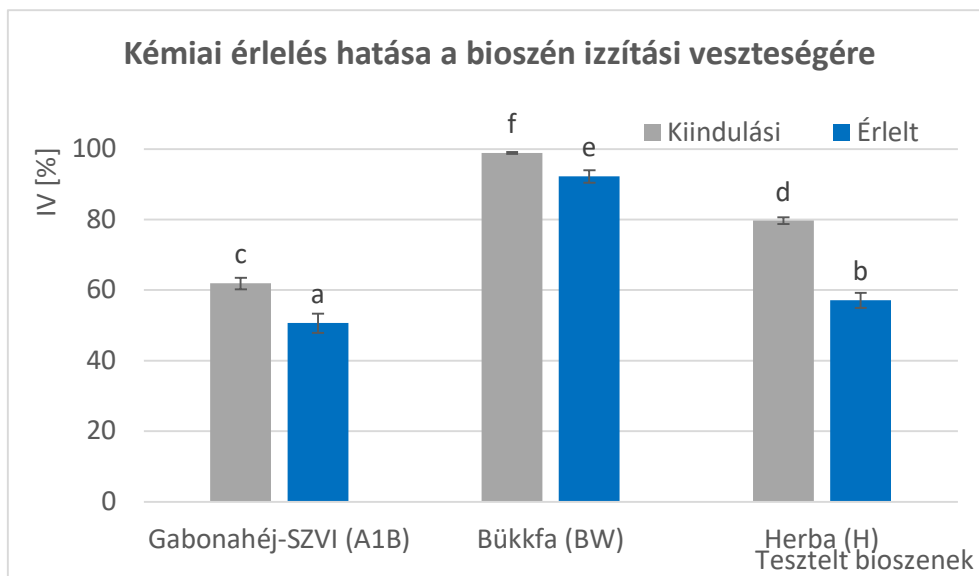
4. TÁBLÁZAT ELEMNTARTALOM A KIINDULÁSI ÉS A KÉMIAI ÉRLELT BIOSZENEBEN

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

Szintén H₂O₂ 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

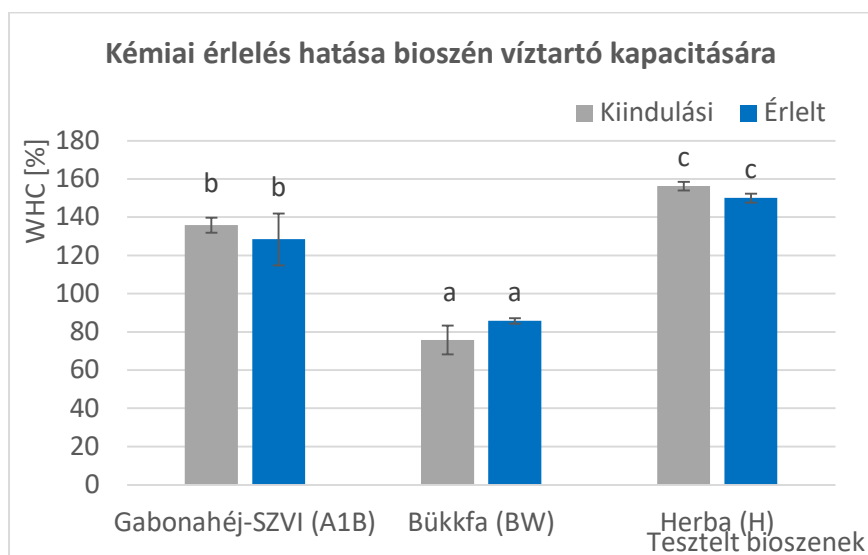
A 10. ábrán az egyes minták kémiai érlelés hatására megváltozott izzítási veszteség értéke látható. Mind a három esetben a mért érték csökkenése figyelhető meg, (azaz a hamutartalom növekedése). Minden minta esetén szignifikáns a csökkenés mértéke. Az érlelés előtt a BW esetén 99%-os, a H esetén 80%-os, 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 H₂O₂-érlelés hatására bekövetkező erőteljes oxidálását a szerves anyagoknak.



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

6.1.2. Víztartó kapacitás (WHC) alakulása a kémiai érlelés hatására

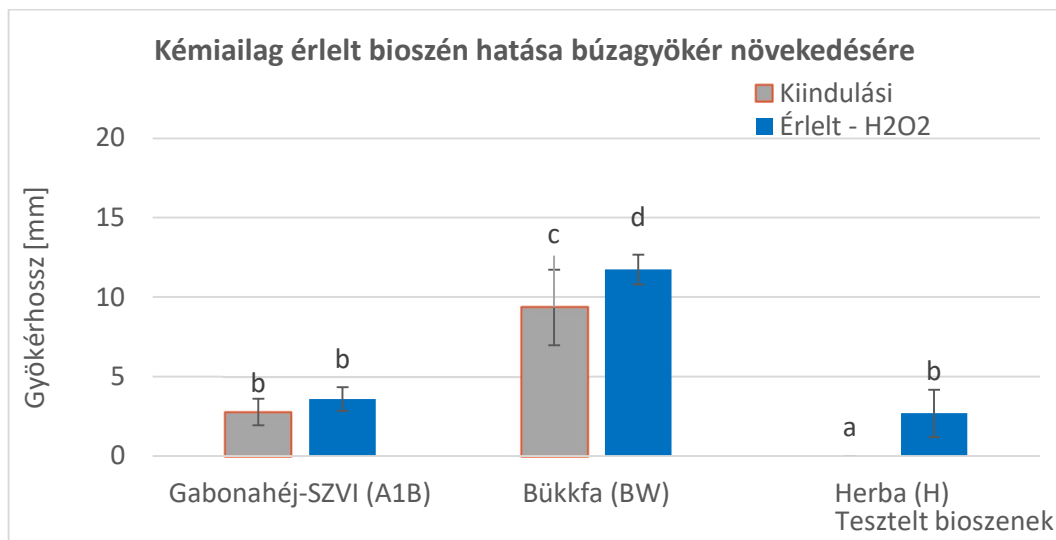
Az alábbi ábra szemlélteti a víztartó kapacitás változását (11. ábra). Megállapítható, hogy az A1B és a Herba esetén csökkent, míg a BW esetén nőtt a víztartó kapacitás. Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy ez a változás egyik esetben sem tekinthető szignifikánsnak. Az érlelést követően a Herba bioszén rendelkezett a legnagyobb mért értékkel (150%) míg a BW a legkisebb mért értékkel (86%).



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

6.1.3. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Triticum aestivum* teszt növényen a kémiai érlelés hatására

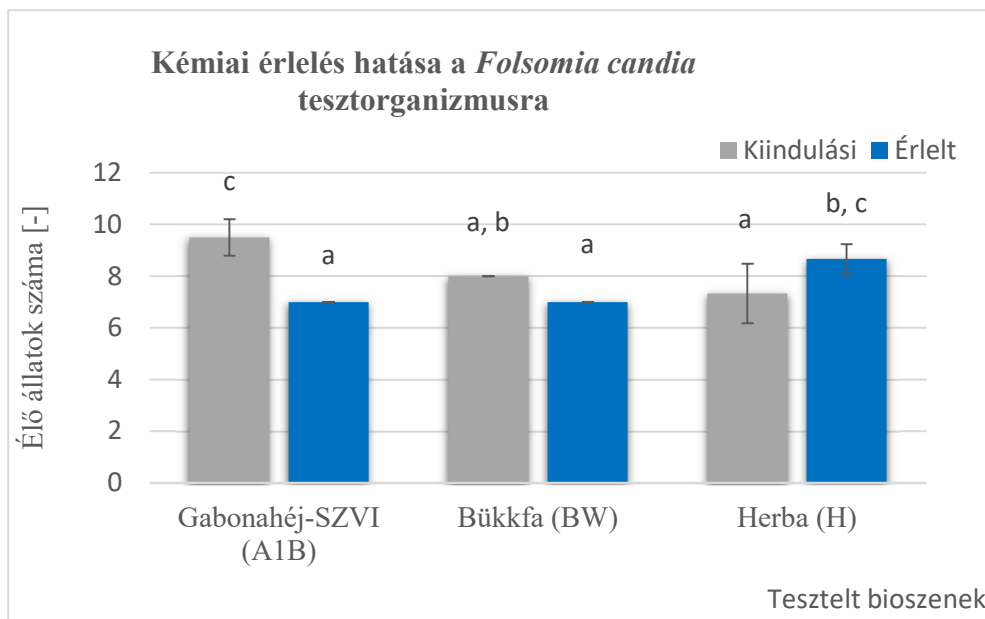
A 12. ábrán a kémiai érlelés hatásai jól nyomon követhetők a búza gyökérhosszának alakulásában. A BW bükkfa alapú minta esetén növekedést lehet megállapítani, ami a gyökér átlagos hosszúságát érinti. Ez a hosszúság növekedés szignifikáns mértékű volt. A BW esetén az átlagos 9,4 mm hossz érlelés hatására 11,7 mm-re növekedett. A Herba minta esetében 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.



12. 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 13. ábrán követhetők 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 elősejtszám 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.



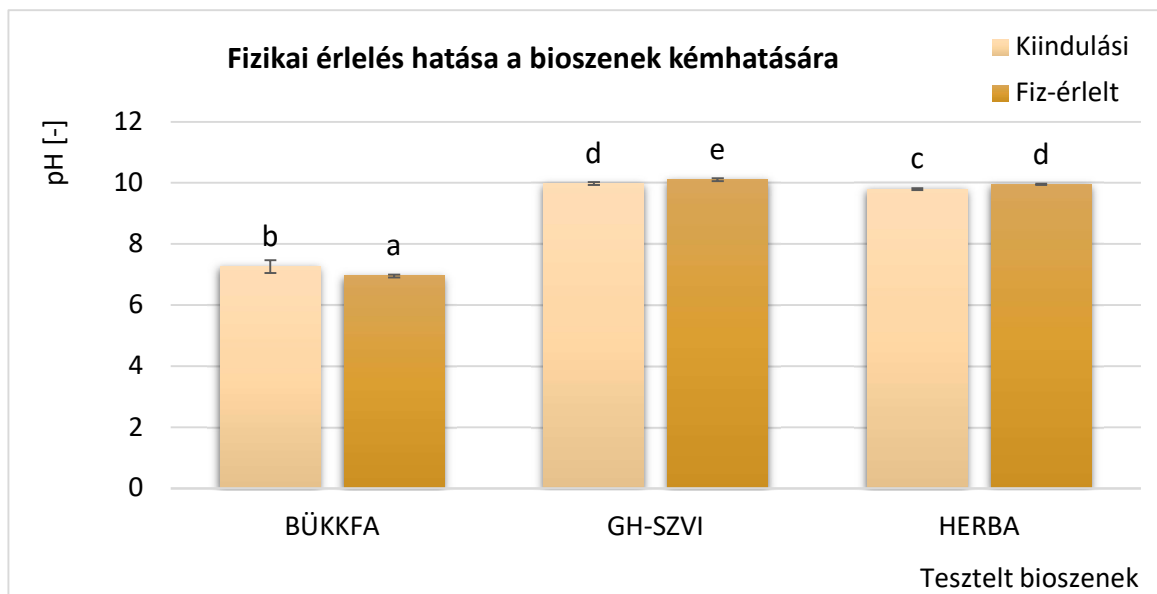
13. ÁBRA A KÉMIAI ÉRLELÉS HATÁSA A COLLEMBOLA MORTALITÁSÁRA

Tomczyk és munkatársai (2021) szennyvíziszap alapú bioszenekkel végeztek laborkísérleteket, amelyek során az ökototoxicitás alakulását is vizsgálták. Az ökotoxikológiai vizsgálatokat különböző növényrel - *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 zsázsa 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

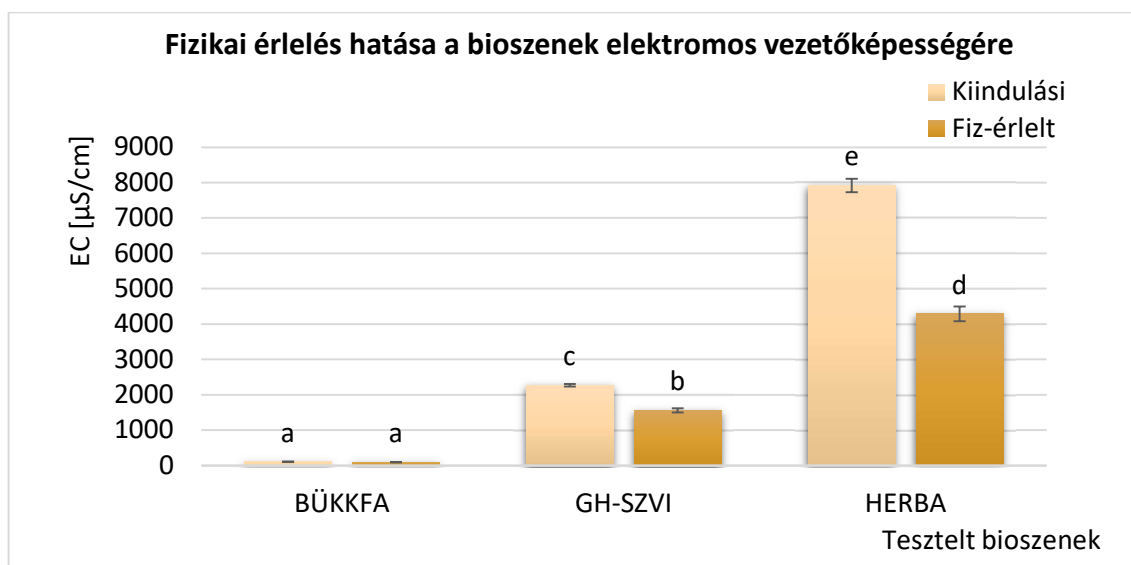
6.2.1. pH és vezetőképesség alakulása a fizikai érlelés hatására

A 14. 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.



14. 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. Ezenél 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 15. ábra.



15. 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.

5. TÁBLÁZAT A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSA AZ EGYES MINTÁK ELEMÖSSZETÉTELÉRE

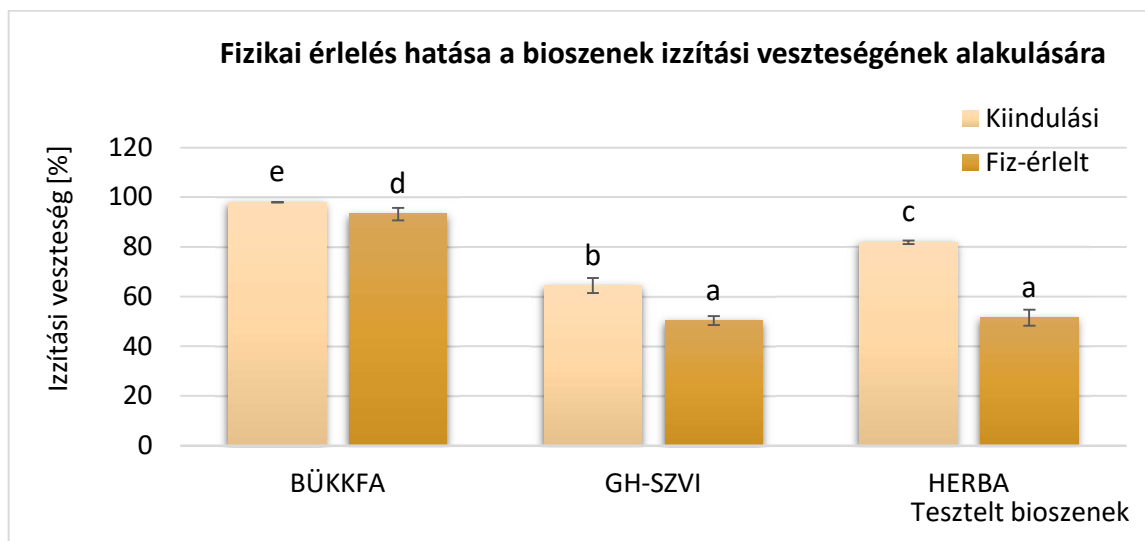
	Elemtartalom a kiindulási és a fizikai érlelt bioszenekben					
	Zn	Cu	Fe	Ca	K	S
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
BÜKKFA (BW) - Kiindulási	< LOD ^a	24 ^a (± 2)	85 ^a (± 8)	6239 ^a (± 1091)	6784 ^a (± 316)	354 ^a (± 69)
GH-SZVI (A1B) - Kiindulási	64 ^b (± 6)	54 ^b (± 0)	382 ^b (± 3)	11303 ^c (± 930)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

6.2.3. Izzítási veszteség alakulása a fizikai érlelés hatására

A vizsgált bioszenek izzítási veszteségére minden esetben szignifikánsan hatott a fizikai érlelés (16. 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.

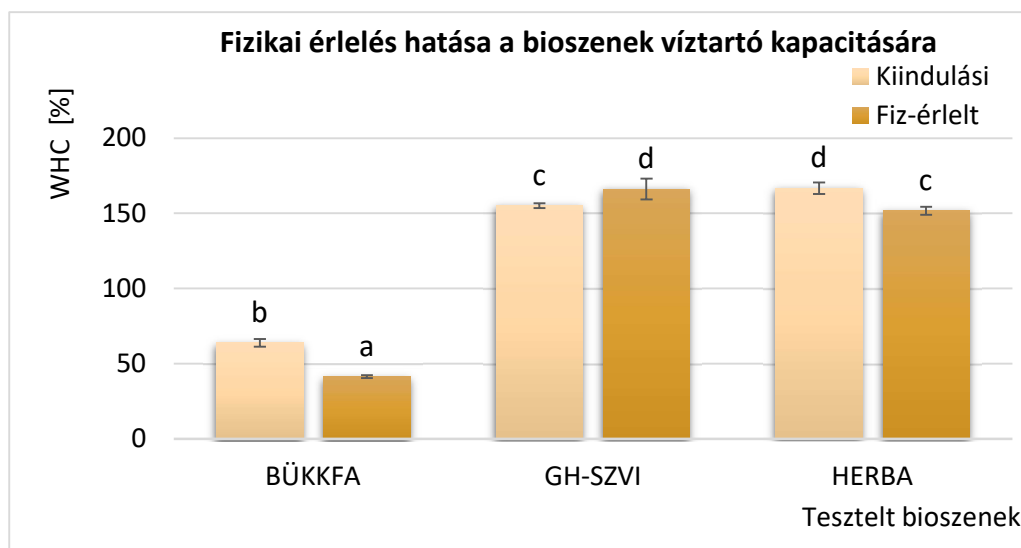
Ezt követte a Herba minta melynél a kezdeti ~82%-os veszteség az érlelés után ~52%-ra esett vissza. A többihez képest legkisebb változás a BW bioszénél volt tapasztalható, ahol a kezdeti ~98%-os veszteség mindössze ~93%-ra esett vissza.



16. 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 (17. ábra).



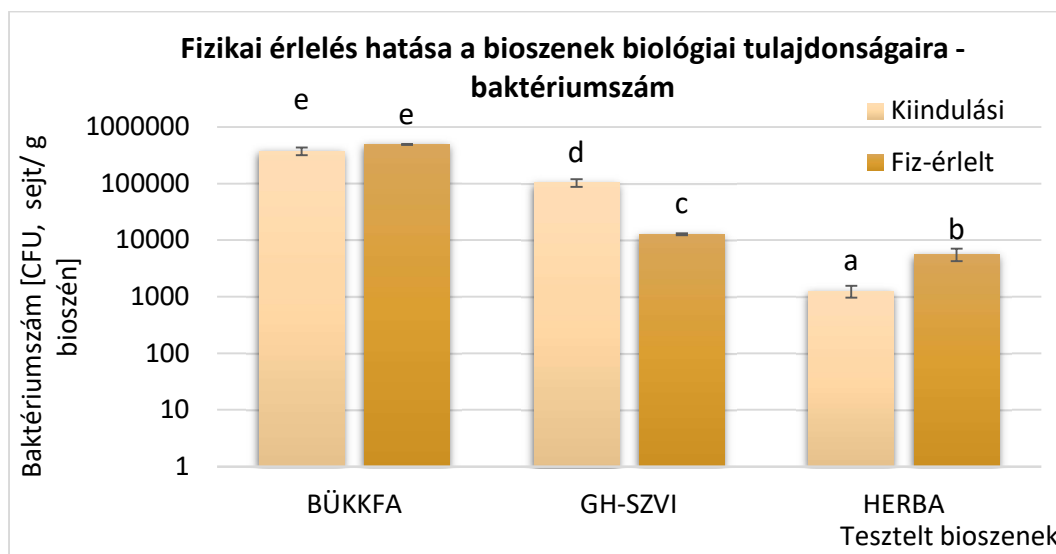
17. ÁBRA AZ EGYES MINTÁK VÍZTARTÓ KÉPESSÉGÉNEK VÁLTOZÁSA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

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.

6.2.5. Aerob heterotróf baktériumszám alakulása a fizikai érlelés hatására

A fizikai érlelés hatása a baktériumszám változására a 18. 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.

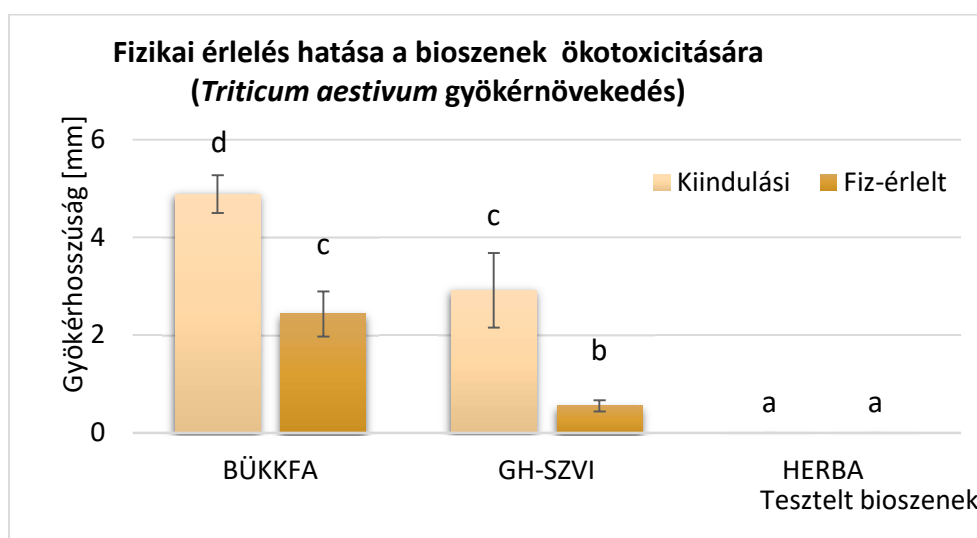


18. ÁBRA A FIZIKAI ÉRLELÉS HATÁSA A BAKTÉRIUMSZÁMRA

6.2.6. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Triticum aestivum* tesztnövényen

A 19. 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.

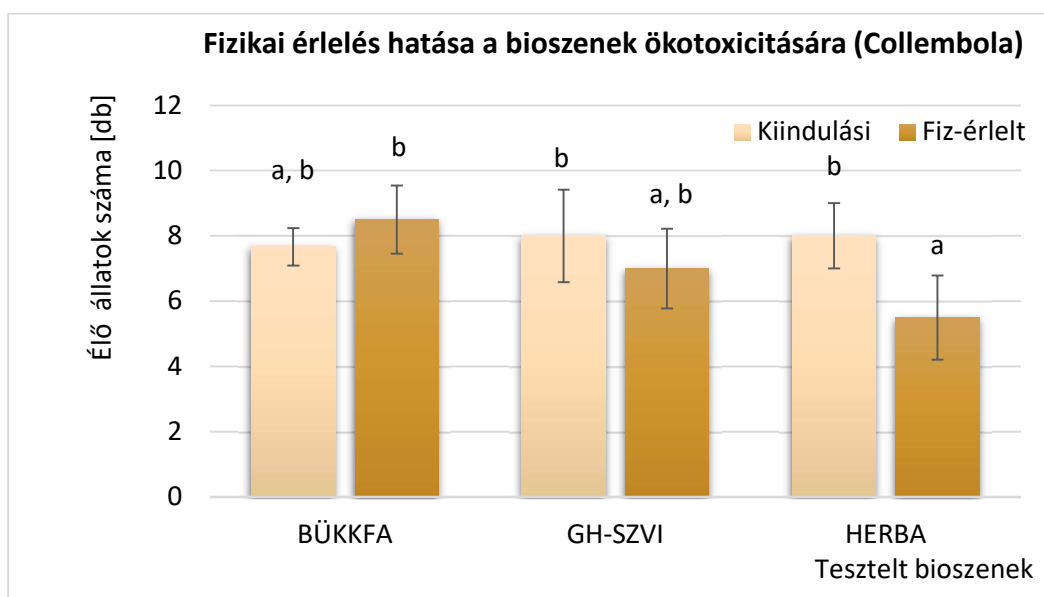
A BW és az A1B esetén is elmondható, hogy a kezelés után lényegesen visszaesett a kifejlődő gyökérkezdemények hossza. A BW esetén az átlagos 4,9 mm-ről 2,4 mm-re esett vissza a mért hossz. Ez az A1B esetén 2,9 m-ről 0,6 mm-re történő csökkenést jelentett. Összességében a fizikai érlelés kedvezőtlen hatást gyakorolt a búza növekedésére. Ugyanakkor kiemelendő, hogy a búza tesztnövény kimagasló érzékenységgű tesztorganizmus az ökotoxikológiai vizsgálatokban.



19. 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 20. ábrán láthatóak.



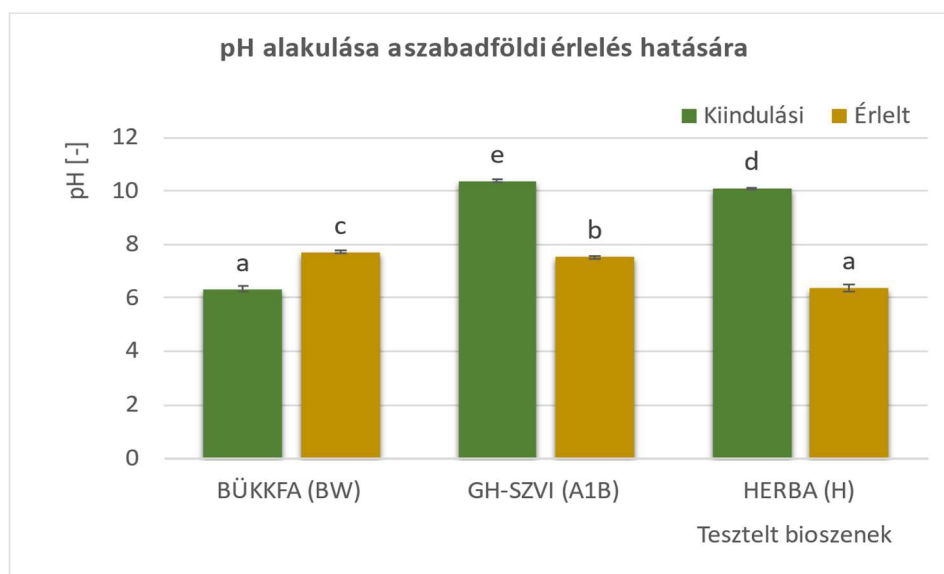
20. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA ÉLETBEN MARADT TESZTORGANIZMUSOK SZÁMA

Egyedül a Herba minta esetén 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.Szabadszíri érlelés eredményeinek kiértékelése

6.3.1. pH és vezetőképesség alakulása a szabadszíri érlelés hatására

A pH mérés eredményeit a 21. ábra mutatja.

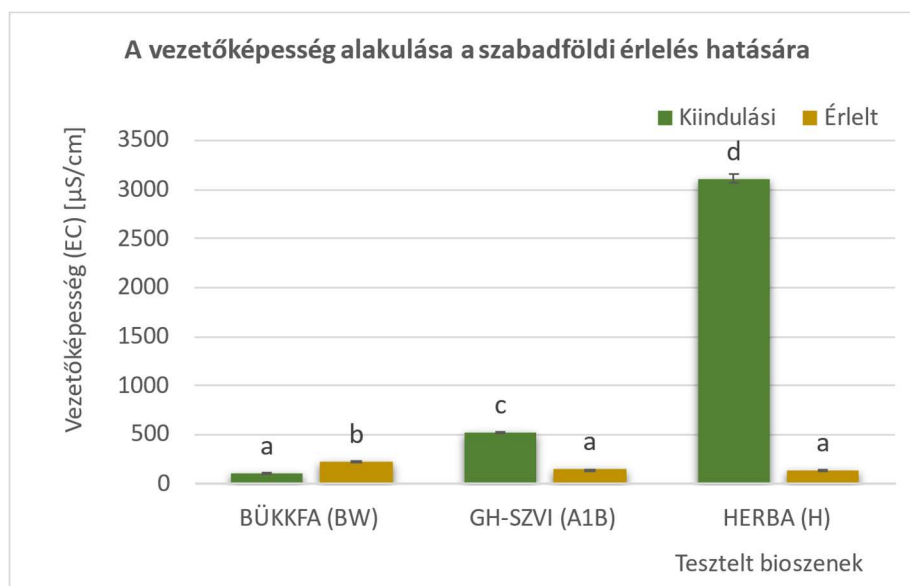


21. ÁBRA A SZABADSÍRI ÉRLELÉS HATÁSA A BIOSZENEK KÉMHAATÁSÁRA

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 értelt minták között is. Egyedül a kiindulási BW mintából és az értelt H mintából mért pH esetén tapasztaltunk nem szignifikáns különbséget. A legnagyobb pH értéket a kiindulási A1B minta (10,38) esetén-, míg legalacsonyabbat pedig a kiindulási BW minta (6,34) esetén mértük. 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 funkciós csoportok az érés során oxidálódnak, melynek eredményeként H^+ szabadulnak fel és ezáltal csökken a pH értéke.

A vezetőképesség mérés (EC) eredményei a 22. ábrán láthatóak.



22. 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 értékére (3115 $\mu S/cm$) mely az összes mintánál többszörösen magas értéket mutat. A legkisebb EC értéket pedig a kiindulási BW minta (106 $\mu S/cm$) 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 vízzeloldható 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.

6. TÁBLÁZAT AZ ELEM-TARTALOM VIZSGÁLAT EREDMÉNYEI

	Elem-tartalom 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 ^b	10 ^a (± 1)	85 ^b (± 8)	6518 ^d (± 392)	4940 ^a (± 212)	469 ^a (± 63)
GH-SZVI (A1B) - Kiindulási	94 ^a (± 7)	55 ^c (± 3)	731 ^d (± 65)	13807 ^{a, b} (± 293)	37230 ^d (± 689)	1647 ^b (± 75)
HERBA (H) - Kiindulási	92 ^a (± 3)	81 ^b (± 2)	949 ^a (± 119)	10198 ^c (± 568)	135736 ^c (± 1874)	1857 ^b (± 16)
BÜKKFA (BW) - Érlelt	101 ^a (± 10)	82 ^b (± 8)	1254 ^c (± 109)	23059 ^c (± 1887)	14355 ^c (± 1185)	1406 ^d (± 142)
GH-SZVI (A1B) - Érlelt	59 ^c (± 9)	18 ^a (± 4)	1019 ^a (± 114)	16349 ^b (± 1889)	6608 ^b (± 551)	850 ^c (± 102)
HERBA (H) – Érlelt	25 ^b (± 12)	19 ^a (± 2)	315 ^c (± 33)	13322 ^a (± 1120)	4306 ^a (± 339)	586 ^a (± 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.

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

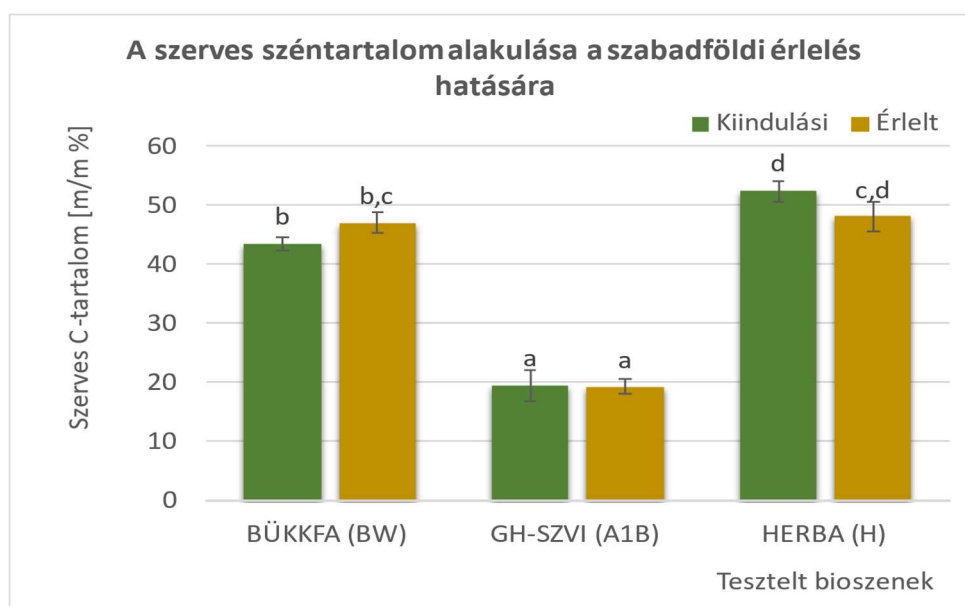
A különböző mintákban található nitrogéntartalom a 8. táblázatban látható. Az összes nitrogéntartalomról elmondható, hogy minden minta esetén csökkent az érlelés hatására, ugyanakkor ez a csökkenés a BW minta esetén nem volt szignifikáns. Az ammónium formában jelen levő nitrogén tartalom minden minta 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.

7. TÁBLÁZAT AZ EGYES NITROGÉNFORMÁK ELŐFORDULÁSA AZ EGYES MINTÁKBAN

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

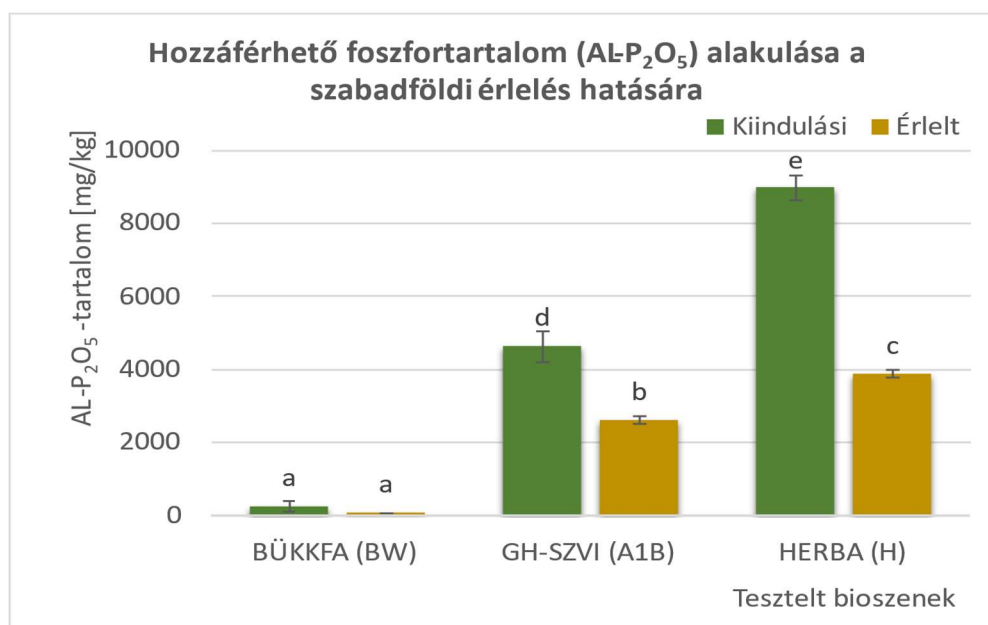
Az egyes mintákban tapasztalható szerves széntartalom alakulása a természetes érlelés hatására a 23. ábrán követhető nyomon.



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

A kapott eredmények variancia analízisét követően kijelenthető, hogy az egyes minták kiindulási és érlelt eredményei között nincs szignifikáns eltérés.

A 24. ábrán a különféle minták hozzáférhető foszfortartalma követhető nyomon.

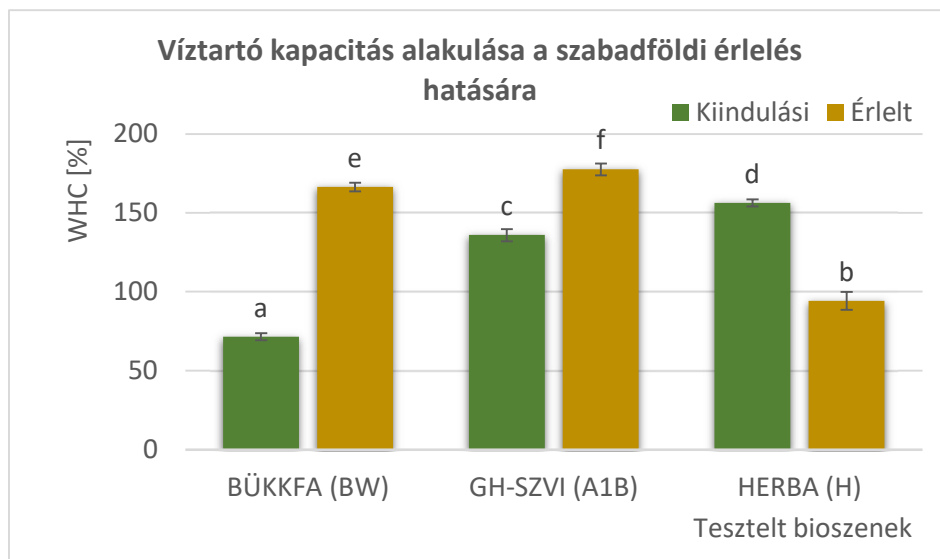


24. ÁBRA A MINTÁKBAN MÉRHEŐ HOZZÁFÉRHEŐ FOSZFORTARTALOM VÁLTOZÁSA AZ ÉRLEÉS HATÁSÁRA

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.

6.3.1. Vízartó kapacitás (WHC) alakulása a szabadföldi érlelés hatására

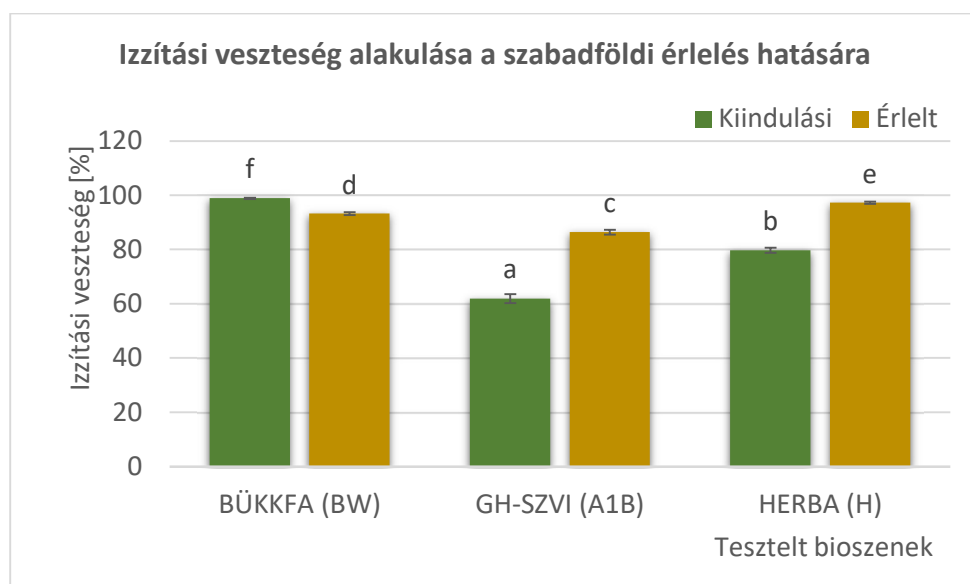
A 25. ábrán a vízartó kapacitás változásának mértéke lett ábrázolva. Elmondható az eredmények alapján, hogy mindegyik minta esetén lényeges hatást gyakorolt az érlelés a bioszenek ezen tulajdonságára. A legkisebb WHC-val a kiindulási BW minta- (71,53 %), míg a legnagyobb értékkel az érlelt A1B minta (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 vízartó kapacitás mértékét legjobban a bioszenek felületének nagyságától függ. Ezért a vízartó kapacitás változása jelezheti, a bioszén felületének a változását (Adhikari et al., 2023)



25. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA TAPASZTALT VÍZTARTÓ KAPACITÁS ALAKULÁSÁNAK ÉRTÉKEI

6.3.2. Izzítási veszteség alakulása a szabadföldi érlelés hatására

Az izzítási veszteség alakulása a 26. ábrán követhető nyomon.

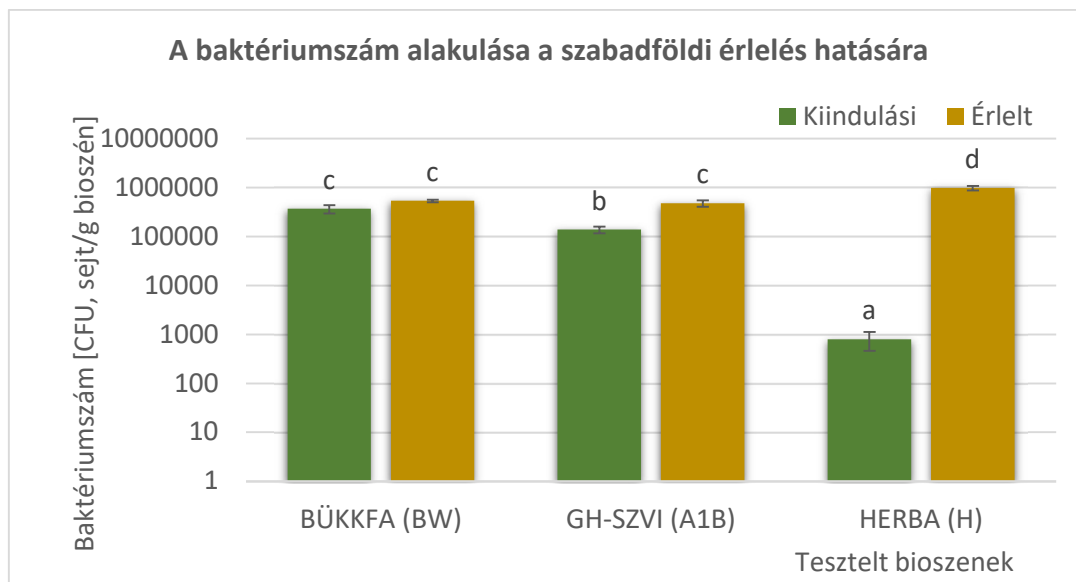


26. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA TÖRTÉNŐ IZZÍTÁSI VESZTESÉGEK VÁLTOZÁSA

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.

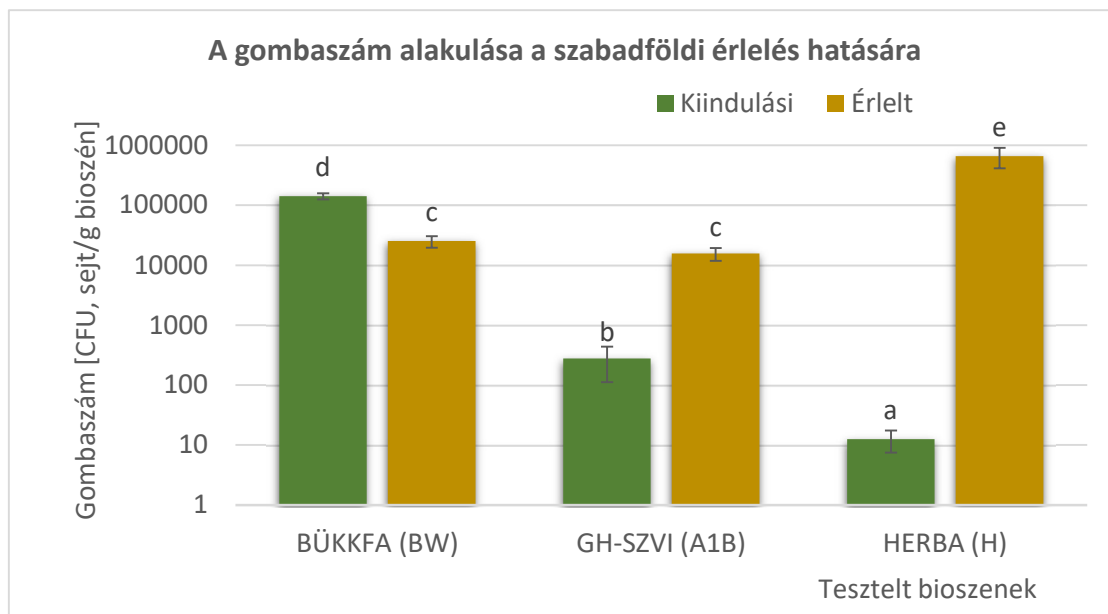
6.3.3. Aerob heterotróf baktérium- és gombaszám alakulása a szabadföldi érlelés hatására

A baktériumszám meghatározásának eredményei a 27. 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.



27. ÁBRA A TELEPKÉPZÉSRE ALKALMAS BAKTÉRIUMOK SZÁMÁNAK VÁLTOZÁSA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSÁRA

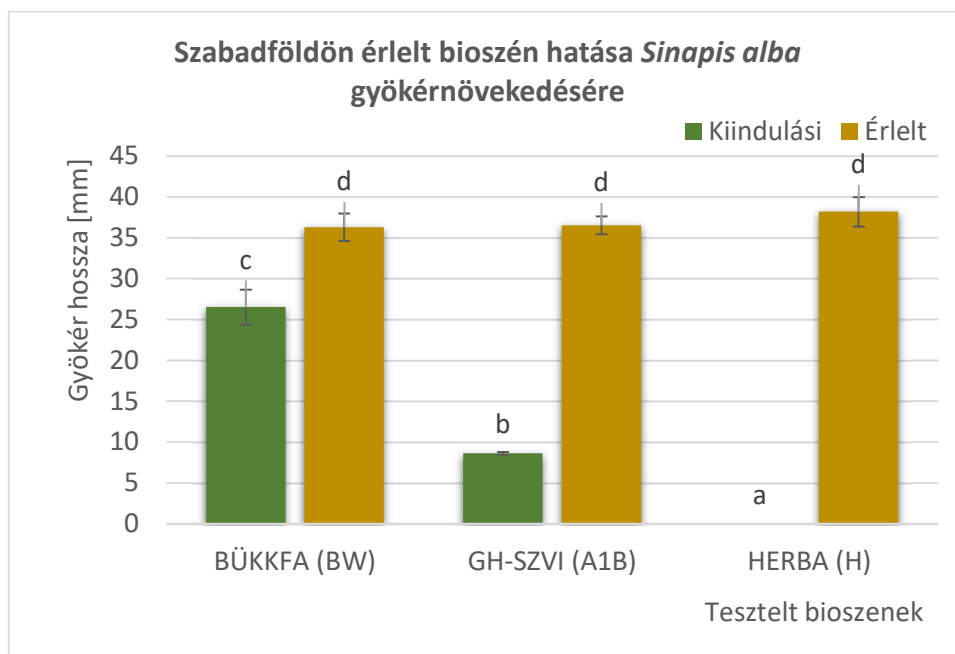
A gombaszám alakulásának mértéke a 28. ábrán követhető nyomon. Az A1B és a H minták esetén a baktériumszám változáshoz hasonlóan szignifikáns növekedés tapasztalható. Ezen felül szintén a H minta esetén tapasztalható a legnagyobb mértékű változás (13 sejt/g-ról 661111 sejt/gramm-ra). Az A1B minta esetén 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 ért el.



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

6.3.4. Növénynövekedésre gyakorolt hatás vizsgálata *Sinapis alba* tesztművennyel a szabadföldi érlelés hatására

A *Sinapis alba* azaz a fehér mustár gyökérnövekedésére gyakorolt hatását lehet nyomon követni a 28. ábrán.



29. ÁBRA A SZABADFÖLDI ÉRLELÉS HATÁSA A SINAPIS ALBA GYÖKÉRNÖVEKEDÉSÉRE

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 szembetűnő 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.

6.3.5. Talajlakó állat életképességére gyakorolt hatás vizsgálata *Folsomia candida* rovarral

A *Folsomia candida* mortalitás vizsgálat eredményei alapján kijelenthető, hogy átlagosan egyik esetben sem pusztult el 3-nál több élőlény a vizsgálatok során. A variancia analízis 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.

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 jelöl, 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.

8. TÁBLÁZAT A KÜLÖNFÉLE MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÖSSZESÍTŐ TÁBLÁZATA

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

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. Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy nem minden bioszén mintára hatottak ugyanúgy a különféle érlelési módszerek. Több bioszén jellemző esetén is elmondható, hogy az adott érlelési folyamat nem befolyásolta számottevően az adott paraméter alakulását. Egyes vizsgálatoknál az volt tapasztalható, hogy a mesterséges érlelést követően ellentétes hatások voltak megfigyelhetőek, viszont a természetes érlelés esetén nem tapasztaltunk szignifikáns változást. Kísérleteim főbb következtetései a következők:

- A kémiai peroxidos érlelés alkalmazása a nagymértékű oxidációs folyamatokkal nem releváns a szabadföldi érlelés modellezésére;
- 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.
- A kutatás további fontos eredményeként kiemelem, hogy az érlelések eredményei egyik bioszén esetén jeleztek hosszú távú alkalmazhatóságukat akadályozó hatásokat.

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. *Agrokemia 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., Hynš, 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. Retrieved September 3, 2023, from 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 hatásaik 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/talajmuvelo/talajjavitas-rigolirozas-melyito-szantas-melylazitas/>
42. Böröndi, T., Gruiz, K., & Klebercz, O. (2012). *Talajjavítás hulladékokkal Szabadföldi kísérletek termesztközeg 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 CO₂ and N₂O 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).