PROGRESS IN PLANT PROTECTION
61 (3): 207-213, 2021
eISSN 2084-4883

DOI: 10.14199/ppp-2021-023
Published online: 20.08.2021

Received: 18.06.2021 / Accepted: 12.08.2021

ARTYKUŁ ORYGINALNY

Reakcja pszenicy jarej rosnącej w stresie suszy na dolistne i doglebowe stosowanie krzemu

Response of spring wheat grown in drought stress to foliar and soil silicon application

Urszula Sienkiewicz-Cholewa*

Streszczenie

Celem badań była ocena działania dolistnej i doglebowej aplikacji krzemu (Si) na złagodzenie stresu suszy w pszenicy jarej. Dwuletnie badania przeprowadzono w hali wegetacyjnej w wazonach o pojemności 10 kg gleby. Krzem był aplikowany dolistnie w stężeniu 6 mM Si/l oraz doglebowo przed siewem roślin w dawkach 200 i 400 mg Si/kg, w postaci Na_2SiO_3. W fazie krzewienia wprowadzono stres suszy i utrzymywano wilgotność gleby na poziomie 30% PPW. Zastosowanie krzemu wpłynęło pozytywnie na plony i parametry biochemiczne roślin rosnących w stresie wodnym. Doglebowa suplementacja krzemem skuteczniej od dolistnej ograniczyła redukcję plonów i negatywny wpływ deficytu wody na rośliny. Pobranie krzemu przez pszenicę było większe z gleby niż z dolistnej aplikacji.

Słowa kluczowe: stres suszy, krzem, Si, aplikacja dolistna i doglebowa, pszenica jara

Abstract

The aim of study was the evaluation of silicon (Si) foliar and soil application effect on mitigation of drought stress in spring wheat. Two-years study was performed in greenhouse with the use of vases with a capacity of 10 kg of soil. Silicon was used as a foliar application at the concentration of 6 mM Si/l and as soil application before plant sowing at doses 200 and 400 mg Si/kg, in the form of Na_2SiO_3. At the growth stage of tillering, drought stress was introduced and soil moisture was kept at 30% PPW. Silicon application positively affected yield and biochemical parameters of plants growing under water stress. Soil application was more efficient than foliar one in reducing of yield decrease and negative impact of water deficit on plants. Silicon uptake from soil by wheat was greater than from foliar application.

Key words: drought stress, silicon, Si, foliar and soil application, spring wheat

Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Herbologii i Technik Uprawy Roli
Orzechowa 61, 50-540 Wrocław
*corresponding author: u.sienkiewicz@iung.wroclaw.pl
ORCID: 0000-0003-3788-9440

Wstęp / Introduction

Susza glebowa, czyli silny niedobór wody dostępnej dla roślin występuje przy braku opadów atmosferycznych i wywołuje u roślin stres, czyli reakcję na niesprzyjające warunki wzrostu. Szacuje się, że stres suszy wpływa na obniżenie 75% światowych zbiorów podstawowych roślin uprawnych, redukcji ulega około 20% plonów pszenicy (Daryanto i wsp. 2016; Kim i wsp. 2019). Od wielu dekad obserwuje się pogorszenie bilansu wodnego w rolnictwie wielu krajów europejskich. Okresowe susze występujące z coraz większym nasileniem i częstotliwością ograniczają plonowanie zbóż jarych, dla których zimowe zapasy wody na glebach lekkich są zazwyczaj niewystarczające i ograniczają wschody i rozwój roślin.

W warunkach deficytu wody zostaje zaburzona gospodarka wodna w roślinach. W przypadku silnego stresu suszy wysokie ciśnienie osmotyczne w glebie może prowadzić do odwodnienia roślin. Głównym receptorem sygnału niedoboru wody jest błona komórkowa, a jej stabilność jest szeroko stosowanym kryterium oceny tolerancji roślin na stres wodny (Sacała 2007). W reakcji na stres rośliny wytwarzają nadmierną ilość reaktywnych form tlenu (RFT), które powodują stres oksydacyjny i uszkadzają chloroplasty. W komórkach roślin dochodzi do lawinowego utleniania błon plazmatycznych komórek (peroksydacja lipidów) i zwiększenia ich przepuszczalności. Jednym z produktów degradacji błon lipidowych jest aldehyd malonowy (MDA) uważany za marker stopnia ich rozpadu (Hasegawa i wsp. 2000; Zhu 2001). Sposobem obrony roślin przed niekorzystnym wpływem warunków stresowych jest regulacja osmotyczna poprzez akumulację w komórkach ochronnych, kompatybilnych związków organicznych m.in. aminokwasów i cukrów prostych, zwanych osmolitami. Ich rolą jest utrzymanie turgoru, stabilizacja białek i struktur komórkowych, a także usuwanie reaktywnych form tlenu (Shen i wsp. 1997; Atkinson i Urwin 2012).

Obecnie na całym świecie prowadzone są badania nad rolą krzemu (Si) w łagodzeniu skutków deficytu wody w roślinach. Krzem mimo wysokiej zawartości w roślinach (0,1–10%) nie jest uznawany za składnik niezbędny dla roślin, ale zaliczany jest do pierwiastków korzystnych tzw. beneficial element. Krzem odgrywa ważną rolę w mineralnym odżywianiu roślin, zwłaszcza gatunków o dużej akumulacji tego pierwiastka.

W krajach klimatu tropikalnego i subtropikalnego od wielu lat, z dobrym skutkiem, stosuje się doglebowe i dolistne nawożenie krzemem ryżu, trzciny cukrowej, kukurydzy, pszenicy, buraka cukrowego i innych roślin (Tubana i wsp. 2016). Suche i przepuszczalne gleby tych regionów wykazują zwykle niski i bardzo niski poziom Si dostępnego dla roślin (Sienkiewicz-Cholewa i Zajączkowska 2020). Efektywność plonotwórcza i biochemiczna rola Si w łagodzeniu skutków stresu suszy u roślin w warunkach glebowo-klimatycznych Europy nie została dotychczas dobrze rozpoznana. Wyniki badań dowodzą, że krzem w warunkach stresu suszy może zapobiegać degradacji struktury i funkcji błon komórkowych, a także działa jako regulator osmolitów (Sacała 2009). Doświadczenia polowe przeprowadzone w warunkach gleb naszego kraju wskazują na korzystny wpływ dolistnej i doglebowej aplikacji krzemu na plonowanie pszenicy jarej w warunkach umiarkowanej wilgotności gleby, jak i w stresie wodnym (Kowalska i wsp. 2020a, 2020b).

Celem podjętych badań była ocena wpływu krzemu stosowanego dolistnie i doglebowo na plonowanie i parametry biochemiczne wybranej odmiany pszenicy jarej rosnącej w warunkach stresu suszy.

Materiały i metody / Materials and methods

W latach 2018–2019 w hali wegetacyjnej Stacji Doświadczalnej Instytutu Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Jelczu-Laskowicach przeprowadzono dwa doświadczenia wazonowe z pszenicą jarą odmiany Harenda wrażliwą na suszę. Pszenicę wysiano w wazonach typu Mitcherlicha wypełnionych 10 kg gleby, pozostawiając do zbioru 17 roślin w wazonie. Krzem w postaci krzemianu sodu $Na_2SiO_3 \times 5H_2O$ aplikowano doglebowo przed siewem pszenicy oraz dolistnie na początku fazy krzewienia, stosując 2 lub 3 opryski w odstępach 7-dniowych.

W wazonach utrzymywano wilgotność gleby na poziomie 60% PPW (polowej pojemności wodnej), która w naszych glebach uznawana jest za optymalną dla wzrostu i plonowania roślin. W fazie strzelania w źdźbło wprowadzono stres suszy ograniczając podlewanie roślin do wilgotności 30% PPW. Stan suszy utrzymywano w glebie przez okres 21 dni począwszy od fazy strzelania w źdźbło (BBCH 30). Polową pojemność wodną gleby (100% PPW) określono na podstawie maksymalnej nasiąkliwości wodnej s.m. gleby oznaczonej metodą wagową w cylindrach Kopecky'ego, po odpłynięciu wody grawitacyjnej. Masę wody w wazonach odpowiadającą 60 i 30% PPW obliczono na podstawie oznaczonej aktualnej wilgotności gleby.

Glebą doświadczalną był piasek gliniasty (pg) o pH 5,6 i niskiej, deficytowej zawartości Si – 30,12 mg/kg (ekstrakcja w 0,5 M octanie amonu; wycena Matichenkov 2008).

W obu doświadczeniach przetestowano 6 obiektów doświadczalnych, każdy w 4 powtórzeniach.

Krzem dolistnie i doglebowo aplikowano w 2 dawkach: S1 – dawka niższa, S2 – dawka wyższa.

<u>Doświadczenie I – dolistna aplikacja krzemu:</u>

(1) 60% PPW, 0 – bez Si,
(2) 60% PPW, Si1 – dwukrotny oprysk 6 mM Si/l,
(3) 60% PPW, Si2 – trzykrotny oprysk 6 mM Si/l,
(4) 30% PPW, 0 – bez Si,
(5) 30% PPW, Si1 – dwukrotny oprysk 6 mM Si/l,
(6) 30% PPW, Si2 – trzykrotny oprysk 6 mM Si/l.

Doświadczenie II – doglebowa aplikacja krzemu:

(1) 60% PPW, 0 – bez Si,
(2) 60% PPW, Si1 – 200 mg Si/kg,
(3) 60% PPW, Si2 – 400 mg Si/kg,
(4) 30% PPW, 0 – bez Si,
(5) 30% PPW, Si1 – 200 mg Si/kg,
(6) 30% PPW, Si2 – 400 mg Si/kg.

Po zbiorze roślin z wazonów oddzielono i wymłócono ziarno z kłosów, oddzielono plewy i zważono plon ziarna i słomy. Po 7 dniach od ostatniego oprysku krzemianem sodu pobrano liście flagowe pszenicy i oznaczono w nich zawartość chlorofilu (Chl a + b), aldehydu malonowego (MDA) i cukrów rozpuszczalnych. Do oznaczenia krzemu, liście pszenicy z obiektów z dolistną aplikacją Si przed suszeniem przemywano wodą destylowaną.

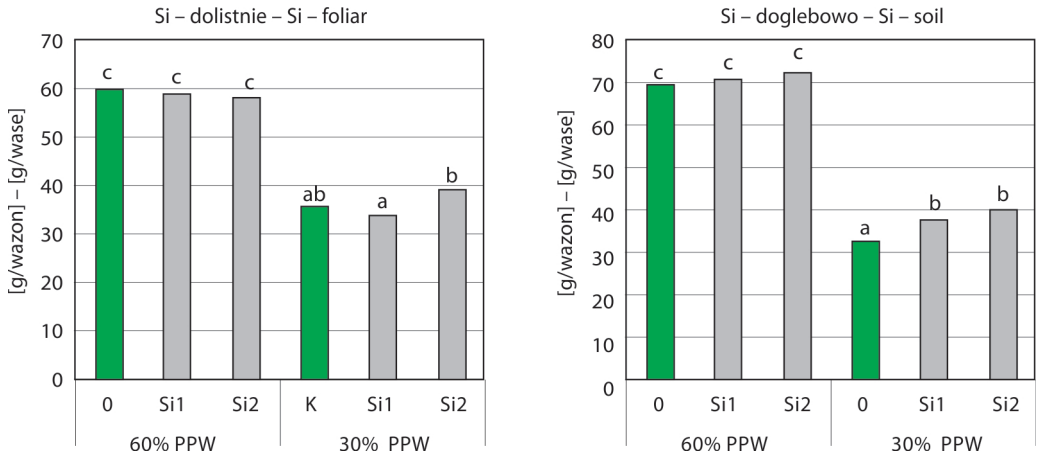
Uzyskane wyniki badań poddano analizie wariancji dla bloków kompletnie zrandomizowanych, wykorzystując program AWAR opracowany w Instytucie Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa (Filipiak i Wilkos 1995). Różnice pomiędzy średnimi oceniano na podstawie testu Tukeya ($p < 0,05$).

Wyniki i dyskusja / Results and discussion

Plony pszenicy / Yield of wheat

Zastosowana w doświadczeniach dolistna, jak i doglebowa suplementacja krzemianem sodu w warunkach optymalnej wilgotności dla roślin nie różnicowała istotnie wielkości plonów ziarna pszenicy (rys. 1). Wprowadzony okresowo deficyt wody na poziomie 30% PPW gleby spowodował drastyczny spadek plonów ziarna i słomy pszenicy zarówno na obiektach bez Si, jak i zasilonych krzemem. Wyższa dawka krzemu Si2 podana dolistnie (trzykrotny oprysk 6 mM Si/l) skutecznie złagodziła negatywny wpływ deficytu wody na pszenicę powodując zwyżkę plonu ziarna o 11%, w porównaniu do obiektu bez Si. Trzykrotny oprysk 6 mM Si/l okazał się niewystarczający i nie wpłynął korzystnie na wielkość plonów. Doglebowa aplikacja krzemu skuteczniej od dolistnej ograniczała spadek plonu ziarna wywołany stresem suszy. Plon ziarna uzyskany po dodaniu do gleby niższej dawki krzemu Si1 (200 mg Si/kg) wzrósł o 16%, a pod wpływem podwójnej dawki Si2 o 22%, w porównaniu do plonu z obiektu bez Si. Na wykresach przedstawiono średnie wartości z 2 lat.

Podobny efekt plonotwórczy po dolistnej aplikacji krzemu, w warunkach ograniczonej do 40% PPW wilgotności gleby uzyskali Maghsoudi i wsp. (2019) w pszenicy jarej oraz El-Mageed i wsp. (2020) w kukurydzy. Źródłem przyswajalnego krzemu dla roślin był również krzemian sodu zaaplikowany dwukrotnie w stężeniu 6 mM Si/l. Odmiana pszenicy wrażliwa na suszę zareagowała na zabiegi zwyżką plonu o 18%, a odporna o 11%. Zasilenie kukurydzy krzemem 2 i 4 mM Si/l w warunkach 20% PPW również skutecznie zwiększyło odporność roślin na stres i ograniczyło redukcję plonu ziarna kolejno o 15 i 30%, w stosunku do plonu z obiektu bez Si. Podobny efekt w doświadczeniu z kukurydzą uzyskali Gomaa i wsp. (2021). Po dwukrotnej aplikacji Si w formie krzemianu potasu (4,4 mM Si/l) plon ziarna zwiększył się o 16%, a po trzykrotnej o 25%. Pojedynczy zabieg był natomiast nieskuteczny. W badaniach Kowalskiej i wsp. (2020a) trzykrotny oprysk pszenicy odmiany Harenda płynnym kwasem krzemowym w warunkach suszy spowodował zwiększenie plonu ziarna o 23%. Na dolistne zasilanie krzemem reagują również pozbawione dostępu do wody roślinny dwuliścienne. Krzemian potasu zastosowany czterokrotnie w okresie wegetacji buraka cukrowego, ograniczył spadek plonu korzeni



Wartości oznaczone tymi samymi literami wskazują na brak istotnej różnicy według testu Tukeya ($p < 0,05$)
Si1 dolistnie – dwukrotny oprysk, Si1 doglebowo – 200 mg Si/kg; Si2 dolistnie – trzykrotny oprysk, Si2 doglebowo – 400 mg Si/ha
Values marked with the same letters indicate no significant difference according to Tukey's test ($p < 0.05$)
Si1 foliar – application two times repeated, Si1 soil – 200 mg Si/kg; Si2 foliar – application three times repeated, Si2 soil – 400 mg Si/ha

Rys. 1. Plony ziarna pszenicy
Fig. 1. Yields of wheat grain

w silnym i umiarkowanym stresie suszy o 21 i 31% (Ali i wsp. 2019).

Dolistne odżywianie roślin krzemem nie zawsze daje pozytywne efekty. Sattar i wsp. (2019) nie uzyskali istotnego wzrostu masy siewek rosnących w stresie wodnym 40% PPW po oprysku krzemianem sodu o wysokim stężeniu 40 mM Si/l. W innym doświadczeniu z kukurydzą (Freitas i wsp. 2011) krzem wniesiony „na liść" w trzykrotnym zabiegu wzrastającymi dawkami Si spowodował jedynie niewielką zmianę zawartości krzemu w liściach. W żadnym z doświadczeń i w badaniach własnych krzem dostarczony roślinom rosnącym w optymalnej wilgotności nie miał wpływu na wielkość plonu, a rola krzemu ujawniła się w warunkach silnego stresu. Ma i wsp. (2016) oraz Guevel i wsp. (2007) twierdzą, że pierwiastek ten pobierany jest głównie przez korzenie roślin w postaci H_4SiO_4, a jego translokacja z liści do korzeni roślin jest ograniczona. Zdaniem Laane (2018) oraz Othmani i wsp. (2020) opryski dolistne krzemianami sodu i potasu są skuteczniejsze w stresach biotycznych, a wytworzona krzemionkowa warstwa w liściach działa jak mechaniczna bariera zapobiegająca infekcjom grzybowym.

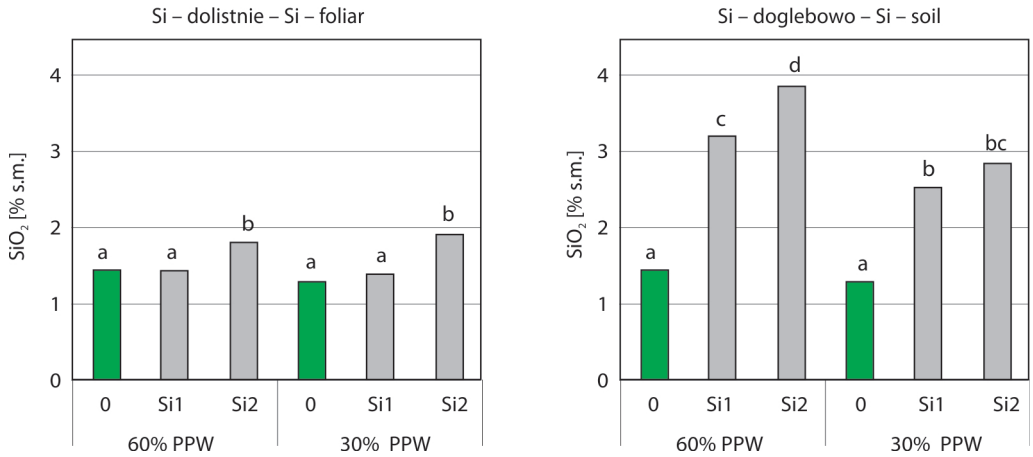
Chen i wsp. (2011) badali wpływ doglebowej suplementacji krzemem w postaci krzemianu potasu w dawce 300 mg Si/kg na plony dwóch odmian ryżu wrażliwych na suszę. Niedobór wody w doniczkach utrzymywano przez okres 15 dni po siewie. Po pobraniu krzemu masa pędów wzrosła blisko 100%, ale tylko w warunkach stresu. W doświadczeniu polowym z ryżem Ullah i wsp. (2018), po dostarczeniu krzemu do gleby w dawkach 0–600 kg Si/ha i ograniczeniu wody dla roślin (50% PPW) uzyskali wzrost plonu ziarna w porównaniu z kontrolą o 34–45%. W podobnym doświadczeniu wazonowym Habibi (2014) z bardzo dobrym skutkiem zastosował doglebowo pod rzepak krzemian sodu w dawce 0,35 g Na_2SiO_3/kg. Gleba o pH 6,8 wykazywała niską zawartość Si przyswajalnego (30 mg/kg). Wilgotność gleby ograniczono na okres 25–40 dni po siewie. W warunkach stresu masa pędów rzepaku była o 75% wyższa na obiekcie zasilonym krzemem, w porównaniu do obiektu bez Si. Przy dobrym nawodnieniu krzem nie różnicował plonów. Na doglebową aplikację wzrastającymi dawkami kwasu krzemowego, postępującym wzrostem plonu zareagował również melon rosnący w umiarkowanym deficycie wodnym (50% PPW) (Alam i wsp. 2020). Skuteczność działania krzemu w aplikacji doglebowej może być wysoka, szczególnie przy niskiej zawartości Si przyswajalnego.

Z badań wynika, że potencjał plonotwórczy krzemu zależy od formy i metody jego stosowania, od gatunku i odmiany rośliny, dawki i dostępności krzemu z zastosowanego nawozu (ziemia okrzemkowa, krzemian wapnia, sodu, potasu i inne), stężenia krzemu w roztworze do dolistnej aplikacji, ilości i terminów zabiegów, rodzaju gleby i pH oraz stopnia występującego stresu.

Zawartość krzemu w liściach pszenicy / Silicon content in wheat leaves

W doświadczeniu po dwukrotnej aplikacji krzemu (Si1) analiza nie wykazała wzrostu zawartości krzemionki w liściach pszenicy (średnia z 2 lat), w porównaniu do stężenia występującego w roślinach kontrolnych. Po trzykrotnym zabiegu zawartość tego składnika wzrosła o 19% w warunkach optymalnych i o 50% przy deficycie wody. Doglebowe zastosowanie krzemu w obu dawkach spowodowało ponad 2-krotne zwiększenie koncentracji SiO_2 w roślinach, co świadczy o większej skuteczności pobierania krzemu przez korzenie. Przy optymalnej wilgotności krzem pobrany został przez rośliny w większej ilości niż w warunkach deficytu wody (rys. 2).

Podobne różnice w stężeniu krzemionki w pędach pszenicy po zastosowaniu krzemianu sodu w obu formach, na



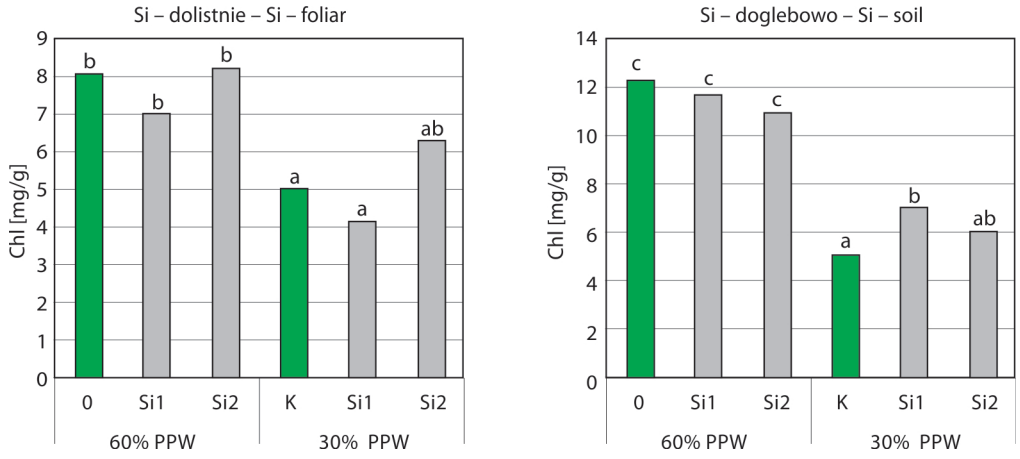
Wartości oznaczone tymi samymi literami wskazują na brak istotnej różnicy według testu Tukeya ($p < 0,05$)
Values marked with the same letters indicate no significant difference according to Tukey's test ($p < 0.05$)

Rys. 2. Koncentracja SiO_2 w liściach
Fig. 2. SiO_2 concentration in leaves

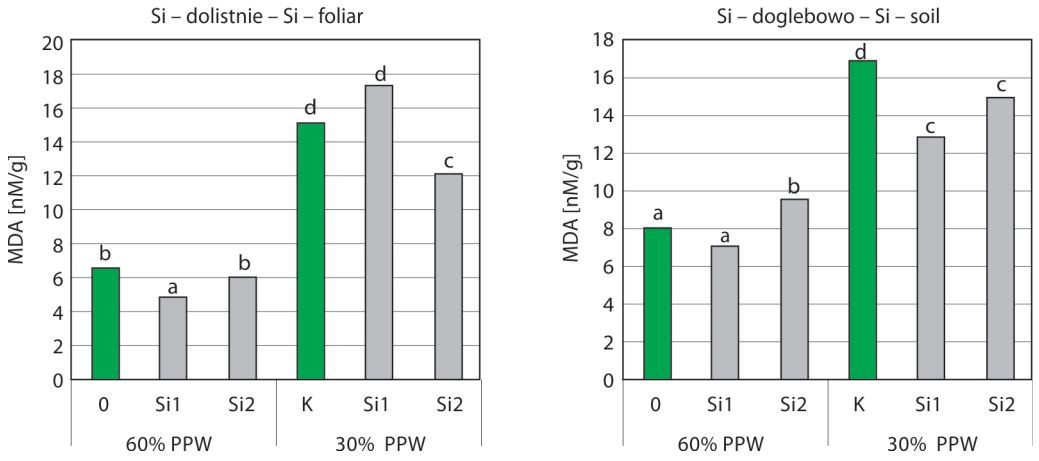
korzyść doglebowej stwierdzili Zajączkowska i wsp. (2020). W badaniach Ma i wsp. (2016) po aplikacji do gleby 200 g Si/kg (dawka równoważna Si1) uzyskali w liściu flagowym pszenicy rosnącej w warunkach suszy (35% PPW) większą o 34% koncentrację SiO_2. W pędach ryżu zasilonego krzemianem potasu w dawce 300 g Si/kg zawartość SiO_2 (Chen i wsp. 2011) wzrosła w warunkach optymalnej wilgotności o 18%, a w stresie suszy o 20% w stosunku do obiektów kontrolnych. Suplementacja dolistna krzemem w doświadczeniu Freitasa i wsp. (2011) nie wpłynęła na zróżnicowanie stężenia krzemionki w liściach pszenicy.

Analiza biochemiczna roślin / Plant biochemical analysis

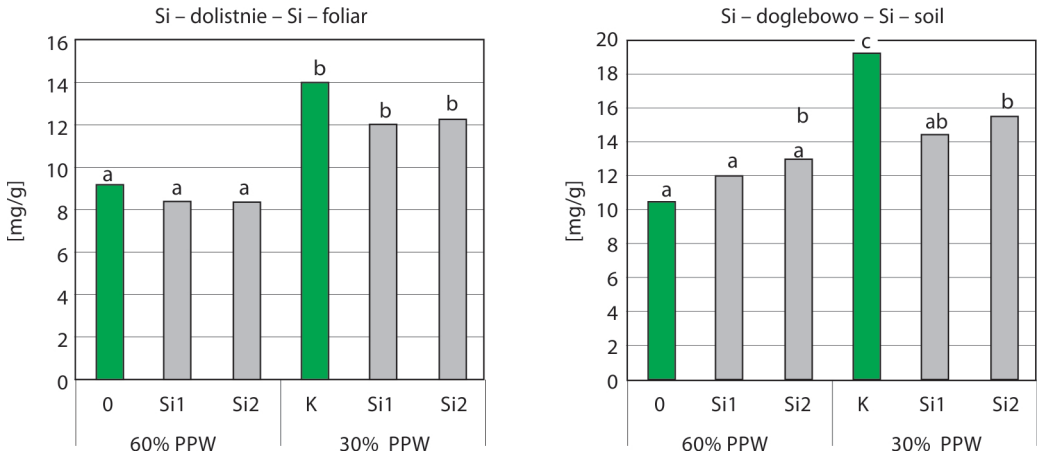
Krzem zastosowany w warunkach optymalnych nie spowodował znaczących zmian w koncentracji badanych wskaźników biochemicznych w roślinach. Pod wpływem stresu suszy (stres – Si) w liściach nastąpił znaczny spadek zawartości chlorofilu w wyniku utleniania i rozpadu chloroplastów (rys. 3). W komórkach roślin wzrosło ponad dwukrotnie stężenie aldehydu malonowego będącego produktem degradacji błon lipidowych (rys. 4) oraz cukrów rozpuszczalnych pełniących rolę osmoregulacyjną (rys. 5). W tkankach liści po aplikacji dolistnej krzemu stwierdzono wyższą zawartość chlorofilu oraz niższe o 20% stężenie MDA w porównaniu do obiektów bez Si (stres – Si). Dodatek krzemu do gleby już w niższej dawce (stres + Si1) skutecznie łagodził skutki deficytu wody u roślin. W tkankach wzrosło stężenie chlorofilu o 39% i została zredukowana o 24% ilość MDA. Korzystny wpływ krzemu na rośliny rosnące w stresie suszy potwierdzają wyniki badań Maghsoudi i wsp. (2019) oraz Bukhari i wsp. (2020). Po dolistnym zastosowaniu krzemu na pszenicę wrażliwą na suszę, wraz ze zwiększeniem plonu udowodnili wzrost stężenia chlorofilu w liściach o 15–17% i znaczne obniżenie poziomu MDA, w stosunku do obiektu bez Si. Egzogenny krzem złagodził wywołany deficytem wody stres oksydacyjny. W doświadczeniu Ma i wsp.



Rys. 3. Zawartość chlorofilu w liściach
Fig. 3. Chlorophyll content in leaves



Rys. 4. Zawartość aldehydu malonowego w liściach
Fig. 4. Malondialdehyde content in leaves



Rys. 5. Zawartość cukrów rozpuszczalnych w liściach
Fig. 5. Soluble sugars content in leaves

(2016) aplikacja doglebowa przyswajalnego krzemu mimo silnego stresu wodnego (35% PPW) nie wpłynęła na stężenie chlorofilu, ani na redukcję poziomu zawartości MDA w liściach pszenicy. Zawartość cukrów rozpuszczalnych w liściu flagowym pszenicy w warunkach niedoboru wody w glebie oznaczali tylko Bukhari i wsp. (2020). Pod wpływem dwóch aplikacji dolistnych o stężeniu 4 mM Si/l nagromadzenie cukrów było istotnie wyższe w roślinach pszenicy zaopatrzonej w krzem. Wpływ krzemu na zmiany wskaźników biochemicznych w roślinach nie są jednoznaczne i wymagają dalszych analiz.

Przeprowadzone badania dowodzą, że korzystny wpływ krzemu na wzrost i plonowanie roślin ujawnia się w warunkach stresowych, a zastosowanie krzemu dolistnie i doglebowo może skutecznie ograniczyć negatywny wpływ deficytu wody na rośliny.

Wnioski / Conclusions

1. Okresowy deficyt wody w glebie (30% PPW) spowodował silny spadek plonu ziarna i słomy pszenicy.
2. Zastosowana w doświadczeniach suplementacja krzemem w warunkach optymalnej wilgotności gleby (60% PPW) nie różnicowała istotnie wielkości plonów.
3. W warunkach suszy glebowej krzem zastosowany dolistnie w formie trzykrotnego oprysku 6 mM Si/l ograniczył redukcję plonu o 15% w stosunku do obiektu bez Si.
4. Doglebowa aplikacja krzemu skuteczniej łagodziła negatywny wpływ stresu wodnego na pszenicę. Plon ziarna uzyskany po dodaniu do gleby niższej dawki krzemu wzrósł o 16%, a pod wpływem wyższej o 22%, w porównaniu do plonu z obiektu bez Si.
5. Analiza zawartości chlorofilu, aldehydu malonowego i cukrów rozpuszczalnych w roślinach wskazuje na udział krzemu w mechanizmach antyoksydacyjnych i zwiększeniu odporności roślin na stres suszy.
6. W tkankach liści pszenicy stwierdzono wyższy poziom chlorofilu i cukrów rozpuszczalnych oraz zredukowaną zawartość MDA w wyniku doglebowej aplikacji krzemu w warunków niedoboru wody.

Literatura / References

Alam A., Hariyanto B., Ullah H., Salin K.R., Datta A. 2020. Effects of silicon on growth, yield and fruit quality of cantaloupe under drought stress. Silicon. DOI: 10.1007/s12633-020-00673-1

Ali A.M., Ibrahim S.M., Abou-Amer I. 2019. Water deficit stress mitigation by foliar application of potassium silicate for sugar beet grown in a saline calcareous soil. Egyptian Journal of Soil Science 59 (1): 15–23. DOI: 10.21608/ejss.2019.7086.1236

Atkinson N.J., Urwin P.E. 2012. The interaction of plant biotic and abiotic stresses: from genes to the field. Journal of Experimental Botany 63 (10): 3523–3543. DOI: 10.1093/jxb/ers100

Bukhari M.A., Ahmad Z.M., Ashraf M.Y., Afzal M., Nawaz F., Nafees M., Jatoi W.N., Malghani N.A., Shah A.N., Manan A. 2020. Silicon mitigates drought stress in wheat (*Triticum aestivum* L.) through improving photosynthetic pigments, biochemical and yield characters. Silicon. DOI: 10.1007/s12633-020-00797-4

Chen W., Yao X., Cai K., Chen J. 2011. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption. Biological Trace Element Research 142 (1): 67–76. DOI: 10.1007/s12011-010-8742-x

Daryanto S., Wang L., Jacinthe P.-A. 2016. Global synthesis of drought effects on maize and wheat production. Plos One 11: 1–15. DOI: 10.1371/journal.pone.0156362

El-Mageed T.A.A., Shaaban A., El-Mageed S.A.A., Semida W.M., Rady M.O.A. 2020. Silicon defensive role in maize (*Zea mays* L.) against drought stress and metals-contaminated irrigation water. Silicon 13: 2165–2176. DOI: 10.1007/s12633-020-00690-0

Filipiak K., Wilkos S. 1995. Statistical calculations. Description of system AWAR. Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa, Puławy, R324, 52 ss.

Freitas L.B., Coelho E.M., Maia S.C.M., Silva T.R.B. 2011. Foliar fertilization with silicon in maize. Revista Ceres 58 (2): 262–267. DOI: 10.1590/S0034-737X2011000200020

Gomaa M.A., Kandil E.E., El-Dein A.A.M.Z., Abou-Donia M.E.M., Ali H.M., Abdelsalam N.R. 2021. Increase maize productivity and water use efficiency through application of potassium silicate under water stress. Scientific Reports 11: 224. DOI: 10.1038/s41598-020-80656-9

Guével M.-H., Menzies J.G., Bélanger R.R. 2007. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. European Journal of Plant Pathology 119 (4): 429–436. DOI: 10.1007/s10658-007-9181-1

Habibi G. 2014. Silicon supplementation improves drought tolerance in canola plants. Russian Journal of Plant Physiology 61: 784–791. DOI: 10.1134/S1021443714060077

Hasegawa P.M., Bressan R.A., Zhu J.-K., Bohnert H.J. 2000. Plant cellular and molecular responses to high salinity. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 51: 463–499. DOI: 10.1146/annurev.arplant.51.1.463

Kim W., Iizumi T., Nishimori M. 2019. Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009. Journal of Applied Meteorology and Climatology 58 (6): 1233–1244. DOI: 10.1175/JAMC-D-18-0174.1

Kowalska J., Tyburski J., Bocianowski J., Krzymińska J., Matysiak K. 2020a. Methods of silicon application on organic spring wheat (*Triticum aestivum* L. spp. *vulgare*) cultivars grown across two contrasting precipitation years. Agronomy 10 (11): 1655. DOI: 10.3390/agronomy10111655

Kowalska J., Tyburski J., Jakubowska M., Krzymińska J. 2020b. Effect of different forms of silicon on growth of spring wheat cultivated in organic farming system. Silicon 13: 211–217. DOI: 10.1007/s12633-020-00414-4

Laane H.-M. 2018. The effects of foliar sprays with different silicon compounds. Plants 7 (2): 45. DOI: 10.3390/plants7020045

Ma D., Sun D., Wang C., Qin H., Ding H., Li Y., Guo T. 2016. Silicon application alleviates drought stress in wheat through transcriptional regulation of multiple antioxidant defense pathways. Journal of Plant Growth Regulation 35 (1): 1–10. DOI: 10.1007/s00344-015-9500-2

Maghsoudi K., Emam Y., Ashraf M., Arvin M.J. 2019. Alleviation of field water stress in wheat cultivars by using silicon and salicylic acid applied separately or in combination. Crop & Pasture Science 70 (1): 36–43. DOI: 10.1071/CP18213

Matichenkov V.V. 2008. Silicon deficiency and functionality in soils, crops and food. s. 207–213. W: Proceedings of II International Conference on Soil and Compost Eco-Biology, November 26–29, 2008, Puerto de la Cruz, Tenerife.

Othmani A., Ayed S., Bezzin O., Farooq M., Ayed-Slama O., Slim-Amara H., Younes M.B. 2020. Effect of silicon supply methods on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) response to drought stress. Silicon. DOI: 10.1007/s12633-020-00639-3

Sacała E. 2009. Role of silicon in plant resistance to water stress. [Rola krzemu w odporności roślin na stres wodny]. Journal of Elementology 14 (3): 619–630.

Sattar A., Cheema M.A., Sher A., Ijaz M., Ul-Allah S., Nawaz A., Abbas T., Ali Q. 2019. Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit. Acta Physiologiae Plantarum 41 (8): 146. DOI: 10.1007/s11738-019-2938-2

Shen B., Jensen R.G., Bohnert H.J. 1997. Increased resistance to oxidative stress in transgenic plants by targeting mannitol biosynthesis to chloroplasts. Plant Physiology 113 (4): 1177–1183. DOI: 10.1104/pp.113.4.1177

Sienkiewicz-Cholewa U., Zajączkowska A. 2020. Rola i plonotwórcze efekty stosowania krzemu na przykładzie światowych badań. [The role and yield-forming effect of silicon application based on the example of global research]. Progress in Plant Protection 60 (4): 313–319. DOI: 10.14199/ppp-2020-034

Tubana B.S., Babu T., Datnoff L.E. 2016. A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. Soil Science 181 (9/10): 393–411. DOI: 10.1097/SS.0000000000000179

Ullah H., Luc P.D., Gautam A., Datta A. 2018. Growth, yield and silicon uptake of rice (*Oryza sativa*) as influenced by dose and timing of silicon application under water-deficit stress. Archives of Agronomy and Soil Science 64 (3): 318–330. DOI: 10.1080/03650340.2017.1350782

Zajączkowska A., Korzeniowska J., Sienkiewicz-Cholewa U. 2020. Effect of soil and foliar silicon application on the reduction of zinc toxicity in wheat. Agriculture 10 (11): 522. DOI: 10.3390/agriculture10110522

Zhu J.-K. 2001. Plant salt tolerance. Trends in Plant Science 6 (2): 66–71. DOI: 10.1016/S1360-1385(00)01838-0