

Szilícium- és kénkezelések hatásának vizsgálata az őszi zab vegetatív fejlődésére és gyökérmorfológiai jellemzőire

FORGÁCS FANNI ZSUZSA – VIRÁG ISTVÁN CSABA – KUTASY ERIKA TÜNDE
Debreceni Egyetem MÉK
Növénytermesztési, Nemesítési és Növénytechnológiai Intézet, Debrecen

Összefoglalás

A zab a világ egyik jelentős takarmány- és élelmiszernövénye, amely kiemelkedő tápértékkel rendelkezik. A növények gyökérzetének fejlődése meghatározó szerepet játszik a tápanyagfelvételben, ezáltal közvetett módon befolyásolja a terméshozamot is. Jelen vizsgálatban őszi zab növényeken elemeztük a szilícium, a kén, valamint a tápelemek együttes alkalmazásának hatását a növények vegetatív fejlődésére tenyészedényes kísérletben, – a vízellátás kivételével – nem kontrollált természetes időjárás viszonyok mellett.

A kén (S) esszenciális tápelem, hiszen többek között a cisztein és a metionin aminosavak alkotórészeként alapvető fontosságú a fehérjeszintézis során, valamint fontos szerepe van az enzimikus folyamatokban és a növények védekezési mechanizmusaiban. A szilíciumot (Si) általánosságban nem tekintik esszenciális elemnek, azonban bizonyíthatóan számos kedvező élettani hatással rendelkezik kalászos kultúrák esetében, mivel a sejtfalba beépülve növeli a növények szilárdságát, valamint javítja a növények abiotikus és biotikus tényezőkkel szembeni ellenálló képességét. A két elem együttes alkalmazása pedig szinergista hatást eredményezhet. A hazánkat érintő klímaváltozás hatására egyre inkább felértékelődik a növényi stressz mérséklésére alkalmazható technológiai elemek használata, melyre a kén és szilícium tartalmú lombtrágyák jó alternatívát jelenthetnek, ezáltal fokozható a termésstabilitás kevésbé kiszámítható éghajlati viszonyok között is. A vizsgálatokat műszeres mérések és objektív számítások segítségével végeztük el.

Eredményeink alapján a SPAD-értékek tekintetében a szilícium- és kénkezelésben részesült növények mutatták a legkedvezőbb értékeket, ugyanakkor az NDVI-értékek esetében a kezelések között nem volt kimutatható különbség. A növénymagasság

vizsgálatakor a kombinált kezelés eredményezte a legmagasabb átlagértékeket, hasonlóan a bokrosodási rátához, azonban ezek az eltérések nem bizonyultak statisztikailag szignifikánsnak a kontrollhoz viszonyítva. A gyökérhossz esetében szintén a kombinált kezelés mellett mértük a legnagyobb átlagértékeket, ami statisztikailag igazolhatóan eltért a többi kezelés eredményétől. A gyökértömeg tekintetében a kénkezelés eredményezte a legmagasabb értékeket, azonban ebben az esetben az eltérés nem volt szignifikáns. Kísérletünk eredményei alapján megállapítható, hogy a kombinált kezelés alkalmazása a SPAD, növénymagasság, bokrosodási ráta és a gyökérhossz paraméterek esetén pozitív hatást gyakorolt, elősegítve a növények fejlődését, ezáltal közvetetten befolyásolva a terméshozamot.

Kulcsszavak: *Avena sativa* L., gyökérfejlődés, NDVI, növénymagasság, SPAD

Evaluation of the effects of silicon and sulfur treatments on the vegetative growth and root morphological characteristics of winter oats

F. ZS. FORGÁCS – I. CS. VIRÁG – E. T. KUTASY

University of Debrecen, Faculty of Agricultural and Food Sciences
and Environmental Management,
Institute of Crop Production, Breeding, and Plant Technology, Debrecen

Summary

Oats are one of the world's major feed and food crops, possessing outstanding nutritional value. The development of the plant's root system plays a decisive role in nutrient uptake, thereby indirectly influencing crop yield as well. In the present study, we analyzed the effect of silicon, sulfur, and the combined application of these nutrients on the vegetative development of winter oats in a pot experiment under natural weather conditions—with the exception of water supply - in a non-controlled environment.

Sulfur (S) is an essential nutrient, as it is a component of the amino acids cysteine and methionine, making it vital for protein synthesis, and it plays an important role in enzymatic processes and plant defense mechanisms. Silicon (Si) is generally not considered an essential element; however, it has been shown to have numerous

beneficial physiological effects in cereal crops, as it increases plant strength by incorporating into the cell wall and improves plants' resistance to abiotic and biotic stresses. The combined use of these two elements can result in a synergistic effect. Due to the effects of climate change in Hungary, the use of technological elements to mitigate plant stress is becoming increasingly important; foliar fertilizers containing sulfur and silicon can serve as a good alternative, thereby enhancing yield stability even under less predictable climatic conditions. The studies were conducted using instrumental measurements and objective analytical methods

Based on our results, plants treated with silicon and sulfur showed the most favorable SPAD values, while no detectable difference was observed among treatments in terms of NDVI values. When examining plant height, the combined treatment yielded the highest average values, similarly to the tillering rate; however, these differences were not statistically significant compared to the control. For root length, the highest average values were also measured with the combined treatment, which was statistically significantly different from the results of the other treatments. Regarding root mass, the sulfur treatment yielded the highest values; however, in this case, the difference was not significant. Based on the results of our experiment, it can be concluded that the use of the combined treatment had a positive effect on SPAD, plant height, tillering rate, and root length, promoting plant growth and thereby indirectly influencing crop yield.

Key words: *Avena sativa* L., root development, NDVI, plant height, SPAD

Bevezetés

A zab jelentős kultúrnövény, amely iránt az utóbbi években megnövekedett kereslet figyelhető meg. Sokoldalú felhasználhatósága révén egyaránt fontos takarmánynövény, a humán táplálkozás alapanyaga, valamint dietetikai és gyógyászati alkalmazásokban is szerepet kap. Fehérjeösszetétele kedvező, továbbá gazdag esszenciális telítetlen zsírsavakban és vitaminokban (E, B1, B2, B6). Értékes forrása az emberi táplálkozásban nélkülözhetetlen élelmi rostoknak. Nyershamu tartalma a kalászosok között az egyik legjelentősebb (Al & Mahmoud, 2021). A zabot többnyire extenzív rendszerben termesztik, mivel a talajjal, agrotechnikával szemben kevésbé érzékeny növény, mely kifejezetten jó gyomelnyomó képességgel rendelkezik (Sorrell & Simmons, 1992). A

Magyarországon szélesebb körben ismert tavaszi zabhoz képest az őszi ökotípus a megváltozott klimatikus viszonyok között kedvezőbb alternatívát jelenthet, mivel korábbi betakarítást tesz lehetővé, valamint hosszabb tenyészidejének köszönhetően nagyobb terméshozam elérésére képes (Chawade et al., 2012).

A kísérlet során kén (S) és szilícium (Si) tartalmú lombtrágyák hatását vizsgáltuk. Szakirodalmi adatok szerint a Si lombtrágyaként történő kijuttatása fokozhatja a gyökérszövet fejlődését, valamint a növénymagasságot, ami vélhetően a fiatal zabnövények magasabb szilíciumtartalmával magyarázható (Toledo et al., 2012). A szilícium szerepének jelentősége az 1980-as évektől került a kutatások fókuszába, amikor felismerték hiányának terméshozamot korlátozó hatását (Debona, 2017). Ugyanakkor a megítélése mind a mai napig nem egységes: egyes szerzők esszenciális tápelemként hivatkoznak rá (Malhotra & Kapoor, 2019), míg mások „*részleges biológiai jelentőségű*” elemként hivatkoznak rá (Pais, 1980), mely bár a növény számára nem nélkülözhetetlen, jelenléte kedvező hatást gyakorol a növények fejlődésére.

A kén szélesebb körben alkalmazott tápelem, különösen az olajnövények – például repce és napraforgó – termesztésében, ahol igazoltan növeli az olajtartalmat és annak minőségét (Shoja et al., 2018). A kén a mezeoelemek közé tartozik, a növényi szövetek kéntartalma a szárazanyagban 0,2–0,7% közötti. Sárvári (2019) szerint. A gabonafélék érzékenyen reagálnak a kénhiányra még abban az esetben is, ha más tápelemmel megfelelően ellátottak (Brodowska et al., 2017). A túlzott mértékű SO₂ terhelés azonban súlyos károkat okozhat a növényben. A kén bizonyíthatóan stimulálja a gyökérszövet növekedését, növelve a gyökérszövet hosszát és tömeget, ami a megnövekedett tápanyagfelvétel felületen keresztül az egész növény fejlődésére hatással van (Aula et al., 2019).

A Si és S lombtrágyázás élettani és termésre gyakorolt hatásait már korábban is vizsgálták őszi zab kultúrában. Kutasy et al. (2021) kutatásai alapján a szilícium, illetve a kombinált (Si+S) kezelés jelentősen növelte a fotoszintézis intenzitását, a transzspirációt, a klorofill- és karotinoidtartalmat, valamint a vízhasznosítási hatékonyságot szárazságstressz esetén, miközben a levélterület-index csökkent; a kisebb lombzat ellenére a termés és az ezerszemtömeg is nőtt. A kezelésekre adott reakciókban - a vízhasznosítás, a konduktancia és a levélfelület tekintetében - jelentős fajtakülönbségek mutatkoztak. Aszályos és száraz évszakokban a Si+S kombináció több évben szignifikáns terméscsökkenést okozott, ráadásul egyes kísérletekben csak a

kombinált kezelés bizonyult szignifikánsnak (Kutasy et al., 2023; Forgács et al., 2024). A termés elemek eltérően alakultak: a szilíciumos kezelés önmagában növelte ugyan az ezerszemtömeget, de a legalacsonyabb bugaszámot eredményezte, míg a kénkezelés növelte a buga- és kalászkaszámot. A legnagyobb szemtermést a kombinált kezeléssel érték el (Forgács et al., 2024). Tavaszi zabban is végeztek vizsgálatokat, melyek eredményeként megfigyelték, hogy a kizárólag szilícium tartalmú lombtrágyával történő kezelés egyes fajtáknál termés-csökkenéshez vezethet, míg a kéntartalmú kezelések egyenletesebben javították a hozamot (Stadnik & Tobiasz-Salach, 2022; Bytyqi et al., 2026).

A gyökérezetre vonatkozó vizsgálatok esetén sóstressznek kitett zabcsíranövényekben a szilícium szignifikánsan csökkentette a fajlagos gyökérhosszt (SRL) és a sztómakonduktanciát, a levelek szerkezeti széntartalmát pedig növelte, ami vastagabb, kevésbé megnyúlt gyökerek kialakulására és módosult vízháztartásra utal (Qian et al., 2022). Hidropónikus rendszerben a nano-részecskés szilícium és a szilikát serkentette a zab növekedését, és fokozta a gyökér sejtfalának lignifikációját toxicitás nélkül (Asgari et al., 2018). Általánosságban, számos kultúrnövényben a Si növeli a gyökérhosszt, az elágazódást, a gyökérszőr-képződést és a gyökértömeget, amit gépi látáson alapuló gyökérfenotipizálással is igazoltak (Tripathi et al., 2021). A szemtermés ásványianyag-összetételét a szilíciumos és kénes kezelések szignifikánsan befolyásolták: a kéntartalmú kezelések (S, Si+S) mutatták a legstabilabb pozitív hatást a makro- és mikroelem-koncentrációk (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn stb.) növelésében, míg az önmagában kijuttatott szilícium hatása egyes elemekre korlátozott, vagy negatív volt (Kutasy et al., 2023; Bytyqi et al., 2026). Mindezek alapján a Si és S lombtrágyázás komplex módon befolyásolja az őszi zab vegetatív és generatív fejlődését, amit a fajta és a környezeti feltételek jelentősen módosítanak.

Anyag és módszer

A kísérletet a Debreceni Egyetem Böszörményi úti Campusán található Bemutatókert és Arborétum területén állítottuk be. A gyökérezet vizsgálata szántóföldi körülmények között nehezen kivitelezhető, ezért a pontosabb mérhetőség érdekében a növényeket tenyészedenyekben neveltük. Egy cserép átmérője 28 cm (felülete 615,75 cm²), magassága 23 cm volt. A 180 kg/ha-os

vetőmagnormát alapul véve 11 g-nyi vetőmagot helyeztünk el edényenként. A vetés Mv Hópehely fajtával történt 2024. október 17-én, a gyökérmosásra pedig 2025. július 31-én, teljes érést (BBCH 90) követően került sor. A relatív klorofilltartalom és NDVI méréseket 2025. április. 25-én, a zabnövények szárbaindulásakor (BBCH 30-31) kezdtük el, majd ezt követően heti rendszerességgel folytattuk egészen 2025. május. 27. napjáig, tejesérés végéig (BBCH 77).

A tenyészedényeket a kísérleti területről származó talajjal töltöttük fel, amit a kísérleti terület talajának felső 20 cm-es rétegéből vettük. A talajminták homogenizálását követően laboratóriumi vizsgálatokat végeztünk, melyek alapján a talaj pH_(KCl) értéke közel semleges (6,91) volt. Az Arany-féle kötöttségi szám (K_A) 44, az AL-oldható foszfortartalom 1300 mg/kg, míg a káliumtartalom 674 mg/kg volt. A talaj kiinduló vízdoldható szilíciumtartalma 35,8 mg/kg, kéntartalma pedig 14,1 mg/kg (KCL kivonat) volt.

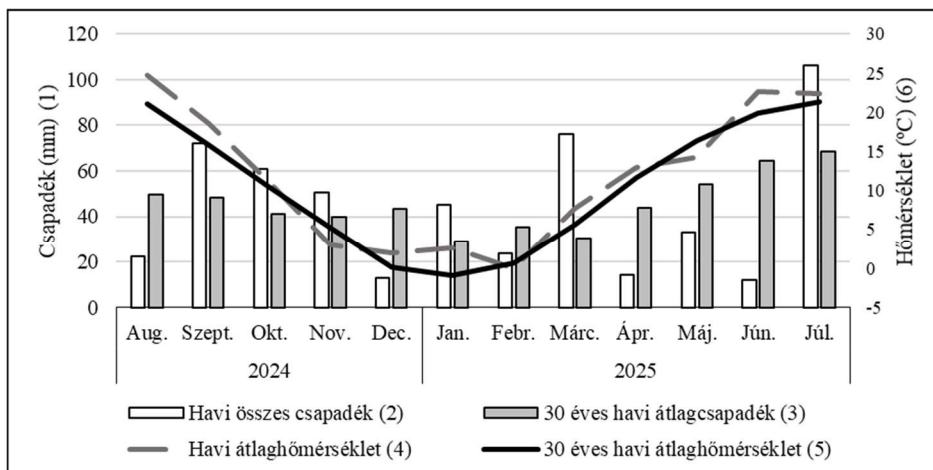
A növényeket szabad ég alatt neveltük, hetente háromszor (hétfő, szerda, péntek) teljes vízkapacitásig vízzel telítettük a talajt. A megjelenő gyomnövényeket folyamatosan eltávolítottuk.

A tenyészidőszak alatt három alkalommal végeztünk lombkezeléseket szilícium- (Optysil – 200 g SiO₂ l⁻¹) és kéntartalmú (Jello Fluid – 1000 g SO₃ l⁻¹) lombtrágyákkal. Az Optysil nevű készítményt 0,5 l/ha, a Jello Fluid készítményt pedig 5 l/ha dózisban juttattuk ki. A kezeléseket a következő fenológiai fázisokban végeztük el: 3 leveles állapot (BBCH 13), a zászlólevél megjelenése (BBCH 37) és tejesérés (BBCH 75). A kezeléseket 5 ismétlésben, tehát kezelésenként 5 elkülönülő cserépben végeztük el, melyben cserepenként 11 g zab vetőmagból kifejlődött növény helyezkedett el.

A tenyészidőszak során 5 alkalommal végeztünk relatív klorofilltartalom (Minolta SPAD-502) és NDVI (FieldScout CM 1000) méréseket. A gyökérmosást megelőzően mértük a növénymagasságot. A gyökérmosás során csapvízzel eltávolítottuk a talajmaradványokat a gyökérről, majd meghatároztuk a bokrosodási erélyt, a mellégyökérzet leghosszabb gyökérét (továbbiakban: gyökérhosszt) és a gyökértömeget. A gyökértömeg meghatározása tömegállandóságig történő szárítással történt, egységesen 70%-os nedvességtartalomra korrigálva (a szárítás MEMMERT 800 típusú szárítószekrényben történt, a tömegméréseket pedig Ohaus Scout Pro SPU6001 hordozható laboratóriumi mérleggel végeztük).

A klimatikus viszonyokat tekintve a növények vízellátottsága biztosított volt, ugyanakkor a tenyészedények nyílt terepi elhelyezése miatt a növények a természetes hőmérsékleti és időjárási viszonyoknak voltak kitéve, ugyanúgy, mint a szántóföldi kísérlet esetén. A kedvező őszi időjárás elősegítette a növényeink kezdeti fejlődését, amit az átlagostól valamivel melegebb tavaszi időjárás is segített, azonban a nyári légköri aszály kedvezőtlen hatást gyakorolt a tenyészedényben lévő növényekre is (1. ábra).

1. ábra. A kísérleti zabnövények tenyészidőszakára vonatkozó időjárási adatok (Debrecen, 2024–2025)



Megjegyzés: a DE MÉK PNK Agrometeorológiai Observatórium mérési programjának adatai.

Figure 1. Weather data for the growing season of the experiment [Debrecen, 2024–2025]. (1) Precipitation, (2) Monthly precipitation, (3) 30 years average precipitation, (4) Monthly mean temperature, (5) 30 years average temperature, (6) Temperature, Note: data from the measurement program of the DE MÉK PNK Agrometeorological Observatory.

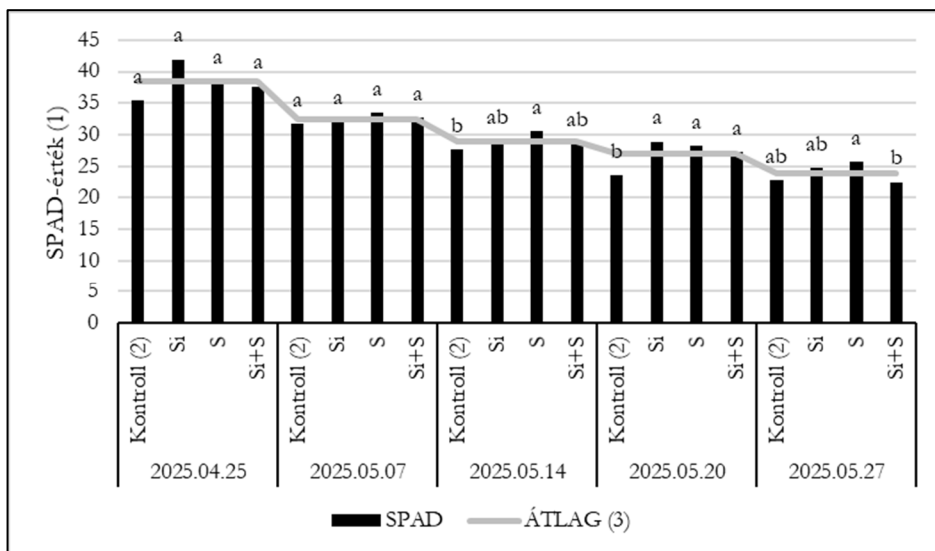
A statisztikai elemzéseket az IBM SPSS Statistics 22. verziószámú szoftverrel végeztük. Az adatok kiértékelése során egytényezős varianciaanalízist (ANOVA), valamint páronkénti összehasonlításra LSD post-hoc tesztet alkalmaztunk. Az eredmények ábrázolása Microsoft Excel 2016 program segítségével történt.

Eredmények

Relatív klorofilltartalom

A relatív klorofilltartalom méréseket öt alkalommal végeztük az állományban, 2025. április 25-től kezdődően (2. ábra). Az eredmények alapján a legmagasabb értékeket az első mérési időpontban rögzítettük, ezt követően fokozatos, egyenletes csökkenés volt megfigyelhető.

2. ábra. Szilícium és kén kezelés hatása az őszi zab SPAD-értékére eltérő mérési időpontokban (Debrecen, 2025)



Megjegyzés: a különböző kisbetűk a kezelések közötti szignifikáns eltéréseket jelölik az adott mérési időpontokban.

Figure 2. Effect of silicon and sulfur treatment in winter oat on SPAD-values in different measuring dates (Debrecen, 2025). (1) SPAD-value, (2) Control, (3) Average, Note: the different small letters indicate significant differences between treatments at the given measurement time points.

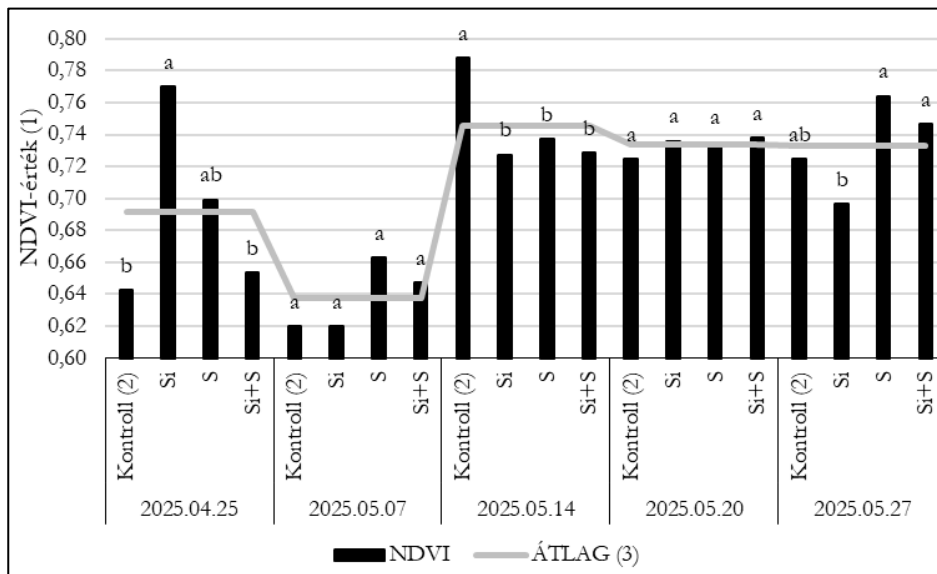
A szilícium- és/vagy kénkezelésben részesült növények minden mérési időpontban az átlagot meghaladó SPAD-értékeket mutattak. A kontroll kezelés esetében jellemzően alacsonyabb értékeket mértünk, azonban statisztikailag

szignifikáns különbséget csak a 2025. május 20-ai mérési időpontban tudunk kimutatni. A csökkenés mértéke az első és a második mérés között volt a legjelentősebb (mintegy 15%), ezt követően a csökkenés üteme mérséklődött, és hetente 5–9,4% közötti értékeket mutatott.

NDVI

Az NDVI-értékek között számottevő különbség nem volt megfigyelhető (3. ábra). Ugyanakkor figyelemre méltó, hogy az április 25-ei mérési időpontot követően jelentős csökkenés következett be az NDVI-értékekben, amelyet a következő mérési alkalommal (május 14.) egy, a két héttel korábban mért értékeket is meghaladó növekedés követett.

3. ábra. Szilícium és kén kezelés hatása az őszi zab NDVI-értékére eltérő mérési időpontokban (Debrecen, 2025)



Megjegyzés: A különböző kisbetűk a kezelések közötti szignifikáns eltéréseket jelölik az adott mérési időpontokban

Figure 3. Effect of silicon and sulfur treatment in winter oat on NDVI-values in different measuring dates (Debrecen, 2025). (1) NDVI-value, (2) Control, (3) Average. Note: the different small letters indicate significant differences between treatments at the given measurement time points.

Növénymagasság

A vizsgált fajta esetében a kombinált kezelés (Si+S) eredményezte a legmagasabb átlagos növénymagasságot (közel 47 cm), ami több mint 10%-kal haladta meg a kontroll növények átlagmagasságát (1. táblázat). A többi kezelés között jelentős eltérést nem találtunk, azonban a kombinált (Si+S) és a Si kezelés közötti különbség a varianciaanalízis alapján statisztikailag igazolhatónak bizonyult. A két kezelés közötti magasságkülönbség 5,53 cm volt.

Bokrosodási ráta

A bokrosodási ráta szintén a kombinált kezelésben részesített növények esetében mutatta a legkedvezőbb értékeket. A többi kezelés között jelentős eltérés nem volt kimutatható, és szignifikáns eltérést egyik kezelés között sem találtunk (1. táblázat). Az eredmények alapján megállapítható, hogy a növények többsége egy, esetenként két hajtást fejlesztett, oldalhajtások kialakulása csak ritkán fordult elő. Ezek a mért értékek nem tükrözik a szántóföldi körülmények között tapasztalható bokrosodási intenzitást, ami feltételezhetően a tenyészedényes termesztés korlátozó hatásával magyarázható.

Gyökérhossz

Mivel nem állt rendelkezésünkre rhizobox a kísérlet kivitelezéséhez, ezért bár a tenyészedényes vizsgálati módszer korlátozza és befolyásolja a gyökérzet fejlődését, mégis a rendelkezésre álló eszközeinket tekintve ez a legkíméletesebb eljárás, amely lehetővé teszi a gyökérszőrök sérülésének minimalizálását, és ezáltal a teljes gyökérzet vizsgálatát.

Az eredményeink (1. táblázat) alapján a kombinált kezelés hatására szignifikánsan nőtt a gyökérzet átlagos hossza a többi kezeléshez képest. Emellett a kizárólag szilíciummal (Si) kezelt növények gyökérhossza is statisztikailag igazolhatóan eltért mind a kontroll, mind a kénes (S) kezelésben részesített növények átlagos gyökérhosszától. A kontrollhoz viszonyítva a kombinált kezelés esetén átlagosan 52%-kal, a szilíciumos kezelés esetén pedig átlagosan 30%-kal hosszabb gyökérzetet mértünk.

Gyökértömeg

A gyökérzet tömegének vizsgálatát a fentiekben már részleteztük. A legmagasabb átlagos értéket a kénes kezelés esetében mértük, ezt követte a

szilíciumos kezelés, majd a kontroll. A legalacsonyabb értéket a kombinált kezelés adta. A kezelések közötti különbségek azonban statisztikailag nem voltak igazolhatóak (1. táblázat).

1. táblázat. Szilícium és kén kezelés hatása az őszi zab növénymagasságára, bokrosodási rátájára és gyökérparamétereire (Debrecen, 2025)

Kezelések (2)	Paraméterek (1)			
	Magasság (cm) (5)	Bokrosodási ráta (6)	Gyökérhossz (cm) (7)	Gyökértömeg (g) (8)
Kontroll (3)	42,47 ab	1,07 a	23,40 c	21,07 a
Si	41,33 b	1,08 a	30,40 b	23,00 a
S	43,20 ab	1,06 a	24,80 c	28,07 a
Si+S	46,87 a	1,11 a	35,60 a	19,20 a
Átlag (4)	43,47	1,08	28,55	22,83

Megjegyzés: a táblázatban látható kisbetűk a kezelések közötti szignifikáns különbségeket jelölik az adott vizsgált paraméteren belül ($\alpha=5\%$).

Table 1. Effect of silicon and sulfur treatments on plant height, tillering rate, and root parameters of winter oats (Debrecen, 2025). (1) Parameters, (2) Treatments, (3) Control, (4) Average, (5) Plant height, (6) Tillering rate, (7) Root length, (8) Root weight. Note: the small letters in the table indicate significant differences between treatments within the given parameter ($\alpha=5\%$).

Következtetések

A vizsgált paraméterek alapján megállapítható, hogy a kezelések összességében kedvező hatást gyakoroltak mind a növények általános kondíciójára, mind a gyökérképződésre. A növénymagasság, a bokrosodási ráta és a gyökérhossz esetében - bár nem minden esetben szignifikáns módon - a kontrollhoz képest magasabb értékeket mértünk, és ezeknél a paramétereknél a kombinált kezelés eredményezte a legmagasabb átlagokat. Figyelemre méltó azonban, hogy a gyökértömeg esetében a kombinált kezelés adta a legkisebb értéket, amely mintegy 9%-kal maradt el a kontrolltól. Ez a tendencia részben összhangban van Hattori et al. (2009) rozzsal végzett tenyészedényes

kísérletének eredményeivel, ahol száraz körülmények között a szilícium hatására a növények több asszimilátumot szállítottak a gyökerekbe, ami csökkentette a hajtás/gyökér arányt, ugyanakkor a gyökérnövekedés serkentése nem feltétlenül a gyökér száraztömegének növekedésében, hanem a gyökérrendszer funkcionális hatékonyságának javulásában nyilvánult meg. Ezzel szemben Poudel et al. (2026) rizs vizsgálata során a talajos közegben alkalmazott zeolit – mint lassú felszívódású Si-forrás – a gyökérparaméterek 29–73%-os növekedése mellett a gyökér száraz tömegét is akár 106%-kal emelte, ami arra utal, hogy a szilícium formája és a közeg tulajdonságai meghatározó szerepet játszanak a gyökér biomassza alakulásában.

A 2021-ben végzett szilícium és kén kezeléseket vizsgálta Csajbók et al. (2022) őszi zabban. A korábbi években őszi zab kultúrákban végzett kutatásaink alapján, a 2021-es tenyészidőszakban végzett mérések szerint a SPAD-értékek többségében, míg az NDVI-értékek minden mérési időpontban alacsonyabb átlagértékeket mutattak a kontroll parcellák növényeihez viszonyítva (Csajbók et al., 2022). Továbbá megfigyelhető volt, hogy a kombinált kezeléseket esetén jelentkeztek a legalacsonyabb értékek, melyek a statisztikai elemzések alapján többnyire szignifikánsnak bizonyultak. Ez a jelenség némiképp ellentmondásban áll Lima et al. (2025) szántóföldi kukorica kísérletének tapasztalataival, ahol a 150 g/ha dózisú levéltrágyaként kijuttatott szilícium 13%-kal növelte a nettó fotoszintézist és 10%-kal a szemtermést, valamint a gyökérfejlődésre is egyértelműen pozitív hatást gyakorolt. Az ellentmondás hátterében az eltérő növényfaj, az alkalmazott szilíciumforma és dózis, valamint a kísérleti körülmények (szántóföld vs. kisparcellás kísérlet) különbözősége állhat.

Bekir & Kutasy (2022) a 2022-es tenyészidőszak alatt tavaszi zabban vizsgálták a kén- és szilíciumtartalmú lombtrágyák élettani hatását. Eredményeik összhangban állnak a korábban ismertetett vizsgálatokkal az NDVI-értékek tekintetében, ugyanakkor a SPAD-értékek esetén kapott eredmények nem bizonyultak szignifikánsnak. Az NDVI esetén azonban minden mért időpontban alacsonyabb értéket tapasztaltak a többi kezeléshez, valamint a kontrollhoz képest, míg a növénymagasság vonatkozásában a kezeléseket egyértelműen pozitív hatást gyakoroltak. Badawy et al. (2021) nano szilíciummal végzett rizs kísérlete szintén megerősítette a kezeléseket gyökérnövekedésre gyakorolt kedvező hatását: a nano Si magáztatásként és levéltrágyaként történő

alkalmazása szántóföldi, sós talajú körülmények között jelentősen növelte a gyökér vastagságát és térfogatát, ami hozzájárult a sótűrő képesség javulásához és a magasabb terméshez.

Összességében megállapítható, hogy a szilícium és kén együttes alkalmazása nem befolyásolta, vagy pozitív hatást gyakorolt a vizsgált paraméterekre, amely megállapítás a kezelések külön-külön történő alkalmazására is érvényes. Több vizsgált tulajdonság esetében a mért értékek elmaradtak a szántóföldi kísérletekben tapasztaltaktól. Ennek háttérében feltételezhetően a tenyészedényben rendelkezésre álló 14,16 dm³ talajtérfogat, annak tápanyagtartalma, valamint a gyökérzet korlátozott terjeszkedési lehetősége áll, ami várható módon befolyásolta az eredményeket. A korlátozott gyökérfejlődésből adódó eltéréseket a szakirodalmi adatok is alátámasztják: Poudel et al. (2026) rizs esetében a hidropóniában alkalmazott nátrium-metaszilikát 23–46%-kal növelte a gyökérhosszt, -felszínt, -térfogatot és az elágazások számát, míg talajos közegben a zeolit bizonyult hatékonyabbnak, ami jól szemlélteti, hogy a közeg típusa és a szilícium formája együttesen határozzák meg a gyökérválaszt. Azonos időpontban végzett kezelések mellett párhuzamosan szántóföldön is végeztük a vizsgálatokat, ott a paraméterek rendre magasabb értékeket mutattak a tenyészedénnyel szemben. Fontos hangsúlyozni, hogy egyetlen kísérleti év eredményei alapján messzemenő következtetések nem vonhatók le, ezért a kísérlet folytatása a következő évben is indokolt.

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium KDP-2023 kódszámú Kooperatív Doktori Program Doktori Hallgatói Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALOM

Al, H. R. L. M. T. & Mahmoud, J. M. R. (2021). Effect Agricultural Sulfur and Nitrogen on Growth and Yield Stressed Oat (*Avena sativa* L.). *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(1), 6073–6079.

- Asgari, F., Majd, A., Jonoubi, P. & Najafi, F. (2018). Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 127: 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.021>
- Aula, L., Dhillon, J. S., Omara, P., Wehmeyer, G. B., Freeman, K. W. & Raun, W. R. (2019). World sulfur use efficiency for cereal crops. *Agronomy Journal*, 111(5), 2485–2492.
- Badawy, S. A., Zayed, B. A., Bassiouni, S. M. A., Mahdi, A. H. A., Majrashi, A., Ali, E. F. & Seleiman, M. F. (2021). Influence of Nano Silicon and Nano Selenium on Root Characters, Growth, Ion Selectivity, Yield, and Yield Components of Rice (*Oryza sativa* L.) under Salinity Conditions. *Plants*, 10: 1657. <https://doi.org/10.3390/plants10081657>
- Brodowska, M. S., Filipek, T. & Kurzyrna-Szklarek, M. (2017). Content of magnesium and calcium in cultivated plants depending on various soil supply with nitrogen, potassium, magnesium and sulfur. *Journal of Elementology*, 22(4), 1167–1177.
- Bytyqi, B., Forgács F., Melash, A. A., Virág I., Csajbók J., Appiah, E. A. & Kutasy, E. (2026). Foliar application of silicon and sulfur modifies grain mineral composition of spring oats (*Avena sativa* L.) under contrasting seasonal drought conditions. *Plants*, 15(2), Article 316. <https://doi.org/10.3390/plants15020316>
- Bytyqi, B. & Kutasy E. (2022). Physiomorphology responses of spring oat varieties in Silicon and Sulphur application to alleviate drought stress. [In: Kajos et al. (szerk.) XI Interdiszciplinális Doktorandusz Konferencia 2022 Tanulmánykötet.] Pécsi Tudományegyetem Doktorandusz Önkormányzat, Pécs, 80–87.
- Chawade, A., Lindén, P., Bräutigam, M., Jonsson, R., Jonsson, A., Moritz, T. & Olsson, O. (2012). Development of a model system to identify differences in spring and winter oat. *PLoS one*, 7(1), e29792. DOI: 10.1371/journal.pone.0029792.
- Csajbók, J., Buday-Bódi, E., Nagy, A., Fehér, Z. Z., Tamás, A., Virág, I. Cs., Bojtor, Cs., Forgács, F., Vad, A. M. & Kutasy, E. (2022). Multispectral analysis of small plots based on field and remote sensing surveys – a comparative evaluation. *Sustainability*, 14(6), 3339.
- Debona, D., Rodrigues, F. A. & Datnoff, L. E. (2017). Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. *Annual Review of Phytopathology*, 55. 85-107. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035312>.
- Forgács, F., Kutasy, E. & Virág, I. (2024). Study of the effects of silicon and sulphur foliar fertilization on yield components and yield in different winter oat cultivars. *Acta Agraria Debreceniensis*, 2024(1), 43–49. <https://doi.org/10.34101/actaagrar/1/14300>
- Hattori, T., Ishii, K., An, P. & Inanaga, S. (2009). Growth Enhancement of Rye by Silicon Application Under Two Different Soil Water Regimes. *Journal of Plant Nutrition*, 32. 187–196. <https://doi.org/10.1080/01904160802590577>

- Kutasy, E., Buday-Bódi, E., Virág, I., Forgács, F., Melash, A. A., Zsombik, L., Nagy, A. & Csajbók, J. (2021). Mitigating the negative effect of drought stress in oat (*Avena sativa* L.) with silicon and sulphur foliar fertilization. *Plants*, 11(1), Article 30. <https://doi.org/10.3390/plants11010030>
- Kutasy, E., Diósi, G., Buday-Bódi, E., Nagy, P., Melash, A. A., Forgács, F., Virág, I., Vad, A., Bytyqi, B., Buday, T. & Csajbók, J. (2023). Changes in plant and grain quality of winter oat (*Avena sativa* L.) varieties in response to silicon and sulphur foliar fertilisation under abiotic stress conditions. *Plants*, 12(4), Article 969. <https://doi.org/10.3390/plants12040969>
- Lima, M. de L., Flores, R. A., Xavier, M. F. N., Sousa, R. G. de, Casaroli, D., Dapper, F. P., Capuchinho, F. F., Santos, G. G., Abdala, K. de O. & Momesso, L. (2025). Silicon as a Strategy to Mitigate Abiotic Stresses and Improve Physiological Performance and Grain Yield of Maize Grown Under Tropical Climate Conditions. *Plants*, 14(17), 2755. <https://doi.org/10.3390/plants14172755>
- Malhotra, C. & Kapoor, R. T. (2019). Silicon: A Sustainable Tool in Abiotic Stress Tolerance in Plants. [In: Hasanuzzaman et al. (eds.) Plant Abiotic Stress Tolerance.] Springer, Cham. 333–356. DOI: 10.1007/978-3-030-06118-0_14.
- Pais, I.: 1980. A mikrotápanyagok szerepe a mezőgazdaságban. Mezőgazdasági Kiadó, Budapest. 138.
- Poudel, K., Ghimire, A., Kwon, M., wa Mbembo, M. B. & Kim, Y. (2026). Effect of Silicon on Early Root and Shoot Phenotypes of Rice in Hydroponic and Soil Systems. *Plants*, 15(2), 176. <https://doi.org/10.3390/plants15020176>
- Qian, C., Geng, F., Wang, Z., Lu, H., Zhao, X. & Li, X. (2022). Responses of hydraulic-related leaf and root eco-physiological traits to silicon application on the salinity stress of oat seedlings. *Silicon*. 14. 12303–12313. <https://doi.org/10.1007/s12633-022-01928-9>
- Sárvári, M. (2019). Tápanyag-gazdálkodás. [In: Pepó P. (szerk.) Általános növénytermesztési ismeretek.] Mezőgazda Lap- és Könyvkiadó, Budapest.
- Shoja, T., Majidian, M. & Rabiee, M. (2018). Effects of zinc, boron and sulfur on grain yield, activity of some antioxidant enzymes and fatty acid composition of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Acta Agriculturae Slovenica*. 111. 1: 73–84.
- Sorrells, M. E. & Simmons, S. R. (1992). Influence of environment on the development and adaptation of oat. *Oat Science and Technology*. 33. 115–163. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr33.c5>
- Stadnik, B. & Tobiasz-Salach, R. (2022). Physiological response of oat (*Avena sativa* L.) to the foliar application of silicon in conditions of increased soil salinity. *IOAG 2022*. <https://doi.org/10.3390/iocag2022-12332>
- Toledo, M. Z., Castro, G. S. A., Crusciol, C. A. C., Soratto, R. P., Cavariani, C., Ishizuka, M. S. & Picoli, L. B. (2012). Silicon leaf application and physiological quality of white oat and wheat seeds. *Semina: Ciências Agrárias*, 33(5), 1693–1701. DOI: 10.5433/1679-0359.2012v33n5p1693.

Tripathi, P., Subedi, S., Khan, A. L., Chung, Y. S. & Kim, Y: 2021. Silicon effects on the root system of diverse crop species using root phenotyping technology. *Plants*, 10(5), Article 885. <https://doi.org/10.3390/plants10050885>

A szerzők levelezési címe – Address of the authors:

*Forgács Fanni Zsuzsa – Dr. Virág István Csaba – Dr. Kutasy Erika Tünde
Debreceni Egyetem MÉK
Növénytermesztési, Nemesítési és Növénytechnológiai Intézet
Debrecen
Böszörményi út 138.
H-4032
*forfazsu@agr.unideb.hu