



Zachodniopomorski
Uniwersytet Technologiczny
w Szczecinie



Wydział
Kształtowania
Środowiska i Rolnictwa

Piotr Ptak

dyscyplina: Rolnictwo i Ogrodnictwo

Reakcja fizjologiczna pomidora zwyczajnego (*Lycopersicon esculentum* Mill.) na podwyższone stężenie soli w warunkach zróżnicowanego żywienia krzemem i selenem

The physiological response of the tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.) to increased salt concentration under conditions of diversified silicon and selenium nutrition

rozprawa doktorska

zrealizowana pod kierunkiem:

dr hab. inż. Małgorzaty Mikiciuk, prof. ZUT

Katedra Bioinżynierii

Szczecin, 2024

Dziękuję pani dr hab. inż. Małgorzacie Mikiciuk,
prof. ZUT, za trud, cierpliwość i wiarę, dzięki
którym realizacja tej pracy była możliwa

Abstract

Elevated salt concentrations in the environment are one of the main causes of soil degradation and a significant stress factor that limits plant growth and yield, among other things, by affecting their physiological and biochemical processes. One of the main challenges in plant production today is to counteract abiotic stresses or mitigate their effects. The aim of the conducted research was to evaluate the influence of selenium and silicon on the physiological, biochemical, and biometric characteristics of the common tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) variety Roquetero F1, grown under conditions of elevated NaCl concentration in hydroponics.

Two independent, two-factor hydroponic experiments were conducted in a completely randomized design, with five replications, under controlled conditions in the growth chambers of the Department of Bioengineering, Faculty of Environmental Management and Agriculture, West Pomeranian University of Technology in Szczecin. In both experiments, the first experimental factor was the level of sodium chloride concentration in the nutrient solution (0 - control, 50, 75, and 100 mmol NaCl · dm⁻³), and the second factor was the level of selenium (0 - control, 5.0, 10 μmol Na₂SeO₄ · dm⁻³) or silicon (0 - control, 1.5, 3.0 Na₂SiO₃ · 5H₂O · dm⁻³) concentration in the solution.

It was shown that selenium increased the content of assimilation pigments in tomato leaves, particularly those growing at a concentration of 100 mmol NaCl · dm⁻³. Selenium applied at a dose of 5.0 μmol · dm⁻³ increased the intensity of CO₂ assimilation and transpiration, as well as stomatal conductance for water in plants growing under elevated NaCl concentration. At both applied doses, it also increased the total leaf area and the activity of catalase and peroxidase, as well as the relative water content determined after 14 and 28 days of exposure to the experimental factors. When introduced into the solution at a concentration of 5.0 μmol · dm⁻³, it reduced the proline content in the leaves of these plants. A decrease in electrolyte leakage and sodium content was noted in the leaves of plants growing under the highest NaCl concentration.

Under the highest salinity level used, silicon at a dose of 3.0 mmol · dm⁻³ increased the content of chlorophyll "a" and total chlorophyll, and depending on the measurement time, at a dose of 1.5 or 3.0 mmol · dm⁻³, also increased the intensity of CO₂ assimilation. The supply of silicon to plants growing under elevated NaCl concentration increased the parameters of chlorophyll "a" fluorescence (F_V, F_M, and F_V/F_M) and decreased the F₀ value, as determined in the first three measurement periods. In tomatoes growing under

salt stress, silicon at both applied doses increased the total leaf area and catalase activity and reduced the proline content and electrolyte leakage from tissues (in plants growing under the highest salinity).

The obtained research results concerning selected physiological and biochemical parameters of tomatoes indicate the positive effects of selenium and silicon nutrition in mitigating the effects of salt stress. The usefulness of the studied physiological and biochemical characteristics in describing the state of salt stress in tomatoes was also demonstrated.

Keywords: salt stress, silicon, selenium, physiological characteristics, *Lycopersicon esculentum* Mill.

Streszczenie

Podwyższone stężenie soli w środowisku jest jedną z głównych przyczyn degradacji gleb, a także istotnym czynnikiem stresogennym ograniczającym wzrost i plonowanie roślin, między innymi poprzez oddziaływanie na ich procesy fizjologiczno – biochemiczne. Jednym z głównych wyzwań w produkcji roślinnej jest obecnie przeciwdziałanie stresom abiotycznym lub też łagodzenie ich skutków. Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu selenu oraz krzemu na cechy fizjologiczne, biochemiczne i biometryczne pomidora zwyczajnego (*Lycopersicon esculentum* Mill.) odmiany Roquetero F1, rosnącego w warunkach podwyższonego stężenia NaCl w hydroponikach.

Przeprowadzono dwa niezależne, dwuczynnikowe doświadczenia hydroponiczne, w układzie kompletnej randomizacji, w pięciu powtórzeniach, w kontrolowanych warunkach komór wzrostowych Katedry Bioinżynierii, Wydziału Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. W obydwu eksperymentach pierwszym czynnikiem doświadczalnym był poziom stężenia chlorku sodu w pożywce (0 – kontrola, 50, 75 oraz 100 mmol NaCl · dm⁻³), drugim zaś odpowiednio poziom stężenia soli selenu (0 – kontrola, 5,0; 10 μmol Na₂SeO₄ · dm⁻³) oraz krzemu (0 – kontrola; 1,5; 3,0 Na₂SiO₃ · 5H₂O · dm⁻³).

Wykazano wpływ selenu na zwiększenie zawartości barwników asymilacyjnych w liściach pomidora, w szczególności rosnących w warunkach stężenia 100 mmol NaCl · dm⁻³. Selen zastosowany w dawce 5,0 μmol · dm⁻³ zwiększył intensywność asymilacji CO₂ i transpiracji, a także przewodnictwo szparkowe dla wody

u roślin rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl. W obu zastosowanych dawkach zwiększył natomiast sumaryczną powierzchnię liści oraz aktywność katalazy i peroksydazy, a także względną zawartość wody określoną po 14 i 28 dobach ekspozycji na działanie czynników eksperymentu. Wprowadzony do pożywki w stężeniu $5,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zmniejszył zawartość proliny w liściach tych roślin. Zanotowano zmniejszenie wycieku elektrolitów oraz zawartości sodu w liściach roślin rosnących w warunkach najwyższego stężenia NaCl.

W najwyższym zastosowanym zasoleniu, krzem w dawce $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zwiększył zawartość chlorofilu „a” oraz chlorofilu całkowitego, a w zależności od terminu pomiaru, w dawce $1,5$ lub $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, także intensywność asymilacji CO_2 . Zaopatrzenie roślin rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl w krzem zwiększyło parametry fluorescencji chlorofilu „a” (F_V , F_M i F_V/F_M) oraz zmniejszyło wartość F_0 , określone w trzech pierwszych terminach pomiaru. U pomidora rosnącego w stresie solnym, krzem w obu zastosowanych dawkach zwiększył sumaryczną powierzchnię liści i aktywność katalazy, a także zmniejszył zawartość proliny oraz wyciek elektrolitów z tkanek (u roślin rosnących w najwyższym zasoleniu).

Uzyskane rezultaty badań dotyczące wybranych parametrów fizjologicznych i biochemicznych pomidora wskazują na pozytywne efekty zastosowanego żywienia roślin selenem oraz krzemem w łagodzeniu skutków stresu solnego. Wykazano także przydatność badanych cech fizjologiczno – biochemicznych do opisu stanu stresu solnego u pomidora.

Słowa kluczowe: stres solny, krzem, selen, cechy fizjologiczne, *Lycopersicon esculentum* Mill.

Spis treści

Objaśnienie skrótów	3
Wstęp	4
1. Przegląd piśmiennictwa	6
1.1 Przyczyny nadmiernego stężenia soli i jego wpływ na rośliny	6
1.2 Znaczenie krzemu	11
1.3 Znaczenie selenu	12
1.4 Charakterystyka gatunku i znaczenie gospodarcze pomidora zwyczajnego	14
2. Materiał i metody badań	16
2.1 Materiał badawczy	16
2.2 Doświadczenie wegetacyjne	16
2.3 Metody badań fizjologicznych i biochemicznych, pomiarów biometrycznych oraz analiz laboratoryjnych	20
2.4 Metody statystyczne	24
3. Wyniki	25
3.1 Doświadczenie A	25
3.1.1 Zawartość barwników asymilacyjnych w liściach	25
3.1.1.1 Zawartość chlorofilu „a”	25
3.1.1.2 Zawartość chlorofilu „b”	27
3.1.1.3 Zawartość chlorofilu całkowitego	29
3.1.1.4 Zawartość karotenoidów	31
3.1.2 Parametry wymiany gazowej	33
3.1.2.1 Natężenie procesu asymilacji CO ₂	33
3.1.2.2 Intensywność transpiracji	36
3.1.2.3 Przewodnictwo szparkowe dla wody	38
3.1.2.4 Stężenie CO ₂ w przestworach międzykomórkowych miększu asymilacyjnego	40
3.1.3 Parametry fluorescencji chlorofilu „a”	42
3.1.3.1 Fluorescencja maksymalna (F _M)	42
3.1.3.2 Fluorescencja początkowa (F ₀)	44
3.1.3.3 Fluorescencja zmienna (F _V)	46
3.1.3.4 Maksymalna fotochemiczna wydajność PSII (F _V /F _M)	48
3.1.3.5 Wskaźnik witalności PS II (PI)	50
3.1.4 Wskaźnik względnej zawartości wody w liściach (RWC)	52

3. 1. 5 Zawartość proliny	54
3. 1. 6 Aktywność katalazy i peroksydazy	55
3. 1. 7 Wyciek elektrolitów z tkanek liści	56
3. 1. 8 Zawartość wybranych pierwiastków w części nadziemnej	57
3. 1. 9 Powierzchnia liści.....	59
3. 2 Doświadczenie B.....	59
3. 2. 1 Zawartość barwników asymilacyjnych w liściach	59
3. 2. 1. 1 Zawartość chlorofilu „a”	59
3. 2. 1. 2 Zawartość chlorofilu „b”	61
3. 2. 1. 3 Zawartość chlorofilu całkowitego	63
3. 2. 1. 4 Zawartość karotenoidów	66
3. 2. 2 Parametry wymiany gazowej	68
3. 2. 2. 1 Natężenie procesu asymilacji CO ₂	68
3. 2. 2. 2 Intensywność transpiracji	70
3. 2. 2. 3 Przewodnictwo szparkowe dla wody.....	72
3. 2. 2. 4 Stężenie CO ₂ w przestworach międzykomórkowych miększu asymilacyjnego	74
3. 2. 3 Parametry fluorescencji chlorofilu „a”	76
3. 2. 3. 1 Wartości fluorescencji maksymalnej (F _M)	76
3. 2. 3. 2 Fluorescencja początkowa (F ₀).....	78
3. 2. 3. 3 Fluorescencja zmiennej (F _V).....	80
3. 2. 3. 4 Maksymalna fotochemiczna wydajność PS II (F _V /F _M)	82
3. 2. 3. 5 Wskaźnik witalności PS II (PI).....	84
3. 2. 4 Wskaźnik względnej zawartości wody w liściach (RWC).....	86
3. 2. 5 Zawartość proliny	88
3. 2. 6 Aktywność katalazy i peroksydazy	89
3. 2. 7 Wyciek elektrolitów z tkanek liści	90
3. 2. 8 Zawartość wybranych pierwiastków w części nadziemnej	91
3. 2. 9 Powierzchnia liści.....	93
4. Dyskusja.....	94
5. Wnioski	106
Bibliografia.....	107
Aneks.....	124
Spis fotografii.....	124
Spis rycin.....	124
Spis tabel	125

Objaśnienie skrótów

A – intensywność asymilacji CO₂

CAT - katalaza

c_i – stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych miękiszu asymilacyjnego

E – intensywność transpiracji

EK – ekstynkcja przy określonej długości fali

F₀ – fluorescencja zerowa (początkowa)

F_M – fluorescencja maksymalna

FL - fluorescencja

F_V – fluorescencja zmienna

F_V/F_M – maksymalna potencjalna efektywność reakcji fotochemicznej w PSII

g_s – przewodność szparkowa dla wody

L_T/ L₀ – parametr opisujący stosunek przewodnictwa elektrolitycznego roztworów, wskazujący na stopień wycieku elektrolitów z komórek

PAR – promieniowanie fotosyntetycznie czynne (photosynthetically active radiation)

PI (Performance Index) – wskaźnik witalności PS II

POX - peroksydaza

ROS – wolne rodniki

RWC – wskaźnik względnej zawartości wody w liściach (Relative Water Content)

Se0, Se1, Se2 – poziom stężenia selenianu sodu w pożywce

Si0, Si1, Si2 – poziom stężenia metakrzemianu sodu w pożywce

ś. m. – świeża masa

v – ilość cm³ 80 - procentowego acetonu użytego do ekstrakcji

Z0, Z1, Z2, Z3 – poziom stężenia NaCl w pożywce

Wstęp

Stres jest odpowiedzią rośliny na zmiany środowiskowe - stresory, prowadzące do zaburzenia optymalnych warunków wzrostu i rozwoju (Ahmad i in. 2014). Ze względu na źródło czynników stresowych, dokonać można ich podstawowej klasyfikacji. Obejmuje ona stresory biotyczne, do których zaliczyć można patogenne grzyby, bakterie i szkodniki roślin (Oerke 2006, Flood 2010, Bebber i Gurr 2015) oraz abiotyczne będące efektem działania czynników środowiskowych - fizycznych i chemicznych. Abiotyczne czynniki stresowe to przede wszystkim działanie temperatury, wody, promieniowania UV, podwyższone stężenie soli i zachwianie równowagi mineralnej oraz szczególnie powszechne na obszarach uprzemysłowionych, zanieczyszczenie środowiska (Ahmad i in. 2014, Negrão i in. 2017, Ohama i in. 2017, Zandalinas i in. 2018). Dla roślin, niezdolnych do zmiany stanowiska bytowania, stresory abiotyczne przyjmują szczególne znaczenie, stanowiąc najczęstsze źródło stresu fizjologicznego (Pessaraki i in. 2014, Barker i Pilbeam 2015, Shabala 2017).

Rośliny posiadają złożony system odpowiedzi na czynniki stresogenne, które stale ulegają zmianie, adekwatnie do zmian środowiskowych. Zmiany te, obejmujące zarówno struktury jak i funkcje roślin są złożone i zdecydowanie bardziej skomplikowane niż u zwierząt, co wynika z braku zdefiniowanego systemu odpornościowego. Mogą one przyjmować postać bezpośredniego przeciwdziałania czynnikowi stresującemu lub być odpowiedzią, mającą na celu redukcję siły działania stresora.

W świetle obserwowanych zmian klimatycznych, zagrożenia wynikające z działania czynników stresowych nie mogą zostać zbagatelizowane, stanowią bowiem istotny problem dotyczący nie tylko roślinności rosnącej na stanowiskach naturalnych, ale w znacznie większym stopniu również upraw. Aby skutecznie sprostać wyzwaniu stawianemu przez coraz liczniejsze źródła czynników stresowych, konieczne jest zrozumienie różnych aspektów ich działania, metod odpowiedzi roślin oraz skuteczności dostępnych metod badawczych w ocenie efektywności reakcji roślin na stres (Venkateswarlu i in. 2011). Nadmierne wysalanie gleb, będące najczęściej połączeniem procesów alkalizacji i sodyfikacji, prowadzi do powstania niezwykle istotnego problemu jakim jest stres solny. Będąc przede wszystkim efektem zarówno bezpośrednich jak i pośrednich działań antropogenicznych, prowadzi do ustawicznej degradacji gleb, która do 2050 roku może objąć 50% globalnych gruntów ornych. Nadmierne zasolenie prowadzi do uszkodzenia tkanek, procesów metabolicznych i ogólnego rozwoju roślin, co w przypadku roślin uprawnych oznacza mniejszy plon, straty wartości odżywczych,

a w aspekcie ekonomicznym straty na poziomie około 27,3 miliarda USD rocznie (Chele i in. 2021, Truřã i in. 2023).

Podwyższone stężenie soli w środowisku, zwane zasoleniem, które obecnie obejmuje ponad 7% całkowitej powierzchni lądów (Hopmans i in. 2021, Basak i in. 2022) jest jedną z głównych przyczyn degradacji gleb. Powierzchnia gruntów stale lub okresowo zasolonych rokrocznie ulega zwiększeniu. Problem nadmiernego zasolenia występuje przede wszystkim na obszarach suchych i półsuchych oraz nawadnianych wodą morską. W strefie klimatu umiarkowanego jest ono natomiast najczęściej spowodowane niebilansowanym, nadmiernym nawożeniem na obszarach intensywnie użytkowanych rolniczo, w uprawach pod osłonami, a także stosowaniem soli do likwidacji śliskości jezdni w miastach. Odpowiedź roślin na podwyższone stężenie soli w środowisku jest więc od lat istotnym tematem badawczym, między innymi fizjologii roślin.

Wyniki niektórych badań wskazują, że zaopatrzenie roślin w określone pierwiastki może być czynnikiem łagodzącym skutki stresu solnego (Sattar i in. 2017, Xu i in. 2022). Do pierwiastków tych należą między innymi selen oraz krzem. Według wielu autorów, mechanizmy korzystnego oddziaływania selenu i krzemu opierają się na właściwościach antyoksydacyjnych tych pierwiastków, przejawiających się aktywowaniem enzymów takich jak np. katalaza czy peroksydaza. Rola zarówno selenu jak i krzemu w odpowiedzi roślin na stresy abiotyczne, w tym stres solny nie została dostatecznie poznana.

Uwzględniając powyższe zagadnienia w pracy podjęto badania nad charakterystyką fizjologiczno - biochemicznej reakcji roślin pomidora (*Lycopersicon esculentum* Mill.) na podwyższone stężenie soli w środowisku oraz oceną skuteczności oddziaływania selenu i krzemu w redukcji stresu solnego. W oparciu o uzyskane wyniki dokonano również oceny przydatności zastosowanych fizjologicznych i biochemicznych metod badawczych do opisu stanów stresowych u roślin oraz ich odporności na stres solny.

Cele badań zrealizowano dokonując weryfikacji następujących hipotez badawczych:

- zróżnicowane stężenie NaCl środowiska wpływa na cechy fizjologiczno-biochemiczne roślin gatunku *Lycopersicon esculentum* Mill.,
- selen wpływa na parametry fizjologiczno - biochemiczne roślin poddanych działaniu stresu solnego
- krzem oddziałuje na cechy fizjologiczno – biochemiczne roślin poddanych działaniu stresu solnego.

1. Przegląd piśmiennictwa

1.1 Przyczyny nadmiernego stężenia soli i jego wpływ na rośliny

Podwyższone zasolenie gleby stanowi jeden z najważniejszych, abiotycznych czynników stresowych, który niekorzystnie wpływa na wzrost i plonowanie roślin uprawnych (Venkateswarlu i in. 2011). Poziom zasolenia gleby wyznaczany jest na podstawie stężenia składników mineralnych w roztworze glebowym. Dotyczy to głównie soli kwasu siarkowego, solnego i węglowego oraz soli zasad – sodowej, magnezowej i wapniowej. Zachwianie proporcji soli pierwiastków oraz ich nadmierna kumulacja, prowadzi do zmian właściwości fizycznych oraz odczynu gleby, uniemożliwiając roślinom właściwe pobieranie składników pokarmowych. O podwyższonym zasoleniu świadczy już stężenie roztworu glebowego przekraczające 0,2% składu roztworu glebowego. Jeżeli wysycenie gleby jonami sodu, przekracza 15% jej składu jonowego, znacznie pogarsza właściwości podłoża (Kłosowska 2010, Barker i Pilbeam 2015, Sharma i in. 2016).

Według licznych autorów (Zhang i in. 2014, Safdar 2019, FAO 2021, Hopmans i in. 2021, Basak i in. 2022) gleby nadmiernie zasolone stanowią do 30% obszarów uprawnych oraz ponad połowę wszystkich obszarów nawadnianych. Podwyższone stężenie soli w glebie prowadzi do szeregu niekorzystnych zmian, w tym między innymi do zwiększenia podatności gleb na erozję oraz zmniejszenia dostępności wody dla roślin. Prowadzi to do wzrostu kosztów uprawy gleby, jednocześnie znacznie obniżając jej wartość użytkową oraz zmniejszając plonowanie roślin (Munns 2015, Safdar 2019, Yadav 2020, Saddiq 2021).

Obszary o podwyższonym zasoleniu tworzą się tam, gdzie utwory glebowe wchodzi w bezpośredni kontakt z solą lub wodami zasolonymi. Jest to szczególnie wyraźne w przypadku obszarów uprawnych znajdujących się w pobliżu zlewków wód słonych oraz położonych poniżej poziomu morza, gdzie zasolenie może stanowić efekt mieszania wód słonych z wodami gruntowymi (Shabala 2017, Chhabra 2017). Ponadto na terenach suchych, zasolenie gleb związane jest z naturalnym procesem wietrzenia. Przy braku opadów atmosferycznych i innych źródeł nawadniania, uniemożliwia to przenikanie soli w głąb profilu glebowego, powodując ich gromadzenie na powierzchni (Shabala 2017, Chhabra 2017). Szczególnie narażone na nadmierne zasolenie są jednak obszary gleb intensywnie eksploatowanych, znajdujące się w strefie klimatu umiarkowanego, dla których główne źródło zasolenia stanowią czynniki antropogeniczne. Intensywne nawadnianie obszarów pozbawionych sprawnego systemu

melioracyjnego, szczególnie na terenach polodowcowych, prowadzi do przedostawania się soli z głębokich warstw gleb ku ich powierzchni. Innym, szkodliwym czynnikiem, jest niezrównoważone nawożenie mineralne gleb. Ponadto, w okresie zimowym, obszary silnie zurbanizowane oraz uprawne położone w bezpośrednim kontakcie z drogami, narażone są na działanie soli, stosowanych powszechnie jako środek zmniejszający śliskość nawierzchni. Na uwagę zasługuje również nawadnianie upraw wodą charakteryzującą się naturalnie dużym zasoleniem. Dotyczy to szczególnie terenów klimatów cieplejszych, szczególnie zaś obszarów nadmorskich i ubogich w źródła wody słodkiej (Greszta i Gruszka 2000, Sardo 2005, Wrochna i in. 2006, Kłosowska 2010, Shabala 2017).

Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym nadmiernemu gromadzeniu się soli pierwiastków w glebach, uzyskującym znaczenie globalne, jest działanie efektu cieplarnianego. Zwiększenie temperatur oraz ograniczenie opadów atmosferycznych, powoduje intensywne parowanie wód przy jednocześnie niewielkim ich przepływie w głąb gleby, czego efektem może być gromadzenie się soli w powierzchniowych warstwach gleb (Kłosowska 2010, Shabala 2017).

Wpływ podwyższonego stężenia soli na rośliny może mieć zróżnicowany charakter w zależności od gatunku rośliny, rodzaju i stężenia soli, długości okresu oddziaływania czynnika stresogennego, stanu środowiska oraz innych czynników towarzyszących. Może stanowić przyczynę zmian o charakterze morfologicznym, anatomicznym, fizjologicznym i metabolicznym, które prowadzą do ograniczenia wzrostu i produktywności roślin, a ostatecznie nawet ich śmierci (Ashraf i Harrio 2004, Fathi 2016). Odpowiedzią jest przystosowanie obserwowane u roślin rosnących na glebach, w których stężenie chlorku sodu przekracza 0,5%. Gatunki tych roślin określane jako halofity (słonorośla), wykazują zdolność prawidłowego wzrostu nawet w warunkach stężenia soli przekraczającego 20% (Kacperska 2002b, Dajic 2006, Safdar 2019). Większość roślin uprawnych stanowią jednak glikofity, czyli gatunki stosunkowo mało odporne na podwyższone zasolenie, w przypadku których ekspozycja na warunki nadmiernego zasolenia skutkuje zaburzeniami ich procesów życiowych (Dajic 2006, Safdar 2019).

Rośliny rosnące w warunkach podwyższonego stężenia soli charakteryzuje strzelisty pokrój, mała powierzchnia blaszek liściowych i średnica pędu oraz słabo rozwinięty system korzeniowy (Zhang i in. 2014, Yu i in. 2015, Jan i in. 2016, Ma i in. 2020). Długa ekspozycja na działanie czynnika stresowego prowadzi do koncentracji

toksycznych jonów w liściach, powodując w efekcie zmianę zabarwienia na niebieskawozieloną i kolejno brązową, będącą efektem postępującej nekrozy. Tempo zmian uwarunkowane jest czasem ekspozycji rośliny na podwyższone zasolenie (Munns 2002).

Działanie nadmiernego zasolenia wpływa na gospodarkę wodną komórek i zaburza mechanizm otwierania aparatów szparkowych, przyczyniając się do zmniejszenia powierzchni transpiracyjnej rośliny. Powoduje zmniejszenie wielkości komórek miękiszu, nadając im nieregularne kształty i prowadzi do uszkodzenia błoniastych struktur komórkowych, zmniejszając liczbę chloroplastów. Ponadto wpływa również na zmiany w obrębie tkanek, czego rezultatem jest zmniejszenie średnicy naczyń wiązek przewodzących oraz zwiększenie grubości warstwy miękiszu asymilacyjnego i palisadowego będące efektem powstawania przestrzeni powietrznych przy jednoczesnym ściśnięciu komórek. W owocach roślin poddanych działaniu podwyższonego zasolenia, zauważalne jest zwiększenie grubości kutykuli, epidermy i mezokarpu (Xu i in. 2014, Alabdeen i Ahmed 2017, Hasana i Miyake 2017, Rouphael i in. 2017, Injamum-ul-Hoque i in. 2018, Moretti i in. 2018). Występujące w nadmiarze, jony sodu wykazują inhibicyjne powinowactwo do akceptorów białek transportowych potasu, prowadząc do deficytu tego pierwiastka. Zaburza to równowagę jonową komórek prowadząc do stresu osmotycznego. Stres solny indukuje ponadto syntezę kwasu abscysynowego w korzeniach, który transportowany do części nadziemnych rośliny, głównie liści, powoduje zamykanie aparatów szparkowych, ograniczając transpirację (Zhu 2007, Kłosowska 2010, Munns i in. 2015, Safdar 2019). Oprócz powyższych, odwracalnych zmian wynikających z zaburzenia gospodarki mineralnej roślin, nadmierne zasolenie prowadzi również do trwałego uszkodzenia fotosyntezy. Ograniczając syntezę białek chlorofilowych 47 kDa oraz białek błonowych 94 kDa, umożliwiających przyłączenie fikobilisomów do błon tylakoidów powoduje uszkodzenia PSII i w efekcie wpływa na zmniejszenie wydajności tego procesu (Mehta i in. 2010).

Odpowiedzi roślin na nadmierne zasolenie to przystosowania oraz mechanizmy obronne służące minimalizowaniu skutków stresu i zachowaniu homeostazy. Mogą one funkcjonować na różnych poziomach, od pojedynczych komórek do całego organizmu. Przy długotrwałej ekspozycji na czynnik stresowy o niewielkim natężeniu, zaobserwować można zmiany adaptacyjne. Jednym z podstawowych mechanizmów odpowiedzi na stres solny, właściwym wszystkim roślinom, jest dostosowanie

osmotyczne, w wyniku którego stężenie osmotyczne soku komórkowego utrzymywane jest na właściwym poziomie. Na poziomie komórkowym uwzględnia to modyfikacje w obrębie struktur ścian komórkowych. Są to procesy indukowane działaniem peroksydazy obejmujące intensyfikację biosyntezy ligniny, modyfikację kalozy warunkującej mechanizm transportowy plazmodesm oraz zwiększenie aktywności ekspansyn (Byrt i in. 2018). Ponadto u halofitów, spotykana jest duża koncentracja jonów Na^+ i Cl^- w wakuolach komórek, co zabezpiecza przed przenikaniem ich nadmiaru do cytoplazmy przy jednoczesnym utrzymaniu stężenia tych jonów poniżej progu toksyczności. U roślin o mniejszej tolerancji na stres solny, zaobserwować można redukcję koncentracji jonów Na^+ i Cl^- oraz prowadzenie osmoregulacji w oparciu o roztwory organiczne. Są to mechanizmy aktywne, wymagające nakładu energii ze strony rośliny (Munns i in. 2015).

Złożonym mechanizmem odporności roślin na zasolenie jest działające na poziomie komórkowym neutralizowanie, powstających jako efekt działania stresu solnego, wolnych rodników (ROS). Pozwala to na znaczną redukcję uszkodzeń wynikających z zaburzeń funkcjonowania enzymów oraz ściany i błon komórkowych (Munns i Tester 2008, Taha i in. 2021, Singh 2022).

Właściwa odpowiedź roślin na stres wywołany nadmiernym zasoleniem, uwarunkowana jest prawidłowym funkcjonowaniem białek błonowych – powierzchniowych oraz integralnych. Stwierdzono, że ich funkcje pozwalają na szybki transport jonów przez błony komórkowe, jednakże szczegóły funkcjonowania tych mechanizmów nadal pozostają w obszarze badań. Skuteczną rolę w reakcji roślin na działanie czynnika stresowego, wynikającego z nadmiernego zasolenia, przypisuje się również specyficznym endosomom. Organelle te okazują się funkcjonować szczególnie sprawnie u odpornych na zasolenie odmian tytoniu. Odpowiedzialność za te funkcje przypisuje się błonowym białkom transportowym endosomów (Morgan i in. 2014, Parihar i in. 2015).

Według Munns'a i Tester'a (2015) formą reakcji roślin na podwyższone zasolenie jest występowanie szlaków transportowych i metabolicznych, których funkcjonowanie jest w pełni niezależne od poziomu koncentracji Na^+ w tkankach (Munns i in. 2015). Badania prowadzone niezależnie przez Rivero i in. (2014) oraz Martinez i in. (2016) wykazały zwiększoną aktywność osmoprotektantów u roślin pod wpływem stresu solnego i cieplnego. Szczególne znaczenie w odpowiedzi fizjologicznej roślin przypisuje się działaniu melatoniny (Martinez i in. 2018) oraz proliny. Intensywna synteza oraz

gromadzenie proliny u roślin eksponowanych na działanie czynników stresu abiotycznego, związana jest z jej silnym działaniem antyoksydacyjnym, dlatego jej poziom wskazuje nie tylko na występowanie stresu, ale również intensywność jego działania. Bierze ona udział w stabilizowaniu struktur komórkowych oraz przeciwdziała uszkodzeniu aparatu fotosyntetycznego. Warunkuje również odpowiednie pH soku komórkowego oraz stabilizację struktur białkowych. Ponadto zmniejsza potencjał wody w liściach, zmniejszając pobór wody i regulując proces transpiracji, pozwalając na utrzymanie odpowiedniego ciśnienia turgorowego w warunkach suszy i nadmiernego zasolenia (Maggio i in. 2002, Ashraf i Foolad 2007, Hmidi i in. 2018).

Mechanizmy przystosowawcze działające na poziomie komórkowym prowadzą do szeregu przystosowań w obrębie organów. Obejmują one zmiany w czasie kwitnienia tj. jego przyspieszenie lub opóźnienie, wynikającego ze zmian długości trwania rozwoju wegetatywnego. Zmiany te uzależnione są od gatunku rośliny oraz stężenia soli (Kim i in. 2013). Uwzględniają również translokację produktów fotosyntezy i ich kumulację w owocach, gromadzenie nadmiaru jonów sodu w pędach, zaś w liściach ich transport z mezofilu do komórek skórki (Munns i in. 2015).

Badania nad skutecznymi metodami neutralizacji oraz minimalizacji skutków stresu solnego u roślin opierają się na wsparciu właściwych roślinom mechanizmów reakcji odpornościowej. Badania te obejmują uzyskiwanie odmian odpornych na podwyższone zasolenie, wpływ niektórych składników pokarmowych jak np. potas, azot i cynk (Morgan 2014, Jan i in. 2017) oraz organizmów symbiotycznych, w tym grzybów mikoryzowych oraz bakterii z grupy *Rhizobium* (Ahmad i in. 2014, Vejan i in. 2016). W badaniach Jan i in. (2017) nad pszenicą (*Triticum aestivum* L.), stwierdzono redukcję skutków stresu solnego objawiającego się zmniejszeniem zawartości barwników asymilacyjnych oraz fenoli, po dodatkowym zaopatrzeniu roślin w cynk i potas. Khan i Panda (2008) wykazali skuteczne działanie potasu u ryżu (*Oryza sativa* L.) rosnącego w warunkach nadmiernego zasolenia, w stymulowaniu funkcji enzymatycznych peroksydazy (POX) i katalazy (CAT). Podobnie skuteczne działanie wapnia i potasu wykazał Morgan (2014) w zachowaniu równowagi jonowej u bobu (*Vicia faba* L.). W ostatnich latach, duże zainteresowanie wzbudza rola oraz możliwość wykorzystania w celu łagodzenia skutków stresu solnego u roślin pierwiastków nie należących do grupy niezbędnych, takich jak krzem i selen (Hawrylak 2007, Meharg i Meharg 2014, Barker i Pilbeam 2015, Khan 2019, Dhiman i in. 2021, Rasool i in. 2022, Rasool i in. 2023).

1.2 Znaczenie krzemu

Krzem (Si), w formie związanej należy do grupy pierwiastków najpowszechniej występujących w przyrodzie. W zależności od rodzaju podłoża, jego zawartość w glebie może wahać się od <1% do niemal 50%, przyjmując średnio wartość 30 % suchej masy. Zdolność roślin do pobierania krzemu z podłoża uwarunkowana jest występowaniem w glebie kwasów krzemowych Si(OH)_4 i $\text{Si(OH)}_3\text{O}^-$, oraz zależy od odczynu gleby. Związane jest to z polimeryzacją kwasów, której tempo ulega spowolnieniu w środowisku zasadowym, wpływając na większą ich przyswajalność. Intensywność pobierania oraz zawartość krzemu w tkankach roślin wyższych jest różna i uwarunkowana gatunkowo, wykazuje jednak wyższy poziom u roślin jednoliściennych (Currie 2007, Barker i Pilbeam 2015, Coskun i in. 2016).

Krzem pobrany przez roślinę ulega polimeryzacji w ścianach komórek epidermy i wewnątrz niektórych komórek innych tkanek. Pobieranie i transport tego pierwiastka mogą mieć charakter zarówno czynny jak i bierny, zaś w niektórych przypadkach działają oba mechanizmy. Proces ten przebiega z udziałem LSi 1, akwaporyn komórek skórki i egzodermis korzeni i został szczegółowo zbadany u ryżu. Wzbogacanie roślin krzemem sprzyja ponadto wytwarzaniu przez nie fenoli i fitoaleksyn, skutecznie wspomagających odporność na infekcje grzybowe. Wykazały je badania przeprowadzane na ryżu (Rodrigues i in. 2004) i pszenicy (Lim 2012). Analogiczne potwierdzenia znaleziono również u przedstawicieli roślin dwuliściennych np. ogórka (Fawe i in. 1998, Ma i Yamaji 2015). Dalsze rozprzestrzenienie krzemu w roślinie odbywa się z udziałem ksylemu, w kierunku epidermy, gdzie wiązany jest on z celulozą, pektynami oraz jonami wapnia (Currie i in. 2007, Coskun i in. 2016).

Znaczenie krzemu w rozwoju roślin wyższych stanowi nadal temat badań. Pomimo doniesień wskazujących na korzystny wpływ tego pierwiastka na zwiększenie biomasy roślin oraz regulowanie odpowiedzi roślin na czynniki stresowe (biotyczne i abiotyczne), jego bezpośredni udział w procesach fizjologicznych i biochemicznych nie został dotychczas dostatecznie wyjaśniony. Jednocześnie krzem może stanowić do 10% suchej masy pędu (Hodson i in. 2005), przewyższając niekiedy zawartość makroskładników takich jak wapń, magnez czy fosfor. Rośliny rosnące w warunkach braku lub deficytu przyswajalnego krzemu, charakteryzują się słabszą odpowiedzią na czynniki stresowe. Wynika to z wzmacniającej roli krzemu, który po pobraniu przez roślinę łączy się z elementami struktur ścian komórkowych. Około 90% przyswojonego krzemu łączy się w struktury krzemowo-celulozowe, mechanicznie wzmacniając tkanki. Krzem może

również zastąpić fosforany w strukturach DNA i RNA, zwiększając ich stabilność. (Bocharnikova i in. 2014). Ponadto wykazano zdolność krzemu do redukcji toksycznego działania glinu, prawdopodobnie poprzez tworzenie specyficznych kompleksów krzemianowych (Currie 2007, Barker i Pilbeam 2015, Coskun i in. 2016).

Oprócz bezpośredniego udziału we wzmacnianiu ścian komórkowych, zmniejszającego skuteczność infekcji bakteryjnych i grzybowych, krzem bierze udział w stymulowaniu naturalnych mechanizmów obronnych roślin z uwzględnieniem antyoksydacyjnego działania metabolitów wtórnych, w tym flawonoidów i związków fenolowych. U roślin dobrze zaopatrzonych w ten pierwiastek zaobserwowano zwiększoną aktywność enzymatyczną, w tym chitynazy i peroksydazy, skutecznie przeciwdziałających patogenom grzybowym (Currie 2007, Gałązka 2014, Tripathi i in. 2014, Coskun i in. 2016, Ma i in. 2016, Song i in 2016).

W badaniach nad wpływem krzemu na wzrost i rozwój roślin wykazano pozytywny wpływ tego pierwiastka w warunkach stresu wywołanego działaniem metali takich jak: cynk, mangan, glin, miedź i kadm (Adrees i in. 2015, Dornes i in. 2016, Deshmukh 2017), suszę (Sacała i Dubrajło 2012, Kowalska i in. 2018), wysoką temperaturę (Ma i Yamaji 2015, Abdel i in. 2016). Przeciwdziałanie efektom suszy wynikało ze zwięźnienia światła aparatów szparkowych, zmniejszającego intensywność transpiracji. W przypadku stresu solnego, działanie krzemu skutkowało zwiększeniem aktywności katalazy i dysmutazy ponadtlenkowej (SOD), w antyoksydacyjnej ochronie błon komórkowych (Ma 2004, Currie 2007, Barker i Pilbeam 2015, Coskun i in. 2016).

1.3 Znaczenie selenu

Dostępny dla roślin selen występuje w glebie w postaci jonowej selenianu (VI) SeO_4^{2-} i selenianu (IV) SeO_3^{2-} , związanych często w postaci soli. W większości gleb, obecność tego pierwiastka wynika bezpośrednio z zasobności w materię organiczną, w związku z czym największa jego koncentracja obejmuje wierzchnie warstwy. Na przemieszczanie selenu w glebie wpływ ma jej odczyn oraz w pewnym stopniu intensywność opadów, która wiąże się ze zjawiskiem wyługowywania. Zasobność gleb w selen jest znacznie zróżnicowana w skali światowej. Znaczną koncentrację tego pierwiastka stwierdza się na gorących obszarach pustynnych, gdzie w wyniku wietrzenia zasobnych w selen skał, przedostaje się on do podłoża. Zawartość selenu w glebach obszarów wilgotnych oraz na terenach podlegających intensywnemu nawadnianiu jest

niewielka, w związku z jego wyługowywaniem. Uwarunkowane specyfiką gleby jest również tempo reakcji przemian selenianu (IV) w selenian (VI) oraz odwrotnie, które są zazwyczaj procesami bardzo powolnymi (Barker i Pilbeam 2015, Pilon-Smits 2015).

Zdolność roślin do pobierania selenu uwarunkowana jest składem mechanicznym gleby. Silna adsorpcja SeO_3^{2-} przez podłoża ilaste utrudnia jego przyswajalność, co sprawia, że rośliny rosnące na glebach piaszczystym mogą pobierać nawet dwa razy więcej tego pierwiastka (Barker i Pilbeam 2015). Pobieranie selenu z podłoża przebiega przy udziale tych samych nośników, które odpowiedzialne są za przyswajanie przez rośliny jonów siarki SO_4^{2-} . Wynika to z podobieństw fizykochemicznych obu pierwiastków, wskazując jednocześnie na ich konkurencję. Zwiększona zawartość SeO_4^{2-} w podłożu może utrudnić lub zahamować przyswajanie SO_4^{2-} . Badania prowadzone na jęczmieniu oraz cebuli wskazują, że zależność ta dotyczy zarówno roślin jedno- jak i dwuliściennych (Pilon-Smits 2015).

Wiązanie selenu w związki organiczne przebiega w liściach i jest zbliżone do procesu wiązania siarki. Silne podobieństwo chemiczne siarki i selenu warunkuje również w następstwie toksyczne działanie tego ostatniego, który u większości roślin, pozbawionych specyficznego łańcucha metabolicznego dla tego pierwiastka, może zostać związany w selenocysteinę (SeCyst) lub selenometioninę (SeMet). Prowadzi to do powstania struktur białkowych o zaburzonym, toksycznym dla organizmu działaniu. Niektóre gatunki posiadają jednak szlaki metaboliczne pozwalające na łączenie selenocysteiny z grupą metylową przy udziale SeCyst metylotransferazy, niwelując toksyczne działanie selenu i pozwalając na jego akumulację (Barker i Pilbeam 2015, Pilon-Smits 2015, White 2018).

Dotychczasowe doniesienia na temat badań dotyczących stresu fizjologicznego roślin, wskazują na działania selenu zbliżone do krzemu. Dotyczy to szczególnie stresu abiotycznego wywołanego metalami ciężkimi w tym ołowiem i kadmem (He i in. 2004, Cao i in. 2013), suszą oraz skrajnie wysokimi i niskimi wartościami temperatury (Djanaguiraman i in. 2010, Abbas 2013, Balal i in. 2016). W przypadku stresu wywołanego zasoleniem, mechanizmy te opierają się o właściwości antyoksydacyjne selenu przejawiające się zwiększaniem aktywności enzymatycznej katalazy, dysmutazy ponadtlenkowej oraz peroksydazy glutationowej (GPX) - (Hasanuzzaman i in. 2014, Barker i Pilbeam 2015, Pilon-Smits 2015, Hasanuzzaman, i in. 2020, El Moukhtari i in. 2021).

1.4 Charakterystyka gatunku i znaczenie gospodarcze pomidora zwyczajnego

Pomidor zwyczajny (*Lycopersicon esculentum* Mill.) jest przedstawicielem rodzaju psianka (*Solanum* L.), obejmującego około 1400, spośród liczącej ponad 3000 gatunków rodziny psiankowatych (*Solanaceae* L.) (Bergougnoux 2014, Knapp 2016, <http://ecocrop.fao.org/> 2017). Autochtoniczny dla obszaru Ameryki Południowej gatunek został introdukowany w Europie w XVI wieku, w efekcie ówczesnej ekspansji kolonialnej Hiszpanii. Przyjęta w wielu europejskich krajach nazwa zwyczajowa, wywodzi się od hiszpańskiego *tomate*, które stanowi bezpośrednie zapożyczenie od słowa „tomatl”, z grupy azteckich języków nahuatl. Za źródłosłów polskiej nazwy przyjmuje się włoskie „pomi d’oro” (Hancock 2012, Bergougnoux 2014, <http://www.freelang.net/> 2021).

Sklassyfikowany w 1753 roku przez Karola Linneusza, pomidor został przypisany do rodzaju *Solanum* pod nazwą *Solanum lycopersicum*. Pomimo wieloletnich rozważań dotyczących klasyfikacji pomidora, przynależność rodzajowa tego gatunku została potwierdzona późniejszą rewizją filogenetyczną w oparciu o badania molekularne. Obecnie nazwa *Lycopersicon esculentum* obowiązuje nadal w naukach ogrodniczych oraz nasiennictwie (Bergougnoux 2014, Knapp 2016, Tepe i in. 2016, <https://www.itis.gov/> 2021).

Gatunki pomidora rosnące w rodzimych warunkach siedliskowych charakteryzowane są jako byliny. W klimacie umiarkowanym pomidor jest jednak rośliną jednoroczną. Pędy gatunków dzikich osiągają zazwyczaj wysokość do 1,5 metra i od momentu owocowania zaczynają się płożyć pod ciężarem owoców. Uprawne odmiany szklarniowe mogą osiągać wysokość do kilku metrów, zaś ich łodygi mogą być wiotkie lub sztywne. Odmiany sztywnołodogowe charakteryzują się (w przeciwieństwie do wiotkołodogowych) mięsistymi międzywęzłami i intensywniej wybarwionymi, pomarszczonymi liśćmi. Pokrój rośliny krzaczasty, w uprawie uzależniony od odmiany. Dobrze rozwinięty system korzeniowy, dorastający do 90 cm. Kwiaty barwy żółtej zebrane są w kwiatostany. Specyfika rozmnażania, obejmująca samo i obcopolność jest, cechą gatunkową. Owoc pomidora stanowi wielokomorowa jagoda, której kształt, wybarwienie i rozmiar, zależne są od gatunku, a przypadku roślin uprawnych, również odmiany (Dobrakowska-Kopecka i Ostrowski 1984, Orłowski 2000, Bergougnoux 2014, FAO 2021).

Względna łatwość w dostosowaniu do warunków klimatycznych i zróżnicowanych sposobów uprawy oraz wysokie plonowanie przyczyniły się do powstania licznych odmian oraz rozpowszechnienia pomidora na świecie jako jednej z najważniejszych roślin ogrodnich. Roczne zbiory owoców tego gatunku w skali globalnej wynoszą 160 mln ton, przy dużym udziale krajów Europy, w tym Polski, gdzie zbiera się około 200 tys. ton owoców rocznie (Bergougnoux 2014, FAO 2021, WPTC).

Owoce pomidora charakteryzują się cenionymi walorami smakowymi oraz dużymi wartościami odżywczymi i zdrowotnymi. Stanowią istotny element diety człowieka, zarówno w postaci świeżej, jak i licznych przetworów (Campestrini 2019, Li 2021). Są bogate w kwas L-askorbinowy oraz β -karoten, biotynę i witaminy z grupy B. Zawierają także niewielkie ilości witaminy K, będącej niezbędnym elementem procesu krzepnięcia krwi. Owoce pomidora stanowią również cenne źródło pierwiastków, przede wszystkim potasu, żelaza, magnezu, cynku i miedzi. Zawierają także znaczne ilości likopenu, przeciwutleniacza o silnych właściwościach antynowotworowych i ochronnych wobec układu krwionośnego (Li 2021). Duża zawartość tego związku sprawia, że owoce pomidorów stanowią główne źródło pozyskiwania go w celach farmaceutycznych (Blanca i in. 2015, Almeida i in. 2016, Lu i in. 2016).

Istotna, szczególnie w związku z ekonomicznym znaczeniem pomidora, jest kwestia odporności tego gatunku na czynniki stresowe. Charakteryzuje się on podatnością na ponad 200 różnych szkodników i chorób. Występująca w klimacie umiarkowanym znaczna amplituda temperatury oraz opadów w okresie wegetacyjnym, sprzyja rozwojowi infekcji grzybowych oraz naraża na działanie stresów abiotycznych takich jak susza lub nadmiar wody. W przypadku upraw bezglebowych istotnym czynnikiem jest nieodpowiednie żywienie mineralne roślin, którego efektem może być stres solny lub susza fizjologiczna (Bergougnoux 2014, Kissoudis i in. 2016). Pomidor jest uznawany za dobrą roślinę wskaźnikową do oceny wpływu nadmiernego stężenia soli na jej procesy fizjologiczne (Marsic 2018, Naeem 2020).

2. Materiał i metody badań

2.1 Materiał badawczy

Biologiczny materiał badań stanowiły rośliny pomidora zwyczajnego (*Lycopersicon esculentum* Mill.), średnio wczesnej odmiany Roquetero F1 (Fot. 1). Odmiana ta przeznaczona jest głównie do uprawy pod osłonami. Charakteryzuje się dużą plennością i dobrze rozwiniętym systemem korzeniowym oraz zwartym pokrojem. Wytwarza owoce kuliste, lekko spłaszczone, nieznacznie żebrowane przy szypułce.



Fot. 1. Pomidor zwyczajny (*Lycopersicon esculentum* Mill.), odmiana Roquetero F1
Źródło: fotografie autora.

2.2 Doświadczenie wegetacyjne

Eksperymentalną część badań przeprowadzono w latach 2015- 2017, w Pracowni Fizjologii Roślin i Entomologii Katedry Bioinżynierii, Wydziału Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie.

Założono dwa niezależne (A i B), dwuczynnikowe doświadczenia hydroponiczne, w układzie kompletnej randomizacji, w pięciu powtórzeniach. W obydwu eksperymentach pierwszym czynnikiem doświadczalnym był poziom stężenia chlorku sodu w pożywce, drugim zaś poziom stężenia soli selenu (doświadczenie A) oraz krzemu (doświadczenie B). Poziomy poszczególnych czynników doświadczalnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zastosowane w przeprowadzonych doświadczeniach poziomy czynniki doświadczalnych

Doświadczenie A	Doświadczenie B
I czynnik – poziom stężenia soli [mmol NaCl·dm ⁻³]	I czynnik – poziom stężenia soli [mmol NaCl·dm ⁻³]
50 (Z1)	50 (Z1)
75 (Z2)	75 (Z2)
100 (Z3)	100 (Z3)
kontrola – pożywka pełna Hoaglanda (150%) (Z0)	kontrola – pożywka pełna Hoaglanda (150%) (Z0)
II czynnik – poziom stężenia selenianu sodu [μmol Na ₂ SeO ₄ ·dm ⁻³]	II czynnik – poziom stężenia metakrzemianu sodu [mmol Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O·dm ⁻³]
5,0 (Se1)	1,5 (Si1)
10 (Se2)	3,0 (Si2)
kontrola – pożywka pełna Hoaglanda (150%) (Se0)	kontrola – pożywka pełna Hoaglanda (150%) (Si0)

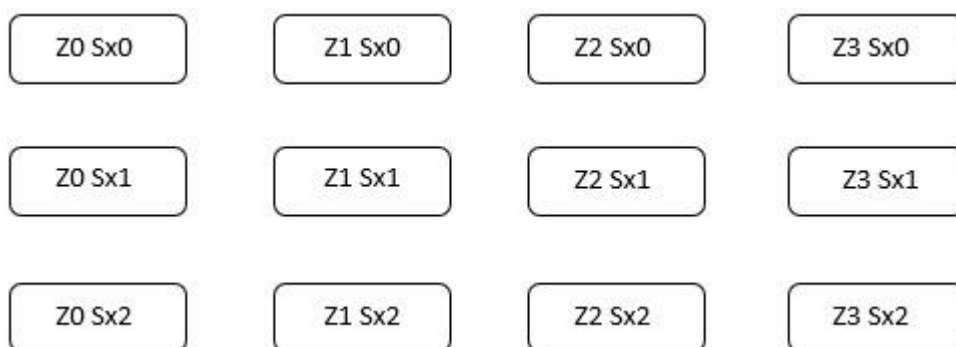
Wysiewu nasion badanej odmiany pomidora, pochodzących z holenderskiej firmy Hazera, dokonano do pojemników wykonanych z tworzywa sztucznego, wypełnionych uniwersalnym podłożem ogrodniczym, umieszczonych w fitotronie. Po upływie 14 dob od wysiewu nasion i rozwinięciu się pierwszej pary liści właściwych, rośliny przenoszono do pojemników z tworzywa sztucznego, o pojemności 1,5 dm³, wypełnionych 1,5-krotnie stężoną pożywką pełną Hoaglanda. Uprzednio ich system korzeniowy oczyszczano delikatnie z resztek podłoża glebowego. W każdym pojemniku umieszczono po 5 okazów. roślin. Powtórzenie stanowiła pojedyncza roślina. Po 7 dobach dokonano zróżnicowania składu pożywek zgodnie z założeniami zawartymi w tabeli 1. W trakcie trwania eksperymentów pożywkę systematycznie napowietrzano oraz dokonywano jej wymiany w odstępach 3-dobowych.

Doświadczenia wegetacyjne przeprowadzono w komorze wzrostowej, w kontrolowanych warunkach wzrostu roślin: temperatura +25°C, wilgotność względna powietrza 60%, fotoperiod 12/24h, natężenie PAR 1000 μmol·m⁻²·s⁻¹ (Fot. 2). Każde z doświadczeń zostało przeprowadzone w trzech powtórzeniach w czasie.

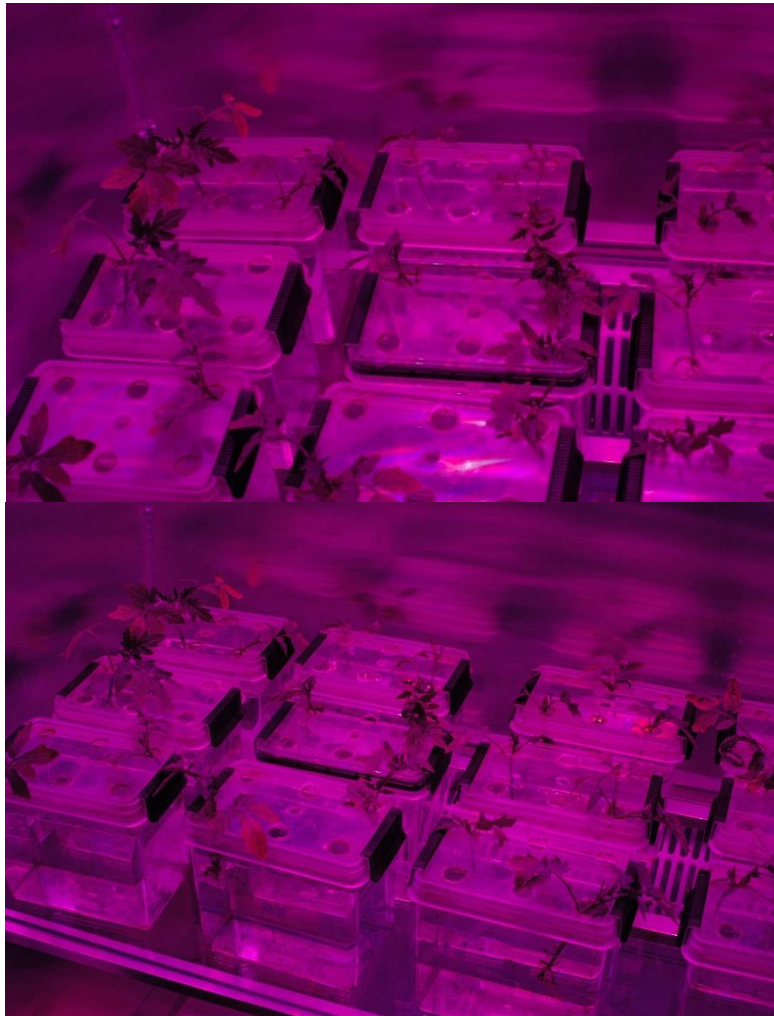


Fot. 2 Komora wzrostowa w Pracowni Fizjologii Roślin i Entomologii, Katedry Bioinżynierii
Źródło: fotografie autora.

Układ pojedynczego doświadczenia przedstawiono na ryc. 1 oraz fot. 3.



Ryc. 1 Schemat doświadczenia hydroponicznego gdzie Sx – stężenie odpowiedniego pierwiastka, zależnie od doświadczenia A lub B



Fot. 3 Układ doświadczenia – pojemniki z roślinami w komorze
wegetacyjnej

Źródło: fotografie autora.

2.3 Metody badań fizjologicznych i biochemicznych, pomiarów biometrycznych oraz analiz laboratoryjnych

Wybrane cechy fizjologiczne oraz biochemiczne badanego gatunku określono w pięciu terminach dla każdego powtórzenia w czasie, po upływie 48 i 96 godzin oraz 7, 14 i 28 dób od zróżnicowania składu pożywki, czyli ekspozycji roślin na czynniki doświadczalne. Pomiarów biometrycznych roślin, określenia składu chemicznego materiału roślinnego oraz wycieku elektrolitów z tkanek dokonano po upływie 28 dób.

Wykonano oznaczenia następujących cech doświadczalnych:

- **zawartości chlorofilu „a”, „b” oraz chlorofilu całkowitego w liściach** - metodą Arnona i in. (1956) w modyfikacji Lichtenthalera i Welburna (1983) – określono w 6 powtórzeniach, w tych samych terminach i liściach, w których wykonywano pomiary wymiany gazowej;
- **zawartości karotenoidów w liściach** – metodą Hagera i Mayera-Berthnratha (1966) – określono w 6 powtórzeniach, w tych samych terminach i liściach, w których wykonywano pomiary wymiany gazowej.

Próbki świeżej masy liści, o wadze ok. 0,03 g pobierano korkoborem i ucierano z 10 cm³ 80-procentowego acetonu w celu ekstrakcji barwników. Następnie homogenaty wirowano w temperaturze pokojowej, przez 10 min przy 1500 obrotach na minutę. Gęstość optyczną supernatantów oznaczano za pomocą spektrofotometru Marcel Mini przy długościach fal: 440, 645 i 663 nm.

Zawartość oznaczanych barwników asymilacyjnych obliczono według następujących wzorów:

- zawartość chlorofilu „a”:

$$[12,7 \text{ (EK 663)} - 2,69 \text{ (EK 645)}] \cdot \frac{V}{\text{św.m.}};$$

- zawartość chlorofilu „b”:

$$[22,9 \text{ (EK 645)} - 4,68 \text{ (EK 663)}] \cdot \frac{V}{\text{św.m.}};$$

- zawartość chlorofilu całkowitego:

$$[20,2 \text{ (EK 645)} + 8,02 \text{ (EK 663)}] \cdot \frac{V}{\text{św.m.}};$$

- zawartość karotenoidów:

$$[4,16 \text{ (EK 440)} - 0,89 \text{ (EK 663)}] \cdot \frac{V}{\text{św.m.}};$$

gdzie EK – ekstynkcja przy określonej długości fali

v- objętość acetonu zużytego do ekstrakcji

św.m. – świeża masa próbki w g

Zawartość barwników wyrażono w $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ św.m. rośliny;

- **parametrów wymiany gazowej roślin** – natężenia procesu asymilacji CO_2 (A), intensywności transpiracji (E), przewodnictwa szparkowego dla wody (g_s) oraz stężenia CO_2 w przestworach międzykomórkowych miękiszu asymilacyjnego (c_i). Pomiary wykonano przenośnym gazowym analizatorem TPS-2, (PP Systems International, Inc., Amesbury, MA, USA) przy zastosowaniu standardowych ustawień, wyposażonym w komorę pomiarową PLC4, pracującą w systemie otwartym. Oznaczeń dokonano na w pełni wyrosniętych, losowo wybranych, zdrowych liściach właściwych, pierwszej i drugiej pary, w 15 powtórzeniach (analizowano po trzy liście z każdej rośliny). Odczytu z ekranu aparatu, dokonano po ustabilizowaniu się wartości. Poszczególne parametry wymiany gazowej wyrażano w następujących jednostkach: A ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), E ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), g_s ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) i c_i ($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$).

- **parametrów fluorescencji chlorofilu „a”**

Pomiary parametrów indukcji fluorescencji chlorofilu „a” wykonano i zarejestrowano z wykorzystaniem spektrofluorymetru HANDY– PEA (Hansatech Instruments Ltd, Norfolk, UK), w oparciu o standardową procedurę aparatu. Pomiary prowadzono na w pełni wyrosniętych, zdrowych liściach o takim samym położeniu na roślinach i podobnej orientacji do światła, które zacieniano na 20 minut przed pomiarem za pomocą fabrycznych klipsów. Oznaczenia wykonano w 10 powtórzeniach.

Oznaczono następujące parametry:

$F_V = F_M - F_0$ - fluorescencji zmiennej, wyznaczanej po adaptacji ciemniowej.

F_0 - fluorescencja początkowa, będąca wynikiem strat energii wzbudzenia podczas jej przekazywania w antenach energetycznych,

F_M - fluorescencja maksymalna (wyznaczona po adaptacji ciemniowej).

Parametry te pozwoliły na wyliczenie:

F_V / F_M – maksymalna potencjalna efektywność reakcji fotochemicznej w PS II wyznaczana po adaptacji ciemniowej.

PI (Performance Index) – wskaźnik witalności PS II, dotyczy ogólnej żywotności tego systemu;

-
- **wskaźnika względnej zawartości wody w liściach (RWC)** – według Yamasaki i Dillenburga (1999). Pomiary wykonano na w pełni wyrosniętych, wybranych losowo liściach pierwszej i drugiej pary. Wskaźnik RWC (%) wyliczono według wzoru $[(\text{św.m.}-\text{s.m.})/(\text{m.n.}-\text{s.m.})] \cdot 100$, gdzie św. m. – świeża masa próbki, m.n. – masa próbki przy pełnym turgorze, s.m. – sucha masa próbki;
 - **wycieku elektrolitów z tkanek liści – według Lutts’a i in. (1996)** Oznaczenie wykonano w 3 powtórzeniach, na w pełni wyrosniętych, losowo wybranych liściach, które pocięto na fragmenty o średnicy 1 cm. Fragmenty przepłukano trzykrotnie wodą destylowaną, a następnie umieszczono w kolbkach zawierających 10 cm³ wody destylowanej. Przewodnictwo elektrolityczne roztworu (L_T) mierzono po 24 godzinach. Następnie próbki ogrzewano w łaźni wodnej w temperaturze 98° C przez 20 minut. Kolejnego pomiaru (L_0) przewodnictwa dokonano po ochłodzeniu próbek do temperatury 25° C. Wyciek elektrolitów określono jako wartość procentową wynikającą ze stosunku L_T/L_0 ;
 - **powierzchni asymilacyjnej liści** – z wykorzystaniem aparatu Nikon D500 oraz oprogramowania Easy Leaf Area. Metoda opata jest o analizę zdjęć cyfrowych w wysokiej rozdzielczości i określenie stosunku liczby pikseli barw w zakresie odcieni zieleni, w stosunku do liczby pikseli barwy czerwonej, zajmujących obszar o określonej powierzchni w cm² (element kontrolny). Pozwala to na sumaryczną ocenę powierzchni liści w obrębie zdjęcia (Fot. 4).



Fot. 4 Liście pomidora wraz z elementem kontrolnym, wykorzystane w analizie powierzchni liści, z zastosowaniem programu Easy Leaf Area

Źródło: fotografie autora.

- **zawartości wybranych pierwiastków w części nadziemnej.** Zawartość potasu, sodu, wapnia i magnezu oznaczono metodą ASA (atomowej spektrometrii absorbcyjnej), z zastosowaniem spektrofotometru serii iCE 3000 (ThermoScientific, Waltham, Massachusetts, USA). Metoda polega na pomiarze absorpcji promieniowania lampy katodowej przez wolne atomy pierwiastka w badanej próbce (zmineralizowanej na mokro w mieszaninie HNO₃ i HClO₄ w proporcjach 1:1). Uzyskane wyniki posłużyły do określenia równoważnikowego stosunku zawartości K:(Ca+Mg). W analizie wykorzystano materiał biologiczny pochodzący zarówno z korzeni jak i nadziemnej części roślin.
- **aktywność katalazy (CAT) w roślinie** - metodą Lück'a (1965). Materiał biologiczny (fragmenty liści) o masie 0,1 g homogenizowano w zamrożonych moździerzach z dodatkiem buforu fosforanowego, przy pH 7,0. Ekstrakty odwirowano przy 14800x g w temperaturze 4°C. Otrzymane supernatanty wykorzystano do określenia aktywności katalazy. Metoda ta polega na pomiarze spadku absorbancji w próbkach, spowodowanego rozkładem H₂O₂ przy długości fali $\lambda = 240$ nm. Aktywność katalazy obliczono stosując molowy wskaźnik absorbancji dla H₂O₂, wynoszący 43,6 i wyrażono w $\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{św.m} \cdot \text{min}^{-1}$
- **aktywność peroksydazy (POX) w roślinie** – metodą Chance i Maehly (1955). 1g tkanki roślinnej pobranej z losowo wybranych, w pełni wyrosniętych, świeżych liści, roztarto w schłodzonym moździerzu z 3 cm³ buforu octanowego, a następnie uzupełniono buforem do 15 cm³. 1 cm³ homogenatu odwirowano do osiągnięcia przejrzystego supernatantu, a następnie rozcieńczono do pomiaru buforem octanowym w stosunku 1:4. Następnie zmieszano 0,9 cm³ buforu octanowego, 0,5 cm³ 0,06 M H₂O₂, 0,5 cm³ pirogalolu oraz 0,1 cm³ ekstraktu i inkubowano przez 4 minuty w temperaturze 30°C. Pomiaru absorbancji dokonano przy wykorzystaniu spektrofotometru Shimadzu UV-1800, przy $\lambda=430$ nm wobec próbki odczynnikowej (1 cm³ buforu octanowego, 0,5 cm³ 0,06 M H₂O₂, 0,5 cm³ pirogalolu bez inkubacji). Próbkę kontrolną stanowi próbka zawierająca 0,9 cm³ buforu octanowego, 0,5 cm³ H₂O₂, 0,5 cm³ pirogarolu oraz 0,1 cm³ ekstraktu.
- **zawartości proliny** – metodą Batesa i in. (1973) Około 500 mg tkanki roślinnej pobranej z losowo wybranych, w pełni wyrosniętych, świeżych liści,

homogenizowano z 10 cm⁻³ 3% roztworu kwasu sulfosalicylowego, a następnie odwirowano przy 22000x g w temperaturze 4°C przez 5 minut.

- Następnie do 2 cm⁻³ otrzymanego supernatantu dodano 2 cm⁻³ kwaśnej nihydryny i 2 cm⁻³ lodowatego kwasu octowego, po czym roztwór umieszczono w zamkniętych korkiem kolbkach i umieszczono w łaźni wodnej o temperaturze 90-100°C. Po upływie 1h, kolbki chłodzono w łaźni lodowej, w temperaturze 4°C. Do każdej kolbki dodano 4 cm⁻³ toluenu i poddano wytrząsaniu przez około 15- 20 sekund, a następnie odstawiono do rozdzielania się faz mieszaniny. Górną fazę przeniesiono do suchych probówek i pozostawiono w temperaturze pokojowej. Pomiaru absorbancji dokonano przy wykorzystaniu spektrofotometru Shimadzu UV-1800, przy długości fali $\lambda=520$ nm. Zawartość wolnej proliny wyrażono w mg·g⁻¹ św. m.

2.4 Metody statystyczne

Uzyskane wyniki badań stanowiące średnie z trzech powtórzeń eksperymentów w czasie, dla każdego z doświadczeń (A i B) osobno, poddano dwuczynnikowej analizie wariancji, w układzie kompletnej randomizacji, z wykorzystaniem programu statystycznego STATISTICA (Statsoft, Kraków, Polska, wersja 12.5).

W celu określenia różnic pomiędzy średnimi dla efektów głównych i dla interakcji dokonano wyróżnienia grup jednorodnych, za pomocą testu Duncana (poziom istotności $\alpha < 0,05$). Dla danych liczbowych dotyczących zawartości barwników asymilacyjnych, parametrów wymiany gazowej oraz fluorescencji chlorofilu „a”, a także wskaźnika RWC, analizę wariancji wykonano osobno dla każdego terminu pomiaru (I – V).

3. Wyniki

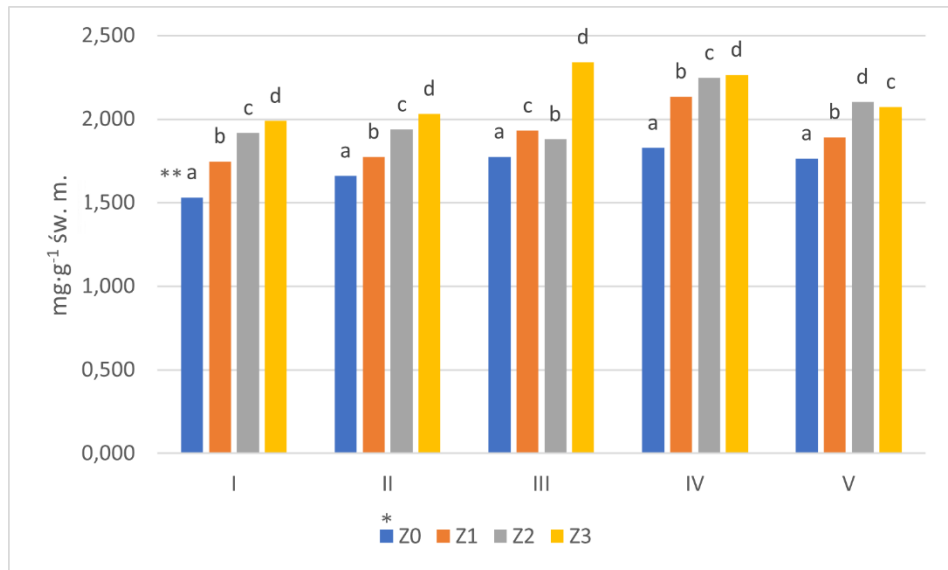
3. 1 Doświadczenie A

3. 1. 1 Zawartość barwników asymilacyjnych w liściach

3. 1. 1. 1 Zawartość chlorofilu „a”

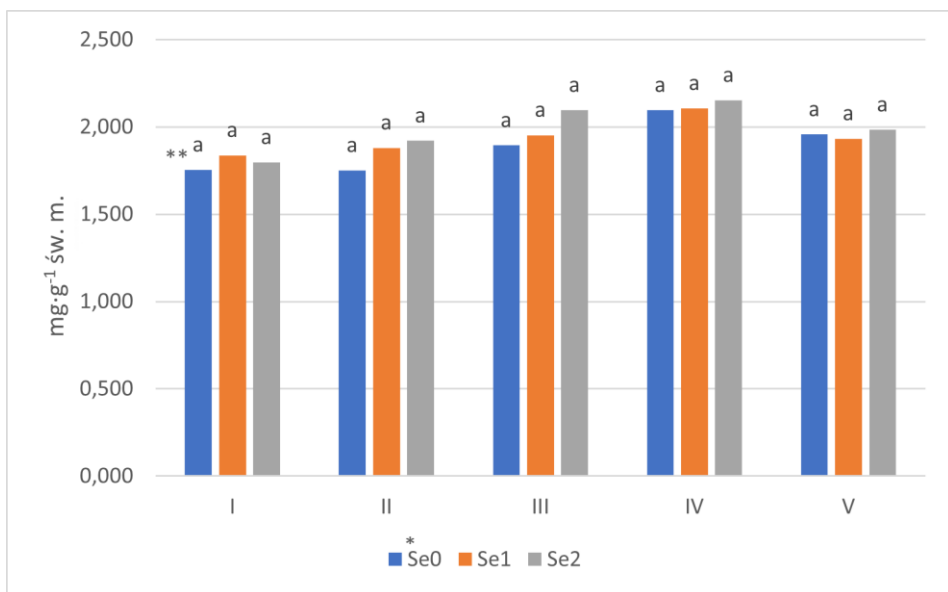
W przypadku wpływu zróżnicowanego stężenia NaCl na zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora, we wszystkich terminach badań zaobserwowano jej wzrost wraz ze zwiększeniem poziomu zasolenia, z czego w czterech terminach (I -IV) największą zawartość chlorofilu „a” stwierdzono w liściach pomidora rosnącego w pożywce o największym stężeniu NaCl (ryc. 1). W żadnym z terminów pomiaru nie stwierdzono wpływu efektu głównego – zróżnicowanego stężenia soli selenu, na zawartość chlorofilu „a” w liściach badanych roślin (ryc. 2).

W przypadku interakcji czynników doświadczalnych wykazano duże zróżnicowanie, niezależnie od terminu pomiaru. Zastosowane żywienie selenem nie wpłynęło na zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora rosnącego w pożywce nie zawierającej NaCl (Z0). W przypadku roślin z pożywek o stężeniu soli Z1 wykazano wzrost zawartości tego barwnika, w porównaniu z kontrolą, po zastosowaniu selenu w stężeniu Se1 i Se2 (I termin badań), S1 (II termin) oraz Se2 (III i IV termin). W ostatnim terminie badań w zasoleniu tym wykazano natomiast zmniejszenie zawartości chlorofilu „a” w kombinacjach Z1Se1 i Z1Se2 w stosunku do kombinacji Z1Se0. W przypadku roślin rosnących w największym stężeniu soli (Z3) zaopatrzenie w selen w stężeniu zarówno Se1 jak i Se2 zwiększyło zawartość analizowanego barwnika – zależność taką wykazano w I i II terminie badań. W III oraz IV terminie stwierdzono natomiast wzrost zawartości chlorofilu „a” po zastosowaniu selenu w stężeniu wyższym (Se2). W V terminie badań, wykazano natomiast zmniejszenie zawartości omawianego barwnika zarówno po wprowadzeniu do pożywki selenu w stężeniu Se1 jak i Se2. Porównując średnie dla interakcji czynników doświadczenia, stwierdzić można, że największą zawartością chlorofilu „a” w liściach w I oraz III terminie badań charakteryzowała się kombinacja Z3Se2 (tab. 2)



Ryc. 2. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora

Objaśnienia: *Z0 – kontrola, Z1 – 50 mmol NaCl·dm⁻³, Z2 – 75 mmol NaCl·dm⁻³, Z3 – 100 mmol NaCl·dm⁻³; **średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy poziomie istotności $\alpha=0,05$; I- V – terminy pomiarów.



Ryc. 3. Wpływ stężenia soli selenu na zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora

Objaśnienia: *Se0 – kontrola, Se1 – 5,0 $\mu\text{mol Na}_2\text{SeO}_4 \cdot \text{dm}^{-3}$, Se2 – 10 $\mu\text{mol Na}_2\text{SeO}_4 \cdot \text{dm}^{-3}$; **średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy poziomie istotności $\alpha=0,05$; I-V – terminy pomiarów.

Tabela 2. Zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora [mg·g⁻¹ św. m.]

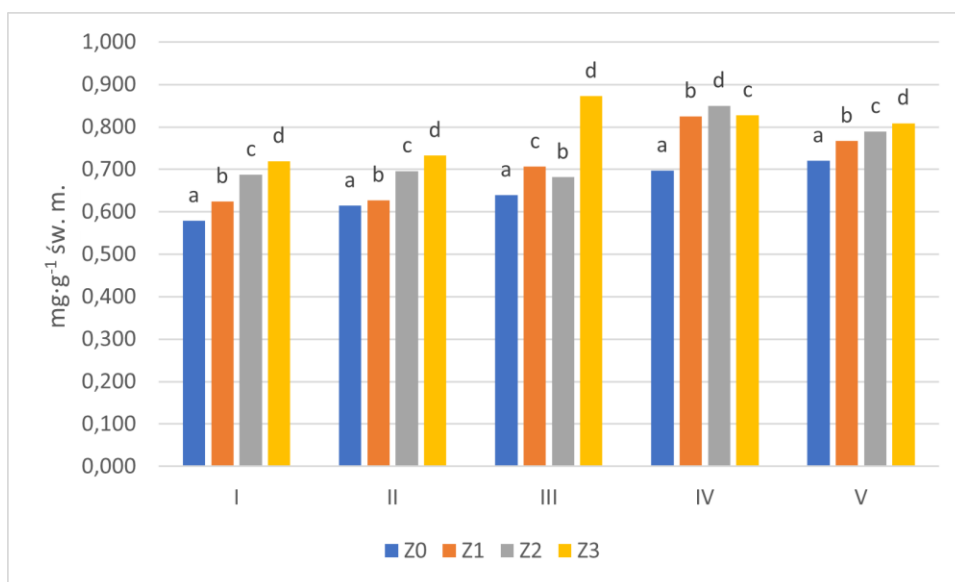
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,40a	2,02e	1,88de	1,69bcd
	Se1	1,61abc	1,73cd	1,99e	2,00e
	Se2	1,56abc	1,48ab	1,87de	2,27f
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,73bcd	1,41a	1,92cde	1,92cde
	Se1	1,52ab	2,00def	1,96cde	2,02f
	Se2	1,71bc	1,89cde	1,91cde	2,14f
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,79bc	1,47a	2,07cde	2,23e
	Se1	1,69ab	2,14de	1,76b	2,24e
	Se2	1,83bcd	2,20e	1,80bc	2,54f
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2,05bcd	1,98bc	2,26def	2,08bcd
	Se1	1,59a	2,40fg	2,20bcd	2,21def
	Se2	1,83ab	2,01bc	2,27def	2,49g
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,43a	2,13def	1,87bcd	2,37f
	Se1	2,04cde	1,75b	2,11def	1,81bcd
	Se2	1,80bcd	1,78bc	2,31ef	2,02cde

Objaśnienia: Se0 – kontrola, Se1 – 5,0 μmol Na₂SeO₄·dm⁻³, Se2 – 10 μmol Na₂SeO₄·dm⁻³, Z0 – kontrola, Z1 – 50 mmol NaCl·dm⁻³, Z2 – 75 mmol NaCl·dm⁻³, Z3 – 100 mmol NaCl·dm⁻³; średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy poziomie istotności α=0,05.

3. 1. 1. 2 Zawartość chlorofilu „b”

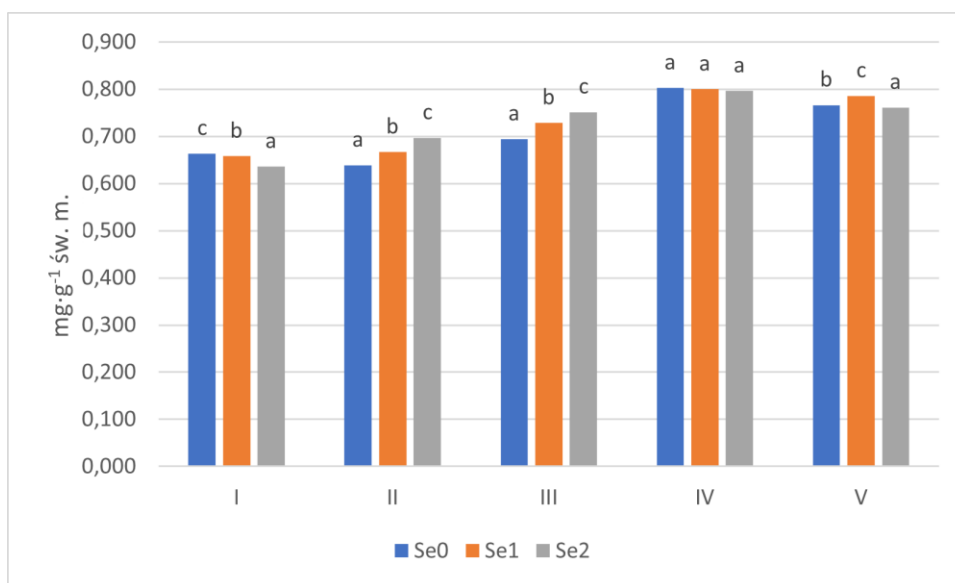
Wykazano wpływ poziomu zasolenia pożywki na zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora. W trzech terminach pomiaru (I, IV i V) zaobserwowano wzrost zawartości tego barwnika wraz ze zwiększeniem stężenia NaCl (ryc. 3). W czterech terminach pomiaru wykazano wpływ dawki selenu na omawianą cechę fizjologiczną. W II i III terminie stwierdzono wzrost wielkości tego parametru wraz ze wzrostem stężenia selenu w pożywce (ryc. 4). We wszystkich terminach pomiaru, stwierdzono zróżnicowany wpływ współdziałania czynników doświadczenia na zawartość chlorofilu „b” w liściach badanego gatunku. W II i III terminie badań, w przypadku roślin rosnących w pożywce o stężeniu soli Z1, dodatek selenu, niezależnie od wielkości dawki zwiększył

zawartość chlorofilu „b” w porównaniu z kontrolą (Z1Se0). Selen zastosowany w wyższej dawce (Se2) zwiększył także zawartość analizowanego barwnika w liściach pomidora rosnącego w pożywce o stężeniu soli Z3 – zależność taką wykazano w II i III terminie pomiaru (tab. 3).



Ryc. 4. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 5. Wpływ stężenia soli selenu na zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 3. Zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora [mg·g⁻¹ św. m.]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,56ab	0,71bc	0,68abc	0,69abc
	Se1	0,60ab	0,63abc	0,72bc	0,66abc
	Se2	0,56ab	0,52a	0,65abc	0,79c
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,62bc	0,51a	0,71cd	0,70bc
	Se1	0,57ab	0,69cd	0,62cd	0,70cd
	Se2	0,64cd	0,67cd	0,68bcd	0,79d
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,65ab	0,53a	0,76bc	0,82c
	Se1	0,62a	0,79c	0,65ab	0,84cd
	Se2	0,63ab	0,79c	0,62a	0,94d
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,82bcd	0,78bcd	0,82bcd	0,76bcd
	Se1	0,59a	0,94d	0,86cd	0,79bcd
	Se2	0,67ab	0,74abc	0,85cd	0,91cd
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,56a	0,83bcd	0,74abcd	0,91d
	Se1	0,88cd	0,74abcd	0,82bcd	0,69ab
	Se2	0,71abc	0,72abc	0,79bcd	0,81bcd

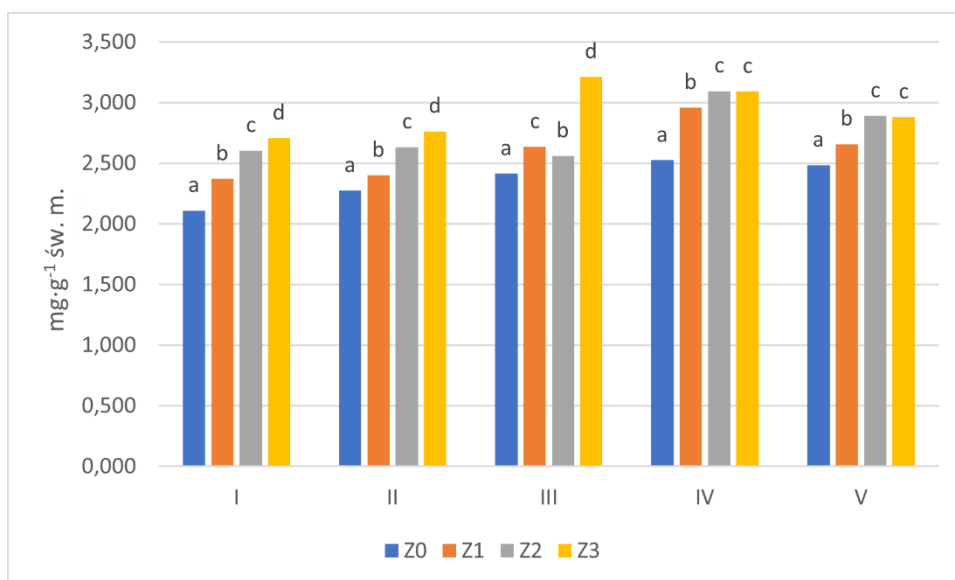
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 1. 3 Zawartość chlorofilu całkowitego

W Stwierdzono wpływ zarówno czynników głównych doświadczenia, jak i ich interakcji na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora. Wzrost stężenia NaCl, niezależnie od poziomu zwiększył zawartość chlorofilu całkowitego, w porównaniu z wariantem kontrolnym (Z0). Największą jego zawartością charakteryzowały się liście pomidora rosnącego w pożywce o zasoleniu Z3 (I–III termin pomiaru) oraz Z2 i Z3 (IV i V termin) (ryc. 6). Analizując wpływ soli selenu, największą zawartość chlorofilu całkowitego w terminach II - V, wykazano w przypadku roślin rosnących w pożywce z dodatkiem selenu w dawce Se2.

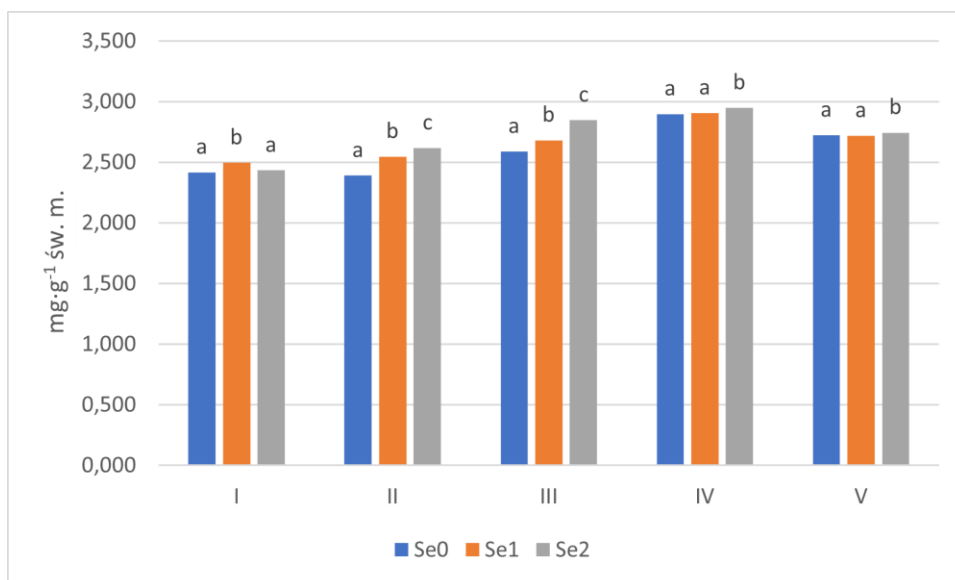
W przypadku współdziałania czynników doświadczalnych, stwierdzono, że zastosowanie selenu w dawce zarówno Se1 jak i Se 2 zwiększyło zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora rosnącego w pożywce o stężeniu soli

Z0 (V termin pomiaru) oraz Z1 (II i III termin). Podobne oddziaływanie selenu, jednakże tylko w wyższej dawce (Se2) zanotowano w V terminie u roślin z wariantu Z2 oraz w I i III terminie, z wariantu Z3. W I oraz III terminie badań największą zawartość chlorofilu całkowitego stwierdzono w liściach roślin z kombinacji Z3Se2 (tab. 4).



Ryc. 6. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 7. Wpływ stężenia soli selenu na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 4. Zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora [$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ św. m.]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	1,97a	2,74de	2,57cd	2,38bcd
	Se1	2,22abc	2,36bcd	2,71de	2,66d
	Se2	2,13ab	2,00ab	2,52cd	3,07e
II termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2,36bc	1,92a	2,64cd	2,62cd
	Se1	2,10ab	2,70cd	2,66cd	2,72cd
	Se2	2,35bc	2,57cd	2,59cd	2,94d
III termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2,45bc	2,01a	2,83cd	3,05d
	Se1	2,31ab	2,90d	2,41b	3,09d
	Se2	2,47bc	2,99d	2,43bc	3,49e
IV termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2,88bcd	2,76bc	3,09cd	2,85bcd
	Se1	2,18a	3,35d	3,06cd	3,01bcd
	Se2	2,50ab	2,75bc	3,12cd	3,40d
V termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2,00a	2,97bc	2,61b	3,29c
	Se1	2,92bc	2,49b	2,94bc	2,50b
	Se2	2,52b	2,50b	3,11c	2,84bc

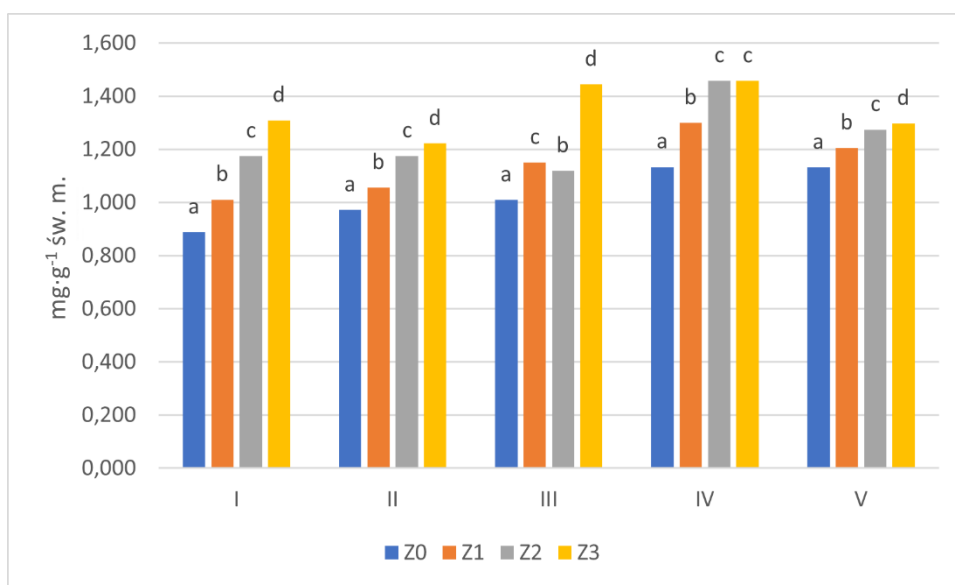
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 1. 4 Zawartość karotenoidów

Wykazano wpływ zarówno czynników głównych jak i ich interakcji na zawartość karotenoidów w liściach pomidora. Największą zawartością tych barwników charakteryzowały się rośliny rosnące w pożywce o zasoleniu na poziomie Z3, a w IV terminie badań Z2 oraz Z3. W trzech terminach pomiaru wykazano wzrost zawartości karotenoidów, wraz ze wzrostem poziomu zasolenia NaCl (ryc. 7). Udowodniono także, że selen w obydwu zastosowanych dawkach zwiększył zawartość tych barwników oznaczoną w trzech pierwszych terminach (ryc. 8).

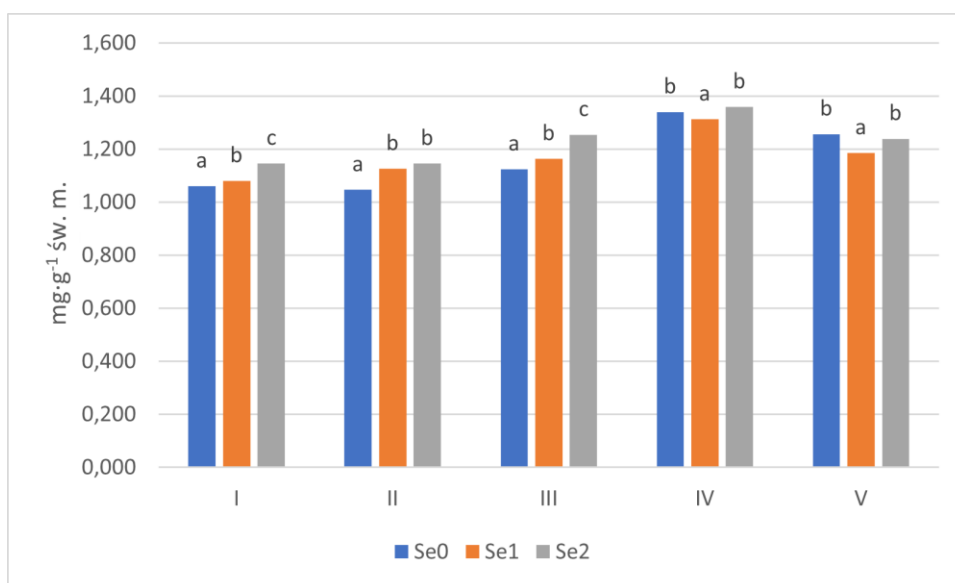
Analizując interakcję czynników doświadczenia, podobnie jak w przypadku chlorofilu całkowitego, w I oraz III terminie pomiaru, największą zawartość karotenoidów stwierdzono w liściach pomidora z kombinacji Z3Se2. Wpływ zastosowanego zaopatrzenia roślin w selen, w warunkach stresu solnego, na omawianą cechę fizjologiczną był zróżnicowany i zależny od poziomu zasolenia oraz terminu

badani. W przypadku roślin rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z1, w pierwszym terminie pomiaru dodatek selenu w obu dawkach zmniejszył zawartość karotenoidów, w kolejnych dwóch terminach natomiast wpłynął na jej zwiększenie. W IV terminie zależność taką zanotowano natomiast tylko w przypadku selenu zastosowanego w stężeniu Se2. W przypadku roślin rosnących w warunkach największego zasolenia (Z3), w I, III oraz IV terminie pomiaru wykazano wzrost zawartości karotenoidów, w stosunku do kontroli, po zastosowaniu selenu w dawce Se2 (tab. 5).



Ryc. 8. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość karotenoidów w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 9. Wpływ stężenia soli selenu na zawartość karotenoidów w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 5. Zawartość karotenoidów w liściach pomidora [mg·g⁻¹ św. m.]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,81a	1,21d	1,16bcd	1,04abcd
	Se1	0,89a	0,97abc	1,19cd	1,25d
	Se2	0,95ab	0,84a	1,17bcd	1,62e
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,0bc	0,79a	1,19cde	1,18cde
	Se1	0,8ab	1,23e	1,18cde	1,20de
	Se2	1,0bcd	1,14cde	1,14cde	1,27e
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,03ab	0,91a	1,20bcd	1,34d
	Se1	0,98a	1,24cd	1,03ab	1,38d
	Se2	1,00ab	1,29cd	1,11abc	1,60e
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,27bcd	1,19abc	1,54de	1,34bcd
	Se1	0,99a	1,49de	1,37bcde	1,39bcde
	Se2	1,13ab	1,21abc	1,45cde	1,63e
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,92a	1,36cd	1,19abc	1,54d
	Se1	1,31bcd	1,08abc	1,28bcd	1,06ab
	Se2	1,15abc	1,16abc	1,34cd	1,28bcd

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

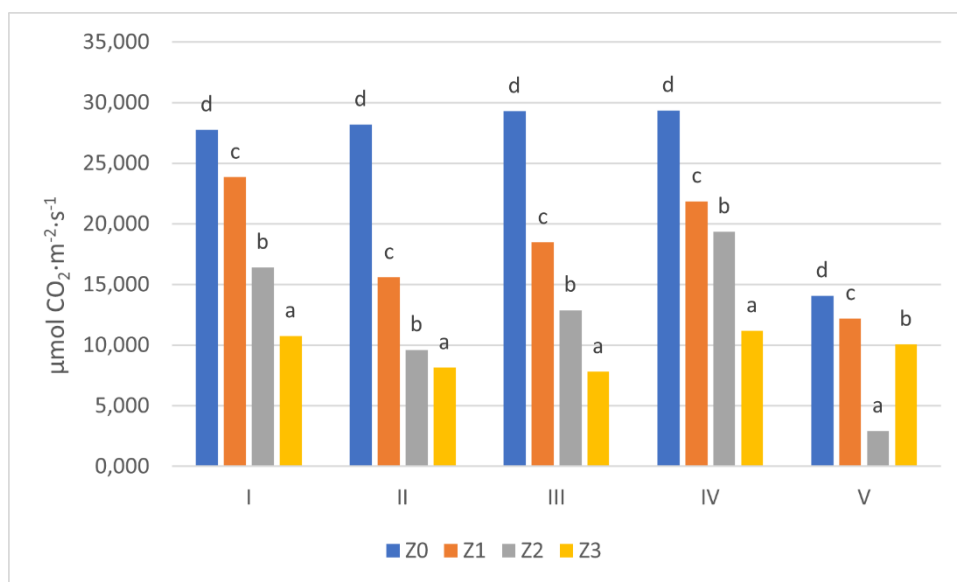
3. 1. 2 Parametry wymiany gazowej

3. 1. 2. 1 Natężenie procesu asymilacji CO₂

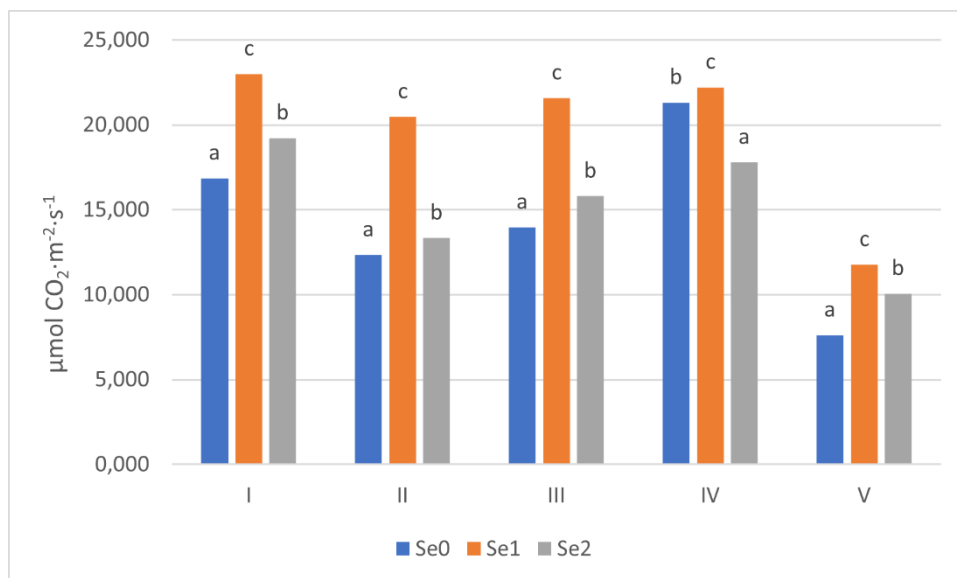
Stwierdzono wpływ zarówno czynników głównych jak i ich interakcji na intensywność procesu asymilacji CO₂. W przypadku wpływu chlorku sodu, we wszystkich terminach badań, największą wartość omawianego parametru stwierdzono u roślin rosnących w kontroli Z0. W pierwszych czterech terminach pomiaru, zwiększanie dawki NaCl powodowało spadek natężenia procesu asymilacji CO₂ (ryc. 9). We wszystkich terminach pomiaru najwyższymi wartościami tej cechy charakteryzowały się rośliny z wariantu Se1. Najmniejsze natężenie asymilacji CO₂ w terminach I, II, III i V, wykazano natomiast u roślin kontrolnych (Se0) (ryc. 10).

Stwierdzono zróżnicowany wpływ współdziałania czynników doświadczenia na natężenie procesu asymilacji CO₂. Charakter wykazanych zmian był zależny od terminu pomiaru. U roślin rosnących w zasoleniu na poziomie kontrolnym, najwyższe wartości

asymilacji CO₂, w terminach I-III zanotowano w wariancie Se1. W przypadku najwyższego zasolenia (Z3), w terminach I-IV, najniższe wartości analizowanego parametru stwierdzono u pomidora rosnącego w pożywce bez dodatku soli selenu. We wszystkich terminach pomiaru, w przypadku roślin z wariantów Z2 i Z3 wykazano wzrost natężenia asymilacji CO₂ po zastosowaniu selenu w stężeniu Se1, w porównaniu z wariantem kontrolnym. Selen zastosowany w wyższym stężeniu (Se2), wpłynął w zróżnicowany, zależny od poziomu drugiego czynnika doświadczalnego sposób na omawianą cechę fizjologiczną. W trzech terminach badań (I, III i V) zwiększył, w porównaniu z kontrolą, intensywność asymilacji CO₂ u pomidora rosnącego w pożywce o największym stężeniu NaCl (tab. 6).



Ryc. 10. Wpływ poziomu zasolenia na natężenie procesu asymilacji CO₂ (A) w liściach pomidora
 Objasnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 11. Wpływ stężenia soli selenu na natężenie procesu asymilacji CO₂ (A) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 6. Intensywność asymilacji CO₂ (A) w liściach pomidora [μmol · m⁻² · s⁻¹]

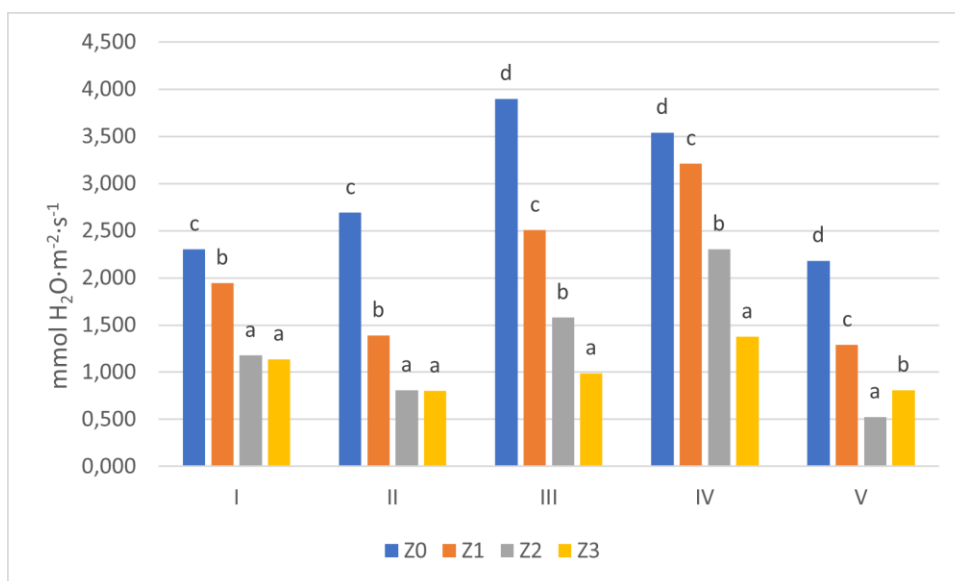
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	26,70f	25,86f	9,53b	5,33a
	Se1	33,93g	26,76f	21,86e	9,43b
	Se2	22,63e	18,93d	17,83c	17,50c
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	28,10e	10,63b	5,06a	5,56a
	Se1	32,50f	23,56d	12,43c	13,40c
	Se2	23,96d	12,56c	11,33b	5,46a
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	26,36e	17,10c	8,13b	4,26a
	Se1	38,46f	16,93c	18,30c	12,63b
	Se2	23,03d	21,40d	12,23b	6,53b
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	34,63h	22,66e	18,26c	9,70a
	Se1	28,26g	22,56e	22,70e	15,33b
	Se2	25,16f	20,36d	17,10c	8,53a
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	17,20fh	5,66c	3,33b	4,26b
	Se1	18,13h	14,50e	1,66a	12,76d
	Se2	6,86c	16,43f	3,76b	13,16d

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 2. 2 Intensywność transpiracji

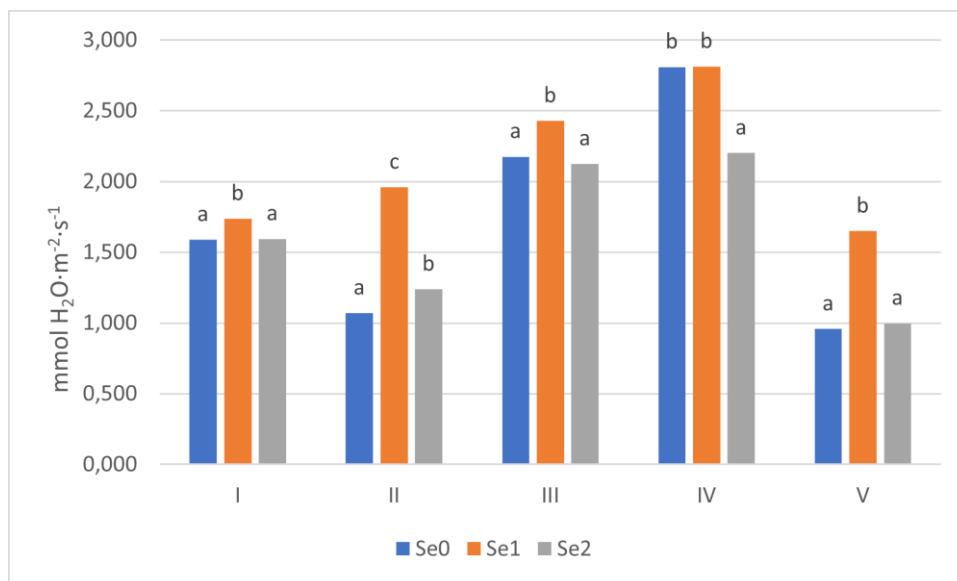
We wszystkich terminach pomiaru intensywności transpiracji, zaobserwowano wpływ czynników głównych na badany parametr. W ocenie wpływu stężenia NaCl, we wszystkich terminach stwierdzono zmniejszenie natężenia transpiracji wraz z jego wzrostem. (ryc. 11). W czterech terminach pomiaru (I, II, III, V) najwyższą intensywnością tego procesu charakteryzowały się rośliny poddane działaniu selenu w stężeniu S1. W terminach I, III i V stwierdzono brak wpływu dawki S2 na badaną cechę względem kontroli (ryc. 12).

Ocena interakcji czynników doświadczalnych, podobnie jak w przypadku intensywności asymilacji wykazała duże zróżnicowanie. Najwyższe natężenie transpiracji stwierdzono w kombinacji Z0Se1 w przypadku czterech terminów badań (I, II, III i V). W terminach II, III i IV najmniejszą intensywnością tego procesu charakteryzowały się rośliny z kombinacji Z3Se0. Selen zastosowany w stężeniu Se1 zwiększył, w porównaniu z kontrolą, intensywność transpiracji pomidora rosnącego w pożywce o podwyższonym stężeniu soli (Z1, Z2 i Z3) – zależność taką zanotowano w terminach II i III. Selen w stężeniu Se2 wpłynął w zróżnicowany sposób na omawianą cechę fizjologiczną pomidora rosnącego w warunkach podwyższonego stężenia NaCl. W ostatnim terminie pomiaru, w pożywkach o stężeniu NaCl na poziomie Z1, Z2 oraz Z3 zwiększył natężenie transpiracji, w porównaniu z kontrolą. Wykazywano także jego wpływ na zmniejszenie intensywności transpiracji np. u roślin z kombinacji Z1 Se2 (I termin) lub Z2Se2 (IV termin) (tab. 7).



Ryc. 12. Wpływ poziomu zasolenia na intensywność transpiracji (E) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 13. Wpływ stężenia soli selenu na intensywność transpiracji (E) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 7. Natężenie transpiracji (E) w liściach pomidora [mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2,26j	2,14i	0,84b	1,10c
	Se1	2,77k	2,05h	1,52d	0,60a
	Se2	1,87g	1,63e	1,16c	1,71f
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2,17f	1,02c	0,56a	0,51a
	Se1	3,57h	1,79e	1,12c	1,35d
	Se2	2,32g	1,35d	0,74b	0,53a
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	3,85i	3,41h	0,86b	0,58a
	Se1	4,51j	1,51e	2,39f	1,30d
	Se2	3,34h	2,59g	1,48de	1,08c
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	3,38e	3,98g	2,67d	1,19a
	Se1	3,41e	3,78f	2,52d	1,53b
	Se2	3,82fg	1,86c	1,71c	1,40b
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2,36g	0,54b	0,34a	0,57b
	Se1	3,30h	1,67f	0,49b	1,12e
	Se2	0,88d	1,65f	0,73c	0,72c

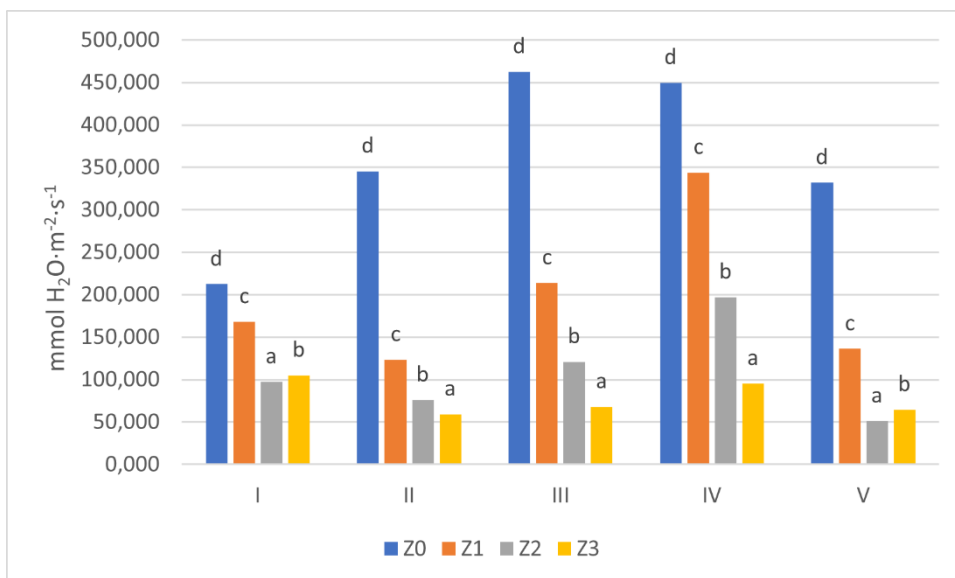
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 2. 3 Przewodnictwo szparkowe dla wody

Wykazano wpływ zarówno czynników głównych doświadczenia jak i ich współdziałania na wartość przewodnictwa szparkowego dla wody w badanych roślinach. W przypadku wpływu chlorku sodu, we wszystkich terminach zaobserwowano najwyższą wartość g_s w kontroli (Z0). W terminach II, III i IV stwierdzono zmniejszenie przewodnictwa szparkowego wraz ze zwiększaniem zasolenia (ryc. 13).

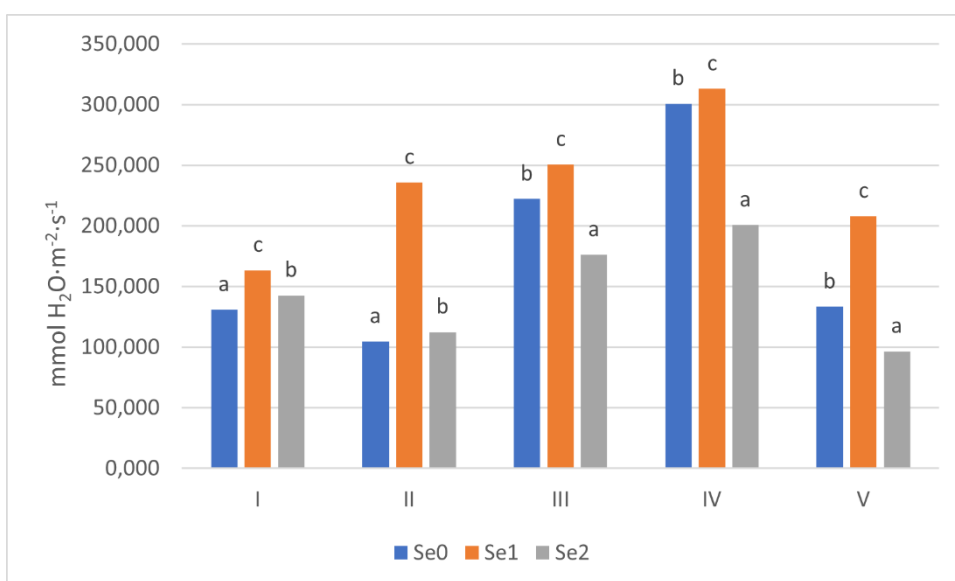
Najniższym przewodnictwem w pierwszych dwóch terminach, charakteryzowały się rośliny z wariantu S0, w kolejnych trzech natomiast z Se2. Jednocześnie we wszystkich terminach pomiaru najwyższa wartość analizowanego parametru obserwowana była u roślin rosnących w pożywce o stężeniu selenu Se1 (ryc. 14).

W ocenie interakcji czynników doświadczenia, we wszystkich terminach wykazano najwyższą wartość badanego parametru u roślin w kombinacji Z0Se1. Najniższą wartość g_s stwierdzono w kombinacji Z2Se0 (terminy I, II i V) oraz Z3Se0 terminy III i IV. Selen zastosowany w stężeniu Se1 wpłynął w zróżnicowany sposób na wartość przewodnictwa szparkowego dla wody. W drugim terminie badań wykazano wzrost g_s w obiektach wariantu Se1, rosnących zarówno w warunkach kontrolnych (Z0) jak i zasolenia na poziomie Z1, Z2 oraz Z3. W terminie I stwierdzono natomiast zmniejszenie przewodnictwa szparkowego w kombinacjach Z1Se1 i Z3Se1 w porównaniu do kombinacji Z1Se0 i Z3Se0. Selen zastosowany w stężeniu Se2 w pożywkach o podwyższonym zasoleniu, na poziomie zarówno Z1 i Z2 jak i Z3, zwiększył przewodnictwo szparkowe w liściach pomidora w porównaniu z kontrolą – zależność taką wykazano między innymi po dłuższej ekspozycji roślin na działanie czynników stresogennych, w V terminie badań. W przypadku obiektów z wariantu Z1, w I, III oraz IV terminie wykazano zmniejszenie wartości g_s po zastosowaniu selenu w stężeniu Se2 (tab. 8).



Ryc. 14. Wpływ poziomu zasolenia na wartości przewodnictwa szparkowego dla wody (g_s) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 15. Wpływ stężenia soli selenu na wartości przewodnictwa szparkowego dla wody (g_s) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 8. Wartości przewodnictwa szparkowego (g_s) dla wody w liściach pomidora [mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	189,66i	183,33hi	67,00a	83,66c
	Se1	268,33j	174,66g	134,33d	76,33b
	Se2	179,00gh	146,33e	90,66c	155,00f
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	241,333f	88,33c	44,33a	44,66a
	Se1	564,333g	167,33e	117,33d	94,33c
	Se2	230,667f	114,66d	66,00b	38,66a
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	474,33f	331,33e	50,33ab	32,66a
	Se1	579,66g	115,00c	208,33d	99,667c
	Se2	333,66e	195,33d	104,33c	71,66b
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	448,33ef	443,33e	234,33d	77,33a
	Se1	464,00f	442,00e	224,33d	121,66b
	Se2	437,00e	146,66c	132,33bc	87,00a
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	414,66h	41,00bc	32,66a	44,66c
	Se1	467,66i	214,33g	75,00d	75,00d
	Se2	113,33e	153,33f	45,66c	74,00d

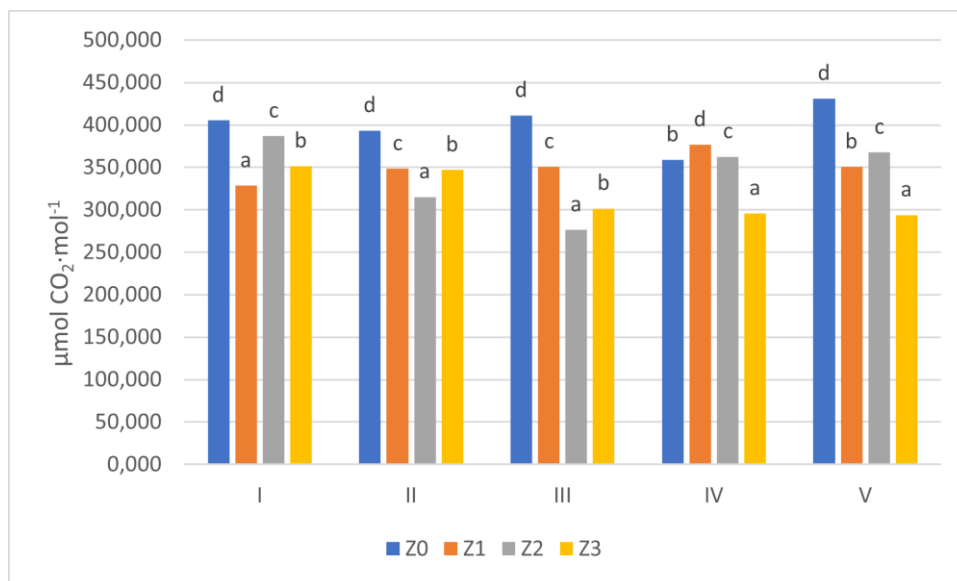
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 2. 4 Stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych mięszku asymilacyjnego

Stwierdzono wpływ zarówno stężenia chlorku sodu jak i stosowanych dawek selenu na wartość parametru c_i w badanych liściach pomidora. W porównaniu z kontrolą, najmniejsze wartości tego parametru cechowały rośliny z wariantu Z1(I termin), Z2 (II i III termin) oraz Z3 (IV i V termin) (ryc. 15). Największe stężenie CO₂ w II i III terminie pomiaru wykazano w przypadku obiektów z wariantu S0, zaś w terminach I i IV S2 (ryc. 16).

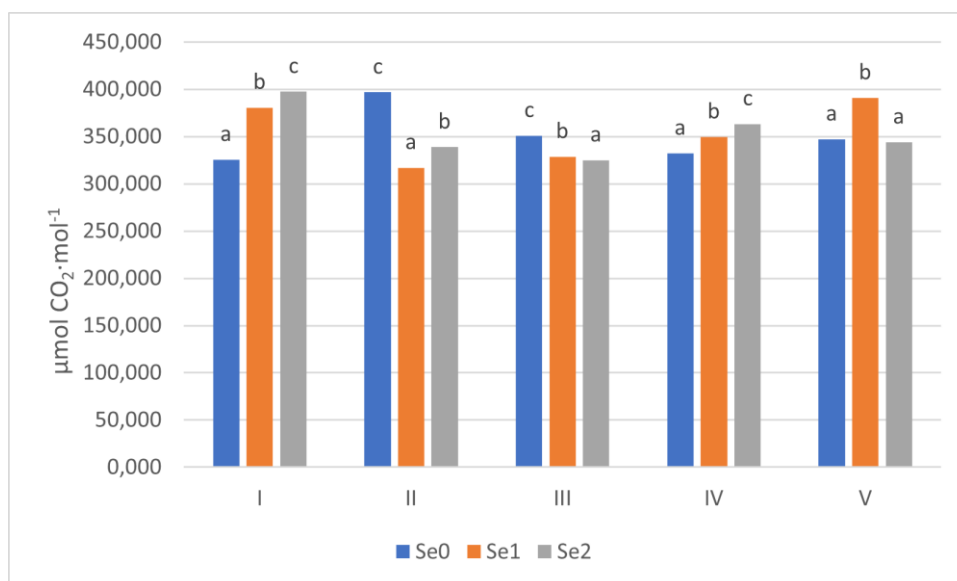
Wykazano wpływ interakcji czynników doświadczalnych na wartość c_i w liściach pomidora. Był on zróżnicowany i zależny od terminu pomiaru. W przypadku obiektów z wariantu Z0 w terminie III oraz Z1 w terminie IV i Z3 w terminie V, wzrost stężenia selenu w pożywce powodował spadek wartości analizowanego parametru. Selen

zastosowany w stężeniu Se1 zmniejszył, w porównaniu do kontroli, wartość c_i w liściach pomidora z wariantów Z1, Z2 oraz Z3, oznaczoną w II terminie pomiaru. W przypadku roślin rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z3 taki wpływ dawki Se1 zanotowano także w III, IV i V terminie. Selen zastosowany w stężeniu Se 2 wpłynął w zróżnicowany sposób na wartość przewodnictwa szparkowego. W I terminie badań, w przypadku obiektów rosnących w podwyższonym zasoleniu (Z1, Z2 i Z3) spowodował on zwiększenie tego parametru. (tab. 9).



Ryc. 16. Wpływ poziomu zasolenia na stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych mięszku asymilacyjnego (c_i) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 17. Wpływ stężenia soli selenu na stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych mięszku asymilacyjnego (c_i) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 9. Stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych mięksiszu asymilacyjnego (c) w liściach pomidora [μmol CO₂·mol⁻¹]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	376,33e	330,33c	286,66a	309,00b
	Se1	377,00e	303,33b	485,66g	357,00d
	Se2	462,33f	351,33d	388,33e	388,33e
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	389,33d	375,66d	441,33e	381,33d
	Se1	448,66e	285,66b	251,66a	282,33b
	Se2	341,66c	383,66d	252,66a	377,00d
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	452,33h	341,00de	268,66c	341,66de
	Se1	414,00g	362,00ef	330,00d	208,66a
	Se2	366,66f	349,00def	230,33b	354,33ef
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	289,33b	400,66f	368,33cd	270,66b
	Se1	397,00de	396,00de	372,00cde	233,00a
	Se2	390,00de	333,00c	347,33bc	383,33de
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	427,33ef	309,33bc	322,33c	330,00cd
	Se1	450,66f	407,33e	423,66ef	282,00ab
	Se2	415,00e	334,66cd	357,00d	269,66a

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

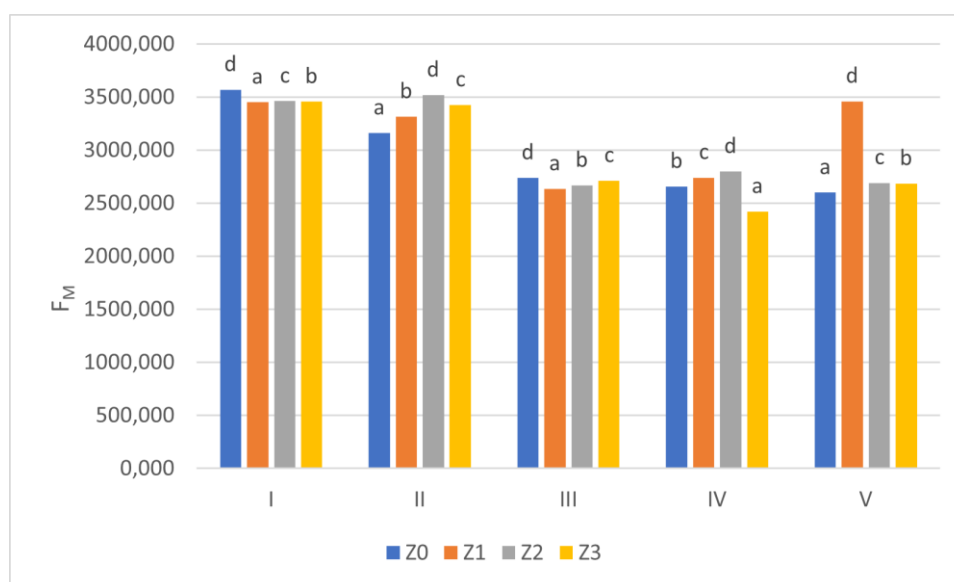
3. 1. 3 Parametry fluorescencji chlorofilu „a”

3. 1. 3. 1 Fluorescencja maksymalna (F_M)

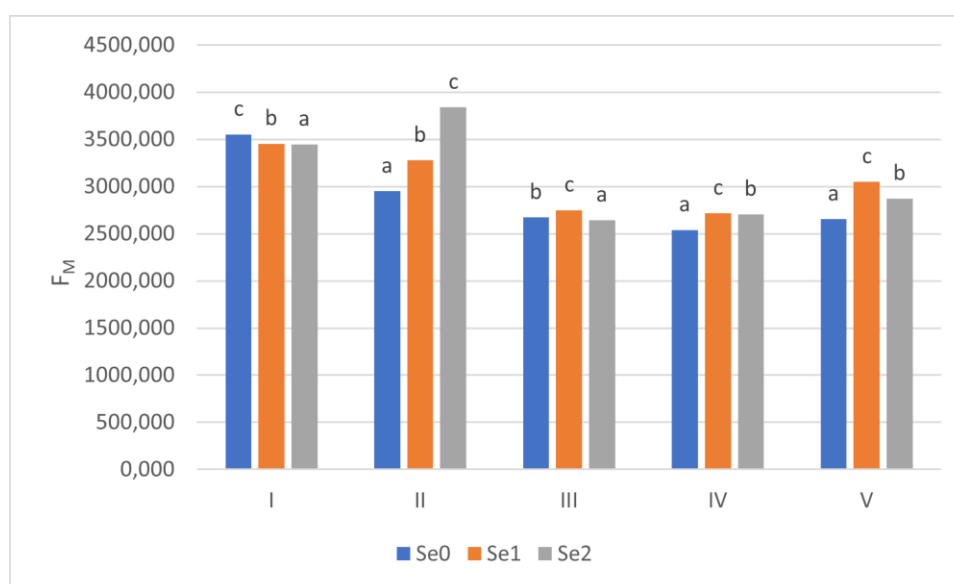
Podwyższone stężenie NaCl spowodowało zmniejszenie, w porównaniu z kontrolą (Z0) wartości FL maksymalnej – zależność taką wykazano w I oraz III terminie pomiaru. W terminach II oraz V rośliny rosnące w warunkach podwyższonego zasolenia wykazywały natomiast wyższe wartości F_M (ryc. 17).

W przypadku wpływu dawek soli selenu, stwierdzono wzrost wartości tego parametru względem kontroli (Se0) w II, III, IV i V terminie pomiaru, przy czym w terminie III zaobserwowano go jedynie u roślin z wariantu Se1. W terminach III, IV i V, najwyższymi wartościami FL maksymalnej charakteryzowały rośliny z wariantu Se1 (ryc. 18).

Analizując interakcję czynników doświadczalnych stwierdzono, że selen niezależnie od dawki zwiększał wartość F_M w liściach roślin z wariantów Z2 oraz Z3 – zależność taką wykazano w II terminie pomiaru. W przypadku obiektów wariantu Z1 wzrost F_M obserwowano w tym terminie jedynie po zastosowaniu selenu w wyższej dawce (Se2). Ponadto korzystny wpływ selenu w tej dawce na zwiększenie F_L maksymalnej stwierdzono w II terminie u roślin z wariantu Z1 (tab. 10).



Ryc. 18. Wpływ poziomu zasolenia na wartości fluorescencji maksymalnej (F_M) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 19. Wpływ stężenia soli selenu na wartości fluorescencji maksymalnej (F_M) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 10. Wartości fluorescencji maksymalnej (F_M) w liściach pomidora

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	3753,33b	3532,33ab	3310,66a	3613,66ab
	Se1	3434,33ab	3367,00a	3624,00ab	3391,66a
	Se2	3521,00ab	3455,66ab	3449,66ab	3364,66a
II termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2968,00a	3173,00a	2889,00a	2767,00a
	Se1	2705,66a	2891,00a	3711,66b	3798,33b
	Se2	3809,33b	3881,00b	3954,66b	3711,66b
III termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2873,00b	2637,33ab	2293,00a	2882,66b
	Se1	2688,66ab	2685,33ab	2912,66b	2712,66ab
	Se2	2653,66ab	2582,00ab	2796,33ab	2541,66ab
IV termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2449,00a	2449,00a	2894,33a	2368,00a
	Se1	2963,00a	2734,66a	2785,66a	2385,66a
	Se2	2559,66a	3040,00a	2713,66a	2508,66a
V termin					
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2695,00ab	3252,33bc	2165,33a	2505,66ab
	Se1	2531,00ab	3805,33c	2965,33ab	2898,66ab
	Se2	2571,66ab	3323,66bc	2946,33ab	2648,66ab

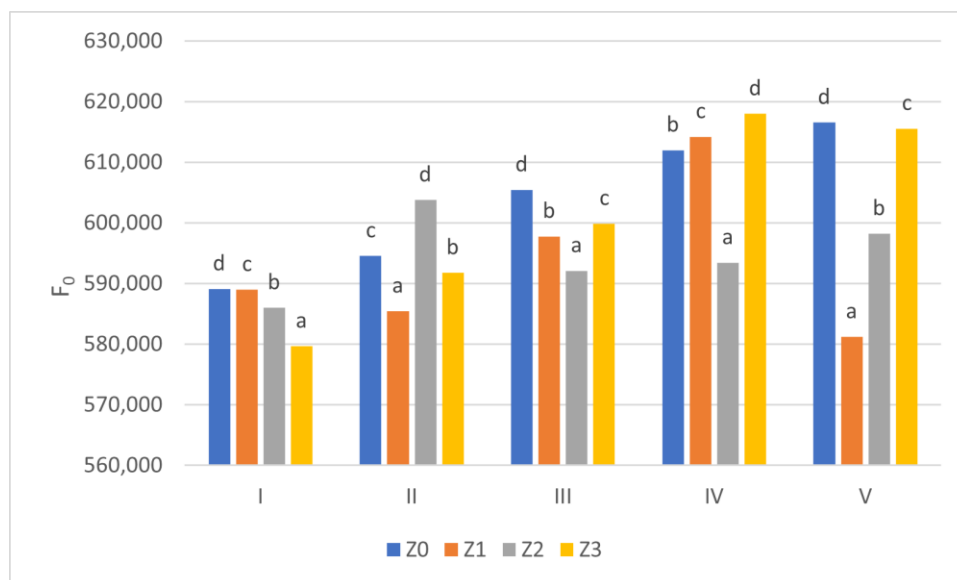
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 3. 2 Fluorescencja początkowa (F_0)

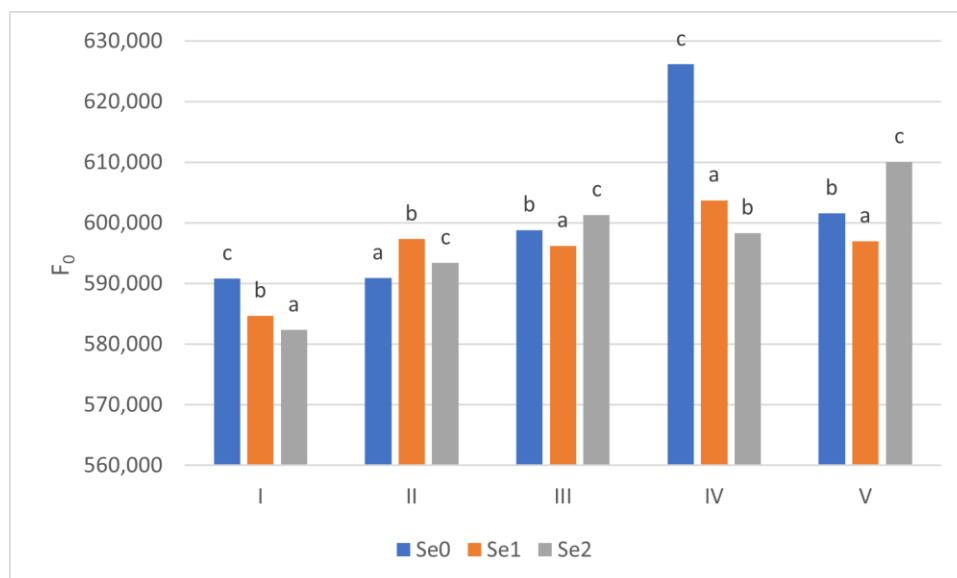
We wszystkich terminach pomiaru zaobserwowano wpływ czynników głównych na wartość parametru FL początkowej w liściach pomidora. Zastosowane poziomy stężenia NaCl w pożywce wpłynęły w zróżnicowany sposób na wartość F_0 . Podwyższony poziom zasolenia niekorzystnie zwiększał F_0 jedynie w terminie II (w przypadku wariantu Z2) oraz IV – w przypadku Z1 oraz Z3. W trzech terminach oznaczeń (I, III, i V) wykazano natomiast zmniejszenie, w porównaniu z kontrolą, wartości FL początkowej pod wpływem zasolenia (ryc. 19). Zastosowana sól selenu, w zróżnicowany sposób wpłynęła na wskaźnik F_0 , w zależności od stężenia oraz terminu pomiaru. Selen w dawce Se1 we wszystkich terminach pomiaru, poza terminem II, korzystnie zmniejszał, w stosunku do kontroli, wartość FL początkowej. W przypadku dawki (Se2), zależność taką wykazano tylko w dwóch terminach (I i IV). Dodatek soli selenu, a w szczególności

w wyższym stężeniu powodował także wzrost wskaźnika F_0 – zależność taką wykazano w II, III i V terminie (ryc. 10).

Analizując interakcję czynników doświadczenia, jedynie w IV terminie badań wykazano korzystne oddziaływanie soli selenu w stężeniu Se1 na zmniejszenie wartości wskaźnika FL początkowej w liściach pomidora z wariantu Z2 (tab. 11).



Ryc. 20. Wpływ poziomu zasolenia na wartości fluorescencji początkowej (F_0) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 21. Wpływ stężenia soli selenu na wartości fluorescencji początkowej (F_0) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 11. Wartości fluorescencji początkowej (F_0) w liściach pomidora

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	604,33a	589,00a	583,667a	586,33a
	Se1	573,00a	596,66a	588,000a	581,00a
	Se2	590,00a	581,33a	586,33a	571,66a
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	600,66ab	573,00a	595,00ab	595,00ab
	Se1	596,66ab	598,33ab	604,33ab	590,00ab
	Se2	586,33ab	585,00ab	612,00b	590,33ab
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	614,66a	588,00a	587,00a	605,66a
	Se1	595,66a	593,66a	587,66a	608,00a
	Se2	606,00a	611,66a	601,66a	586,00a
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	632,00b	632,00b	608,66b	632,00b
	Se1	629,00b	605,33b	562,66a	618,00b
	Se2	575,00ab	605,33b	609,00b	604,00b
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	629,33cd	584,00ab	589,00abc	604,00abcd
	Se1	596,00abcd	585,33abc	597,66abcd	609,00abcd
	Se2	624,33bcd	574,33a	608,00abcd	633,66d

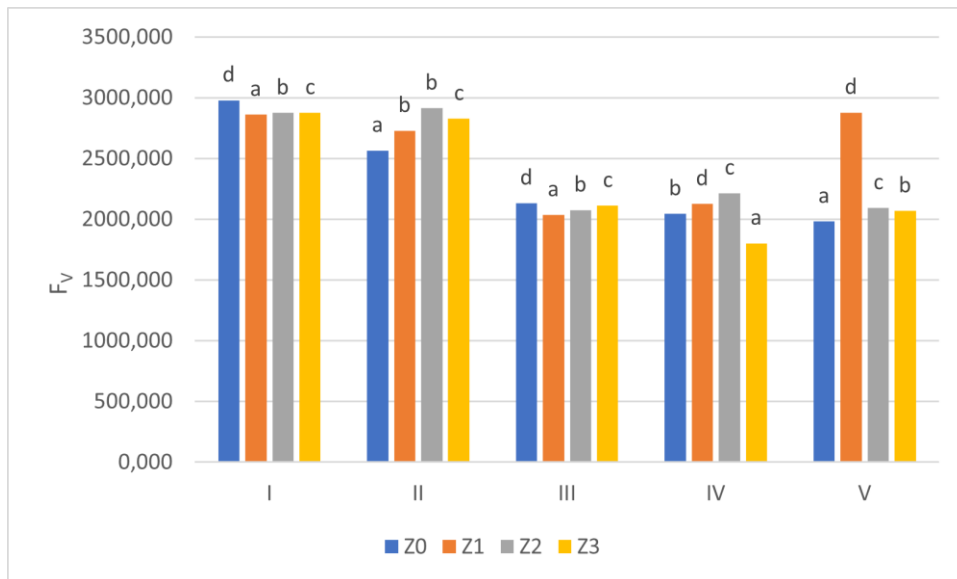
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 3. 3 Fluorescencja zmienna (F_v)

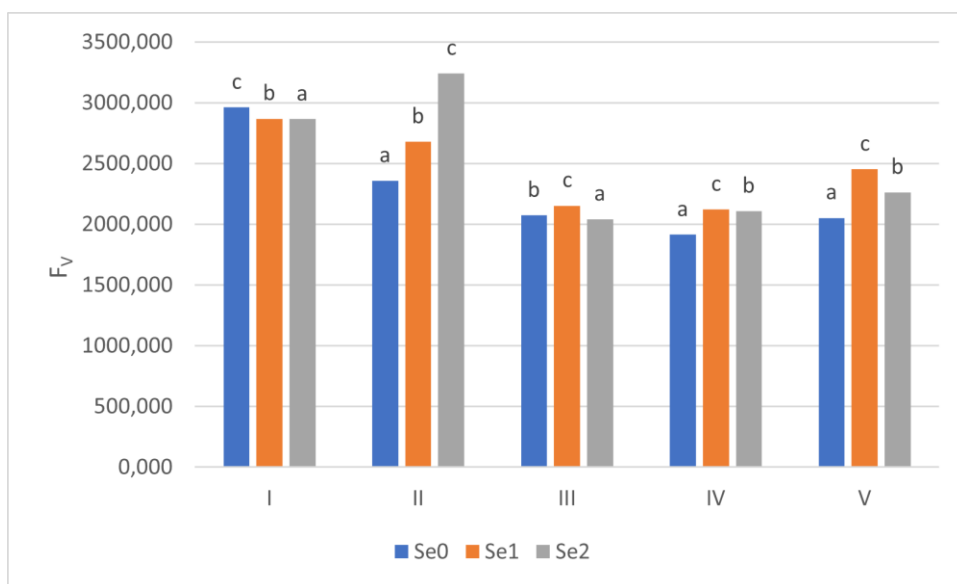
W przypadku wpływu zasolenia, niezależnie od jego poziomu zaobserwowano zmniejszenie wartości wskaźnika FL zmiennej względem kontroli w terminach I i III oraz zwiększenie w terminach II i V (ryc. 21). Dodatek soli selenu do pożywki wpłynął na wartość parametru F_v w badanych roślinach. W trzech terminach pomiaru (III, IV i V) najwyższą wartość tej cechy stwierdzono u roślin z wariantu Se1. Najniższą wartością F_v cechowały się natomiast liście pomidorów z wariantu kontrolnego (Se0) – zależność taką wykazano w II, IV i V terminie (ryc. 22).

Analiza interakcji czynników doświadczenia wykazała, że zastosowanie soli selenu, niezależnie od stężenia korzystnie wpłynęło na zwiększenie wartości wskaźnika fluorescencji zmiennej u roślin z wariantów Z2 i Z3 (II termin). Ponadto u obiektów wariantu Z2 zaobserwowano także wzrost, w porównaniu z kontrolą, wartości F_v po zastosowaniu selenu w dawce Se1 w III terminie badań. Selen w dawce Se2 wpłynął

natomiast na wzrost wartości wskaźnika F_v u roślin wariantu Z1, w II terminie badań. a w (tab. 12).



Ryc. 22. Wpływ poziomu zasolenia na wartości fluorescencji zmiennej (F_v) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 23. Wpływ stężenia soli selenu na wartości fluorescencji zmiennej (F_v) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 12. Wartości fluorescencji zmiennej (Fv) w liściach pomidora

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	3149,00b	2943,33ab	2727,00a	3027,33ab
	Se1	2861,33ab	2770,33a	3036,00ab	2810,66ab
	Se2	2931,00ab	2874,33ab	2863,33ab	2793,00a
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2367,33a	2600,00a	2294,00a	2172,00a
	Se1	2109,00a	2292,66a	3107,33b	3208,33b
	Se2	3223,00b	3296,00b	3342,66b	3105,00b
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2258,33ab	2049,33ab	1706,00a	2277,00ab
	Se1	2093,00ab	2091,66ab	2325,00b	2104,66ab
	Se2	2047,66ab	1970,33ab	2194,66ab	1955,66ab
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1817,00a	1817,00a	2285,66a	1736,00a
	Se1	2334,00a	2129,33a	2257,00a	1767,66a
	Se2	1984,66a	2434,66a	2104,66a	1904,66a
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2065,66ab	2668,33bc	1576,33a	1901,66ab
	Se1	1935,00ab	3220,00c	2367,66abc	2289,66ab
	Se2	1947,33ab	2749,33bc	2338,33ab	2015,00ab

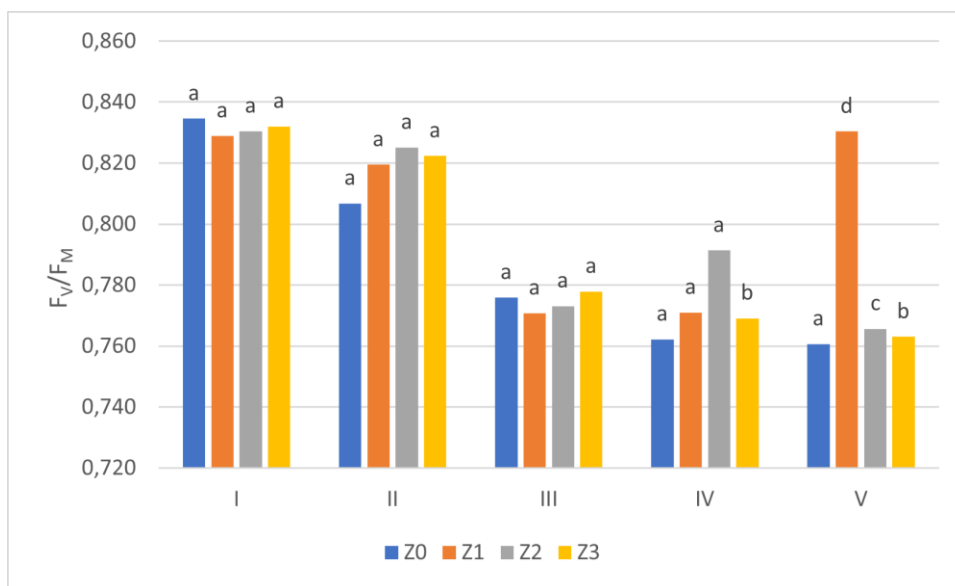
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 3. 4 Maksymalna fotochemiczna wydajność PSII (Fv/F_M)

Stężenie NaCl wpłynęło na wartość wskaźnika F_V/F_M jedynie w IV i V terminie pomiaru. Najwyższą wartość tego parametru wykazano w przypadku obiektów wariantu Z1 (ryc. 23). Jedynie w dwóch terminach pomiaru (II i V) stwierdzono wpływ soli selenu na wartość F_V/F_M w badanych roślinach. W II terminie zaobserwowano wzrost badanej cechy fizjologicznej wraz ze zwiększaniem dawki selenu. W V terminie najwyższym wskaźnikiem F_V/F_M charakteryzowały się natomiast rośliny wariantu Se1 (ryc. 24).

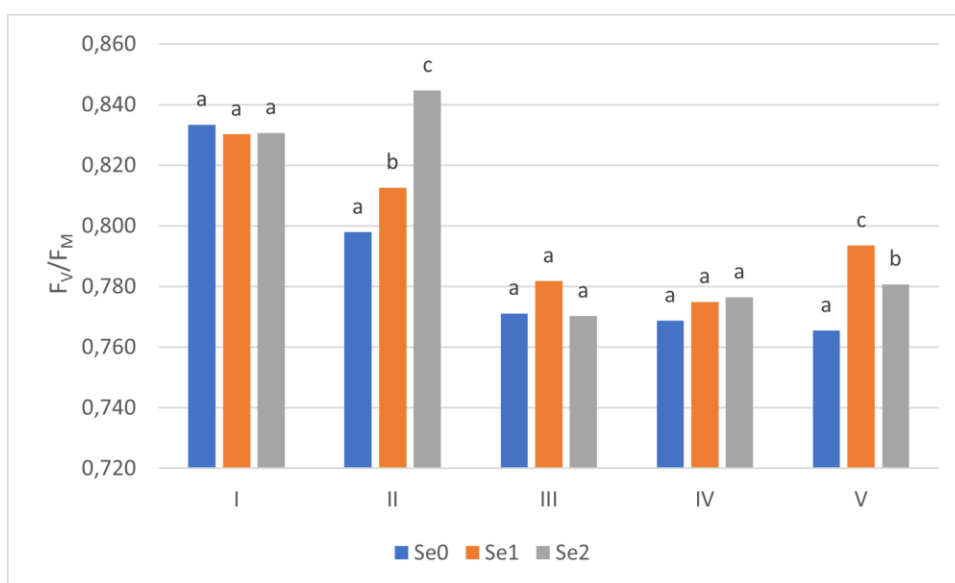
Analizując istotność współdziałania czynników doświadczalnych, w II terminie pomiaru stwierdzono, że wprowadzenie soli selenu, niezależnie od dawki korzystnie wpłynęło na wzrost wskaźnika F_V/F_M u obiektów rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z2 oraz Z3. W terminie II, u pomidora wariantu Z1 wykazano natomiast

zmniejszenie wartości stosunku FL zmiennej do maksymalnej po zastosowaniu selenu w stężeniu Se1 (tab. 13).



Ryc. 24. Wpływ poziomu zasolenia na stosunek fluorescencji zmiennej do maksymalnej (F_v/F_M) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 25. Wpływ stężenia soli selenu na stosunek fluorescencji zmiennej do maksymalnej (F_v/F_M) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 13. Wartości stosunku fluorescencji zmiennej do maksymalnej (F_v/F_M) w liściach pomidora

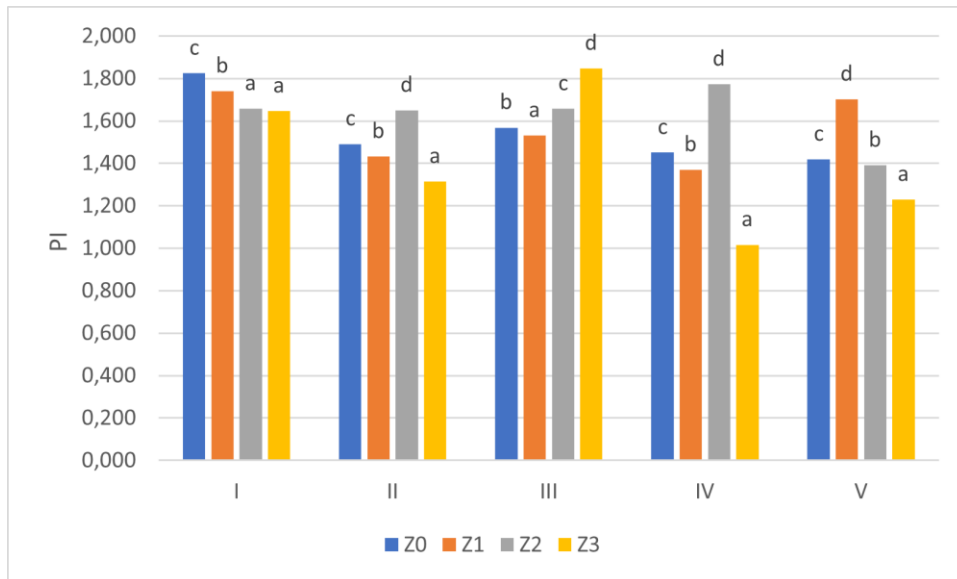
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,83b	0,83ab	0,82ab	0,83ab
	Se1	0,83ab	0,82ab	0,83ab	0,82ab
	Se2	0,83ab	0,83ab	0,83ab	0,83ab
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,79ab	0,81bc	0,79ab	0,78a
	Se1	0,77a	0,79a	0,83cd	0,84cd
	Se2	0,84cd	0,84d	0,84cd	0,83cd
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,78ab	0,77ab	0,73a	0,79ab
	Se1	0,77ab	0,77ab	0,79b	0,77ab
	Se2	0,76ab	0,76ab	0,78ab	0,76ab
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,73ab	0,73ab	0,78ab	0,73a
	Se1	0,77abc	0,77ab	0,81c	0,74ab
	Se2	0,77abc	0,79bc	0,77ab	0,75abc
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,76ab	0,82bc	0,72a	0,75ab
	Se1	0,76ab	0,84c	0,78abc	0,77abc
	Se2	0,75ab	0,82bc	0,78abc	0,75ab

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

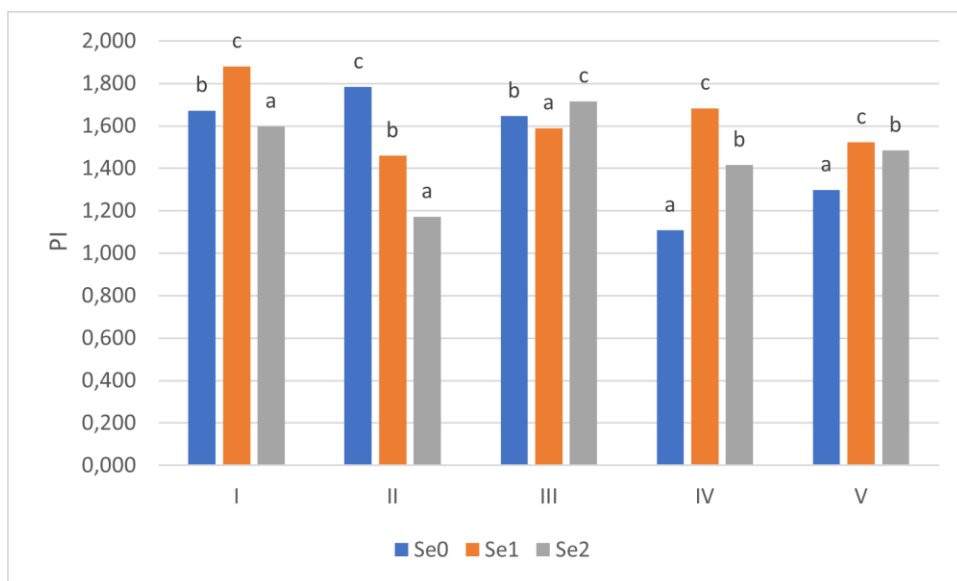
3. 1. 3. 5 Wskaźnik witalności PS II (PI)

Wpływ zastosowanego stężenia NaCl na wartość wskaźnika witalności PI był różnicowany, zależny od poziomu zasolenia oraz terminu pomiaru. Największą jego wartość w I terminie pomiaru wykazywały rośliny kontrole, w II i IV obiekty z wariantu Z2, w III z Z3 zaś w V z wariantu Z1 (ryc. 25). We wszystkich terminach pomiaru, dodatek soli selenu powodował zmiany wartości parametru PI względem kontroli (Se0). W I i IV terminie pomiaru największy wskaźnik PI charakteryzował rośliny z wariantu Se1, w III i V natomiast z Se2. W terminie II zauważono spadek wartości PI wraz ze zwiększaniem dawki selenu (ryc. 26).

Analiza współdziałania czynników doświadczenia wykazała, że selen zastosowany w dawce Se2 zwiększył, w porównaniu z kontrolą (Se0) wartość wskaźnika PI w liściach pomidorów rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z2 (tab. 14).



Ryc. 26. Wpływ poziomu zasolenia na wartości wskaźnika witalności PS II (PI) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 27. Wpływ stężenia soli selenu na wartości wskaźnika witalności PS II (PI) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 14. Wartości wskaźnika witalności PS II (PI) w liściach pomidora

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,33a	1,65a	1,41a	2,29a
	Se1	2,23a	2,05a	2,22a	1,00a
	Se2	1,89a	1,51a	1,33a	1,64a
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	2,20c	1,64bc	1,85bc	1,43b
	Se1	1,61bc	1,44b	1,58bc	1,18ab
	Se2	0,65a	1,21ab	1,50bc	1,32ab
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,38ab	1,57ab	1,68ab	1,94b
	Se1	1,47ab	1,20a	1,64ab	2,02b
	Se2	1,84ab	1,81ab	1,63ab	1,57ab
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,91a	0,91a	1,67ab	0,93a
	Se1	1,75ab	1,68ab	2,20b	1,08a
	Se2	1,68ab	1,50ab	1,43ab	1,03a
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,50abc	1,45abc	0,94a	1,29abc
	Se1	1,39abc	2,28c	1,10ab	1,31abc
	Se2	1,36abc	1,36abc	2,12bc	1,08ab

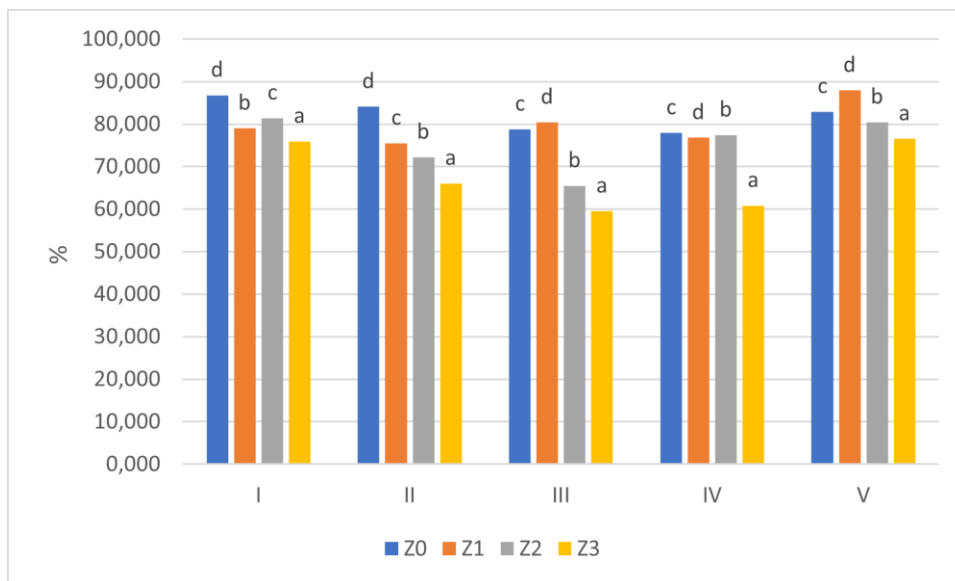
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 4 Wskaźnik względnej zawartości wody w liściach (RWC)

Zróżnicowane dawki chlorku sodu i soli selenu wpłynęły na względną zawartość wody w liściach pomidora. Analizując wpływ stężenia NaCl, we wszystkich terminach pomiaru najniższą wartość RWC stwierdzono u roślin wariantu Z3. W I i II terminie oznaczeń dodatek chlorku sodu, niezależnie od stężenia, powodował spadek względnej zawartości wody w liściach w porównaniu z kontrolą (Z0) (ryc. 27). W II, IV i V terminie pomiaru, najwyższe wartości wskaźnika RWC wykazano w liściach obiektów wariantu Se1. W dwóch ostatnich terminach badań, zastosowanie selenu, niezależnie od stężenia zwiększyło wartość wskaźnika RWC (ryc. 28).

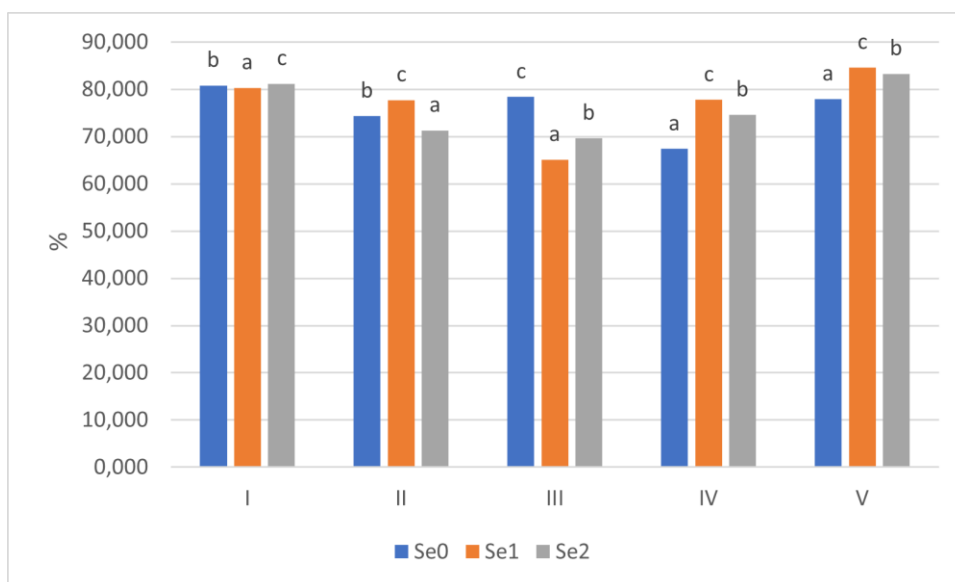
Na podstawie analizy interakcji czynników doświadczenia, w większości terminów pomiarów, nie wykazano istotnego oddziaływania soli selenu na zwiększenie względnej zawartości wody w liściach pomidora rosnącego w warunkach zróżnicowanego stężenia NaCl w pożywce. Jedynie w III terminie badań u obiektów wariantu Z2 i Z3 stwierdzono

zmniejszenie wskaźnika RWC, w porównaniu z kontrolą, po zastosowaniu selenu w stężeniu odpowiednio Se1 i Se2 (tab. 15).



Ryc. 28. Wpływ poziomu zasolenia na wskaźnik względnej zawartości wody (RWC) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 29. Wpływ stężenia soli selenu na wskaźnik względnej zawartości wody (RWC) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 2.

Tabela 15. Wskaźnik względnej zawartości wody w liściach pomidora - RWC [%]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	85,29bc	77,10ab	81,80bc	79,03abc
	Se1	83,30bc	86,80bc	84,76bc	66,43a
	Se2	91,66c	73,10ab	77,64abc	82,35bc
II termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	86,38c	74,02abc	72,22abc	64,62ab
	Se1	82,74bc	82,52bc	73,14abc	72,56abc
	Se2	83,10c	69,91abc	71,21abc	60,95a
III termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	82,41b	79,21b	74,43b	77,51b
	Se1	73,79b	81,22b	50,09a	55,34ab
	Se2	80,15b	80,78b	71,92b	45,69a
IV termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	75,33abc	64,00abc	69,83abc	60,36ab
	Se1	79,57bc	84,08c	82,27bc	65,13abc
	Se2	78,88abc	82,31bc	80,13bc	57,017a
V termin					
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	82,86bcd	74,89ab	76,90abc	77,09abc
	Se1	81,19abcd	93,30cd	76,73abc	87,23bcd
	Se2	84,69bcd	95,52d	87,70bcd	65,25a

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 5 Zawartość proliny

Analiza zawartości wolnej proliny w liściach, wykazała wpływ zarówno czynników głównych doświadczenia, jak i ich interakcji. Zwiększenie stężenia soli selenu względem kontroli (Se0), skutkowało zmniejszeniem zawartości proliny w liściach pomidora, co w szczególności uwidoczniło się w przypadku obiektów wariantu Se1. Wykazano wzrost zawartości proliny w liściach pomidora wraz ze zwiększającym się stężeniem NaCl.

W przypadku roślin z wariantów Z1 i Z2, najmniejszą zawartość proliny stwierdzono po zastosowaniu selenu w dawce Se1. U pomidora rosnącego w warunkach najwyższego stężenia NaCl (Z3) dodatek selenu, niezależnie od dawki zmniejszył zawartość proliny względem kombinacji kontrolnej (Z3Se0). Szczególnie duży spadek zanotowano w kombinacji Z3Se2 (tab. 16).

Tabela 16. Zawartość proliny w liściach pomidora [mg · g⁻¹ św. m.]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	1,94a	4,53b	4,13b	12,46e	5,78c
	Se1	1,89a	2,87a	2,98a	10,77d	4,63a
	Se2	2,48a	4,58b	7,37c	6,95c	5,34b
	Średnia	2,10a	3,99b	4,82c	10,07d	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 6 Aktywność katalazy i peroksydazy

Stwierdzono wpływ czynników głównych doświadczenia oraz ich interakcji na aktywność oznaczanych enzymów. Zwiększenie stężenia soli selenu względem kontroli (Se0), niezależnie od jego poziomu skutkowało wzrostem aktywności katalazy. Wraz ze wzrostem stężenia NaCl wykazano zmniejszenie aktywności katalazy w liściach pomidora. U obiektów wariantu Z3 była ona ponad dwukrotnie niższa w porównaniu z kontrolą (Z0).

W przypadku interakcji czynników doświadczalnych, w zasoleniu na poziomie Z1 stwierdzono spadek aktywności katalazy w porównaniu z kontrolą (Z1Se0) po zastosowaniu soli selenu zarówno w stężeniu Se1 jak i Se2. p W przypadku pozostałych wariantów stężenia NaCl (Z0, Z2 i Z3) wprowadzenie soli selenu, niezależnie od wielkości dawki skutkowało wzrostem aktywności tego enzymu w porównaniu z kontrolą. (tab. 17)

Tabela 17. Aktywność katalazy w liściach pomidora [μmol H₂O₂ · g⁻¹ św.m. · min⁻¹]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	25,85g	23,49f	10,90b	8,92a	17,29a
	Se1	33,10i	13,89d	12,04c	14,06d	18,27c
	Se2	28,78h	17,19e	13,93d	10,68b	17,64c
	Średnia	29,24d	18,19c	12,29b	11,22a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

Największą aktywność tego enzymu wykazano u roślin wariantu Se1, najmniejszą natomiast Se0. Wykazano wzrost aktywności peroksydazy wraz ze zwiększaniem dawki chlorku sodu.

W przypadku wpływu współdziałania czynników na omawianą cechę doświadczalną stwierdzono, że zastosowanie soli selenu zarówno w stężeniu Se1 jak i Se2, niezależnie od poziomu zasolenia NaCl zwiększyło aktywność peroksydazy w porównaniu z kombinacją kontrolną. (we wszystkich stopniach zasolenia zaobserwowano wzrost aktywności peroksydazy wraz ze zwiększaniem dawki soli selenu. Jedynie u roślin z kombinacji Z3Se2, wartość tej cechy była niższa niż w kontroli (Z3Se0) (tab. 18).

Tabela 18. Aktywność peroksydazy w liściach pomidora [$\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{św.m.} \cdot \text{min}^{-1}$]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	2,98a	3,13b	3,13b	3,84e	3,27a
	Se1	4,25h	3,49d	4,09g	4,09g	3,98c
	Se2	3,44c	4,40i	3,89f	3,49d	3,80b
	Średnia	3,55a	3,67b	3,71c	3,81d	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 7 Wyciek elektrolitów z tkanek liści

Wzrost stężenia NaCl, niezależnie od jego poziomu zwiększył wyciek elektrolitów z tkanek liści badanego gatunku. Największą jego wartość, wyższą w porównaniu z kontrolą (Z0) o 58%, stwierdzono w najwyższym zasoleniu (Z3). Wzrastające stężenie soli selenu także wpłynęło na wzrost omawianej cechy fizjologicznej. W przypadku interakcji czynników doświadczalnych u obiektów rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z0 oraz Z1 stwierdzono zwiększenie wycieku elektrolitów wraz ze wzrostem dawki selenu. W przypadku obiektów wariantu Z3, selen zastosowany zarówno w stężeniu Se1 jak i Se2, spowodował spadek tej cechy w porównaniu z kombinacją kontrolną (Z3Se0) (tab. 19).

Tabela 19. Wyciek elektrolitów (L_T/L_0) w liściach pomidora [%]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na_2SeO_4	Se0	30,28a	76,63e	78,21f	112,54k	74,42a
	Se1	45,41b	78,29g	95,04i	83,84h	75,65b
	Se2	49,02c	94,92k	74,04d	94,32j	78,08c
	Średnia	41,57a	83,28c	82,43b	96,90d	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 8 Zawartość wybranych pierwiastków w części nadziemnej

Wykazano wpływ zarówno czynników głównych jak i ich interakcji na zawartość wszystkich oznaczanych pierwiastków w materiale roślinnym. Najmniejszą zawartość magnezu, potasu oraz sodu stwierdzono w roślinach wariantu Z3. W przypadku K, zasolenie na poziomie Z1 i Z2 spowodowało wzrost zawartości tego pierwiastka w stosunku do zawartości w wariacie Z0 (tab. 22).

Udowodniono także spadek zawartości magnezu i sodu pod wpływem zwiększania dawki selenu. Rośliny z wariantu Se2 charakteryzowały się natomiast najwyższą zawartością wapnia i potasu (tab. 22).

Dodatek selenu do pożywki wpłynął w zróżnicowany sposób na zawartość wszystkich oznaczanych pierwiastków, w zależności od jego dawki oraz poziomu stężenia NaCl. Np. w przypadku zawartości magnezu i potasu u roślin wariantu Z3 wykazano jej wzrost, w porównaniu z kombinacją kontrolną (Z3Se) po zastosowaniu selenu w dawce Se1 i spadek po Se2.

Selen wprowadzony do pożywki w dawce Se2 zwiększył zawartość wapnia, w porównaniu z kombinacją kontrolną u roślin rosnących w pożywce o największym stężeniu NaCl. Najmniejszą zawartość sodu stwierdzono w roślinach kombinacji Z2Se2, największą natomiast w Z1Se0. U roślin rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z0, Z1 oraz Z2 selen zastosowany zarówno w dawce Se1 jak i Se2 zmniejszył, w porównaniu z kombinacjami kontrolnymi, kumulację sodu w roślinach. W przypadku roślin wariantu Z3 zależność taką zanotowano dla wyższej dawki soli selenu (tab. 20).

Tabela 20. Zawartość wybranych pierwiastków w części nadziemnej pomidora [g·kg⁻¹]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Mg						
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	11,14i	9,68e	12,91k	5,15b	9,72c
	Se1	11,12hi	9,62d	10,56f	7,43c	9,68b
	Se2	10,91g	11,11h	12,47j	3,77a	9,57a
	Średnia	11,05c	10,14b	11,98d	5,45a	
Ca						
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	37,00g	22,98a	36,47e	38,64i	33,77b
	Se1	37,10h	39,31j	24,41c	23,86b	31,17a
	Se2	36,61f	32,944	49,93k	52,41l	42,97c
	Średnia	36,90b	31,74a	36,94b	38,30c	
K						
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	61,29h	92,20k	55,63e	25,29b	58,61b
	Se1	61,50i	45,03d	58,26g	40,87c	49,82a
	Se2	57,40f	99,99l	69,18j	18,67a	61,31c
	Średnia	60,06b	76,95d	61,02c	28,28a	
Na						
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	74,53k	81,73l	68,38h	47,64c	68,07c
	Se1	72,67j	67,69g	66,23e	51,12d	64,43b
	Se2	70,52i	66,97f	33,64a	34,39b	51,38a
	Średnia	72,57d	72,13c	56,08b	44,38a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

Wykazano wpływ zróżnicowanego stężenia NaCl w pożywce na wartość stosunku równoważnikowego K: (Ca+Mg). Była ona najmniejsza w roślinach wariantu Z3, największa natomiast w Z1. W przypadku wpływu współdziałania czynników na tę cechę doświadczalną najmniejsza wartość stosunku K: (Ca+Mg) charakteryzowała kombinację Z3Se2 (0,16), największa zaś Z1Se0 – 1,22 (tab. 21).

Tabela 21. Stosunek równoważnikowy zawartości K: (Ca+Mg) w części nadziemnej pomidora

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
K:(Ca+Mg)						
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	0,57f	1,22i	0,50d	0,28b	0,64a
	Se1	0,57f	0,36c	0,72g	0,58f	0,56a
	Se2	0,54e	1,00h	0,50d	0,16a	0,55a
	Średnia	0,56b	0,86c	0,57b	0,34a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

3. 1. 9 Powierzchnia liści

Wykazano zmniejszenie sumarycznej powierzchni asymilacyjnej liści wraz ze wzrostem poziomu zasolenia NaCl. Jednocześnie stwierdzono, iż dodatek selenu do pożywki, niezależnie od wielkości dawki korzystnie oddziaływał na wzrost powierzchni liści. Wykazano także istotność współdziałania czynników eksperymentu. W przypadku obiektów Z1, Z2 oraz Z3, dodatek selenu, niezależnie od wielkości dawki zwiększał powierzchnię asymilacyjną liści (tab. 22).

Tabela 22. Sumaryczna powierzchnia asymilacyjna liści pomidora [cm²/roślina]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na ₂ SeO ₄	Se0	116,09l	91,59e	78,91c	68,72a	88,82a
	Se1	113,70k	95,19h	89,49d	97,45j	98,95c
	Se2	93,63f	94,07g	95,44i	74,28b	89,35b
	Średnia	107,80d	93,61c	87,94b	80,15a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 2.

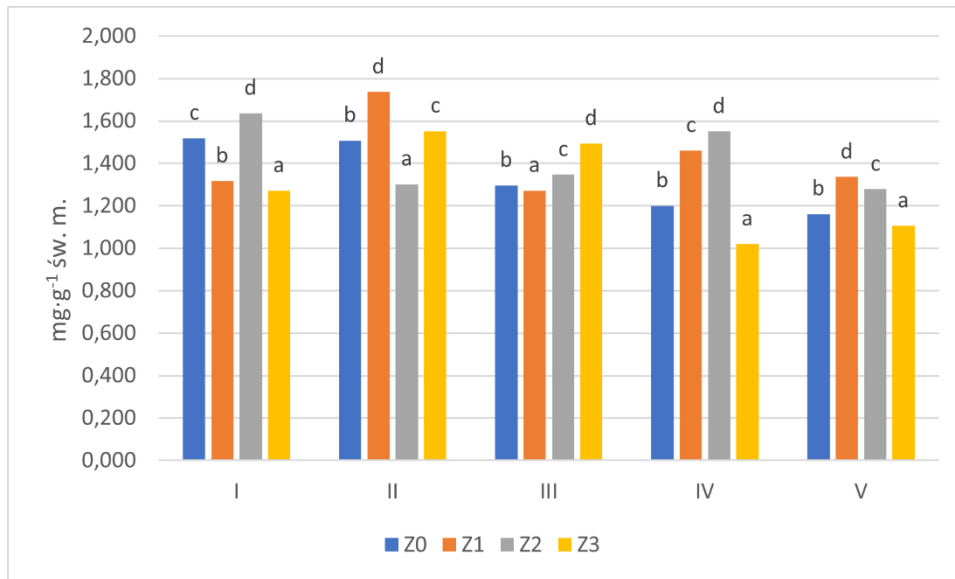
3. 2 Doświadczenie B

3. 2. 1 Zawartość barwników asymilacyjnych w liściach

3. 2. 1. 1 Zawartość chlorofilu „a”

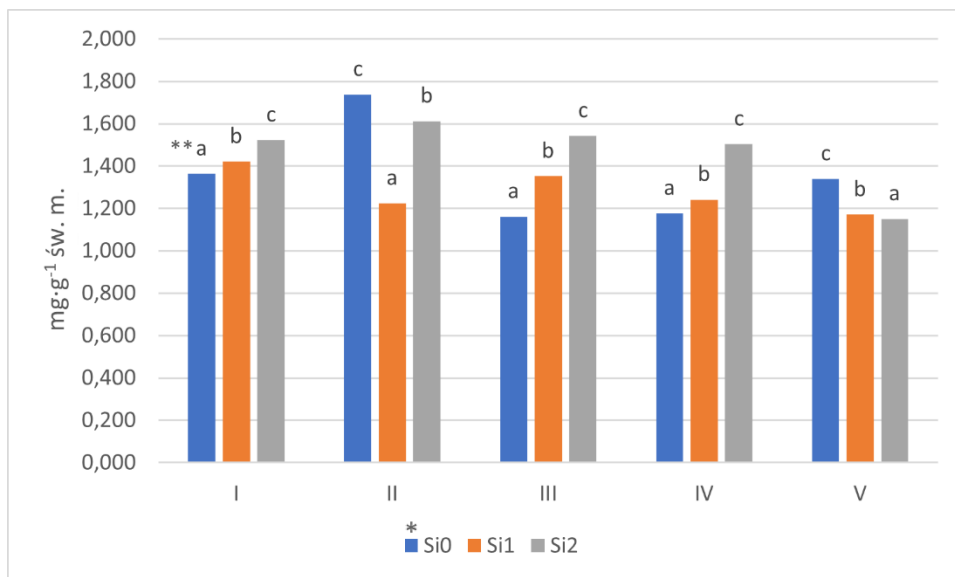
We wszystkich terminach pomiarów stwierdzono wpływ czynników doświadczenia na zawartość chlorofilu „a”. W przypadku wpływu chlorku sodu, efekty działania były zróżnicowane, zależnie od dawki. W trzech terminach - I, IV i V, najniższą zawartością chlorofilu „a” cechowały się rośliny z wariantu Z3 (ryc. 29). W terminach: I, III i IV wykazano wzrost zawartości tego barwnika wraz ze zwiększaniem dawki soli krzemu. Stwierdzono także jej zmniejszenie w stosunku do wariantu kontrolnego (Si0) – w II i IV terminie pomiaru. (ryc. 30).

Wykazano zróżnicowany wpływ współdziałania czynników doświadczalnych na omawianą cechę fizjologiczną. U roślin rosnących w warunkach zasolenia na poziomie Z1 nie stwierdzono wpływu soli krzemu na zawartość chlorofilu „a”. W przypadku obiektów z wariantu Z2, w II i V terminie pomiaru stwierdzono natomiast zmniejszenie zawartości omawianego barwnika po zastosowaniu krzemu w dawce zarówno Si1 jak i Si2. Wzrost zawartości chlorofilu „a”, w stosunku do kombinacji kontrolnej (Z3Si0) wykazano u pomidorów z kombinacji Z3Si2 (III termin badań) (tab. 23).



Ryc. 30. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 31. Wpływ stężenia soli krzemu na zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora

Objaśnienia: *Si0 – kontrola, Si1 – 1,5 mmol Na₂SiO₃·5H₂·dm⁻³, Si2 – 3,0 mmol Na₂SiO₃·5H₂·dm⁻³;

**średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy poziomie istotności α=0,05, I-V – terminy pomiarów.

Tabela 23. Zawartość chlorofilu „a” w liściach pomidora [$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ św. m.]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,20a	1,35ab	1,61bcd	1,28ab
	Si1	1,73cd	1,46abc	1,36ab	1,11a
	Si2	1,61bcd	1,13a	1,92d	1,41abc
II termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,61cde	1,66de	2,16f	1,51bcde
	Si1	1,21bc	1,68de	0,59a	1,41bcd
	Si2	1,70de	1,86ef	1,14b	1,73de
III termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,12a	1,16a	1,28a	1,08a
	Si1	1,22a	1,46ab	1,29a	1,42a
	Si2	1,54ab	1,18a	1,46ab	1,97b
IV termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	0,99ab	1,24abcd	1,47cde	1,00ab
	Si1	1,19abc	1,54cde	1,37bcd	0,86a
	Si2	1,41cd	1,59de	1,80e	1,19abc
V termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,25abcd	1,46bcd	1,75d	0,89a
	Si1	0,87a	1,53cd	1,12abc	1,15abc
	Si2	1,36abcd	1,01abc	0,95ab	1,27abcd

Objaśnienia: Si0 – kontrola, Si1 – $1,5 \text{ mmol Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \cdot \text{dm}^{-3}$, Si2 – $3,0 \text{ mmol Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} \cdot \text{dm}^{-3}$ Z0 – kontrola,

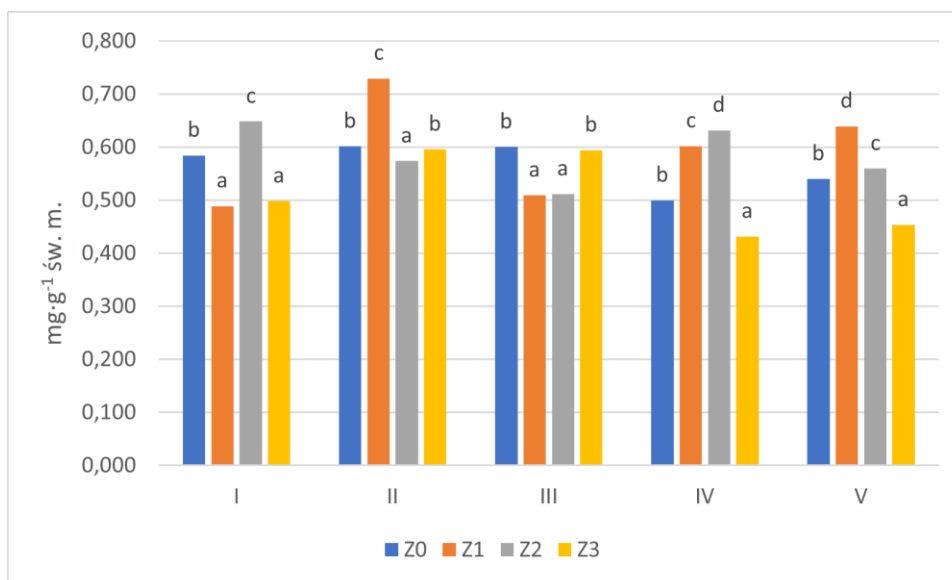
Z1 – $50 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$, Z2 – $75 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$, Z3 – $100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$; średnie oznaczone tą samą literą nie różnią się istotnie przy poziomie istotności $\alpha=0,05$.

3. 2. 1. 2 Zawartość chlorofilu „b”

Wpływ wzrastającego poziomu stężenia chlorku sodu na zawartość chlorofilu „b” był zróżnicowany, zależny od terminu pomiaru. W IV i V terminie najmniejszą zawartość tego barwnika wykazano u obiektów wariantu Z3 (ryc. 31). Wprowadzona do pożywki sól krzemu, zarówno w stężeniu na poziomie Si1 jak i Si2 zwiększyła zawartość chlorofilu „b” w liściach badanego gatunku – zależność taką zanotowano w I, III oraz IV terminie. Jednocześnie w terminach II i V zaobserwowano pod jej wpływem spadek zawartości tego barwnika (ryc. 32).

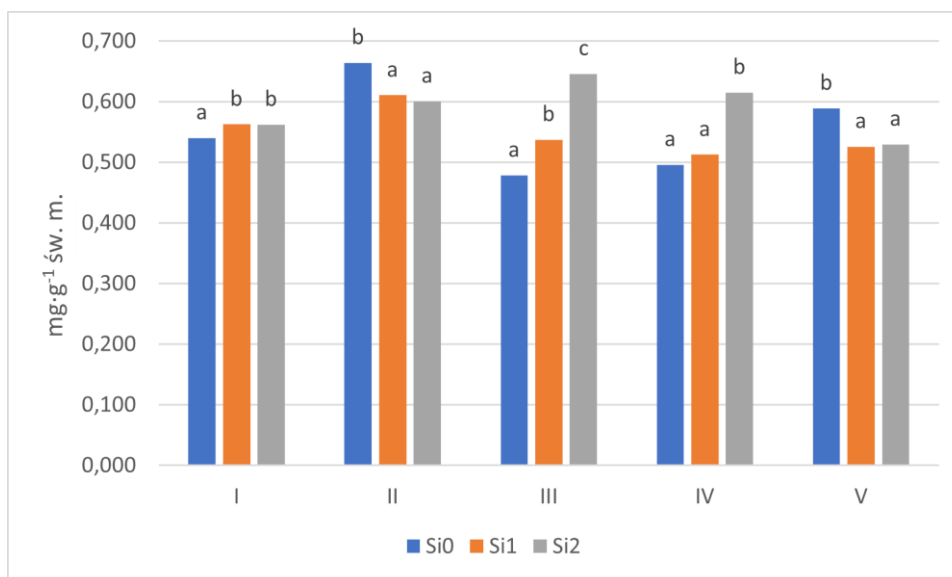
Wpływ interakcji czynników eksperymentu na zawartość chlorofilu „b” był istotny, lecz zróżnicowany i niejednoznaczny. Wprowadzenie krzemu w stężeniu Si2 zwiększyło zawartość chlorofilu „b” w liściach roślin rosnących w zasoleniu na poziomie Z2 oraz

Z3: odpowiednio w IV oraz III terminie pomiaru. Ta sama dawka soli krzemu wpłynęła także na zmniejszenie zawartości omawianego barwnika – zależność taką zanotowano u roślin z kombinacji Z2Si2, w II i V terminie (tab. 24).



Ryc. 32. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 33. Wpływ stężenia soli krzemu na zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 24. Zawartość chlorofilu „b” w liściach pomidora [mg·g⁻¹ św. m.]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	0,46ab	0,52abcd	0,66cde	0,50abc
	Si1	0,67de	0,49ab	0,53abcd	0,55abcd
	Si2	0,61bcde	0,44a	0,75e	0,43a
II termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	0,64b	0,63b	0,79b	0,58ab
	Si1	0,47ab	0,78b	0,66b	0,51ab
	Si2	0,68b	0,76b	0,25a	0,69b
III termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	0,46ab	0,50ab	0,49ab	0,44a
	Si1	0,50ab	0,59abc	0,48ab	0,56abc
	Si2	0,83c	0,42a	0,54abc	0,77bc
IV termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	0,40a	0,57bcd	0,57bcd	0,43ab
	Si1	0,49abcd	0,58bcd	0,57bcd	0,39a
	Si2	0,60cde	0,65e	0,74e	0,45abc
V termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	0,57abc	0,65abc	0,73c	0,38a
	Si1	0,42a	0,71bc	0,48abc	0,47abc
	Si2	0,61abc	0,54abc	0,45ab	0,50abc

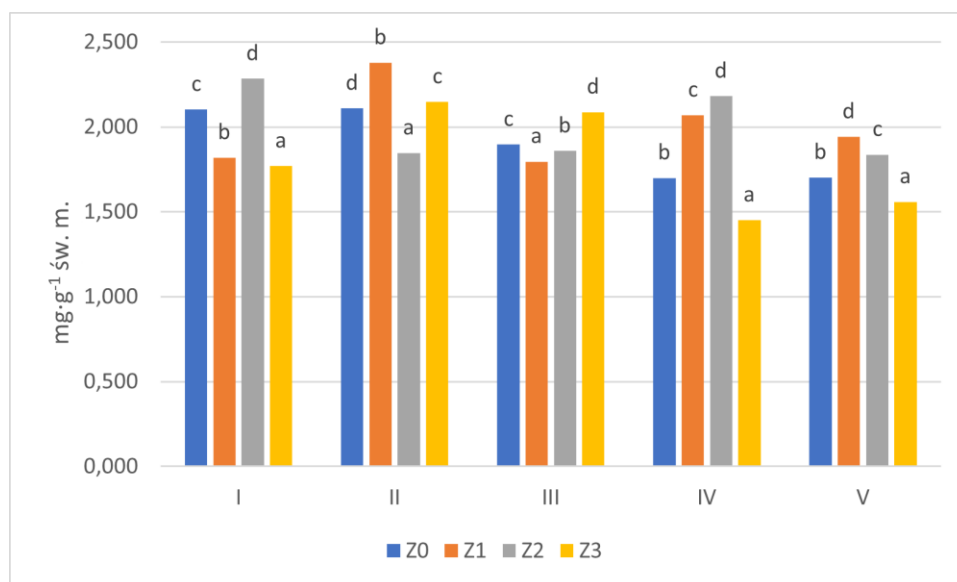
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 1. 3 Zawartość chlorofilu całkowitego

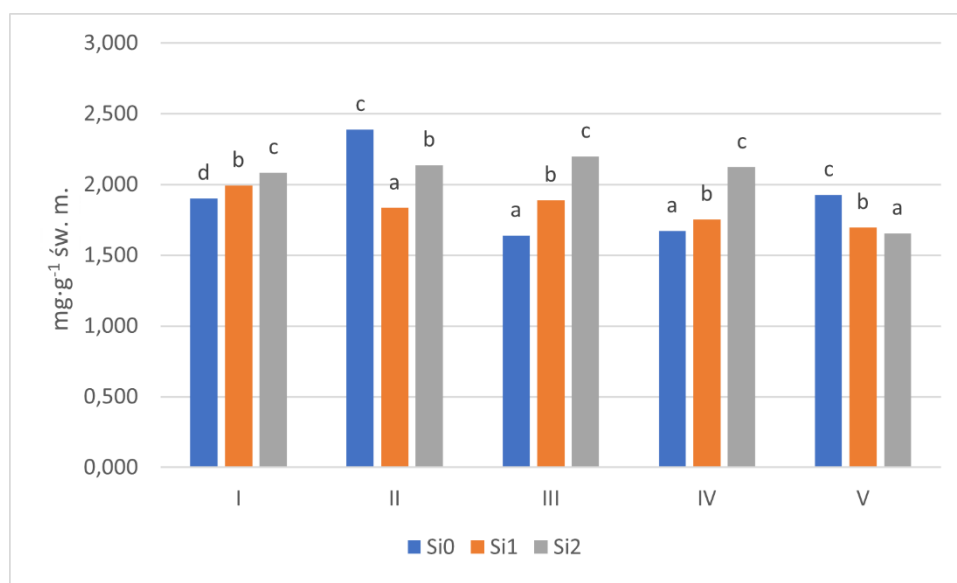
Wykazano wpływ czynników głównych doświadczenia na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach badanego gatunku. Wpływ zasolenia chlorkiem sodu na omawianą cechę był zróżnicowany, zależny od terminu pomiaru. W trzech terminach (I, IV i V), najniższą zawartością chlorofilu całkowitego charakteryzowały się rośliny z wariantu Z3 (ryc. 33). W I, III i IV terminie zanotowano także wzrost zawartości tego barwnika wraz ze zwiększającym się stężeniem soli krzemu w pożywce (ryc. 34).

Analizując efekty współdziałania czynników doświadczalnych, stwierdzono ich duże zróżnicowanie. Nie wykazano wyraźnego, jednoznacznego wpływu krzemu na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora rosnącego w warunkach podwyższonego zasolenia. Wprowadzenie do pożywki soli krzemu w dawce zarówno Si1 jak i Si2 zmniejszyło zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora z wariantu

Z2 (II i V termin). Krzem w dawce Si2 wpłynął na zwiększenie zawartości omawianego barwnika u obiektów z kombinacji Z0Si2 (I i IV termin), Z2Si2 (I termin) oraz Z3Si2 (III termin) (tab. 25).



Ryc. 34. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 35. Wpływ stężenia soli krzemu na zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 25. Zawartość chlorofilu całkowitego w liściach pomidora [$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ św. m.]

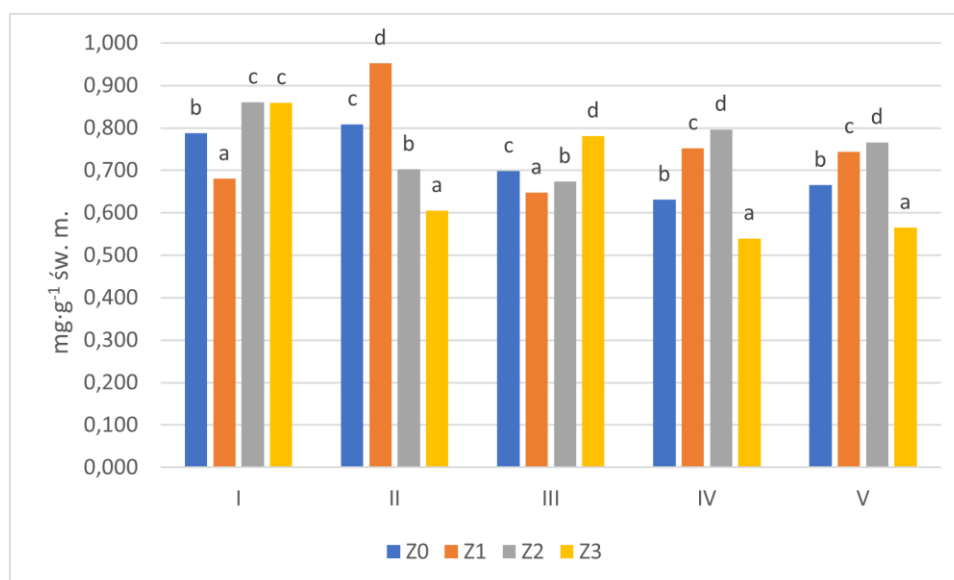
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,66a	1,88abc	2,27cde	1,78ab
	Si1	2,404e	2,00abcd	1,89abc	1,67a
	Si2	2,23bcde	1,57a	2,67e	1,85abc
II termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	2,25c	2,25c	2,96d	2,09bc
	Si1	1,68ab	2,46cd	1,25a	1,92bc
	Si2	2,38c	2,41cd	1,31a	2,42cd
III termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,58ab	1,67ab	1,77ab	1,52a
	Si1	1,72ab	2,05abc	1,78ab	1,99abc
	Si2	2,38bc	1,66ab	2,01abc	2,74c
IV termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,39ab	1,817bcde	2,045def	1,43abc
	Si1	1,69abcd	2,121def	1,943cde	1,25a
	Si2	2,014e	2,269ef	2,554f	1,65abcd
V termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3\cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,82abcd	2,11bcd	2,49d	1,27a
	Si1	1,29a	2,24cd	1,61abc	1,62abc
	Si2	1,98abcd	1,45ab	1,40ab	1,77abcd

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 1. 4 Zawartość karotenoidów

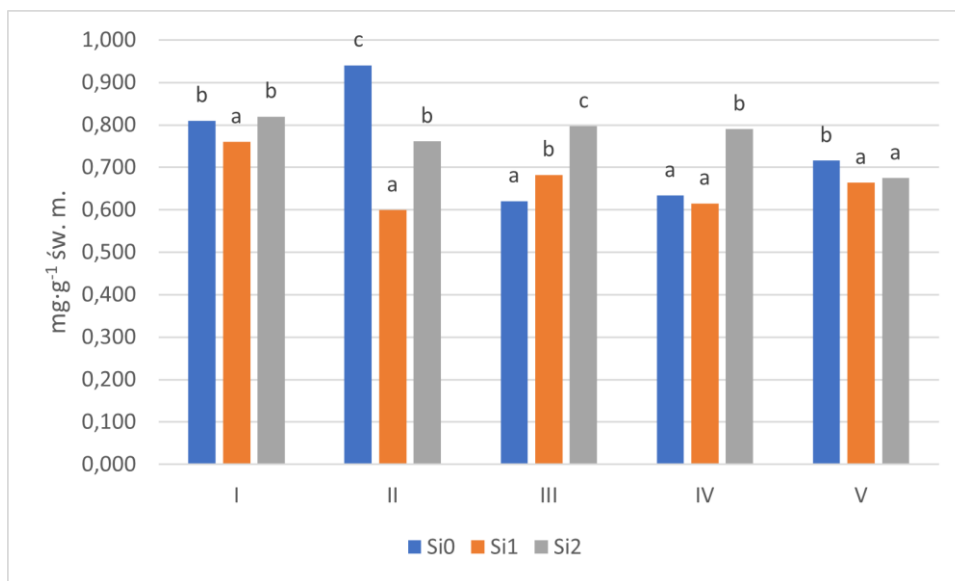
We wszystkich terminach pomiaru, analiza statystyczna wykazała istotność wpływu czynników doświadczenia na zawartość karotenoidów w liściach. Wzrastające stężenie chlorku sodu miało zróżnicowany, zależny od terminu pomiaru wpływ na tę cechę fizjologiczną. Największą zawartością karotenoidów cechowały się obiekty z różnych wariantów zasolenia, w zależności od terminu badań. Najwyraźniej na zmniejszenie zawartości karotenoidów wpłynął najwyższy poziom zasolenia Z3 – szczególnie uwidoczniło się to w II, IV i V terminie pomidora (ryc. 35). Analizując wpływ działania soli krzemu w III terminie pomiaru, stwierdzono wzrost zawartości karotenoidów wraz ze zwiększaniem dawki krzemu (ryc. 36).

Analiza interakcji czynników doświadczenia wykazała duże zróżnicowanie zawartości analizowanego barwnika w poszczególnych kombinacjach, w obrębie większości terminów pomiaru. Stwierdzono, że zastosowanie soli krzemu zarówno w dawce Si1 jak i Si2 powodowało zwiększenie zawartości karotenoidów w liściach w takich kombinacjach jak Z0Si1 i Z0Si2. W przypadku kombinacji Z2Si, Z2Si2, Z3Si1, Z3Si2 wykazano natomiast zmniejszenie zawartości tych barwników pod wpływem soli krzemu (tab. 26).



Ryc. 36. Wpływ poziomu zasolenia na zawartość karotenoidów w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 37. Wpływ stężenia soli krzemu na zawartość karotenoidów w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 26. Zawartość karotenoidów w liściach pomidora [$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ św. m.]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	0,60a	0,70ab	0,84bc	1,08e
	Si1	0,89cd	0,75abc	0,70ab	0,68ab
	Si2	0,86bc	0,57a	1,03de	0,80bc
II termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	0,88ef	0,88ef	1,191g	0,80de
	Si1	0,64cd	1,01fg	0,345a	0,39ab
	Si2	0,90ef	0,95ef	0,571bc	0,61c
III termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	0,60ab	0,64ab	0,68ab	0,54a
	Si1	0,67ab	0,65ab	0,67ab	0,72ab
	Si2	0,81b	0,64ab	0,65ab	1,07c
IV termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	0,53ab	0,71cde	0,76cdef	0,51ab
	Si1	0,58abc	0,69bcde	0,69bcde	0,49a
	Si2	0,77def	0,846ef	0,934f	0,61abcd
V termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	0,68abc	0,79bc	0,93c	0,45a
	Si1	0,55ab	0,86bc	0,67abc	0,59ab
	Si2	0,75abc	0,57ab	0,72abc	0,64abc

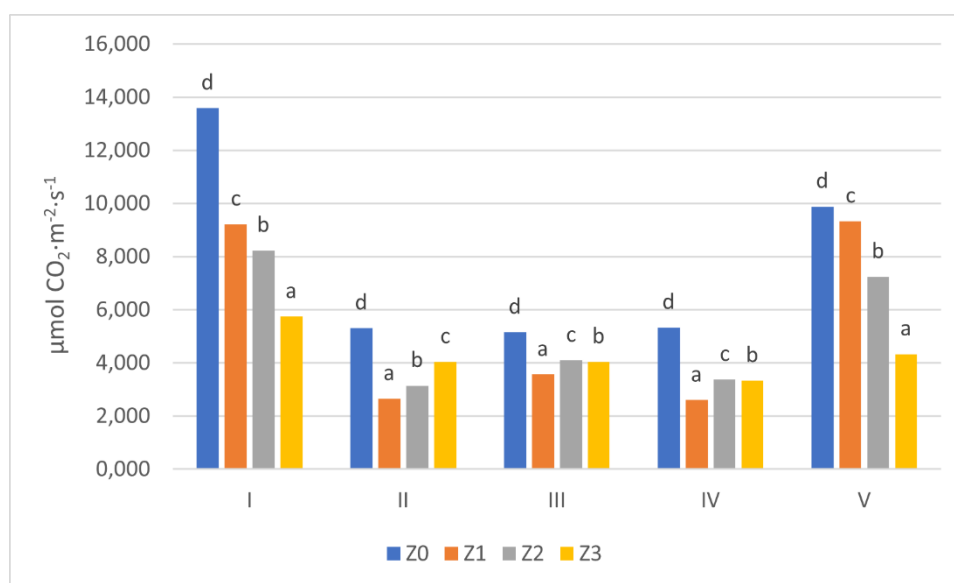
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 2 Parametry wymiany gazowej

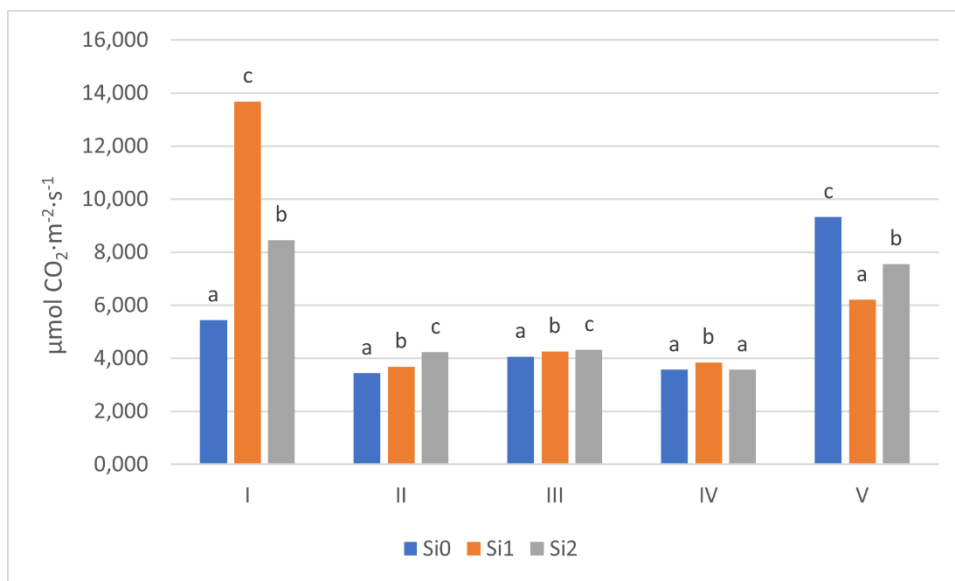
3. 2. 2. 1 Natężenie procesu asymilacji CO₂

Wykazano istotność wpływu czynników głównych doświadczenia na intensywność asymilacji CO₂ określoną we wszystkich terminach pomiaru. W przypadku wpływu stężenia chlorku sodu, w I i V terminie badań stwierdzono spadek natężenia asymilacji CO₂ wraz ze zwiększaniem poziomu zasolenia. Jednocześnie we wszystkich terminach najwyższymi wartościami omawianej cechy charakteryzowały się rośliny wariantu kontrolnego (Z0) (ryc. 37). Wykazano także, że najmniejszą intensywnością asymilacji CO₂ cechowały się rośliny rosnące w pożywce bez dodatku soli krzemu (wariant Si0). Wprowadzenie krzemu zarówno w dawce Si1 jak i Si2 powodowało wzrost natężenia asymilacji - zależność taką zaobserwowano w pierwszych trzech terminach pomiaru (ryc. 38).

Analiza statystyczna wykazała istotność interakcji czynników doświadczenia. W przypadku pomidora rosnącego w pożywce o zasoleniu Z1 stwierdzono wzrost, w porównaniu z kontrolą, intensywności asymilacji CO₂ po zastosowaniu krzemu, w zależności od terminu pomiaru, w dawce Si1 lub Si2. Wykazano także zwiększenie natężenia tego procesu w kombinacjach Z2Si1 (I i II termin), Z2Si2 (I i II i IV termin badań). U roślin rosnących w najwyższym zasoleniu pożywki (Z3), dodatnio na wzrost intensywności asymilacji wpłynął w szczególności krzem zastosowany w stężeniu Si1 (III, IV i V termin) (tab. 27).



Ryc. 38. Wpływ poziomu zasolenia na natężenie procesu asymilacji CO₂ (A) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 39. Wpływ stężenia soli krzemu na natężenie procesu asymilacji CO₂ (A) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 27. Natężenie asymilacji CO₂ (A) w liściach pomidora [μmol · m⁻² · s⁻¹]

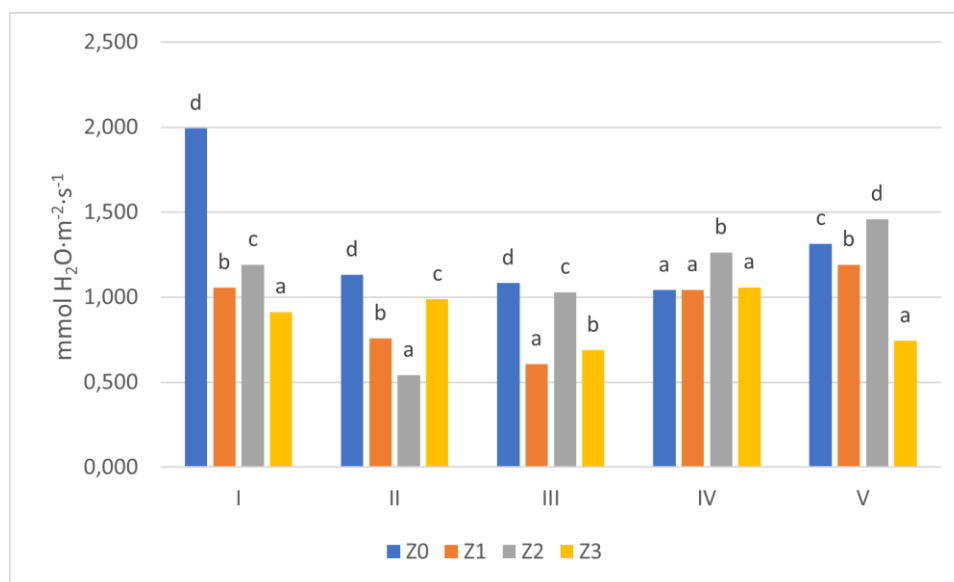
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	12,13d	3,50ab	2,53a	3,60ab
	Si1	12,13d	19,76f	13,40d	9,46c
	Si2	16,50e	4,40b	8,76c	4,16ab
II termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	6,40e	2,30b	1,43a	3,63c
	Si1	5,30d	1,43a	3,76c	4,26c
	Si2	4,23c	4,23c	4,23c	4,23c
III termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	7,23g	2,46a	3,20bc	3,36bc
	Si1	3,56cd	2,86ab	5,13ef	5,46f
	Si2	4,66e	5,36f	3,96d	3,30bc
IV termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	7,63g	1,56a	3,46b	1,60a
	Si1	4,30cde	4,86ef	1,43a	4,80def
	Si2	4,06bcd	1,36a	5,23f	3,60bc
V termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	12,33f	8,20e	12,56f	4,23bc
	Si1	2,53a	12,50f	4,06bc	5,73d
	Si2	14,80g	7,30e	5,10cd	3,03ab

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

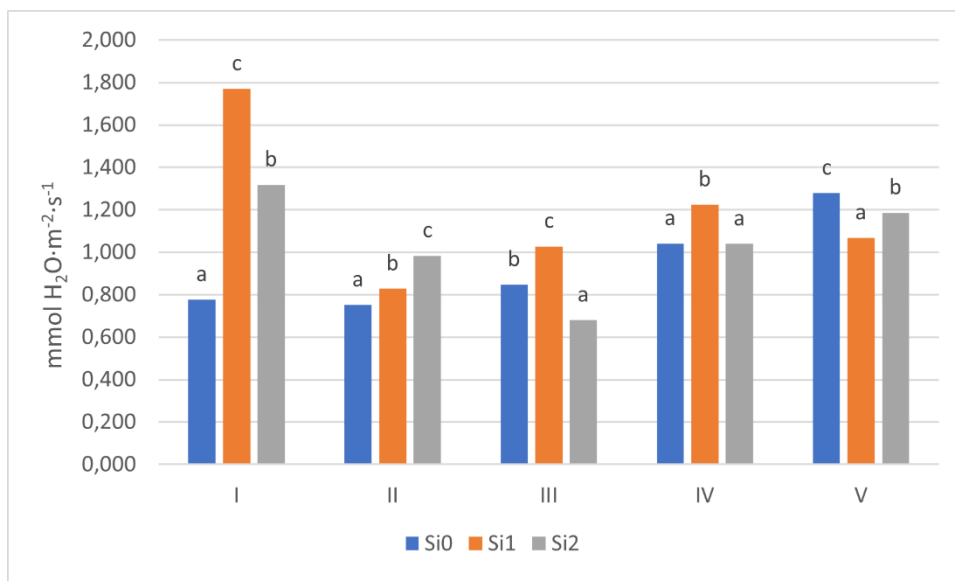
3. 2. 2. 2 Intensywność transpiracji

Wykazano wpływ zróżnicowanego poziomu stężenia NaCl na natężenie transpiracji. W pierwszych trzech terminach pomiaru największą wartość tej cechy fizjologicznej wykazywały rośliny kontrolne (Z0), w kolejnych dwóch z wariantu Z2. (ryc. 39). W przypadku oddziaływania soli krzemu, stwierdzono, że jej zastosowanie w dawce Si1 zwiększyło, w porównaniu z kontrolą (Si0) intensywność transpiracji w liściach badanego pomidora określoną w pierwszych czterech terminach badań. (ryc. 40).

Ocena interakcji czynników doświadczenia wykazała duże zróżnicowanie, w zależności od terminu pomiaru. Krzem zastosowany w stężeniu na poziomie Si1 zwiększył intensywność transpiracji roślin rosnących w pożywce o zasoleniu Z1 (I i III termin), Z2 (I i IV termin) oraz Z3 (I - V termin). Zaobserwowano także zwiększenie natężenia transpiracji po zastosowaniu soli krzemu w dawce Si2, w przypadku kombinacji Z1Si2 (I- II termin), Z2Si2 (I i III termin) oraz Z3Si2 (II i III termin pomiaru). Wykazano również zmniejszenie intensywności omawianego procesu na skutek wprowadzenia krzemu do pożywki. Zależność taką stwierdzono w IV i V terminie badań odpowiednio w kombinacjach: Z0Si1, Z0Si2, Z1Si1 i Z1Si2 oraz Z0Si1, Z1Si1, Z2Si1 i Z2Si2 (tab. 28).



Ryc. 40. Wpływ poziomu zasolenia na intensywność transpiracji (E) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 41. Wpływ stężenia soli krzemu na intensywność transpiracji (E) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 28. Intensywność transpiracji (E) w liściach pomidora [mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹]

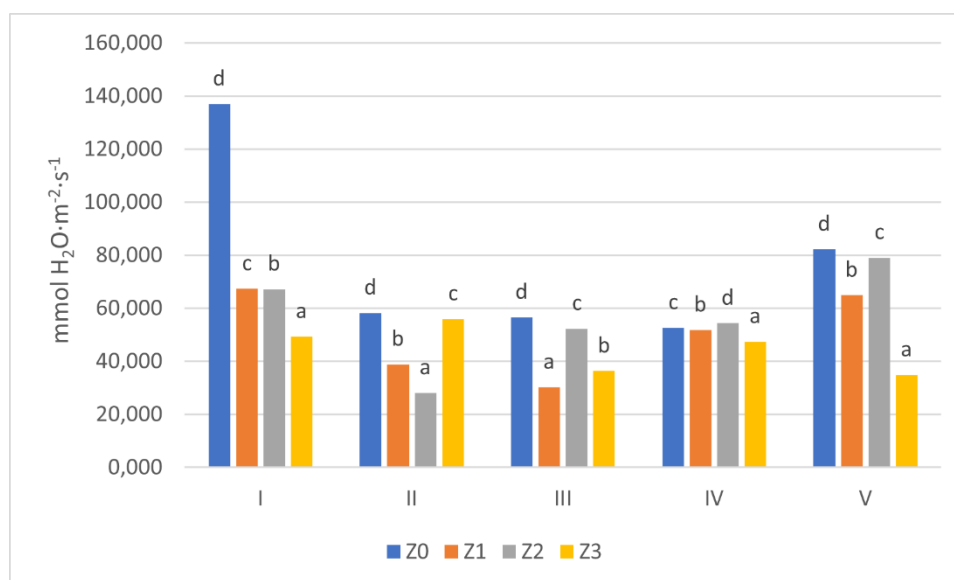
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	1,66d	0,43a	0,36a	0,64b
	Si1	1,74de	2,08f	1,82e	1,42c
	Si2	2,57g	0,64b	1,38c	0,67b
II termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	1,26c	0,66a	0,53a	0,54a
	Si1	0,61a	0,63a	0,57a	1,49c
	Si2	1,51c	0,97b	0,51a	0,93b
III termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	1,19de	0,88c	0,98c	0,33a
	Si1	1,48f	0,62b	0,90c	1,10d
	Si2	0,57b	0,31a	1,20e	0,63b
IV termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	1,58e	0,96c	1,23d	0,38a
	Si1	0,31a	0,70b	1,43e	2,43f
	Si2	1,22d	1,45e	1,12cd	0,35a
V termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	1,72e	1,21bcd	1,66e	0,51a
	Si1	0,55a	1,18bc	1,37d	1,15b
	Si2	1,66e	1,17bc	1,34cd	0,56a

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 2. 3 Przewodnictwo szparkowe dla wody

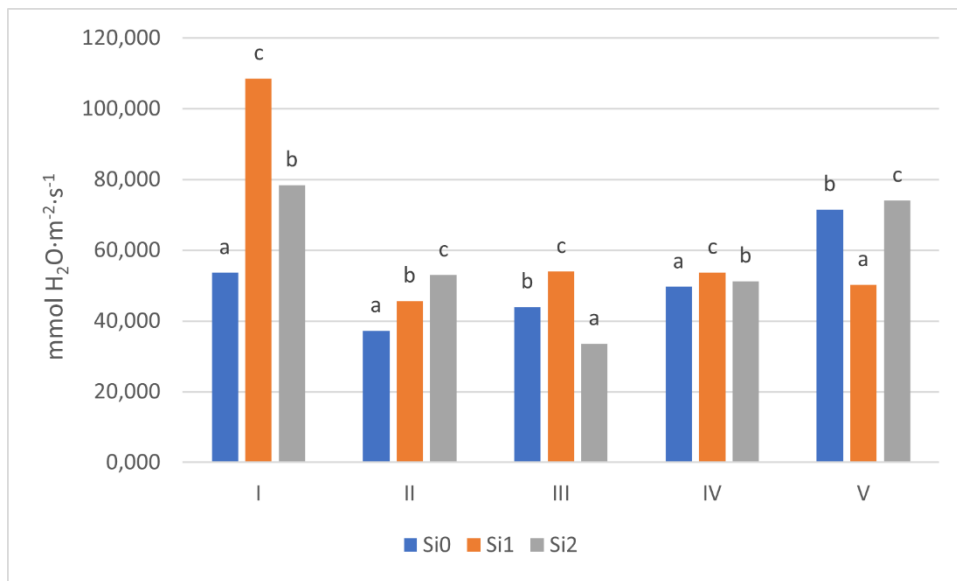
Stwierdzono wpływ zróżnicowanych poziomów czynników głównych doświadczenia na wartość przewodnictwa szparkowego dla wody. We wszystkich terminach pomiaru, niezależnie od poziomu stężenia NaCl, stwierdzono jego wpływ na zmniejszenie, w stosunku do kontroli (Z0), wartości omawianej cechy fizjologicznej. W I, IV i V terminie badań najmniejszym przewodnictwem dla wody cechowały się liście pomidorów wariantu Z3 (ryc. 41). Oceniając wpływ soli krzemu, największe wartości parametru g_s stwierdzono w wariancie Si1 (I, III i IV termin) oraz Si2 (II i V termin) (ryc. 42).

Stwierdzono wpływ współdziałania czynników eksperymentu na wielkość przewodnictwa szparkowego dla wody. Był on zróżnicowany w zależności od terminu badań. Krzem wprowadzony do pożywki w stężeniu na poziomie Si1 zwiększył wartość tej cechy u roślin wariantu Z1 i Z2 (I termin) oraz Z3 (I, II, III i IV termin). Zastosowany w stężeniu wyższym Si2 w wariancie Z1 (II termin), Z2 (I i III termin) oraz Z3 (II i III termin). W dwóch terminach badań, tj. IV i V wykazano także zmniejszenie przewodnictwa szparkowego odpowiednio w kombinacjach Z1Si1 i Z1Si2 oraz Z2Si1 i Z2Si2 (tab. 29).



Ryc. 42. Wpływ poziomu zasolenia na wartości przewodnictwa szparkowego dla wody (g_s) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 43. Wpływ stężenia soli krzemu na wartości przewodnictwa szparkowego dla wody (g_s) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 29. Wartości przewodnictwa szparkowego (g_s) dla wody w liściach pomidora [mmol H₂O·m⁻²·s⁻¹]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	135,33f	21,67a	24,33a	33,33b
	Si1	95,33d	154,00g	104,00e	81,00c
	Si2	180,33h	26,33ab	73,33c	33,67b
II termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	71,00c	23,00a	27,33a	27,66a
	Si1	32,00a	31,33a	30,00a	89,33d
	Si2	71,66c	62,33bc	27,00a	51,00b
III termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	66,66h	46,00d	47,66de	15,66a
	Si1	75,33i	29,00cd	49,00e	62,67g
	Si2	27,66b	15,66a	60,33f	30,67c
IV termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	78,66f	46,66d	56,00e	17,33a
	Si1	24,00b	30,66c	51,00de	109,33g
	Si2	55,33e	78,00f	56,00e	15,66a
V termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	87,33c	65,33b	102,00c	31,33a
	Si1	25,00a	64,33b	69,66b	42,00a
	Si2	134,33d	65,00b	65,66b	31,33a

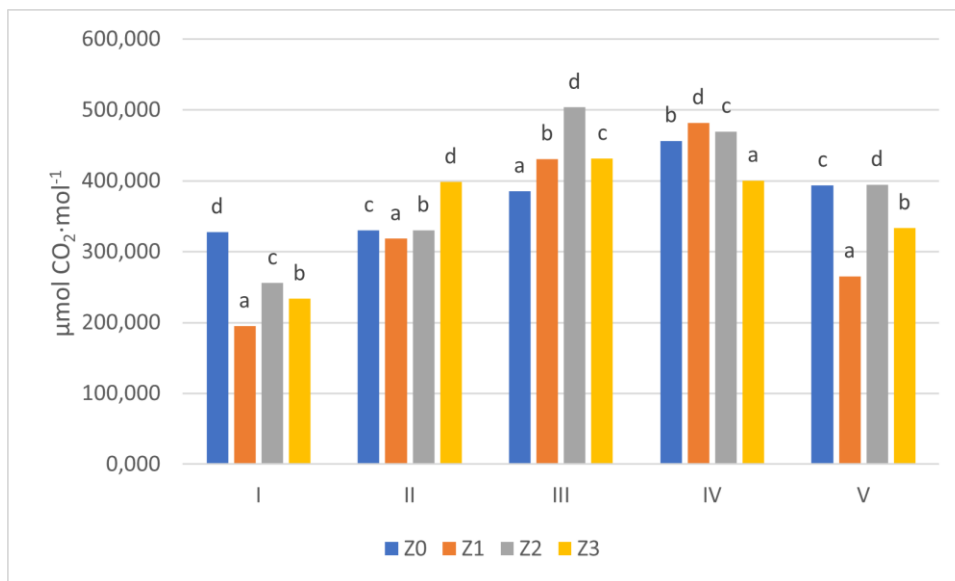
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 2. 4 Stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych mięszku asymilacyjnego

Najmniejsze stężenie CO₂, w trzech terminach pomiaru (I, II i V) cechowało liście roślin z wariantu Z1. W terminie III były to natomiast rośliny kontrolne (Z0), w IV natomiast z wariantu Z3 (ryc. 43). Analizując wpływ drugiego z czynników głównych, można stwierdzić, że w I i V terminie badań najmniejsza wartość c_i charakteryzowała obiekty wariantu kontrolnego (Si0), w II do IV rośliny z wariantu Si2 (ryc. 44).

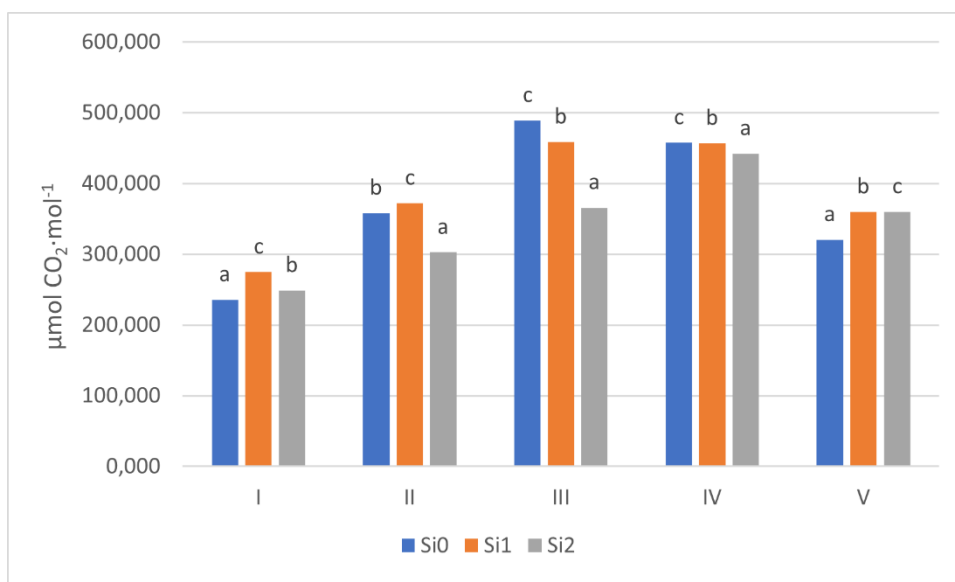
Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ interakcji czynników głównych na omawianą cechę fizjologiczną badanego gatunku. Zmniejszenie stężenia CO₂ w przestworach międzykomórkowych, w porównaniu z kontrolą, wykazano w efekcie wprowadzenia soli krzemu w stężeniu Si1 w kombinacjach Z0Si1 (IV termin), Z1Si1 (II – V termin), Z2Si1 i Z3Si1 (III termin). Krzem zastosowany w stężeniu wyższym Si2

zmniejszył wartość c_i w kombinacjach Z0Si2 (II i V termin), Z1Si2 (II, III i V termin), Z2Si2 (IV termin) oraz Z3Si2 (III i IV termin) (tab. 30).



Ryc. 44. Wpływ poziomu zasolenia na stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych miększu asymilacyjnego (c_i) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 45. Wpływ stężenia soli krzemu na stężenie CO₂ w przestworach międzykomórkowych miększu asymilacyjnego (c_i) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 30. Stężenia CO₂ w przestworach międzykomórkowych miękiszu asymilacyjnego (ci) w liściach pomidora [$\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	367,00c	140,00a	215,67ab	219,82ab
	Si1	286,33bc	288,00bc	263,33abc	261,33abc
	Si2	329,67bc	156,67a	288,67bc	219,33ab
II termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	374,00b	451,33d	227,66a	379,00bc
	Si1	360,00b	264,66a	418,66cd	445,00d
	Si2	256,33a	238,66a	344,33b	371,00b
III termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	292,66b	589,00g	544,66ef	529,66e
	Si1	578,00fg	527,00e	422,33c	306,66b
	Si2	285,33b	176,66a	543,66ef	458,00d
IV termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	456,00d	504,33e	474,33d	395,66b
	Si1	373,66b	423,66c	506,00e	523,33ef
	Si2	540,00f	517,66ef	428,66c	282,66a
V termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	422,66e	323,00c	334,00c	202,33a
	Si1	410,33e	240,33b	419,66e	368,66d
	Si2	348,00cd	232,66b	430,00e	429,00e

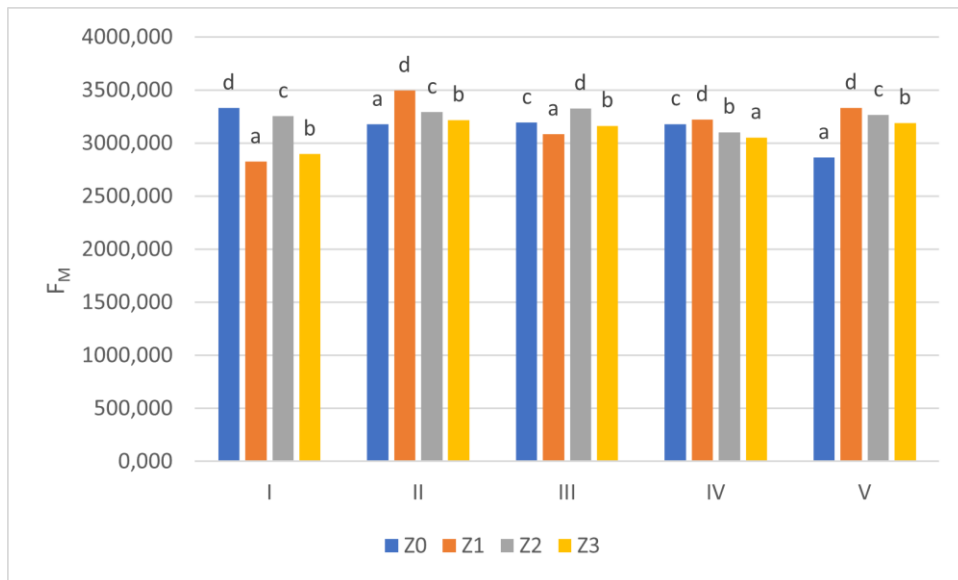
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 3 Parametry fluorescencji chlorofilu „a”

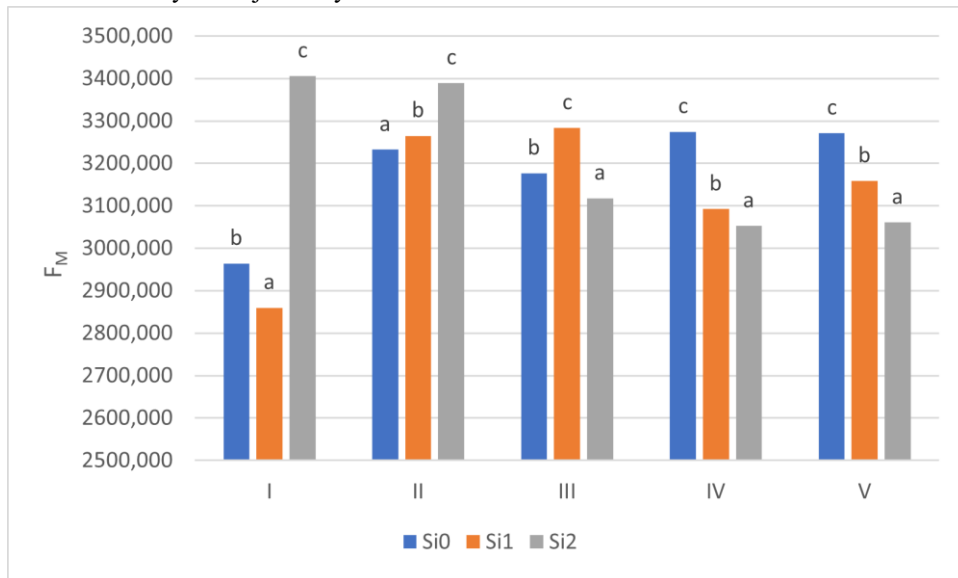
3. 2. 3. 1 Wartości fluorescencji maksymalnej (F_M)

Stwierdzono wpływ obu czynników doświadczenia na wartości parametru fluorescencji maksymalnej. Wzrost stężenia NaCl w pożywce wpłynął na zmniejszenie F_M głównie w I terminie pomiaru. W pozostałych terminach badań największą wartość tego parametru wykazywały obiekty wariantów Z1 (II, IV i V termin) oraz Z2 (III termin). (ryc. 45). W przypadku drugiego czynnika doświadczalnego, w I i II terminie stwierdzono wzrost fluorescencji maksymalnej u obiektów wariantu Si2. W dwóch ostatnich terminach wykazano natomiast zmniejszenie wartości wskaźnika F_M , wraz ze wzrostem poziomu żywienia krzemem (ryc. 46)

Stwierdzono wpływ interakcji czynników doświadczenia na omawianą cechę fizjologiczną. Był on jednak zróżnicowany, zależnie od terminu pomiaru. Korzystny wzrost wartości wskaźnika F_M obserwowano u obiektów z kombinacji Z0Si2 (II termin), Z1Si1 (I, III termin), Z1Si2 (I termin), Z2Si2 (I termin) i Z3Si2 (II termin). Wykazano także zmniejszenie FL maksymalnej np. w kombinacjach Z1Si2 (IV termin) i Z2Si2 (III i V termin) (tab. 31).



Ryc. 46. Wpływ poziomu zasolenia na fluorescencję maksymalną (F_M) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 47. Wpływ stężenia soli krzemu na fluorescencję maksymalną (F_M) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 31. Wartości fluorescencji maksymalnej (F_M) w liściach pomidora

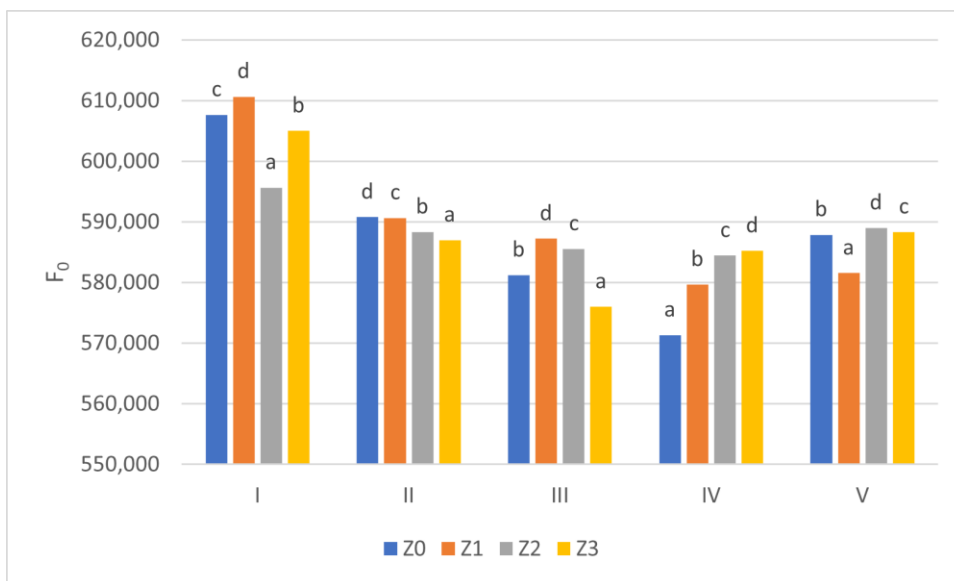
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	3567,66de	2371,33a	2862,66ab	3054,66bcd
	Si1	2917,00abc	3054,66bcd	2918,00abc	2550,33ab
	Si2	3507,00cde	3048,33bcd	3981,33e	3086,66bcd
II termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	3101,66abc	3397,33cde	3441,66cde	2988,66ab
	Si1	2876,00a	3652,00e	3284,33bcd	3248,00bcd
	Si2	3550,66de	3437,66cde	3153,33abc	3416,66cde
III termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	3105,00abc	2929,00a	3521,66c	3152,00abc
	Si1	3182,00abc	3417,66bc	3435,00bc	3100,00abc
	Si2	3297,00abc	2911,33a	3022,66ab	3240,33abc
IV termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	3219,33abc	3427,00c	3379,66bc	3072,66abc
	Si1	3217,00abc	3290,33abc	2972,33abc	2890,00a
	Si2	3105,66abc	2944,00ab	2960,66abc	3200,33abc
V termin					
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	2840,00ab	3547,00cd	3596,66d	3101,66abcd
	Si1	2791,33a	3366,00bcd	3178,66abcd	3299,00abcd
	Si2	2964,00ab	3087,66abcd	3021,00abc	3171,00abcd

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

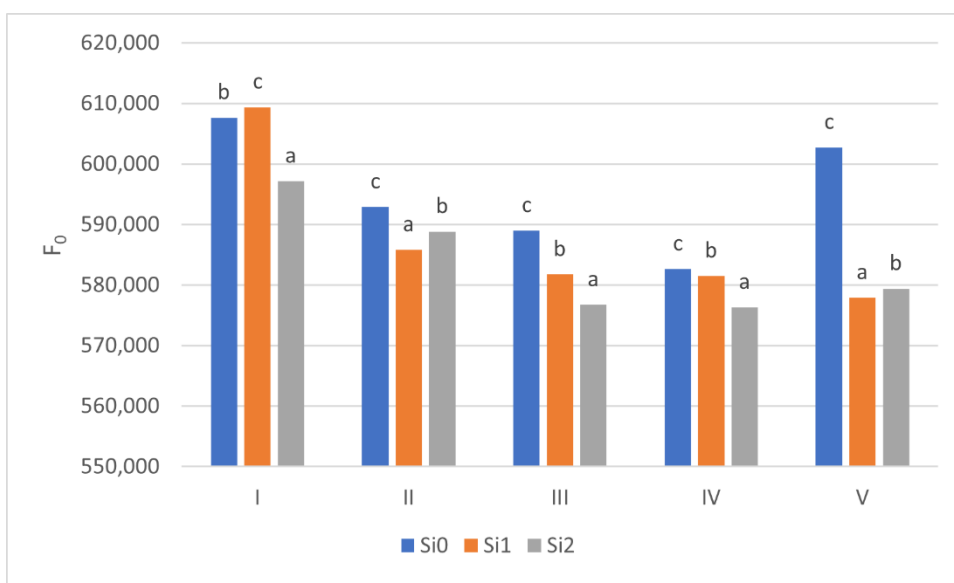
3. 2. 3. 2 Fluorescencja początkowa (F₀)

Analiza wartości parametru FL początkowej wykazała wpływ czynników głównych doświadczenia na tę cechę. Najwyższą wartość F₀, w zależności od terminu pomiaru notowano u obiektów z różnych wariantów zasolenia - od Z0 do Z3 (ryc. 47). W przypadku wpływu żywienia krzemem, korzystne zmniejszenie wartości parametru F₀, w porównaniu z kontrolą, świadczące o większej sprawności przekazywania energii pomiędzy cząsteczkami barwników, wykazano u obiektów wariantu Si1 (II, III, IV i V termin) oraz Si2 (I, III, IV i V termin) (ryc. 48).

Współdziałanie czynników eksperymentu miało niewielki wpływ na FL początkową. Jedynie w II i V terminie badań, w przypadku roślin rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z2 zaobserwowano zmniejszenie, w porównaniu z kombinacją kontrolną (Z2Si0), wskaźnika F₀ po zastosowaniu krzemu w dawce Si2 (Tab. 32).



Ryc. 48. Wpływ poziomu zasolenia na fluorescencję początkową (F₀) w liściach pomidora
 Objasnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 49. Wpływ stężenia soli krzemu na fluorescencję początkową (F₀) w liściach pomidora
 Objasnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 32. Wartości fluorescencji początkowej (F₀) w liściach pomidora

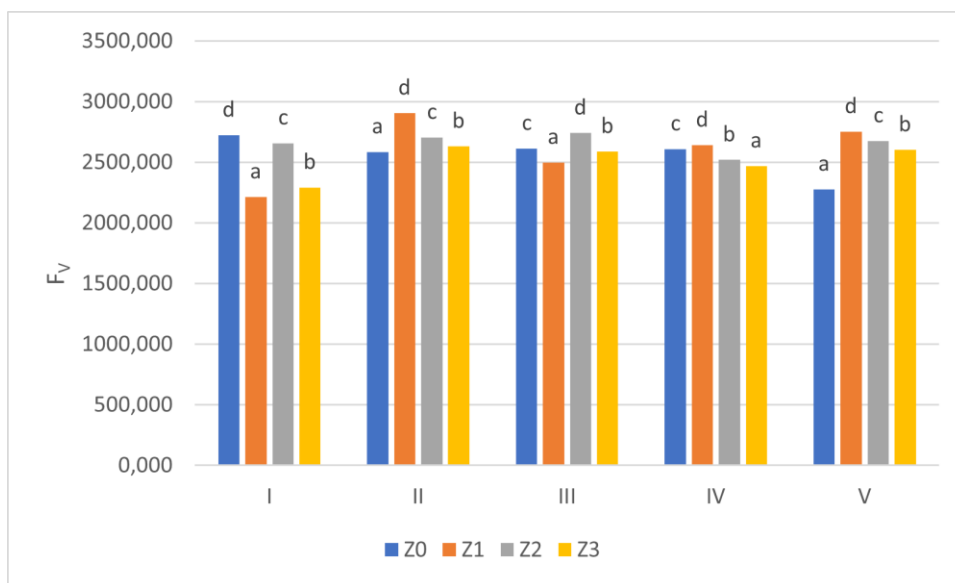
		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
I termin						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	596,66ab	628,66ab	596,00ab	609,33ab	607,66b
	Si1	638,66b	609,33ab	601,00ab	588,66ab	609,41c
	Si2	587,66a	594,00ab	590,00ab	617,00ab	597,16a
	Średnia	607,66c	610,66d	595,66a	605,00b	
II termin						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	571,33a	584,00abc	611,66c	604,66abc	592,91c
	Si1	592,66abc	595,66abc	579,00abc	576,00ab	585,83a
	Si2	608,33bc	592,33abc	574,33ab	580,33abc	588,83b
	Średnia	590,77d	590,66c	588,33b	587,00a	
III termin						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	579,33ab	590,00ab	603,00b	583,66ab	589,00c
	Si1	590,33ab	590,00ab	586,66ab	560,00a	581,75b
	Si2	574,00ab	581,66ab	567,00ab	584,33ab	576,75a
	Średnia	581,22b	587,22d	585,55c	576,00a	
IV termin						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	567,66a	586,00a	588,66a	588,33a	582,66c
	Si1	582,33a	569,33a	586,00a	588,33a	581,50b
	Si2	564,00a	583,66a	578,66a	579,00a	576,33a
	Średnia	571,33a	579,66b	584,44c	585,22d	
V termin						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	585,66ab	592,33abc	623,66c	609,33bc	602,75c
	Si1	584,33ab	569,66aa	585,00ab	572,66ab	577,91a
	Si2	593,66abc	582,66aba	558,33a	583,00ab	579,41b
	Średnia	587,88b	581,55a	589,00d	588,33c	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 3. 3 Fluorescencja zmiennej (F_v)

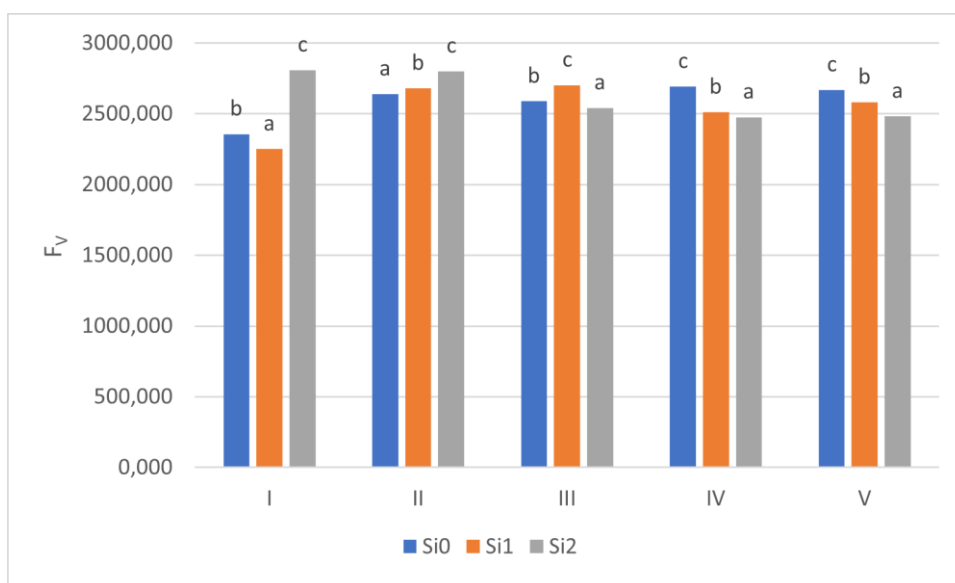
Wzrastający poziom stężenia NaCl wpłynął w zróżnicowany sposób na FL zmienną. W I oraz IV terminie badań stwierdzono zmniejszenie, w porównaniu z kontrolą, wartości wskaźnika F_v u obiektów z wariantu Z1, Z2 i Z3. Zależność odwrotną, tj wzrost FL zmiennej w warunkach podwyższonego zasolenia obserwowano natomiast w V terminie pomiaru. (ryc. 49). Największe wartości FL zmiennej w I i II terminie badań stwierdzono u pomidorów z wariantu Si2, w III natomiast z Si1. W dwóch ostatnich terminach wykazano natomiast zmniejszenie tego wskaźnika FL na skutek żywienia krzemem (ryc. 50).

Wykazano istotny wpływ współdziałania czynników doświadczalnych na wartość FL zmiennej. Żywienie krzemem na poziomie Si1 oraz Si2 powodowało wzrost parametru F_v , w porównaniu z obiektami kontrolnymi odpowiednio w kombinacjach: Z1Si1 (I i III termin pomiaru), Z1Si2 (I termin), Z2Si2 (I termin) i Z3Si2 (II termin) (tab. 33).



Ryc. 50. Wpływ poziomu zasolenia na fluorescencję zmienną (F_v) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 51. Wpływ stężenia soli krzemu na fluorescencję zmienną (F_v) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 33. Wartości fluorescencji zmiennej (Fv) w liściach pomidora

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
		I termin				
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	2971,00de	1742,66a	2266,66abc	2445,33bcd	2356,41b
	Si1	2278,33abc	2445,33bcd	2317,00abcd	1961,66ab	2250,58a
	Si2	2919,33cde	2454,33bcd	3391,33e	2469,66bcd	2808,66c
	Średnia	2722,88d	2214,11a	2658,33c	2292,22b	
		II termin				
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	2530,33abc	2813,33cde	2830,00cde	2384,00ab	2639,41a
	Si1	2283,33a	3056,33e	2705,33cd	2672,00bcd	2679,25b
	Si2	2942,33de	2845,33cde	2579,00abc	2836,33cde	2800,75c
	Średnia	2585,33a	2905,00d	2704,77c	2630,77b	
		III termin				
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	2525,66abc	2339,00a	2918,66b	2568,33abc	2587,91b
	Si1	2591,66abc	2827,66bc	2848,33bc	2540,00abc	2701,91c
	Si2	2723,00abc	2329,66a	2455,66ab	2656,00abc	2541,08a
	Średnia	2613,44c	2498,77a	2740,88d	2588,11b	
		IV termin				
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	2651,66abc	2841,00c	2791,00bc	2484,33abc	2692,00c
	Si1	2634,66abc	2721,00abc	2386,33abc	2301,66a	2510,91b
	Si2	2541,66abc	2360,33ab	2382,00abc	2621,33abc	2476,33a
	Średnia	2609,33c	2640,77d	2519,77b	2469,11a	
		V termin				
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	2254,33ab	2954,66c	2973,00c	2492,33abc	2668,58c
	Si1	2207,00a	2796,33bc	2593,66abc	2726,33abc	2580,83b
	Si2	2370,33ab	2505,00abc	2462,66abc	2588,00abc	2481,50a
	Średnia	2277,22a	2752,00d	2676,44c	2602,22b	

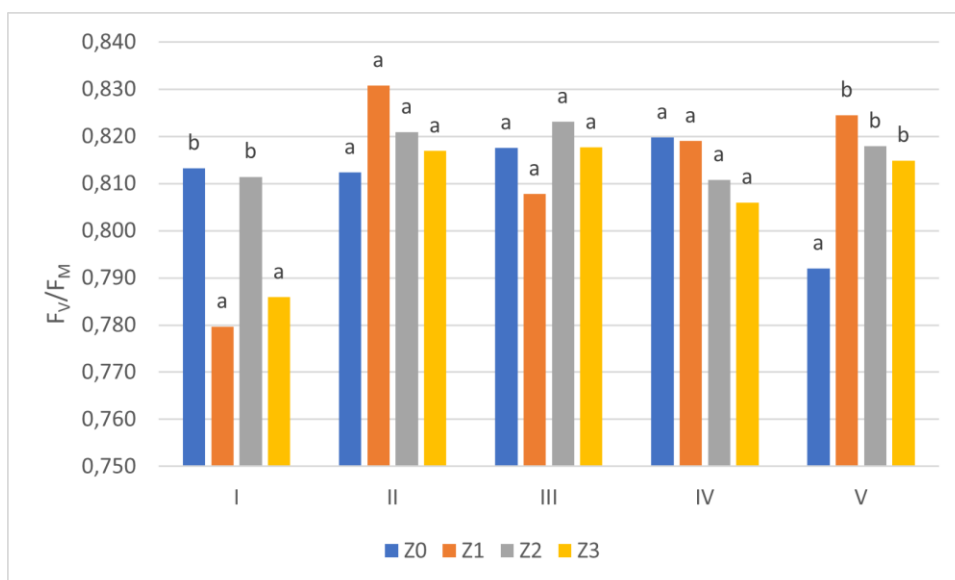
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 3. 4 Maksymalna fotochemiczna wydajność PS II (Fv/F_M)

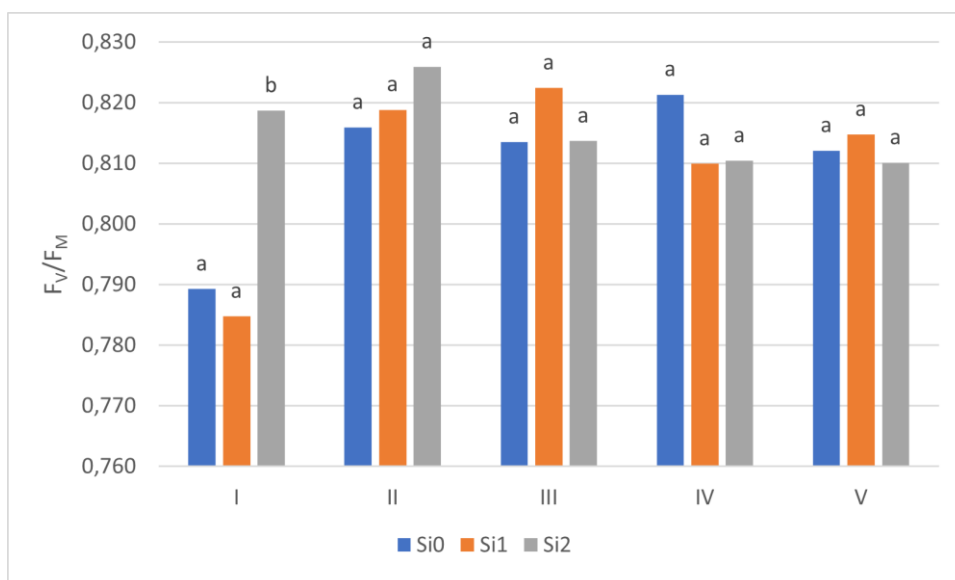
Zróznicowany poziom stężenia NaCl w pożywce wpłynął na wartość wskaźnika Fv/F_M w pierwszym i ostatnim terminie pomiaru. W I terminie badań wykazano jego zmniejszenie u obiektów z wariantu Z1 oraz Z3. W V terminie najmniejszą wartością Fv/F_M charakteryzowały się natomiast rośliny kontrolne (Z0) (ryc. 51). Żywienie krzemem wpłynęło na omawiany parametr FL jedynie w I terminie pomiaru, gdy najwyższą jego wartość notowano u obiektów z wariantu Si2 (ryc. 52).

Wykazano istotność interakcji czynników eksperymentu. Stwierdzono, że żywienie krzemem na poziomie Si1 zwiększyło wartość wskaźnika Fv/F_M, w porównaniu

z kontrolą u roślin z kombinacji Z1Si1 (I i III termin) oraz Z3Si1 (II termin). Wprowadzenie do pożywki krzemu w dawce Si2 spowodowało natomiast wzrost tego parametru w liściach pomidora z kombinacji Z1Si2 i Z2Si2 (I termin) oraz Z3Si2 (II termin) (tab. 34).



Ryc. 52. Wpływ poziomu zasolenia na fotochemiczną wydajność PS II (F_v/F_m) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 53. Wpływ stężenia soli krzemu na fotochemiczną wydajność PS II (F_v/F_m) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 34. Wartości wskaźnika fotochemicznej wydajności PS II (F_V/F_M) w liściach pomidora

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
I termin						
Stężenie $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Si0	0,83cd	0,73a	0,79bc	0,80bcd	0,78a
	Si1	0,77abc	0,80bcd	0,79bc	0,76ab	0,78a
	Si2	0,83cd	0,80bcd	0,85d	0,78bc	0,81b
	Średnia	0,81b	0,78a	0,81b	0,78a	
II termin						
Stężenie $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Si0	0,81b	0,82bc	0,82bc	0,79a	0,81a
	Si1	0,79a	0,83c	0,82bc	0,82bc	0,81a
	Si2	0,82bc	0,82bc	0,81b	0,83bc	0,82a
	Średnia	0,81a	0,83a	0,82a	0,81a	
III termin						
Stężenie $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Si0	0,81ab	0,79a	0,82b	0,81ab	0,81a
	Si1	0,81ab	0,82b	0,82b	0,81ab	0,82a
	Si2	0,82b	0,79a	0,81ab	0,81ab	0,81a
	Średnia	0,81a	0,80a	0,82a	0,81a	
IV termin						
Stężenie $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Si0	0,82ab	0,82b	0,82ab	0,80ab	0,82a
	Si1	0,81ab	0,82ab	0,80ab	0,79a	0,81a
	Si2	0,81ab	0,80ab	0,80ab	0,81ab	0,81a
	Średnia	0,82a	0,81a	0,811a	0,80a	
V termin						
Stężenie $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Si0	0,78a	0,83b	0,82ab	0,80ab	0,81a
	Si1	0,79ab	0,83b	0,81ab	0,82ab	0,81a
	Si2	0,80ab	0,81ab	0,81ab	0,81ab	0,81a
	Średnia	0,79a	0,82b	0,81b	0,81b	

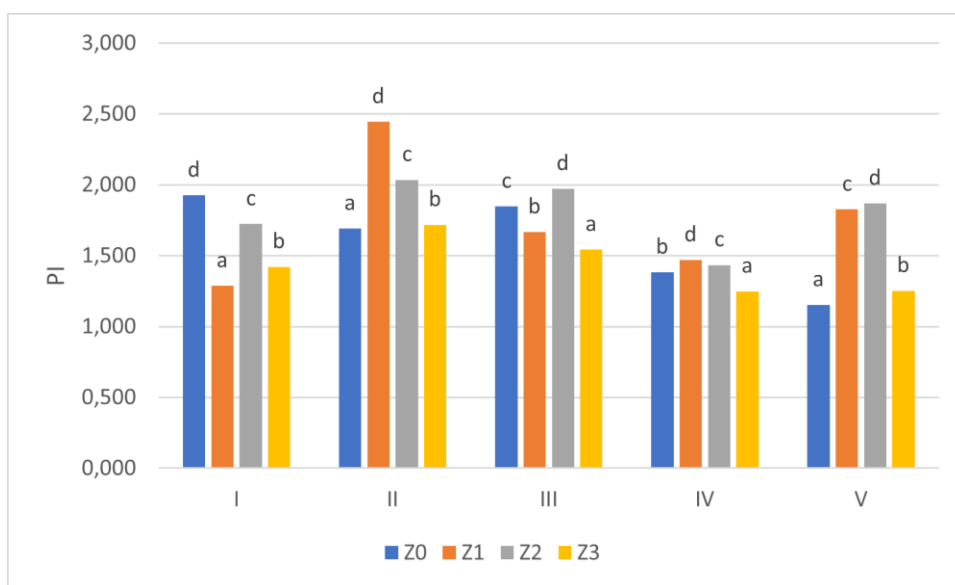
Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 3. 5 Wskaźnik witalności PS II (PI)

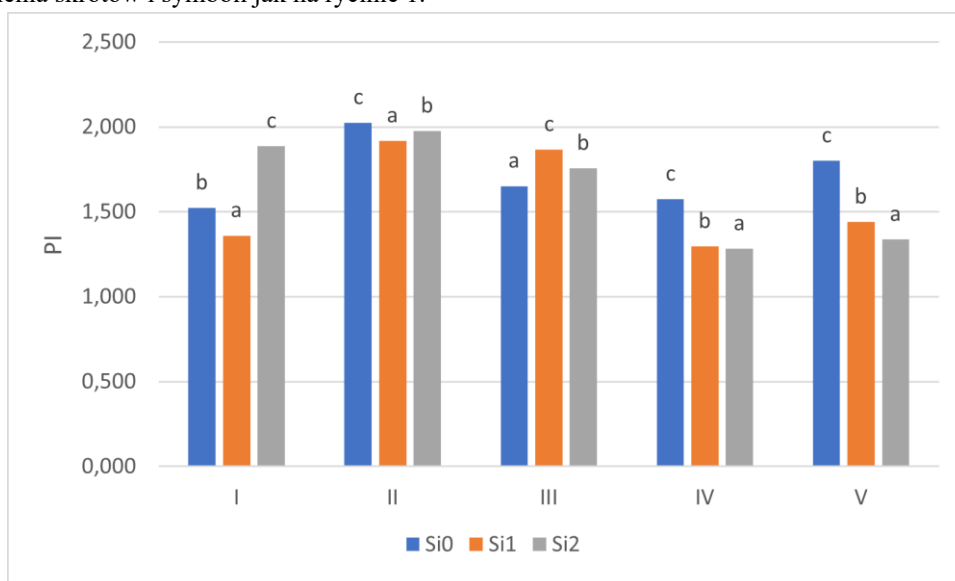
We wszystkich terminach badań stwierdzono istotny wpływ czynników głównych doświadczenia na wartości wskaźnika PI. W pierwszym terminie wykazano zmniejszenie PI pod wpływem podwyższonego stężenia NaCl (Z1, Z2 oraz Z3). W ostatnim terminie badań, najmniejsza wartość tego wskaźnika charakteryzowała rośliny kontrolne (ryc. 53). Wpływ poziomu żywienia krzemem na omawianą cechę fizjologiczną był zróżnicowany,

w zależności od terminu pomiaru. W IV i V terminie wykazano zmniejszenie wskaźnika witalności PSII, wraz ze zwiększaniem dawki soli krzemu (ryc. 54).

Analiza statystyczna wykazała istotność interakcji, jednakże wpływ współdziałania czynników doświadczalnych na wartość wskaźnika PI był bardzo zróżnicowany, w zależności od terminu pomiaru. Żywienie krzemem na poziomie Si1 zwiększyło PI u roślin rosnących w zasoleniu na poziomie Z1 (III termin) oraz Z3 (II termin). Jednocześnie krzem zastosowany w tym samym stężeniu zmniejszał wskaźnik witalności u pomidora z wariantu Z2 (II, IV i V termin) (tab. 35).



Ryc. 54. Wpływ poziomu zasolenia na wartości wskaźnika witalności PS II (PI) w liściach pomidora
Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 55. Wpływ stężenia soli krzemu na wartości wskaźnika witalności PS II (PI) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 35. Wartości wskaźnika witalności PS II (PI) w liściach pomidora

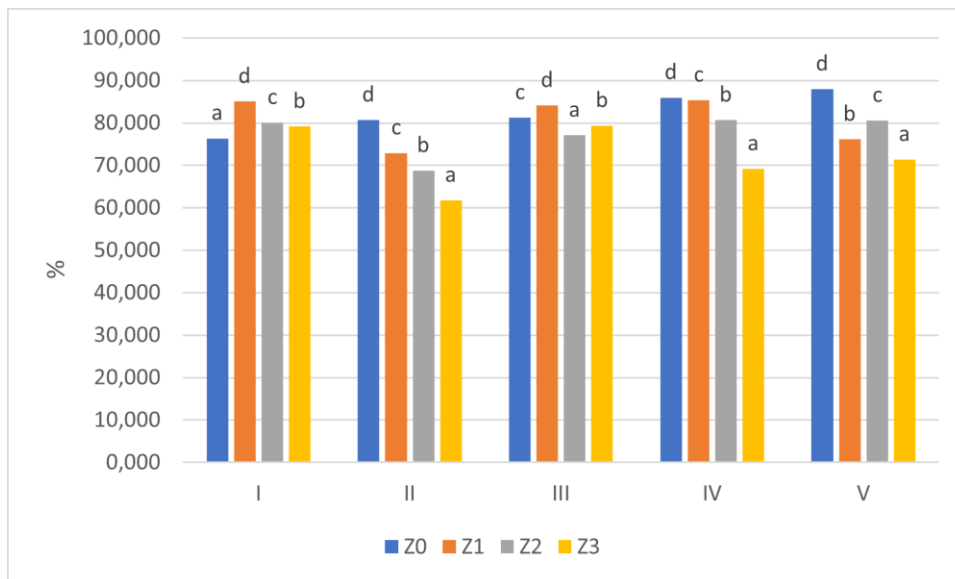
		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	2,36bc	0,91a	1,05a	1,75ab
	Si1	1,53ab	1,75ab	1,06a	1,08a
	Si2	1,87ab	1,19ab	3,05c	1,42ab
II termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,51abc	2,56ef	2,74f	1,26ab
	Si1	1,17a	2,80f	1,65abc	2,03cde
	Si2	2,37def	1,96bcde	1,70abcd	1,85abcd
III termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,38a	1,30a	2,57bc	1,34a
	Si1	1,50a	2,33bc	1,96ab	1,66a
	Si2	2,65c	1,35a	1,38a	1,62a
IV termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,48ab	1,69ab	1,84b	1,26ab
	Si1	1,25ab	1,57ab	1,15a	1,19a
	Si2	1,40ab	1,13a	1,29ab	1,28ab
V termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	1,16ab	2,16cd	2,74d	1,12ab
	Si1	0,95a	1,828bc	1,55abc	1,42abc
	Si2	1,34ab	1,48abc	1,31ab	1,20ab

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 4 Wskaźnik względnej zawartości wody w liściach (RWC)

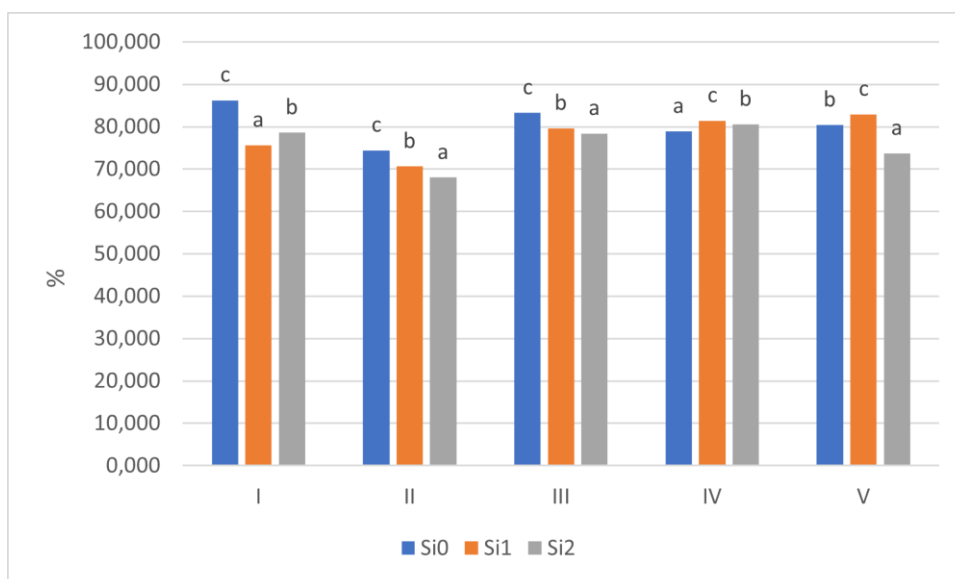
We wszystkich terminach pomiaru stwierdzono wpływ zróżnicowanych poziomów zasolenia oraz żywienia krzemem na względną zawartość wody w liściach pomidora. W II, IV i V terminie badań wykazano zmniejszenie wskaźnika RWC, wraz ze wzrastającym stężeniem NaCl w pożywce. W I terminie badań najmniejszą względną zawartość wody wykazywały obiekty kontrolne (Z0), w III zaś Z2 (ryc. 55). W trzech pierwszych terminach badań, największymi wartościami wskaźnika RWC charakteryzowały się rośliny z wariantu Si0, w dwóch ostatnich natomiast Si1 (ryc. 56).

Analiza współdziałania czynników doświadczalnych wykazała zmniejszenie względnej zawartości wody w liściach pomidora, w porównaniu z kombinacjami kontrolnymi u obiektów z kombinacji Z1Si2 (V termin) i Z2Si2 (I termin). Krzem wprowadzony do pożywki w dawce Si1 zwiększył natomiast omawianą cechę w kombinacji Z2Si1 w IV terminie badań (tab. 36).



Ryc. 56. Wpływ poziomu zasolenia na wskaźnik względnej zawartości wody (RWC) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 1.



Ryc. 57. Wpływ stężenia soli krzemu na wskaźnik względnej zawartości wody (RWC) w liściach pomidora

Objaśnienia skrótów i symboli jak na rycinie 30.

Tabela 36. Wskaźnik względnej zawartości wody w liściach pomidora - RWC [%]

		Stężenie NaCl			
		Z0	Z1	Z2	Z3
I termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	80,30abc	91,72c	91,38c	81,59abc
	Si1	63,14a	81,75abc	80,38abc	77,15abc
	Si2	85,61bc	81,60abc	68,41ab	78,65abc
II termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	80,97cd	75,87bcd	74,79abcd	66,08abc
	Si1	84,04d	69,43abcd	67,12abcd	61,83ab
	Si2	76,95bcd	73,42abcd	64,32abc	57,31a
III termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	77,37ab	91,72b	82,45ab	81,59ab
	Si1	80,61ab	80,27ab	80,38ab	77,15ab
	Si2	85,61ab	80,25ab	68,41a	79,29ab
IV termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	89,67d	87,13d	72,22abc	66,45a
	Si1	82,31bcd	85,73d	86,28d	71,35abc
	Si2	85,86d	83,17cd	83,41cd	69,73ab
V termin					
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	89,67b	86,89b	71,97ab	73,04ab
	Si1	88,35b	85,73b	86,28b	71,35ab
	Si2	85,86b	55,72a	83,41ab	69,73ab

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 5 Zawartość proliny

Wykazano wzrost zawartości proliny w liściach pomidora wraz ze zwiększaniem poziomu stężenia NaCl w pożywce. Stwierdzono także zmniejszenie jej zawartości jako efekt żywienia krzemem.

Wykazano istotność interakcji czynników eksperymentu. Najmniejsza zawartość proliny charakteryzowała liście roślin z kombinacji Z0Si1, największa zaś z Z3Si0 i Z3Si1. Stwierdzono spadek zawartości tego związku wraz ze zwiększaniem dawki soli krzemu, niezależnie od poziomu zasolenia NaCl. Wyjątek stanowiła kombinacja Z0Si2, w której nastąpił wzrost zawartości proliny oraz kombinacja Z3Si1, w której wartość nie uległa istotnej zmianie względem kombinacji kontrolnej (Z3Si0) (tab. 37).

Tabela 37. Zawartość proliny w liściach pomidora [mg · g⁻¹ św. m.]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na ₂ SiO ₃ · 5H ₂	Si0	1,74b	2,46e	2,91f	3,78h	2,72c
	Si1	1,61a	2,36d	2,45e	3,73h	2,54b
	Si2	2,07c	2,13c	2,30d	3,13g	2,41a
	Średnia	1,81a	2,32b	2,55c	3,54d	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 6 Aktywność katalazy i peroksydazy

Wykazano wpływ czynników głównych doświadczenia na aktywność katalazy w liściach badanego gatunku. Stwierdzono zmniejszenie aktywności tego enzymu wraz ze wzrostem stężenia NaCl oraz jej zwiększenie wraz ze wzrostem dawki soli krzemu.

Analiza średnich dla interakcji czynników wykazała najmniejszą aktywność katalazy u roślin z kombinacji Z3Si0, największą natomiast z kombinacji Z0Si2. Żywienie krzemem zarówno na poziomie Si1 jak i Si2 zwiększyło aktywność katalazy w liściach pomidora rosnącego w pożywce o zasoleniu Z0, Z2 oraz Z3. Zmniejszenie aktywności tego enzymu zanotowano natomiast u roślin z kombinacji Z1Si1 i Z1Si2 (tab. 38).

Tabela 38. Aktywność katalazy w liściach pomidora [μmol H₂O₂ · g⁻¹ św.m. · min⁻¹]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na ₂ SiO ₃ · 5H ₂	Si0	24,74h	23,18g	11,20b	9,31a	17,11a
	Si1	30,08i	14,00e	13,13d	14,06e	17,82b
	Si2	33,73j	17,38f	12,04c	11,07b	18,56c
	Średnia	29,52d	18,19c	12,12b	11,48a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

Wykazano istotny, zróżnicowany w zależności od poziomu stężenia NaCl wpływ tego czynnika na aktywność peroksydazy w liściach pomidora. W przypadku roślin z wariantu Z1 stwierdzono zmniejszenie aktywności POX w porównaniu z kontrolą. U wariantów Z2 oraz Z3 zanotowano natomiast jej wzrost. Żywienie krzemem, niezależnie od zastosowanego poziomu, powodowało zmniejszenie aktywności peroksydazy w porównaniu z kontrolą (Si0).

Na podstawie analizy interakcji czynników doświadczenia największą aktywność POX wykazano w liściach roślin z kombinacji Z3Si0, najmniejszą natomiast w Z0Si1. Żywienie krzemem zarówno na poziomie Si1 jak i Si2 zmniejszyło aktywność tego enzymu w roślinach rosnących w warunkach zasolenia na poziomie Z0, Z1 i Z3. Jednocześnie odnotowano wzrost aktywności peroksydazy u roślin z kombinacji Z2Si1 i Z2Si2, w porównaniu z kombinacją Z2Si0 (tab. 39).

Tabela 39. Aktywność peroksydazy w liściach pomidora [$\mu\text{mol H}_2\text{O}_2 \cdot \text{g}^{-1} \text{św.m.} \cdot \text{min}^{-1}$]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Si0	3,59h	3,23f	3,18e	5,16l	3,79c
	Si1	2,27a	2,68b	3,44g	4,20j	3,15a
	Si2	2,88d	2,73c	4,15i	4,85k	3,65b
	Średnia	2,91b	2,88a	3,59c	4,74d	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 7 Wyciek elektrolitów z tkanek liści

Podwyższone stężenie chlorku sodu spowodowało zwiększenie, w porównaniu z kontrolą, wycieku elektrolitów z tkanek liści pomidora. Największą wartość tego parametru stwierdzono u roślin z wariantu Z3 i była ona o 49,5% większa niż w kontroli (Z0). Wykazano także wpływ soli krzemu na omawianą cechę fizjologiczną. Największy wyciek elektrolitów cechował liście pomidora z wariantu Si1, największy natomiast z Si2 (tab. 43).

Wykazano istotne współdziałanie czynników eksperymentu na wyciek elektrolitów w liściach badanego gatunku. Największą wartość tego parametru stwierdzono w przypadku roślin z kombinacji Z3Si0, najmniejszą natomiast z kombinacji Z0Si0. Żywienie krzemem, niezależnie od poziomu zwiększyło wyciek elektrolitów w liściach roślin rosnących w pożywce o zasoleniu na poziomie Z0 oraz Z1. W przypadku obiektów z wariantu Z3, zanotowano natomiast zmniejszenie omawianego parametru pod wpływem soli krzemu (tab. 40).

Tabela 40. Wyciek elektrolitów (L_T/L_0) w liściach pomidora [%]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$	Si0	42,75a	75,76e	80,22g	111,70l	77,61b
	Si1	45,83b	80,40h	92,33i	78,94f	74,38a
	Si2	46,87c	103,48k	73,33d	93,47j	79,29c
	Średnia	45,15a	86,55c	81,96b	94,70d	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 8 Zawartość wybranych pierwiastków w części nadziemnej

Analiza statystyczna wykazała istotny wpływ czynników głównych doświadczenia oraz ich interakcji na zawartość wszystkich oznaczanych pierwiastków. Największą zawartość magnezu oraz potasu stwierdzono w obiektach wariantu Z0, najmniejszą natomiast w Z1. Największą zawartością wapnia oraz sodu charakteryzowały się natomiast, odpowiednio rośliny z wariantów: Z1 oraz Z2. Najmniejszą zawartość tych pierwiastków stwierdzono w obiektach rosnących w warunkach najwyższego stężenia NaCl (Z3). Analizując wpływ żywienia krzemem na omawiane cechy doświadczalne wykazano, że najmniejsza zawartość magnezu, potasu oraz sodu charakteryzowała obiekty kontrolne (Si0), wapnia natomiast obiekty wariantu Si1. Największą zawartość magnezu, oraz potasu wykazywały rośliny wariantu Si1, wapnia i sodu natomiast – Si2.

Analiza współdziałania czynników eksperymentu wykazała, że żywienie krzemem zarówno na poziomie Si1 jak i Si2 zwiększyło zawartość wszystkich oznaczanych pierwiastków w obiektach rosnących w pożywce o zasoleniu Z1. W przypadku roślin z wariantu Z3 wykazano natomiast zmniejszenie zawartości magnezu, wapnia i potasu w efekcie działania soli krzemu w obu zastosowanych dawkach. Stwierdzono także, że niezależnie od poziomu zasolenia NaCl, zawartość sodu w badanych roślinach wzrastała wraz ze wzrostem poziomu żywienia krzemem (tab. 41).

Tabela 41. Zawartość wybranych pierwiastków w roślinach pomidora [g·kg⁻¹]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Mg						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	10,73b	5,40a	11,67e	13,22i	10,25a
	Si1	16,43k	12,64g	12,65g	11,28d	13,25c
	Si2	11,27c	12,08f	13,62j	13,06h	12,51b
	Średnia	12,81d	10,04a	12,65c	12,52b	
Ca						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	37,00e	31,03c	46,41i	42,10g	39,14b
	Si1	42,29h	40,07f	32,26d	27,26b	35,47a
	Si2	56,84k	68,30l	46,47j	16,25a	46,97c
	Średnia	45,38c	46,47d	41,71b	28,54a	
K						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	59,20h	26,17a	54,44f	69,12k	52,23a
	Si1	78,70l	40,22b	44,81d	59,49i	55,80c
	Si2	48,05e	55,76g	64,59j	42,82c	52,80b
	Średnia	61,98d	40,72a	54,61b	57,14c	
Na						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	74,66i	42,94c	24,82a	38,47b	45,22a
	Si1	46,22d	55,14e	71,07h	60,94f	58,34b
	Si2	60,98g	118,92k	167,62l	77,10j	106,15c
	Średnia	60,62b	72,33c	87,84d	58,84a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

Zróznicowany poziom stężenia NaCl w pożywce wpłynął na wielkość stosunku K : (Ca+Mg). Największy zanotowano w przypadku roślin wariantu Z1, najmniejszy natomiast w Z3. Nie stwierdzono oddziaływania drugiego czynnika doświadczalnego na omawianą cechę. W przypadku interakcji czynników największą wartość stosunku K : (Ca+Mg) odnotowano w kombinacji Z3Si1- wynosił on 0,67 (tab. 42).

Tabela 42. Stosunek równoważnikowy zawartości K: (Ca+Mg) w części nadziemnej pomidora

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
K:(Ca+Mg)						
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂	Si0	0,56d	0,34a	0,43b	0,56d	0,47a
	Si1	0,58e	0,34a	0,43b	0,67f	0,51a
	Si2	0,33a	0,32a	0,48c	0,58e	0,43a
	Średnia	0,49b	0,33a	0,45b	0,60c	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

3. 2. 9 Powierzchnia liści

Stwierdzono zmniejszenie sumarycznej powierzchni asymilacyjnej liści pomidora wraz ze wzrostem poziomu stężenia NaCl w pożywce. Zanotowano także wpływ drugiego czynnika doświadczalnego na tę cechę fizjologiczną. Najmniejsza powierzchnia liści charakteryzowała obiekty wariantu kontrolnego (Si0), największa zaś wariantu Si1 (tab. 46).

Analiza interakcji czynników eksperymentu wykazała, że największą powierzchnią liści cechowały się rośliny z kombinacji Z0Si0, najmniejszą natomiast z Z3Si0. Żywienie krzemem, zarówno na poziomie Si1 jak i Si2 zwiększyło powierzchnię liści pomidora rosnącego w pożywce o zasoleniu na poziomie Z1, Z2 oraz Z3. W przypadku roślin z wariantu Z0 zanotowano natomiast zmniejszenie tej cechy, w porównaniu z kombinacją kontrolną (Z0Si0) pod wpływem soli krzemu zastosowanej w obu dawkach (tab. 43).

Tabela 43. Sumaryczna powierzchnia asymilacyjna liści pomidora [cm²/roślina]

		Stężenie NaCl				Średnia
		Z0	Z1	Z2	Z3	
Stężenie Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O	Si0	121,18l	89,86f	72,76b	62,44a	86,56a
	Si1	109,64k	91,02h	84,55d	89,32e	93,63c
	Si2	102,54j	93,43i	89,98g	78,34c	91,07b
	Średnia	111,12d	91,43c	82,43b	76,70a	

Objaśnienia skrótów i symboli jak w tabeli 23.

4. Dyskusja

Podwyższone stężenie soli należy do ważniejszych abiotycznych czynników stresogennych, który w znaczący sposób wpływa na ograniczenie wzrostu i produktywności roślin. Mechanizmy tolerancji tego stresu są przedmiotem badań prowadzonych na licznych gatunkach roślin (Mozafariyan i in. 2017, Xu i in. 2021, Rasool i in. 2022). Celem tych badań jest między innymi opracowanie jak najbardziej efektywnych metod, które mogą być stosowane w celu przeciwdziałania lub minimalizacji skutków stresu zasolenia.

W prezentowanych w niniejszej pracy badaniach oceniano wpływ zaopatrzenia roślin w selen oraz krzem na cechy fizjologiczno – biochemiczne pomidora rosnącego w warunkach zróżnicowanego, podwyższonego stężenia NaCl w hydroponikach.

Zdolność do przeprowadzania podstawowego procesu decydującego o produktywności roślin - fotosyntezy, jest bezpośrednio związana między innymi z zawartością barwników asymilacyjnych w liściach (Singh 2022). Nadmierne zasolenie niesie za sobą szereg zmian wpływających na zmniejszenie wydajności asymilacji CO₂, powodując między innymi uszkodzenie aparatu fotosyntetycznego poprzez reaktywne formy tlenu (ROS), zmianę proporcji chlorofilu „a” do „b” oraz zamykanie aparatów szparkowych. Powstawanie ROS stanowi następstwo, inicjowanego toksycznym działaniem zasolenia, uszkodzenia łańcucha transportu elektronów (ETC) (Wu 2014). W wyniku podwyższonego stężenia soli dochodzi do uszkodzenia błon cytoplazmatycznych chloroplastów oraz zwiększenia aktywności chlorofilazy i w efekcie do rozkładu chlorofilu (Gong 2018). Zmniejsza się także zawartość i aktywność RuBisCo (Lu 2009) oraz ostatecznie zdolność wiązania CO₂ (Aggarwal 2013, Gong 2018). Alzahib (2021) wskazuje również, że spadek zawartości chlorofilu może być wynikiem reakcji adaptacyjnej, mającej na celu redukcję aktywności wolnych rodników, będących efektem wzbudzenia energii w fotoukładach. Dodatkowo istotną rolę w reakcji stresu solnego odgrywają karotenoidy, chroniące błony plazmatyczne dzięki nieenzymatycznym właściwościom antyoksydacyjnym (Verma 2005, Lim 2012, ALKahtani 2020). Karotenoidy posiadają zdolność przekształcania nadmiaru pochłoniętej energii świetlnej w ciepło, redukując ilość energii zużywanej do przeprowadzania procesów enzymatycznych. Zmiany zawartości barwników fotosyntetycznych uznawane są za istotny element odpowiedzi roślin na działanie podwyższonego stężenia NaCl (Sali 2015, Gong 2018, Singh 2022).

W badaniach wielu autorów (Jamil 2007, Heidari 2012, Khan 2013, ALKahtani 2020) zwiększone stężenie soli wpływało bezpośrednio na redukcję zawartości barwników asymilacyjnych w liściach takich gatunków jak: rzodkiew zwyczajna, pszczelnik mołdawski, ogórek siewny i papryka roczna. Według Shahba (2010), zasolenie na poziomie $50 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ powodowało natomiast wzrost zawartości tych związków. Lim (2012) wskazuje na wzrost zawartości karotenoidów nawet w przypadku oddziaływania chlorku sodu w większym stężeniu. W badaniach własnych wykazano wzrost zawartości wszystkich oznaczanych barwników fotosyntetycznych, a w szczególności chlorofilu wraz ze wzrostem poziomu zasolenia (doświadczenie A) lub zanotowano zmniejszenie zawartości zarówno wszystkich form barwników chlorofilowych jak i karotenoidów pod wpływem najwyższego zastosowanego poziomu zasolenia ($100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$) – w doświadczeniu B.

W przeprowadzonych badaniach wykazano zróżnicowany, zależny zarówno od poziomu zasolenia NaCl jak i wielkości dawki soli selenu, wpływ żywienia tym pierwiastkiem na zawartość wszystkich oznaczanych barwników fotosyntetycznych w liściach pomidora. Zaznaczył się dodatni wpływ selenu na zwiększenie ich zawartości, w szczególności u roślin rosnących w warunkach największego zasolenia – $100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$. Rezultaty badań nad wpływem selenu na zawartość barwników asymilacyjnych zawarte w dostępnej literaturze są zróżnicowane. Hasanuzzaman i in. (2020) stwierdzili fitotoksyczne działanie selenu w dawce powyżej $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, przejawiające się m.in. w zmniejszeniu zawartości barwników asymilacyjnych. Karimi i in. (2020) wykazali natomiast zwiększenie zawartości barwników fotosyntetycznych w liściach *Vitis vinifera* L. rosnących w warunkach zasolenia na poziomie $75 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, traktowanych dolistnie selenem w stężeniu $5,0 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Stosowanie krzemu w celu zredukowania szkodliwych efektów działania nadmiernego zasolenia zostało podjęte w badaniach wielu autorów na takich gatunkach jak np.: ogórek (Walaia i in. 2010, Amerian i in. 2024), rzepak (Farshidi 2012), pszenica (Zia i in. 2021), kukurydza (Xu i in. 2022).

El Moukhtari i in. (2021), Singh (2022) i Xu i Liwei (2022) stwierdzili korzystne oddziaływanie tego pierwiastka zastosowanego w dawkach $3,0$ i $2,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, przejawiające się zwiększeniem zawartości barwników asymilacyjnych w liściach odpowiednio: lucerny, pszenicy i kukurydzy. W badaniach własnych nie wykazano jednoznacznego wpływu żywienia roślin krzemem na zawartość wszystkich oznaczanych

form chlorofilu oraz karotenoidów w liściach pomidora rosnącego w warunkach zróżnicowanego stężenia NaCl. Np. w przypadku chlorofilu „a”, w niższym zasoleniu ($50 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$) krzem pozostawał bez wpływu lub powodował zmniejszenie zawartości tego barwnika, gdy tymczasem w największym zastosowanym stężeniu NaCl ($100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$) notowano jej wzrost, w szczególności pod wpływem wyższej dawki krzemu – $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$. Podobne zależności wykazywano także dla chlorofilu całkowitego. W przypadku karotenoidów obserwowano wzrost ich zawartości pod wpływem krzemu w warunkach nie podwyższonego stężenia NaCl, gdy tymczasem w zasoleniu wyższym (Z2 i Z3) notowano zmniejszenie zawartości tych barwników.

Wielu autorów wskazuje na fakt, że stres solny ma istotny wpływ na parametry wymiany gazowej u roślin, prowadząc do zmniejszenia intensywności fotosyntezy i transpiracji, a także przewodnictwa szparkowego oraz do wzrostu wewnętrznego stężenia CO_2 , co spowodowane jest między innymi zamykaniem aparatów szparkowych (Xue i in. 2002, Hamani i in. 2020, Koc 2022, Altuntas i in. 2024).

W badaniach własnych stwierdzono zmniejszenie natężenia procesu asymilacji CO_2 wraz ze wzrostem poziomu stężenia NaCl. Zależność taką wykazano także w jednym z doświadczeń dla transpiracji. W przypadku intensywności transpiracji zaobserwowano jednakże jej wzrost u roślin rosnących w pożywce o stężeniu $75 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$, który uwidocznił się po dłuższym czasie ekspozycji na podwyższone stężenie NaCl. W badaniach przeprowadzonych na bawełnie i fasoli, odnotowano znaczące spadki wskaźnika fotosyntezy netto pod wpływem wysokich stężeń NaCl, wynoszących $120 - 150 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$ (Anaya i in. 2022, Altuntas i in. 2024). Według Hamani i in. (2020), w przypadku bawełny poddanej działaniu zasolenia na poziomie $150 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$, wskaźnik fotosyntezy netto zmniejszył się o 46% natomiast intensywność transpiracji o 75%. Podobne wyniki uzyskano w badaniach na kukurydzy (Ali i in. 2021) i soi (Peña-Calzada i in. 2023), w których chlorek sodu w zwiększonych stężeniach (odpowiednio 80 i 160 oraz $100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$) powodował skrajne spadki wszystkich powyższych parametrów wymiany gazowej.

W prezentowanych w pracy badaniach własnych stwierdzono wzrost natężenia asymilacji CO_2 pod wpływem selenu zastosowanego w dawce $5,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zarówno u pomidora rosnącego w warunkach podwyższonego stężenia NaCl (Z2 i Z3) jak i w kontroli. Selen w stężeniu wyższym ($10 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$) zwiększał intensywność tego procesu przede wszystkim w warunkach najwyższego zasolenia. Wpływ selenu na

natężenie transpiracji badanych roślin rosnących w warunkach zróżnicowanego stężenia NaCl był zróżnicowany. Zaobserwowano między innymi wzrost transpiracji po zastosowaniu selenu w dawce $5,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ u pomidorów rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl.

W przeprowadzonych badaniach, w przypadku roślin rosnących w warunkach zasolenia na poziomie 50 oraz $75 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, wykazywano wzrost natężenia asymilacji CO_2 jako efekt oddziaływania krzemu zastosowanego w zależności od terminu badań w dawce 1,5 lub $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$. U roślin z wariantu Z3 wzrost asymilacji CO_2 notowano przede wszystkim pod wpływem krzemu w dawce Si1. Krzem w dawce zarówno Si1 jak i Si2 wpływał także w niektórych z terminów badań własnych na wzrost natężenia transpiracji, w szczególności u roślin z wariantów Z2 oraz Z3. Jednocześnie zaznaczyć należy, że w okresie dłuższej ekspozycji na działanie czynników doświadczalnych (IV i V termin pomiaru), zarówno u roślin kontrolnych (Z0) jak i z wariantów Z1 i Z2 obserwowano zmniejszenie transpiracji na skutek działania krzemu w obu zastosowanych dawkach.

Zastosowane w badaniach własnych, podwyższone poziomy stężenia chlorku sodu na ogół zmniejszały przewodnictwo szparkowe dla wody oraz stężenie CO_2 w przestworach międzykomórkowych liści pomidora. W przypadku parametru c_i najmniejsze jego wartości notowano przy różnych poziomach stężenia NaCl – w zależności od terminu pomiaru były to warianty Z1, Z2 lub Z3.

Największy wpływ na zwiększenie wartości g_s zarówno w liściach roślin kontrolnych jak i z wariantów Z1, Z2 i Z3 wywarł selen zastosowany w dawce $5,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. W przypadku dawki wyższej - $10 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, oddziaływanie takie było widoczne po dłuższej ekspozycji na czynniki doświadczalne, w ostatnim z terminów pomiaru. W przypadku krzemu odnotowywano wzrost przewodnictwa szparkowego dla wody na skutek oddziaływania dawki Si1 lub Si2, w zależności od terminu pomiaru oraz poziomu zasolenia pożywki. We wszystkich terminach badań wykazano wzrost wartości g_s w liściach pomidora rosnącego w warunkach najwyższego stężenia NaCl na skutek oddziaływania krzemu w dawce Si1. Zaobserwowano także, iż po dłuższej ekspozycji na czynniki eksperymentalne (IV i V termin pomiaru) krzem w obu zastosowanych dawkach zmniejszał przewodnictwo szparkowe roślin z wariantów Z1 lub Z2. Podobne rezultaty badań nad wpływem podwyższonego stężenia NaCl na wartość przewodnictwa

szparkowego (spadek o 68 i 45%) wykazali także w badaniach na takich gatunkach jak: pieprz i bawełna odpowiednio: Hamani i in. (2020) oraz Altuntas i in. (2022).

Selen wpłynął w zróżnicowany sposób, zależny zarówno od wielkości jego dawki, jak i poziomu stężenia NaCl oraz terminu pomiaru na wartość stężenia CO₂ w przestworach międzykomórkowych liści badanego gatunku. Między innymi stwierdzano jej zmniejszenie wraz ze wzrostem dawki selenu zarówno u roślin kontrolnych jak i rosnących w warunkach podwyższonego stężenia soli (Z1 i Z3).

W badaniach własnych stwierdzano wpływ obu poziomów żywienia krzemem na zmniejszenie wartości parametru c_i zarówno u roślin rosnących w warunkach podwyższonego zasolenia jak i kontrolnych. Wpływ taki był widoczny od II terminu pomiaru.

W badaniach nad wpływem selenu na pszenicę (Desoky i in. 2021), pomidora (Hajlaoui i in. 2023) i rzepak (Hussain i in. 2024) rosnące w warunkach stresu zasolenia wykazano korzystny wpływ tego pierwiastka na wzrost takich parametrów wymiany gazowej jak: natężenie asymilacji, intensywność transpiracji, przewodnictwo szparkowe oraz względna zawartość CO₂ w przestrzeniach międzykomórkowych. Podobne wyniki badań nad łagodzącym efekt stresu solnego działaniem krzemu uzyskano w przypadku kukurydzy (Ali i in. 2021), soi (Peña-Calzada i in. 2023) oraz lukrecji (Shen i in. 2024). Chung (2020) stosując NaCl w stężeniu 100 mmol · dm⁻³ oraz krzem w dawce 2,0 mmol · dm⁻³ wskazuje jednak na zmniejszenie natężenia asymilacji CO₂ i transpiracji oraz przewodnictwa szparkowego dla wody oraz wzrost stężenia CO₂ w przestworach międzykomórkowych liści.

Wydajność procesu fotosyntezy jest bezpośrednio uzależniona od prawidłowego funkcjonowania fotoukładu PSII, odpowiedzialnego za przejmowanie energii fotonów światła widzialnego. Dalsze jej wykorzystanie może przebiegać na drodze jednego z trzech procesów: fotosyntezy, radiacji cieplnej lub rozproszenia w postaci fluorescencji. Drogi te wzajemnie się ograniczają i stąd zwiększenie wydajności jednej z nich prowadzi do osłabienia dwóch pozostałych (Maxwell i Johnson 2000). Uszkodzenia powodowane przez powstające w efekcie działania zasolenia ROS, prowadzą do zaburzeń gospodarki jonowej komórek, rozkładu chlorofilu (Singh i in. 2022), uszkodzenia zdolności regeneracyjnych NADP⁺ oraz zmniejszenia przewodności szparkowej dla CO₂ (Sharma i in. 2020). Wszystkie te elementy obniżają wydajność PSII co pozwala na

wykorzystanie parametrów fluorescencji chlorofilu „a” do oceny wydajności przemian fotochemicznych w odpowiedzi na czynniki środowiskowe (Maxwell i Johnson 2000, Kalaji 2018, Arizanova 2019, Sharma 2020). Jednocześnie należy podkreślić, że w przypadku niektórych parametrów FL, nie odnotowano ich dostatecznej wrażliwości na działanie określonych stresorów abiotycznych (Kalaji 2014).

W badaniach własnych określono wartości szeregu parametrów FL chlorofilu stosowanych w ocenie reakcji różnych gatunków roślin, w tym na stres solny (Ghorbani 2018, Harizanova 2019, Faseela 2020, Loudari 2020, Akhter 2021). FL początkowa (F_0), jest indykatorem strat energii wykorzystywanej do wzbudzenia fotosystemu PSII (Murkowski 2002). Wysoka wartość fluorescencji początkowej oznacza słabsze przekazywanie energii między fotoukładami. W badaniach własnych zaobserwowano zróżnicowaną reakcję tego parametru FL na zastosowane poziomy stężenia NaCl. Najwyższe wartości F_0 notowano zarówno w obiektach Z0 jak i Z3. Nie wykazano wyraźnego wpływu selenu na ten parametr FL. Jedynie w IV terminie pomiaru, u roślin z wariantu Z2 zanotowano korzystne zmniejszenie F_0 pod wpływem obu zastosowanych dawek selenu. W przypadku wpływu krzemu, w czterech terminach pomiaru stwierdzono zmniejszenie FL początkowej jako efekt wprowadzenia go do pożywki zarówno w stężeniu 1,5 jak i 3,0 mmol · dm⁻³.

Wielkość parametru FL zmiennej (F_v) wynika bezpośrednio z maksymalnej wydajności energetycznej fotoukładu PSII, wskazując na jego mniejszą aktywność wraz ze spadkiem wartości tego parametru (Kalaji i Łaboda 2010). W przeprowadzonych obu doświadczeniach własnych, wykazano zmniejszenie wartości F_v pod wpływem wszystkich poziomów zasolenia, które uwidocznilo się w I terminie pomiaru. W ostatnim z terminów pomiaru zanotowano natomiast wzrost tego parametru pod wpływem wzrastającego stężenia NaCl. W badaniach własnych, w trzech terminach pomiaru wykazano wzrost F_v pod wpływem selenu zastosowanego w stężeniu Se1. Stwierdzano także zwiększenie wartości tego wskaźnika pod wpływem działania soli krzemu zarówno w dawce Si1 jak i Si2 w przypadku roślin rosnących w podwyższonym zasoleniu (Z1 – Z3). Zależność taką obserwowano przede wszystkim w pierwszych trzech terminach badań.

Jak podają Kalaji i Łaboda (2010), zmniejszenie wartości parametru F_M , czyli FL maksymalnej świadczy o tym, że roślina znajduje się pod wpływem stresu, którego działanie powoduje, że nie wszystkie akceptory elektronów w PSII mogą zostać całkowicie zredukowane. W przeprowadzonych badaniach własnych stwierdzano

zróżnicowany wpływ zastosowanego stężenia NaCl na wartość wskaźnika F_M . Zmniejszenie FL maksymalnej wykazano w obu doświadczeniach po 48 godzinach ekspozycji na zasolenie. Wprowadzenie do pożywki o podwyższonym stężeniu NaCl (Z1, Z2 i Z3) selenu, niezależnie od dawki zwiększyło ten parametr FL oznaczony po 96 godzinach ekspozycji na czynniki doświadczalne. W badaniach własnych wykazano także wpływ krzemu, szczególnie w wyższej zastosowanej dawce, na wzrost wartości wskaźnika F_M u pomidora z wszystkich wariantów stężenia NaCl w pożywce. Po dłuższym czasie ekspozycji (III - V termin), stwierdzano także zmniejszenie F_M na skutek oddziaływania krzemu w dawce Si2.

Kolejnym oznaczanym parametrem FL chlorofilu był, stosunek FL zmiennej do maksymalnej (F_V/F_M), określający maksymalną wydajność fotoukładu PSII. Współczynnik ten uznawany jest za wiarygodny i skuteczny w określaniu stanu fizjologicznego roślin poddanych działaniu stresu, a spadek jego wartości uznaje się za oznakę wynikającą z działania stresora fotoinhibicji (Angelini i in. 2001). Jego wartość w roślinach w fazie pełnego rozwoju, nie znajdujących się w stanie stresu wynosi zazwyczaj maksymalnie około 0,83. Zastosowane w badaniach własnych poziomy stężenia NaCl nie wpłynęły w znaczący sposób na wartość tego parametru FL chlorofilu. W jednym z doświadczeń, po 48 godzinach ekspozycji na stężenie NaCl na poziomie Z1 i Z3 wykazano zmniejszenie F_V/F_M . Wykazano także nieznaczne oddziaływanie selenu na ten parametr w przypadku roślin rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl. Uwidocznilo się ono głównie w II terminie pomiaru, gdy stwierdzono wzrost F_V/F_M jako efekt działania selenu w dawce zarówno Se1 jak i Se2. Wykazano wpływ obu dawek krzemu, a szczególnie wyższej ($3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$) na zwiększenie wartości wskaźnika F_V/F_M u roślin rosnących w warunkach podwyższonego zasolenia - był on widoczny w trzech pierwszych terminach pomiaru.

Wskaźnik witalności PI określa ogólną wydajność fotoukładu PSII, w tym jego zdolność do przyjmowania i przekazywania elektronów między systemami barwników, a szczególnie liniowego przekazywania elektronów na PSI (Kalaji 2011, Akhter 2021). Živčák i in. (2015) wskazują natomiast na skuteczniejsze wykorzystanie tego parametru w ocenie aktywności dobowej fotoukładów, niż analizie ich właściwości w różnych próbkach. W badaniach własnych wykazano bardzo zróżnicowany wpływ zastosowanych poziomów stężenia NaCl na wartość wskaźnika PI. Największe jego wartości wykazywano dla obiektów z różnych wariantów zasolenia, w zależności od terminu pomiaru. Stwierdzono zmniejszenie PI, pod wpływem każdego z zastosowanych

poziomów stężenia NaCl już po 48 godzinach. W jednym z doświadczeń, w ostatnim terminie pomiaru (28 dób ekspozycji) najmniejsze wartości tego wskaźnika wykazywały natomiast rośliny kontrolne (Z0). W większości terminów pomiarów nie stwierdzono wpływu selenu na wartość wskaźnika PI u pomidora rosnącego w warunkach zróżnicowanego stężenia NaCl. Wpływ krzemu był także niejednoznaczny – wykazywany w pojedynczych terminach.

Podwyższone stężenie soli powoduje liczne zmiany w strukturach komórkowych i ich funkcjonowaniu, uszkadzając błony plazmatyczne i prowadząc do zaburzenia gospodarki wodnej rośliny. Bezpośrednim rezultatem tych uszkodzeń jest spadek turgoru (Singh 2020), co w efekcie wpływa na proces transpiracji i zdolność pobierania oraz transportu wody w roślinie. Prowadzi to do zmian w wartościach parametrów bilansu wodnego liści tj. wskaźnika względnej zawartości wody (RWC) oraz powiązanego z nim bezpośrednio deficytu wysycenia tkanek wodą (WSD) - Singh (2022).

Ahanger i in. (2020) oraz Rangseekaew (2021) wykazali zmniejszenie wskaźnika RWC u pomidora jako skutek stresu solnego. Podobnie w badaniach własnych zastosowane poziomy stężenia NaCl w pożywce powodowały spadek wskaźnika RWC. W jednym z doświadczeń, w kilku terminach badań stwierdzono zmniejszenie względnej zawartości wody w liściach badanych roślin, wraz ze wzrostem poziomu zasolenia.

W przeprowadzonych badaniach, w większości terminów pomiaru nie wykazano wpływu selenu na wartość RWC roślin rosnących w zróżnicowanych warunkach stężenia NaCl. Stwierdzono natomiast, że po dłuższej ekspozycji na działanie czynników doświadczalnych (IV i V termin pomiaru), selen niezależnie od stężenia zwiększał względną zawartość wody.

W badaniach własnych krzem zastosowany w stężeniu $1,5 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, w dwóch ostatnich terminach badań zwiększał wartość RWC, gdy tymczasem w okresie do 96 dób ekspozycji na czynniki doświadczalne obserwowano zmniejszenie względnej zawartości wody w liściach roślin żywionych krzemem. Wpływ krzemu na RWC, w warunkach zróżnicowanego stężenia NaCl wykazywano w pojedynczych terminach pomiaru. Pod jego wpływem obserwowano zarówno zmniejszenie tego wskaźnika - w kombinacjach Z1Si2 i Z2Si2 jak i zwiększenie – kombinacja Z2Si1. W badaniach El Moukhtari i in. (2021) oraz Singh (2022) przeprowadzonych w warunkach stresu solnego, wykazano zmniejszenie wartości RWC pod wpływem krzemu zastosowanego zarówno w dawce $2,0$ jak i $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ w kombinacjach kontrolnych. W przypadku roślin rosnących w podwyższonym zasoleniu $40 - 120 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$ autorzy

wskazują natomiast na korzystne działanie krzemu przejawiające się zwiększeniem wartości RWC.

Badania nad wpływem stresu solnego na różne gatunki roślin w tym między innymi: truskawkę, winorośl, lucernę i pszenicę wskazują, że czynnik ten oddziałuje na zmniejszenie powierzchni blaszek liściowych (Zahedi 2019, Karimi 2020, Tian Fei i in. 2020, Saddiq i in. 2021). Także w badaniach własnych wykazano zmniejszenie sumarycznej powierzchni asymilacyjnej liści pomidora wraz ze wzrostem stężenia NaCl. Według Zahedi (2019), Karimi i in. (2020), El Moukhtari i in. (2021) oraz Sultana (2021), zaopatrzenie roślin rosnących w warunkach stresu solnego w krzem lub selen może zwiększać powierzchnię ich liści. W przeprowadzonych badaniach własnych, w przypadku roślin rosnących w warunkach podwyższonego zasolenia (Z1, Z2 i Z3) żywienie zarówno selenem jak i krzemem, w obu zastosowanych dawkach zwiększyło powierzchnię liści. U pomidora wariantu kontrolnego (Z0) stwierdzono natomiast zmniejszenie powierzchni liści pod wpływem krzemu zastosowanego w obu dawkach. Wyniki badań własnych znajdują więc potwierdzenie w literaturze.

W warunkach homeostazy równowagę oksydacyjną regulują w roślinie między innymi enzymy, w tym katalaza i peroksydaza (Singh 2022). Posiadają one silną zdolność rozkładania H_2O_2 chroniąc błony plazmatyczne (Moradbeygi 2020). W sytuacji ekspozycji na zwiększone zasolenie podłoża, ilość ROS w komórkach wzrasta, co w efekcie indukuje intensywną produkcję przeciwutleniaczy, w tym katalazy i peroksydazy (Singh 2022). Jednocześnie silne działanie ROS, będące efektem zasolenia, prowadzi do szeregu zmian takich jak: uszkodzenie błon plazmatycznych i zmniejszenie przewodności szparkowej, a w następstwie upośledzenie procesów biochemicznych, w tym syntezy katalazy i peroksydazy (Taha i in. 2021, Singh 2022). Poziom aktywności katalazy i peroksydazy nie jest zatem wskaźnikiem jednoznacznym. Zwiększone wartości mogą wskazywać na intensywniejszy stres, ale też jednocześnie na intensywną walkę z ROS (Sofa 2015). Latef (2011) wskazuje, że w licznych badaniach nad aktywnością tych enzymów w warunkach stresu solnego uzyskiwano różne wyniki, w zależności od badanego gatunku i poziomu zasolenia. W badaniach własnych wykazano spadek aktywności katalazy wraz ze wzrostem poziomu stresu solnego. Jednocześnie stwierdzono, że selen w obu zastosowanych dawkach zwiększył aktywność CAT. W przypadku wpływu krzemu wykazano wzrost aktywności CAT wraz ze wzrostem jego dawki. Zarówno selen jak i krzem w obu zastosowanych dawkach zwiększały aktywność CAT zarówno u roślin kontrolnych (Z0) jak i z wariantów Z2 i Z3.

W przeprowadzonych badaniach udowodniono wzrost aktywności peroksydazy wraz ze wzrostem stężenia NaCl. Jedynie w doświadczeniu B, wykazano jej zmniejszenie u roślin z wariantu Z1. Zastosowanie selenu zarówno w stężeniu 5,0 jak i 10 $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, w przypadku każdego z poziomów zasolenia zwiększało aktywność POX w liściach badanego gatunku. Oddziaływanie krzemu na aktywność POX było zróżnicowane, zależne głównie od stężenia NaCl. W obu zastosowanych dawkach krzem zmniejszał aktywność POX u roślin wariantów Z0, Z1 i Z3, natomiast w przypadku obiektów Z2 – powodował jego wzrost.

Prolina jest endogennym aminokwasem o właściwościach osmolitycznych, syntetyzowanym przez rośliny w reakcjach stresu fizjologicznego (El Moukhtari i in. 2020). Jako silny nieenzymatyczny antyutleniacz posiada zdolność ochrony błon plazmatycznych przed stresem oksydacyjnym poprzez stabilizację enzymów i białek błonowych (Zhu 2020). Ponadto prolina posiada zdolność wiązania ROS, dzięki czemu jest zdolna do zmniejszania efektów toksyczności jonów (Gohari i in. 2021) oraz wstrzymywania apoptozy komórek (Cao 2020). Pełni wraz z enzymatycznymi antyutleniaczami istotną rolę w utrzymaniu równowagi oksydacyjnej w roślinie (Singh i in. 2022). Jak wskazują liczni autorzy, zawartość endogennej proliny w roślinie wzrasta wraz z intensyfikacją fizjologicznej odpowiedzi na podwyższone stężenie soli (Zahra 2010, Doğan 2011, Sdougá 2019, Hnilickova 2021).

W badaniach własnych, podobnie jak w pracach Almeida (2014), Kahlaoui (2018), De la Torre-González (2018), Devkar (2020) i Shin (2020), udowodniono wzrost zawartości proliny w liściach pomidora wraz ze zwiększaniem stężenia NaCl w pożywce.

Ghanbari (2023) wykazał zmniejszenie syntezy proliny na skutek działania selenu w dawce 10 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ w przypadku wysokich stężeń chlorku sodu (120 - 160 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$). W doświadczeniach El Moukhtari i in. (2021) i Singh i in. (2022) dodatek krzemu w dawkach 2,0 i 3,0 $\text{mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ powodował spadek zawartości proliny w roślinach rosnących w zasoleniu na poziomie 40 - 120 $\text{mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$.

W przeprowadzonych badaniach, selen w dawce 5,0 $\mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zmniejszył zawartość proliny w liściach badanego gatunku rosnącego w warunkach podwyższonego stężenia NaCl (Z1 – Z3). W najwyższym zastosowanym zasoleniu (Z3) zaobserwowano zmniejszenie kumulacji tego aminokwasu wraz ze wzrostem dawki selenu. W badaniach własnych, na ogół stwierdzono spadek zawartości proliny wraz ze zwiększaniem dawki soli krzemu, niezależnie od poziomu zasolenia NaCl.

Zasolenie podłoża prowadzi do utrudnienia w pobieraniu składników pokarmowych przez rośliny, szczególnie potasu, magnezu i wapnia, w efekcie konkurencyjnego działania jonów sodu oraz chloru. Jak podają Smoleń i in. (2020), Šamec i in. (2021) oraz Balasubramaniam i in. (2023), intensywność spadku zawartości tych pierwiastków uzależniona jest od czasu ekspozycji, gatunku rośliny oraz dawki NaCl. Zastosowane w badaniach własnych poziomy zasolenia wpłynęły w zróżnicowany sposób na zawartość oznaczanych pierwiastków w roślinach. Biorąc pod uwagę obydwa doświadczenia stwierdzono, że obiekty wariantu Z3 ($100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$) charakteryzowały się najmniejszą zawartością Mg, K, Na oraz Ca. W przypadku wpływu pozostałych poziomów stężenia soli, tj Z1 i Z2, stwierdzano intensyfikację kumulacji K (eksperyment A) oraz Ca i Na (eksperyment B). Według Smolenia i in. (2020), zasolenie $100 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$ powodowało zmniejszenie zawartości Mg i K, nie wpłynęło na zawartość wapnia i znacząco zwiększyło ilość sodu w liściach marchwi. Šamec i in. (2021), analizując wpływ zróżnicowanego stężenia soli ($50, 100$ i $200 \text{ mmol NaCl} \cdot \text{dm}^{-3}$) na zmniejszenie zawartości Mg, K i Ca oraz wzrost Na w roślinach kapustnych zwracają uwagę na różnice pomiędzy gatunkami, co pokazuje istotność specyfiki gatunkowej w reakcji roślin na zasolenie.

W przeprowadzonych badaniach udowodniono wzrost zawartości Ca oraz zmniejszenie Na, w roślinach rosnących w warunkach największego stężenia NaCl, po zastosowaniu selenu w dawce $10 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. Podobne rezultaty dotyczące zwiększenia zawartości Ca i K oraz zmniejszenia zawartości sodu uzyskali również w warunkach dużego zasolenia Desoky i in. (2021) u pszenicy oraz Hajlaoui i in. (2023) u pomidora. Da Cruz Ferreira i in (2020), podają natomiast, że zastosowanie selenu, w bardzo zróżnicowanym stężeniu (od $2,0$ do $128 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$) u roślin nie znajdujących się w stresie solnym zmniejszało zawartość K, Ca i Mg. Jednocześnie w badaniach własnych wykazano zmniejszenie kumulacji sodu pod wpływem selenu zarówno w dawce Se1 jak i Se2 u obiektów wariantów Z0, Z1 i Z2.

Wpływ krzemu na zawartość oznaczanych pierwiastków był uzależniony od stężenia NaCl w pożywce. W przypadku obiektów rosnących w zasoleniu $50 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ wykazano zwiększenie ich zawartości po zastosowaniu krzemu zarówno w dawce Si1 jak i Si2. W bardzo zbliżonych warunkach zasolenia, zwiększenie zawartości potasu jako efekt działania krzemu wykazali także Ali i in (2021) oraz Al Murad i in. (2022).

W badaniach własnych, u pomidora z każdego z wariantów zasolenia stwierdzono wzrost ilości sodu wraz ze wzrostem dawki krzemu. Odmienne rezultaty badań nad wpływem krzemu na zawartość tego pierwiastka w roślinach rosnących w warunkach podwyższonego stężenia soli wykazali natomiast Abbas i in. (2015) u okry, Ali i in. (2021) u kukurydzy oraz Al. Murad i in. (2022) u fasoli złotej. Ponadto w badaniach własnych krzem w obu zastosowanych dawkach zmniejszył zawartość Mg, Ca i K w roślinach rosnących w warunkach najwyższego stężenia NaCl.

Stosunek zawartości kationów jedno do dwuwartościowych w roślinach jest ważną cechą z uwagi na zjawisko antagonizmu koloidalnego i wpływ na uwodnienie koloidów komórkowych. Niewłaściwa proporcja prowadzi w tym przypadku do nadmiernej przepuszczalności błon plazmatycznych lub przeciwnie, do utrudnienia przepuszczania przez nie substancji, co w efekcie prowadzi do zaburzenia gospodarki wodnej wewnątrz komórki. W przeprowadzonych badaniach wykazano zróżnicowany, zależnie od doświadczenia, wpływ zastosowanego stężenia NaCl w pożywce na ten parametr. Analizując oddziaływanie selenu stwierdzono, że najmniejsze wartości stosunku K: (Ca+Mg) cechowały pomidora z wariantu Z3Se2.

Nie wykazano wpływu krzemu na tę cechę, a w przypadku średnich dla interakcji największą wartość K: (Ca+Mg) odnotowano u pomidora rosnącego w warunkach największego stężenia NaCl, przy dawce Si1.

Wyciek elektrolitów jest jednym z głównych wyznaczników stopnia uszkodzenia błon plazmatycznych komórek (Mansour i Salama 2004), a jego wzrost pod wpływem zwiększającego się stężenia chlorku sodu obserwowany był u różnych gatunków, w tym u pomidora (Khan i in. 2013, Kotagiri i Kollurun 2017, Hniličková i in. 2019, ALKahtani i in. 2020, Ahanger i in. 2020, Ors i in. 2021, Feghhenabi i in. 2023). W badaniach własnych, w przypadku obu doświadczeń, zwiększenie stężenia NaCl powodowało wzrost wycieku elektrolitów. Wykazano także zwiększenie wartości L_T/L_0 pod wpływem wzrastającej dawki zarówno selenu jak i krzemu u pomidora rosnącego w warunkach najmniejszego stężenia NaCl (Z1) oraz kontrolnych (Z0). W przypadku roślin rosnących w warunkach największego stresu solnego (Z3) żywienie tak selenem jak i krzemem w obu zastosowanych dawkach zmniejszyło wyciek elektrolitów. Świadczyć to może o łagodzącym wpływie tych pierwiastków na procesy związane z uszkodzeniami błon cytoplazmatycznych. Karimi i in. (2020) oraz Ghanbari i in. (2023) wykazali zmniejszenie wycieku elektrolitów w przypadku zastosowania selenu,

wskazując na $10 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ jako jedną ze skutecznie działających dawek. W przypadku zastosowania krzemu Sigh (2022) wykazał zmniejszenie wycieku elektrolitów przy zastosowaniu dawki $2,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, podczas gdy Al Murad (2022) w dawkach 1,0 oraz $5,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$.

Podsumowując, wyniki przeprowadzonych badań wskazują na duże zróżnicowanie w reakcji rośliny na podwyższone stężenie soli, w zależności od czasu ekspozycji na działanie stresora oraz od jego natężenia. Oznaczenia wielu cech fizjologicznych i biochemicznych pomidora, na podstawie których dokonano charakterystyki oddziaływania selenu oraz krzemu na rośliny w warunkach stresu solnego, wykonano w szerokich ramach czasowych. Dało to możliwość przeanalizowania reakcji rośliny w czasie, ale jednocześnie stanowiło dużą trudność w dyskusji wyników z literaturą przedmiotu oraz formułowaniu jednoznacznych wniosków. Uzyskane wyniki, dotyczące niektórych z oznaczanych cech mogą wskazywać na korzystne oddziaływanie zarówno selenu jak i krzemu polegające na łagodzeniu skutków stresu solnego u pomidora.

5. Wnioski

1. Wpływ zastosowanych poziomów stężenia NaCl w hydroponikach na oznaczane cechy fizjologiczne i biochemiczne pomidora był zróżnicowany, zależny zarówno od natężenia stresu solnego jak i czasu ekspozycji na działanie czynnika stresogennego.
2. Zaznaczył się dodatni wpływ selenu na zwiększenie zawartości barwników asymilacyjnych w liściach roślin, w szczególności rosnących w warunkach najwyższego stężenia NaCl.
3. Selen w stężeniu $5,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zwiększył intensywność asymilacji CO_2 i transpiracji, a także przewodnictwo szparkowe dla wody u roślin rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl.
4. Wprowadzenie do pożywki o podwyższonym stężeniu NaCl selenu, niezależnie od dawki, zwiększyło takie parametry fluorescencji chlorofilu „a” jak: F_M i F_V/F_M określone po 96 godzinach ekspozycji roślin na czynniki doświadczalne.
5. W przypadku roślin rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl, selen, w obu zastosowanych dawkach zwiększył sumaryczną powierzchnię liści oraz aktywność katalazy i peroksydazy a także względną zawartość wody określoną po 14 i 28 dobach ekspozycji na działanie czynników eksperymentu. Wprowadzony do pożywki w stężeniu $5,0 \mu\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zmniejszył zawartość proliny w liściach tych roślin.

-
6. Zanotowano zmniejszenie wycieku elektrolitów z tkanek liści pomidora rosnącego w warunkach najwyższego stężenia NaCl pod wpływem obu zastosowanych dawek selenu.
 7. Zaopatrzenie roślin w selen wpłynęło na zmniejszenie zawartości sodu w części nadziemnej pomidorów.
 8. W przypadku roślin rosnących w pożywce o najwyższym stężeniu NaCl, krzem w dawce $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$ zwiększył zawartość chlorofilu „a” oraz chlorofilu całkowitego. W zależności od terminu pomiaru, w dawce $1,5$ lub $3,0 \text{ mmol} \cdot \text{dm}^{-3}$, intensyfikował asymilację CO_2 u roślin rosnących w warunkach stresu solnego.
 9. Zaopatrzenie roślin rosnących w warunkach podwyższonego stężenia NaCl w krzem, zwiększyło takie parametry fluorescencji chlorofilu „a” jak: F_V , F_M i F_V/F_M oraz zmniejszyło wartość F_0 , określone w trzech pierwszych terminach pomiaru.
 10. W przypadku roślin rosnących w warunkach stresu solnego, krzem w obu zastosowanych dawkach zwiększył sumaryczną powierzchnię liści i aktywność katalazy, a także zmniejszył zawartość proliny oraz wyciek elektrolitów z tkanek (u roślin rosnących w najwyższym zasoleniu).
 11. Wpływ krzemu na zawartość oznaczanych pierwiastków był uzależniony od stężenia chlorku sodu w pożywce. W każdym z wariantów zasolenia pożywki wykazano wzrost zawartości sodu w części nadziemnej pomidora wraz ze wzrostem dawki krzemu. W przypadku roślin rosnących w najwyższym zastosowanym zasoleniu, krzem zastosowany w obu dawkach zmniejszył zawartość takich pierwiastków jak: magnez, wapń i potas.
 12. Uzyskane rezultaty niektórych badań fizjologicznych i biochemicznych wskazują na pozytywne efekty zastosowanego żywienia roślin selenem oraz krzemem polegające na łagodzeniu skutków stresu solnego.
 13. Wykazano przydatność oznaczanych cech fizjologicznych i biochemicznych do opisu stanu stresu solnego u pomidora.

Bibliografia

1. Abbas S.M. (2013). Low levels of selenium application attenuate low temperature stress in Sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) seedlings. *Pak. J. Bot.*, 45 (5): 1597-604.

-
2. Abbas, Tahira, et al. (2015). Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Phys. Pla.* 37: 1-15.
 3. Abdel Latef A. A., Tran L. S. P. (2016). Impacts of priming with silicon on the growth and tolerance of maize plants to alkaline stress. *Front. Pla. Sci.*, 7: 243.
 4. Adrees M., Ali S., Rizwan M., Zia-ur-Rehman M., Ibrahim M., Abbas F., Irshad M. K. (2015). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. *Ecotoxicol. Environ. Safe.*, 119: 186-197.
 5. Aggarwal K. B., Ranjan J. K., Rathore S. S., Saxena S. N., Mishra B. K. (2013). Changes in physical and biochemical properties of fenugreek (*Trigonella sp. L.*) leaf during different growth stages. *Int. J. Seed Spices*, 3 (1): 31-35.
 6. Ahanger M. A., Mir R. A., Alyemeni M. N., Ahmad P. (2020). Combined effects of brassinosteroid and kinetin mitigates salinity stress in tomato through the modulation of antioxidant and osmolyte metabolism. *Pla. Phys. Bio.*, 147: 31-42.
 7. Ahmad P., Wani M. R., Azooz M. M., Tran L. S. P. (Eds.) (2014). *Improvement of crops in the era of climatic changes*. New York, NY: Springer.
 8. Akhter M. S., Noreen S., Mahmood S., Ashraf M., Alsahli A. A., Ahmad P. (2021). Influence of salinity stress on PSII in barley (*Hordeum vulgare L.*) genotypes, probed by chlorophyll-a fluorescence. *J. King Saud Uni. Sci.*, 33 (1): 101239.
 9. Alabdeen A. D. Z., Ahmed E. E. A. (2017). A Note on the anatomical changes induced by high salinity water in leaves of vetiver (*Chrysopogon zizanioides (L.)* Roberty. *Sud. J. Desert. Res.*, 2 (1).
 10. Ali Muhammad, et al. (2021). Silicon mediated improvement in the growth and ion homeostasis by decreasing Na⁺ uptake in maize (*Zea mays L.*) cultivars exposed to salinity stress. *Pla. Phys. Bio.* 158: 208-218.
 11. ALKahtani M. D., Attia K. A., Hafez Y. M., Khan N., Eid A. M., Ali M. A., Abdelaal K. A. (2020). Chlorophyll fluorescence parameters and antioxidant defense system can display salt tolerance of salt acclimated sweet pepper plants treated with chitosan and plant growth promoting rhizobacteria. *Agronomy*, 10 (8): 1180.
 12. Almeida P., Feron R., de Boer G. J., de Boer A. H. (2014). Role of Na⁺, K⁺, Cl⁻, proline and sucrose concentrations in determining salinity tolerance and their correlation with the expression of multiple genes in tomato. *AoB Plants*, 6. plu039

-
13. Al Murad M., Abdul L. K., Sowbiya M. (2020) Silicon in horticultural crops: cross-talk, signaling, and tolerance mechanism under salinity stress. *Plants* 9.4: 460.
 14. Al Murad M., Sowbiya M. (2022) Silicon supplementation modulates physiochemical characteristics to balance and ameliorate salinity stress in mung bean. *Front. Pla. Sci.* 13: 810991.
 15. Alsamadany H. (2022). Physiological, biochemical and molecular evaluation of mungbean genotypes for agronomical yield under drought and salinity stresses in the presence of humic acid. *Sau. J. Biol. Sci.*, 29 (9), 103385.
 16. Altuntas O., et al. (2024). Unlocking the Potential of Pepper Plants under Salt Stress: Mycorrhizal Effects on Physiological Parameters Related to Plant Growth and Gas Exchange across Tolerant and Sensitive Genotypes. *Plants* 13 (10): 1380.
 17. Alzahib R. H., Migdadi H. M., Al Ghamdi A. A., Alwahibi M. S., Ibrahim A. A., Al-Selwey W. A. (2021). Assessment of morpho-physiological, biochemical and antioxidant responses of tomato landraces to salinity stress. *Plants*, 10 (4), 696.
 18. Anaya F., et al. (2022). Effect of exogenous salicylic acid on growth parameters, gas exchange, and photosynthetic yields in salt-stressed *Vicia faba* L. plants. *Rus. J. Pla. Phys.* 69 (7): 149.
 19. Angelini G., Ragni P., Esposito D., Giardi P., Pompili M. L., Moscardelli R., Giardi M. T. (2001). A device to study the effect of space radiation on photosynthetic organisms. *Physica Medica: PM: an Inter. J. Dev. Appli. Physic. Med. Biol.: Off. J. Ital. Ass. Biomed. Physic. (AIFB)*, 17: 267-268.
 20. Ashraf M. F. M. R., Foolad M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Envir. exp. Bot.*, 59(2): 206-216.
 21. Balal R. M., Shahid M. A., Javaid M. M., Iqbal Z., Anjum M. A., Garcia-Sanchez F., Mattson N. S. (2016). The role of selenium in amelioration of heat-induced oxidative damage in cucumber under high temperature stress. *Act. Phys. Pla.*, 38: 1-14.
 22. Barker A. V., Pilbeam D. J. (Eds.). (2015). *Handbook of plant nutrition*. CRC press.
 23. Basak N., et al. (2022) Salt affected soils: Global perspectives. *Soil Health and Environmental Sustainability: Application of Geospatial Technology*. Cham: Springer International Publishing: 107-129.

-
24. Bebber D. P., Gurr S. J. (2015). Crop-destroying fungal and oomycete pathogens challenge food security. *Fungal Genetics and Biology*, 74: 62-64.
 25. Bergougnoux V. (2014). The history of tomato: From domestication to biopharming. *Biotech. Adv.*, 32: 170–189
 26. Blanca J., Montero-Pau J., Sauvage C., Bauchet G., Illa E., Díez M. J., Cañizares J. (2015). Genomic variation in tomato, from wild ancestors to contemporary breeding accessions. *BMC genomics*, 16(1): 1-19.
 27. Balasubramaniam T., et al. (2023). Plants response mechanisms to salinity stress. *Plants* 12.12: 2253.
 28. Byrt C. S., Munns R., Burton R. A., Gilliam M., Wege S. (2018). Root cell wall solutions for crop plants in saline soils. *Plant science*, 269: 47-55.
 29. Bocharnikova E. A., et al. (2014). The effect of optimization of silicon nutrition on the stability of barley DNA. *Moscow University soil science bulletin* 69: 84- 87.
 30. Campestrini L. H., Melo P. S., Peres L. E., Calhela R. C., Ferreira, I. C., Alencar S. M. (2019). A new variety of purple tomato as a rich source of bioactive carotenoids and its potential health benefits. *Heliyon*, 5 (11): e02831.
 31. Cao F., Wang N., Zhang M., Dai H., Dawood M., Zhang G., Wu F. (2013). Comparative study of alleviating effects of GSH, Se and Zn under combined contamination of cadmium and chromium in rice (*Oryza sativa*). *Biometals*, 26: 297-308.
 32. Cao X., Wu L., Wu M., Zhu C., Jin Q., Zhang J. (2020). Abscisic acid mediated proline biosynthesis and antioxidant ability in roots of two different rice genotypes under hypoxic stress. *BMC plant biology*, 20 (1): 1-14.
 33. Chele K. H., et al. (2021). Soil salinity, a serious environmental issue and plant responses: A metabolomics perspective. *Metabolites* 11 (11): 724.
 34. Chhabra R. (2017). *Soil salinity and water quality*. Routledge.
 35. Coskun D., Britto D. T., Huynh W. Q., Kronzucker H. J. (2016). The role of silicon in higher plants under salinity and drought stress. *Fro. Pla. Sci.*, 7: 1072.
 36. Chung Y. S., et al. (2020). Silicon confers soybean resistance to salinity stress through regulation of reactive oxygen and reactive nitrogen species. *Fro. Pla. Sci.* 10: 1725.
 37. Currie H. A., Perry C. C. (2007). Silica in plants: biological, biochemical and chemical studies. *Annals of botany*, 100 (7): 1383-1389.

-
38. da Cruz Ferreira R. L., et al. (2020). Oxidative stress, nutritional disorders, and gas exchange in lettuce plants subjected to two selenium sources. *J. Soil Sci. Pla.Nutr.* 20: 1215-1228.
39. De la Torre-González A., Montesinos-Pereira D., Blasco B., Ruiz J. M. (2018). Influence of the proline metabolism and glycine betaine on tolerance to salt stress in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) commercial genotypes. *J. Pla. Physio.*, 231: 329-336.
40. Deshmukh R. K., Ma J. F., Bélanger R. R. (2017). Role of silicon in plants. *Fro. Pla. Sci.*, 8: 1858.
41. Desoky El-Sayed M., et al. (2021). Physiological and biochemical mechanisms of exogenously applied selenium for alleviating destructive impacts induced by salinity stress in bread wheat. *Agronomy* 11 (5): 926.
42. Devkar V., Thirumalaikumar V. P., Xue G. P., Vallarino J. G., Turečková V., Strnad, M., Balazadeh S. (2020). Multifaceted regulatory function of tomato SITA1 in the response to salinity stress. *New Phytologist*, 225 (4): 1681-1698.
43. Dhiman P., et al. (2021). Fascinating role of silicon to combat salinity stress in plants: An updated overview. *Plant Physiology and Biochemistry* 162: 110-123.
44. Djanaguiraman M., Prasad P. V., Seppanen M. (2010). Selenium protects sorghum leaves from oxidative damage under high temperature stress by enhancing antioxidant defense system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 48 (12): 999- 1007.
45. Dobrakowska-Kopecka Z., Ostrowski W. 1984 *Sadownictwo i warzywnictwo*. PWRiL Warszawa: 378
46. Doğan M. (2011). Antioxidative and proline potentials as a protective mechanism in soybean plants under salinity stress. *Afr. J. Biotech.*, 10 (32): 5972-5978.
47. Dorneles A. O. S., Pereira A. S., Rossato L. V., Possebom G., Sasso V. M., Bernardy K., Tabaldi L. A. (2016). Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. *Ciência Rural*, 46: 506- 512.
48. El Moukhtari A., Cabassa-Hourton C., Farissi M., Savouré A. (2020). How does proline treatment promote salt stress tolerance during crop plant development? *Fro. Pla. Sci.*, 11: 1127.

-
49. El Moukhtari A., Carol P., Mouradi M., Savoure A., Farissi M. (2021). Silicon improves physiological, biochemical, and morphological adaptations of alfalfa (*Medicago sativa* L.) during salinity stress. *Symbiosis*, 85 (3): 305-324.
50. Feghhenabi F., Hadi H., Khodaverdiloo H., van Genuchten M. T., Lake L. (2023). Demonstration of borage salinity tolerance as affected by Si application through biochemical and physiological responses, and growth attributes. *J. Soil Sci. Pla. Nutr.*, 23 (2): 1678-1693.
51. Fahad S., Hussain S., Matloob A., Khan F. A., Khaliq A., Saud S., Huang J. (2015). Phytohormones and plant responses to salinity stress: a review. *Plant growth regulation*, 75: 391-404.
52. Faseela P., Sinisha A. K., Brestič M., Puthur J. T. (2020). Chlorophyll a fluorescence parameters as indicators of a particular abiotic stress in rice. *Photosynthetica*, 58.
53. Fathi A., Tari D. B. (2016). Effect of drought stress and its mechanism in plants. *International J. Life Sci.*, 10 (1): 1-6.
54. Fawe A. B. O. U. Z. A. I. D., Abou-Zaid M., Menzies J. G., Bélanger R. R. (1998). Silicon-mediated accumulation of flavonoid phytoalexins in cucumber. *Phytopathology*, 88 (5): 396-401.
55. Flood J. (2010). The importance of plant health to food security. *Food security*, 2 (3): 215-231.
56. Fregonezi F., Takahashi H. W. (2016). Nutritional assessment of potassium in tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) by direct reading of fruit sap. *African J. Agri. Res.*, 1245.
57. Gałązka A. (2013). Przemiany związków fenolowych a rola amoniakolizy L- fenyloalaninowej (PAL) w indukcji mechanizmów obronnych rośliny. *Polish J. Agro.*, 15: 83-88.
58. Ghanbari F., Bag-Nazari M., Azizi A. (2023). Exogenous application of selenium and nano-selenium alleviates salt stress and improves secondary metabolites in lemon verbena under salinity stress. *Sci. Rep.* 13 (1): 5352.
59. Ghorbani A., Razavi S. M., Ghasemi Omran V. O., Pirdashti H. (2018). Piriformospora indica inoculation alleviates the adverse effect of NaCl stress on growth, gas exchange and chlorophyll fluorescence in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Pla. Biol.*, 20 (4): 729-736.
-

-
60. Ghosh U. K., Islam M. N., Siddiqui M. N., Cao X., Khan M. A. R. (2022). Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. *Pla. Biol.*, 24 (2): 227-239.
61. Gohari G., Panahirad S., Sepehri N., Akbari A., Zahedi S. M., Jafari H., Fotopoulos V. (2021). Enhanced tolerance to salinity stress in grapevine plants through application of carbon quantum dots functionalized by proline. *Environmental Science and Poll. Res.*, 28: 42877-42890.
62. Gong D. H., Wan G. Z., Si, W. T., Zhou Y., Liu Z., Jia J. (2018). Effects of salt stress on photosynthetic pigments and activity of ribulose-1, 5-bisphosphate carboxylase/oxygenase in *Kalidium foliatum*. *Rus. J. Pla. Phys.*, 65: 98-103.
63. Hajlaoui F., Hajlaoui H., Krouma A. (2023). Physio-Biochemical Response to Exogenous Selenium Application of Tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) Cultivated in the Field under Saline Irrigation. *Rus. J. Pla. Phys.* 70 (6): 142
64. Hamani A. K. M., et al. (2020). Responses of leaf gas exchange attributes, photosynthetic pigments and antioxidant enzymes in NaCl-stressed cotton (*Gossypium hirsutum* L.) seedlings to exogenous glycine betaine and salicylic acid. *BMC Plant Biology* 20: 1-14.
65. Hancock J. F. (2012). *Plant evolution and the origin of crop species*. CABI.
66. Harizanova A., Koleva-Valkova L. (2019). Effect of silicon on photosynthetic rate and the chlorophyll fluorescence parameters at hydroponically grown cucumber plants under salinity stress. *Journal of Central European Agriculture*, 20 (3): 953- 960.
67. Hasana R., Miyake H. (2017). Salinity stress alters nutrient uptake and causes the damage of root and leaf anatomy in maize. *KnE Life Sciences*, 219-225.
68. Hasanuzzaman M., Nahar K., Fujita M. (2014). Silicon and selenium: two vital trace elements that confer abiotic stress tolerance to plants. In *Emerging technologies and management of crop stress tolerance* (pp. 377-422). Academic press.
69. Hasanuzzaman M., Bhuyan M. B., Raza A., Hawrylak-Nowak B., Matraszek-Gawron R., Al Mahmud J., Fujita M. (2020). Selenium in plants: Boon or bane? *Environ. Experimen. Bot.*, 178: 104170.
70. Hawrylak B. (2007). Fizjologiczna reakcja ogórka na stres zasolenia w obecności selenu. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. Ogrodnictwo*, 41: 483-486.
-

-
71. He, P. P., Lv, X. Z., & Wang, G. Y. (2004). Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables. *Environ. Internat.*, 30 (2): 167- 172.
72. Heidari M. (2012). Effects of salinity stress on growth, chlorophyll content and osmotic components of two basil (*Ocimum basilicum* L.) genotypes. *Afr. J. Biotech.*, 11(2): 379-384.
73. Hmidi D., Abdelly C., Athar H. U. R., Ashraf M., Messedi D. (2018). Effect of salinity on osmotic adjustment, proline accumulation and possible role of ornithine- δ -aminotransferase in proline biosynthesis in *Cakile maritima*. *Phys. And molec. Biol. Pla.*, 24: 1017-1033.
74. Hniličková H., Hnilička F., Orsák M., Hejník V. (2019). Effect of salt stress on growth, electrolyte leakage, Na⁺ and K⁺ content in selected plant species. *Plant, Soil and Environment*, 65 (2): 90-96.
75. Hnilickova H., Kraus K., Vachova P., Hnilicka F. (2021). Salinity stress affects photosynthesis, malondialdehyde formation, and proline content in *Portulaca oleracea* L. *Plants*, 10 (5): 845.
76. Hodson M. J., White P. J., Mead A., Broadley M. R. (2005). Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. *Annals of Botany*, 96 (6): 1027-1046.
77. Hopmans J. W., et al. (2021). Critical knowledge gaps and research priorities in global soil salinity. *Advances in Agronomy* 169: 1-191.
78. Hoque M. I. U., Uddin M. N., Fakir M. S. A., Rasel M. (2018). Drought and salinity affect leaf and root anatomical structures in three maize genotypes. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 16 (1): 47-55.
79. Hasanuzzaman, M., et al. (2020). "Selenium in plants: Boon or bane?" *Environ. Experimen. Bot.* 178: 104170.
80. Hussain S., et al. (2024). The potential of selenium to induce salt stress tolerance in *Brassica rapa*: Evaluation of biochemical, physiological and molecular phenomenon. *Plant Stress* 11: 100331.
81. Jan A. U., Had F., Nawaz M. A., Rahman K. (2017). Potassium and zinc increase tolerance to salt stress in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Pla. Phys. Biochem.*, 116: 139-149.
82. Jan S. A., Shinwari Z. K., Rabbani M. A. (2016). Agro-morphological and physiological responses of *Brassica rapa* ecotypes to salt stress. *Pak. J. Bot.*, 48 (4): 1379-1384.
-

-
83. Jamil M., Lee K. J., Kim J. M., Kim H. S., Rha E. S. (2007). Salinity reduced growth PS2 photochemistry and chlorophyll content in radish. *Scie. Agrico.*, 64: 111-118.
84. Kahlaoui B., Hachicha M., Misle E., Fidalgo F., Teixeira J. (2018). Physiological and biochemical responses to the exogenous application of proline of tomato plants irrigated with saline water. *J. Sau. Soc. Agricul. Sci.*, 17 (1): 17-23.
85. Kalaji M. H., Łoboda T. (2009). *Fluorescencja chlorofilu w badaniach stanu fizjologicznego roślin*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
86. Kalaji M. (2011). Oddziaływanie abiotycznych czynników stresowych na fluorescencję chlorofilu w roślinach wybranych odmian jęczmienia *Hordeum vulgare* L. *Rozprawy Naukowe i Monografie. Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie*, 378.
87. Kalaji H. M., Schansker G., Ladle R. J., Goltsev V., Bosa K., Allakhverdiev S. I., Zivcak M. (2014). Frequently asked questions about in vivo chlorophyll fluorescence: practical issues. *Photosyn. Res.*, 122: 121-158.
88. Kalaji H. M., Račková L., Paganová V., Swoczyna T., Rusinowski S., Sitko K. (2018). Can chlorophyll-a fluorescence parameters be used as bio-indicators to distinguish between drought and salinity stress in *Tilia cordata* Mill. *Environ.l Experi. Bot.*, 152: 149-157.
89. Karimi R., et al. (2020). Effects of foliar selenium application on some physiological and phytochemical parameters of *Vitis vinifera* L. cv. Sultana under salt stress. *J. Pla. Nutr.* 43 (14): 2226-2242.
90. Khan A., et al. (2019). Silicon and salinity: crosstalk in crop-mediated stress tolerance mechanisms. *Fro. Pla. Sci.* 10: 1429.
91. Khan M. M., Al-Mas'oudi R. S., Al-Said F., Khan, I. (2013). Salinity effects on growth, electrolyte leakage, chlorophyll content and lipid peroxidation in cucumber (*Cucumis sativus* L.). In *International Conference on Food and Agricultural Sciences Malaysia: IACSIT Press* (Vol. 55, pp. 28-32).
92. Khan M. H., Panda S. K. (2008). Alterations in root lipid peroxidation and antioxidative responses in two rice cultivars under NaCl-salinity stress. *Act. Phys. Pla.*, 30: 81-89.
93. Kim W. Y., Ali Z., Park H. J., Park S. J., Cha J. Y., Perez-Hormaeche J., Yun D. J. (2013). Release of SOS2 kinase from sequestration with GIGANTEA determines salt tolerance in Arabidopsis. *Nat. Commun.*, 4 (1): 1352.
-

-
94. Kissoudis C., Chowdhury R., Finkers H. J., Visser R. G. F., Bai Y. (2016). Supplementary data: Combined biotic and abiotic stress resistance in tomato?
95. Kłosowska, Karolina (2010). "Reakcje roślin na stres solny." *Kosmos* 59.3-4 (288-289)
96. Knapp S., Peralta I. E. (2016). The tomato (*Solanum lycopersicum* L., Solanaceae) and its botanical relatives. *The tomato genome*, 7-21.
97. Koç İ., Nzokou P. (2022). Gas exchange parameters of 8-year-old *Abies fraseri* (Pursh) Poir. seedlings under different irrigation regimes. *Turk. J. agri. Foo. Sci. Tech.* 10 (12): 2421-2429.
98. Kowalska J., Jakubowska M., Nowaczyk R. (2018). The effect of silicon application on growth of spring wheat under organic farming. *J. Res. Appl. Agri. Engin.*, 63 (3)
99. Kotagiri D., Kolluru V. C. (2017). Effect of salinity stress on the morphology and physiology of five different *Coleus* species. *Biomed. Pharmacol. J.*, 10(4): 1639 1649.
100. Latef A. A. H. A., Chaoxing H. (2011). Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on growth, mineral nutrition, antioxidant enzymes activity and fruit yield of tomato grown under salinity stress. *Scie. Horti.*, 127 (3): 228-233.
101. Li N., Wu X., Zhuang W., Xia L., Chen Y., Wu C., Zhou Y. (2021). Tomato and lycopene and multiple health outcomes: Umbrella review. *Foo. Chem.*, 343: 128396.
102. Lichtenthaler H. K. (2007). Biosynthesis, accumulation and emission of carotenoids, α -tocopherol, plastoquinone, and isoprene in leaves under high photosynthetic irradiance. *Photosyn. Res.*, 92: 163-179.
103. Lim J. H., Park K. J., Kim B. K., Jeong J. W., Kim H. J. (2012). Effect of salinity stress on phenolic compounds and carotenoids in buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.) sprout. *Food chemistry*, 135 (3); 1065-1070.
104. Loudari A., Benadis C., Naciri R., Soulimani A., Zeroual Y., Gharous M. E., Oukarroum A. (2020). Salt stress affects mineral nutrition in shoots and roots and chlorophyll a fluorescence of tomato plants grown in hydroponic culture. *J. Pla. Interac.*, 15 (1): 398-405.
105. Lu K. X., Cao B. H., Feng X. P., He Y., Jiang D. A. (2009). Photosynthetic response of salt-tolerant and sensitive soybean varieties. *Photosynthetica*, 47 (3): 381-387.
106. Lu Q., Lian Y., Han W., Tong Y., Su X., An X., Zhang J. 2016 *U.S. Patent No. 9,434,886*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
-

-
107. Ma J. F. (2004). Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. *Soil sci. pla. nutr.*, 50 (1): 11-18.
108. Ma J. F., Yamaji N. (2015). A cooperative system of silicon transport in plants. *Trends in Plant Science*, 20 (7): 435-442.
109. 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. *J. Pla. Gro. Regul.*, 35: 1-10.
110. Ma Y., Dias M. C., Freitas H. (2020). Drought and salinity stress responses and microbe-induced tolerance in plants. *Fro. Pla. Sci.*, 11: 591911.
111. Maggio A., Miyazaki S., Veronese P., Fujita T., Ibeas J. I., Damsz B., Bressan R. A. (2002). Does proline accumulation play an active role in stress-induced growth reduction? *Pla. J.*, 31 (6): 699-712.
112. Mansour M. M. F., Salama K. H. (2004). Cellular basis of salinity tolerance in plants. *Environ. Experimen. Bot.*, 52 (2): 113-122.
113. Marsic N. K., et al. (2018). Photosynthetic traits of plants and the biochemical profile of tomato fruits are influenced by grafting, salinity stress, and growing season. *J. Agricul. Foo. Chem.* 66 (22): 5439-5450.
114. Martinez V., Mestre T. C., Rubio F., Girones-Vilaplana A., Moreno D. A., Mittler R., Rivero R. M. (2016). Accumulation of flavonols over hydroxycinnamic acids favors oxidative damage protection under abiotic stress. *Fro. Pla. Sci.*, 7: 838.
115. Martinez V., Nieves-Cordones M., Lopez-Delacalle M., Rodenas R., Mestre T. C., Garcia-Sanchez F., Rivero R. M. (2018). Tolerance to stress combination in tomato plants: New insights in the protective role of melatonin. *Molecules*, 23 (3): 535.
116. Maxwell K., Johnson G. N. (2000). Chlorophyll fluorescence—a practical guide. *J. experi. Bot.*, 51 (345): 659-668.
117. Meharg C., Meharg A. A. (2015). Silicon, the silver bullet for mitigating biotic and abiotic stress, and improving grain quality, in rice? *Environ. Experimen. Bot.*, 120: 8-17.
118. Mehta P., Jajoo A., Mathur S., Bharti S. (2010). Chlorophyll a fluorescence study revealing effects of high salt stress on Photosystem II in wheat leaves. *Plant physiology and biochemistry*, 48 (1): 16-20.
-

-
119. Moradbeygi H., Jamei R., Heidari R., Darvishzadeh R. (2020). Investigating the enzymatic and non-enzymatic antioxidant defense by applying iron oxide nanoparticles in *Dracocephalum moldavica* L. plant under salinity stress. *Scientia Horticulturae*, 272: 109537.
120. Moretti S., Francini A., Minnocci A., Sebastiani L. (2018). Does salinity modify anatomy and biochemistry of *Olea europaea* L. fruit during ripening? *Scientia Horticulturae*, 228: 33-40.
121. Morgan S. H., Maity P. J., Geilfus C. M., Lindberg S., Mühling K. H. (2014). Leaf ion homeostasis and plasma membrane H⁺-ATPase activity in *Vicia faba* change after extra calcium and potassium supply under salinity. *Plant Physiology and Biochemistry*, 82: 244-253.
122. Mozafariyan M., Kamelmanesh M. M., Hawrylak-Nowak B. (2016). Ameliorative effect of selenium on tomato plants grown under salinity stress. *Archives of Agronomy and Soil Science* 62 (10): 1368-1380.
123. Munns R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, cell & environment*, 25 (2): 239-250.
124. Munns R., Tester M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 59: 651-681.
125. Munns R., Gilliam M. (2015). Salinity tolerance of crops—what is the cost? *New phytologist*, 208 (3): 668-673.
126. Murkowski A. (2002). Oddziaływanie czynników stresowych na luminescencje chlorofilu w aparacie fotosyntetycznym roślin uprawnych. *Acta Agrophys.*, 61: 1- 158.
127. Naeem M., et al. (2020). Effect of Salicylic Acid and Salinity Stress on the Performance of Tomato Plants. *Gesunde Pflanzen* 72 (4)
128. Nahuatl Dictionary. Wired Humanities Projects. Archived from the original on 3 December 2017, <http://www.freelang.net/online/nahuatl.php>
129. Negrão S., Schmöckel S. M., Tester M. J. A. O. B. (2017). Evaluating physiological responses of plants to salinity stress. *Annals of botany*, 119(1): 1-11.
130. Oerke E. C. (2006). Crop losses to pests. *J. Agri. Sci.*, 144 (1): 31-43.
131. Ohama N., Sato H., Shinozaki K., Yamaguchi-Shinozaki K. (2017). Transcriptional regulatory network of plant heat stress response. *Tre. pla. sci.*, 22 (1): 53-65.
132. Orłowski M. (Ed.). (2000). *Polowa uprawa warzyw*. Wydaw. Brasika.
-

-
- 133.Ors S., Ekinçi M., Yildirim E., Sahin U., Turan M., Dursun A. (2021). Interactive effects of salinity and drought stress on photosynthetic characteristics and physiology of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings. *S. Afr. J. Bot.*, 137: 335-339.
- 134.Parihar P., Singh S., Singh R., Singh V. P., Prasad S. M. (2015). Effect of salinity stress on plants and its tolerance strategies: a review. *Env. sci. pol. res.*, 22: 4056- 4075.
- 135.Peña-Calzada K., et al. (2023). Silicon mitigates the negative impacts of salt stress in soybean plants. *J. Sci. Fo. Agr.* 103 (9): 4360-4370.
- 136.Pessarakli M. (Ed.). (2014). *Handbook of plant and crop physiology*. CRC press.
- 137.Pilon-Smits E. A. (2014). Selenium in plants. *Progress in Botany: Vol. 76* (pp. 93-107). Cham: Spring. Internat. Pub.
- 138.Rangseekaew P., Barros-Rodríguez A., Pathom-Aree W., Manzanera M. (2021). Deep-sea actinobacteria mitigate salinity stress in tomato seedlings and their biosafety testing. *Plants*, 10 (8): 1687.
- 139.Rasool A., et al. (2022). Amelioration of salinity induced damage in plants by selenium application: A review. *S. Afr. J. Bot.* 147: 98-105.
- 140.Rasool A., et al. (2023). Exogenous selenium treatment alleviates salinity stress in Proso Millet (*Panicum miliaceum* L.) by enhancing the antioxidant defence system and regulation of ionic channels. *Pla. Gro. Reg.* 100 (2): 479-494.
- 141.Rivero R. M., Mestre T. C., Mittler R. O. N., Rubio F., Garcia-Sanchez F. R. A. N. C. I. S. C. O., Martinez V. (2014). The combined effect of salinity and heat reveals a specific physiological, biochemical and molecular response in tomato plants. *Pla., cel. envir.*, 37 (5): 1059-1073.
- 142.Rodrigues F. Á., McNally D. J., Datnoff L. E., Jones J. B., Labbé C., Benhamou N., Bélanger R. R. (2004). Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. *Phytopathology*, 94 (2): 177-183.
- 143.Rouphael Y., De Micco V., Arena C., Raimondi G., Colla G., De Pascale S. (2017). Effect of *Ecklonia maxima* seaweed extract on yield, mineral composition, gas exchange, and leaf anatomy of zucchini squash grown under saline conditions. *J. Ap. Phyc.*, 29: 459-470.
- 144.Sacała E., Durbajło W. (2012). Oddziaływanie krzemianu sodu na kukurydzę rosnącą w warunkach stresowych. *Przemysł Chemiczny*, 91 (5):949-951.
-

-
145. Saddiq M. S., Iqbal S., Hafeez M. B., Ibrahim A. M., Raza A., Fatima E. M., Ciarmiello L. F. (2021). Effect of salinity stress on physiological changes in winter and spring wheat. *Agronomy*, 11 (6): 1193.
146. Safdar H., Amin A., Shafiq Y., Ali A., Yasin R., Shoukat A., Sarwar M. I. (2019). A review: Impact of salinity on plant growth. *Nat. Sci*, 17 (1): 34-40.
147. Sali A. L. I. U., Rusinovci, I., Fetahu, S., Gashi, B., Simeonovska, E., Rozman, L. (2015). The effect of salt stress on the germination of maize (*Zea mays* L.) seeds and photosynthetic pigments. *Acta Agr. Slo.*, 105 (1): 85-94.
148. Šamec D., Linić I., Salopek-Sondi B. (2021). Salinity stress as an elicitor for phytochemicals and minerals accumulation in selected leafy vegetables of Brassicaceae. *Agronomy* 11 (2): 361.
149. Sattar A., et al. (2017). Separate and combined effects of silicon and selenium on salt tolerance of wheat plants. *Rus. J. Pla. Phys.* 64: 341-348.
150. Sdouga D., Amor F. B., Ghribi S., Kabtni S., Tebini M., Branca F., Marghali S. (2019). An insight from tolerance to salinity stress in halophyte *Portulaca oleracea* L.: Physio-morphological, biochemical and molecular responses. *Ecotox. Env. Saf.*, 172: 45-52.
151. Shabala S. (Ed.). (2017). *Plant stress physiology*. Cabi.
152. Shahba Z., Baghizadeh A., Yosefi M. (2010). The salicylic acid effect on the tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.) germination, growth and photosynthetic pigment under salinity stress (NaCl). *J. Stre. Phys. Biochem.*, 6 (3): 4-16.
153. Sharma A., Rana C., Singh S., Katoch V. (2016). Soil salinity causes, effects, and management in cucurbits. *Handbook of cucurbits: growth, cultural practices, and physiology*. CRC Press, Taylor and Francis Group, 419-434.
154. Sharma A., Kumar V., Shahzad B., Ramakrishnan M., Singh Sidhu G. P., Bali A. S., Zheng B. (2020). Photosynthetic response of plants under different abiotic stresses: a review. *J. Pla. Gro. Reg.*, 39: 509-531.
155. Shen Zihui, et al. (2022). Silicon improves ion homeostasis and growth of liquorice under salt stress by reducing plant Na⁺ uptake. *Scientific Reports* 12 (1): 5089.
156. Shin Y. K., Bhandari S. R., Cho M. C., Lee J. G. (2020). Evaluation of chlorophyll fluorescence parameters and proline content in tomato seedlings grown under different salt stress conditions. *Hort., Environ., and Biotech.*, 61: 433-443.

-
157. Singh P., Mahajan M. M., Singh N. K., Kumar D., Kumar K. (2020). Physiological and molecular response under salinity stress in bread wheat (*Triticum aestivum* L.). *J. Pla. Bioch. Biotech.*, 29: 125-133.
158. Singh P., Kumar V., Sharma J., Saini S., Sharma P., Kumar S., Sharma A. (2022). *murad. Plants*, 11 (19): 2525.
159. Smoleń S., et al. (2020). Effect of soil salinity and foliar application of jasmonic acid on mineral balance of carrot plants tolerant and sensitive to salt stress. *Agronomy* 10 (5): 659.
160. Sofo A., Scopa A., Nuzzaci M., Vitti A. (2015). Ascorbate peroxidase and catalase activities and their genetic regulation in plants subjected to drought and salinity stresses. *Internat. J. Molec. Sci.*, 16 (6): 13561-13578.
161. Song A., Xue G., Cui P., Fan F., Liu H., Yin C., Liang Y. (2016). The role of silicon in enhancing resistance to bacterial blight of hydroponic-and soil-cultured rice. *Sci. Rep.*, 6 (1): 1-13.
162. Sultana N., et al. (2021). Effect of silicon application on growth and biomass yield of rice under salinity stress. *J. Bangla. Agri. Univ.* 19 (4): 429-436.
163. Tepe E. J., Anderson G. J., Spooner D. M., Bohs L. (2016). Relationships among wild relatives of the tomato, potato, and pepino. *Taxon*, 65 (2): 262-276.
164. Tian F., et al. (2020). Salinity stress effects on transpiration and plant growth under different salinity soil levels based on thermal infrared remote (TIR) technique. *Geoderma* 357: 113961.
165. Tripathi D. K., Singh V. P., Gangwar S., Prasad S. M., Maurya J. N., Chauhan D. K. (2014). Role of silicon in enrichment of plant nutrients and protection from biotic and abiotic stresses. *Improvement of Crops in the Era of Climatic Changes: Volume 1*: 39-56.
166. Truşcă M., et al. (2023). Exploring the research challenges and perspectives in ecophysiology of plants affected by salinity stress. *Agriculture* 13 (3): 734.
167. Venkateswarlu B., Shanker A. K., Shanker C., Maheswari M. (Eds.). (2011). *Crop stress and its management: perspectives and strategies*. Spring. Sci. & Bus. Media.
168. Vejan P., Abdullah R., Khadiran T., Ismail S., Nasrulhaq Boyce A. (2016). Role of plant growth promoting rhizobacteria in agricultural sustainability—a review. *Molecules*, 21 (5): 573.

-
169. Verma S., Mishra S. N. (2005). Putrescine alleviation of growth in salt stressed *Brassica juncea* by inducing antioxidative defense system. *J. pla. phys.*, 162 (6): 669-677.
170. White P. J. (2018). Selenium metabolism in plants. *Bioch. et Biophys. Acta (BBA)-Gen. Sub.*, 1862 (11): 2333-2342.
171. Wu X., Zhu Z., Li X., Zha D. (2012). Effects of cytokinin on photosynthetic gas exchange, chlorophyll fluorescence parameters and antioxidative system in seedlings of eggplant (*Solanum melongena* L.) under salinity stress. *Act, Phys.Pla.*, 34: 2105-2114.
172. Xu H. M., Tam N. F. Y., Zan Q. J., Bai M., Shin P. K. S., Vrijmoed L. L. P., Liao W. B. (2014). Effects of salinity on anatomical features and physiology of a semi-mangrove plant *Myoporum bontioides*. *Mar. Poll. Bull.*, 85 (2): 738-746.
173. Xu J., Lifeng G., Liwei L. (2022). Exogenous silicon alleviates drought stress in maize by improving growth, photosynthetic and antioxidant metabolism. *Environ. Exper. Bot.* 201: 104974.
174. Xu S., et al. The synergistic effects of silicon and selenium on enhancing salt tolerance of maize plants. *Environ. Exper. Bot.* 187 (2021): 104482.
175. Yadav S., Modi P., Dave A., Vijapura A., Patel D., Patel M. (2020). Effect of abiotic stress on crops. *Sustainable crop production*, 3.
176. Yu X., Liang C., Chen J., Qi X., Liu Y., Li W. (2015). The effects of salinity stress on morphological characteristics, mineral nutrient accumulation and essential oil yield and composition in *Mentha canadensis* L. *Scie. Horti.*, 197, 579-583.
177. Xue Q., et al. (2002). Genotypic variation of gas exchange parameters and carbon isotope discrimination in winter wheat. *J. pla. phys.* 159 (8): 891-898.
178. Yamasaki S., Dillenburg L. R. (1999). Measurements of leaf relative water content in *Araucaria angustifolia*. *Revista Brasileira de fisiologia vegetal*, 11 (2), 69-75.
179. Zahedi S. M., et al. (2019). Alleviation of the effect of salinity on growth and yield of strawberry by foliar spray of selenium-nanoparticles. *Environ. Poll.* 253: 246- 258.
180. Zahra S., Amin B., Ali V. M., Ali Y., Mehdi Y. (2010). The salicylic acid effect on the tomato (*Lycopersicum esculentum* Mill.) sugar, protein and proline contents under salinity stress (NaCl). *J. biophys. struct. biol.*, 2 (3), 35-41.

-
- 181.**Zandalinas S. I., Mittler R., Balfagón D., Arbona V., Gómez-Cadenas A. (2018). Plant adaptations to the combination of drought and high temperatures. *Phys. Pla.*, 162 (1), 2-12.
- 182.**Zhang L., Ma H., Chen T., Pen J., Yu, S., Zhao X. (2014). Morphological and physiological responses of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plants to salinity. *PLoS One*, 9 (11), e112807.
- 183.**Zhu J. K. (2007). Plant salt stress. *eLS*.
- 184.**Zhu Y., Jiang X., Zhang J., He Y., Zhu X., Zhou X., Liu Y. (2020). Silicon confers cucumber resistance to salinity stress through regulation of proline and cytokinins. *Pla. Phys. Bioch.*, 156, 209-220.
- 185.**Živčák M., Olšovská K., Slamka P., Galambošová J., Rataj V., Shao H. B., Brestič M. (2015). Application of chlorophyll fluorescence performance indices to assess the wheat photosynthetic functions influenced by nitrogen deficiency. *Pla., Soil and Environ.* 60 (5), 210-215.
- 186.**<http://ecocrop.fao.org/>. Data dostępu 03.12.2021.
- 187.**<http://www.fao.org>. Archived from the original on 3 December 2021
- 188.**<http://www.theplantlist.org/>. Archived from the original on 3 December 2021
- 189.**<https://www.itis.gov/>. Archived from the original on 3 December 2021

Aneks

Spis fotografii

FOT. 1. POMIDOR ZWYCZAJNY (<i>LYCOPERSICON ESCULENTUM</i> MILL.), ODMIANA ROQUETERO F1	16
FOT. 2 KOMORA WZROSTOWA W PRACOWNI FIZJOLOGII ROŚLIN I ENTOMOLOGII, KATEDRY BIOINŻYNIERII	18
FOT. 3 UKŁAD DOŚWIADCZENIA – POJEMNIKI Z ROŚLINAMI W KOMORZE WEGETACYJNEJ.....	19
FOT. 4 LIŚCIE POMIDORA WRAZ Z ELEMENTEM KONTROLNYM, WYKORZYSTANE W ANALIZIE POWIERZCHNI LIŚCI, Z ZASTOSOWANIEM PROGRAMU EASY LEAF AREA	22

Spis rycin

RYC. 1 SCHEMAT DOŚWIADCZENIA HYDROPONICZNEGO GDZIE Sx – STĘŻENIE ODPOWIEDNIEGO PIERWIĄSTKA, ZALEŻNIE OD DOŚWIADCZENIA A LUB B	18
RYC. 2. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „A” W LIŚCIACH POMIDORA	26
RYC. 3. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „A” W LIŚCIACH POMIDORA.....	26
RYC. 4. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „B” W LIŚCIACH POMIDORA	28
RYC. 5. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „B” W LIŚCIACH POMIDORA.....	28
RYC. 6. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU CAŁKOWITEGO W LIŚCIACH POMIDORA	30
RYC. 7. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU CAŁKOWITEGO W LIŚCIACH POMIDORA.....	30
RYC. 8. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ KAROTENOIDÓW W LIŚCIACH POMIDORA	32
RYC. 9. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA ZAWARTOŚĆ KAROTENOIDÓW W LIŚCIACH POMIDORA.....	32
RYC. 10. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA NATĘŻENIE PROCESU ASYMLACJI CO ₂ (A) W LIŚCIACH POMIDORA	34
RYC. 11. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA NATĘŻENIE PROCESU ASYMLACJI CO ₂ (A) W LIŚCIACH POMIDORA.....	35
RYC. 12. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA INTENSYWNOŚĆ TRANSPIRACJI (E) W LIŚCIACH POMIDORA	36
RYC. 13. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA INTENSYWNOŚĆ TRANSPIRACJI (E) W LIŚCIACH POMIDORA.....	37
RYC. 14. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI PRZEWODNICTWA SZPARKOWEGO DLA WODY (G _s) W LIŚCIACH POMIDORA.....	39
RYC. 15. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA WARTOŚCI PRZEWODNICTWA SZPARKOWEGO DLA WODY (G _s) W LIŚCIACH POMIDORA.....	39
RYC. 16. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA STĘŻENIE CO ₂ W PRZESTWORACH MIĘDZYKOMÓRKOWYCH MIĘKISZU ASYMLACYJNEGO (C) W LIŚCIACH POMIDORA	41
RYC. 17. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA STĘŻENIE CO ₂ W PRZESTWORACH MIĘDZYKOMÓRKOWYCH MIĘKISZU ASYMLACYJNEGO (C) W LIŚCIACH POMIDORA	41
RYC. 18. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI FLUORESCENCJI MAKSYMALNEJ (F _M) W LIŚCIACH POMIDORA.....	43
RYC. 19. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA WARTOŚCI FLUORESCENCJI MAKSYMALNEJ (F _M) W LIŚCIACH POMIDORA	43
RYC. 20. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI FLUORESCENCJI POCZĄTKOWEJ (F ₀) W LIŚCIACH POMIDORA	45
RYC. 21. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA WARTOŚCI FLUORESCENCJI POCZĄTKOWEJ (F ₀) W LIŚCIACH POMIDORA	45
RYC. 22. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI FLUORESCENCJI ZMIENNEJ (F _V) W LIŚCIACH POMIDORA	47
RYC. 23. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA WARTOŚCI FLUORESCENCJI ZMIENNEJ (F _V) W LIŚCIACH POMIDORA	47
RYC. 24. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA STOSUNEK FLUORESCENCJI ZMIENNEJ DO MAKSYMALNEJ (F _V /F _M) W LIŚCIACH POMIDORA.....	49
RYC. 25. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA STOSUNEK FLUORESCENCJI ZMIENNEJ DO MAKSYMALNEJ (F _V /F _M) W LIŚCIACH POMIDORA.....	49
RYC. 26. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI WSKAŹNIKA WITALNOŚCI PS II (PI) W LIŚCIACH POMIDORA.....	51
RYC. 27. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA WARTOŚCI WSKAŹNIKA WITALNOŚCI PS II (PI) W LIŚCIACH POMIDORA	51
RYC. 28. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WSKAŹNIK WZGLĘDNEJ ZAWARTOŚCI WODY (RWC) W LIŚCIACH POMIDORA	53
RYC. 29. WPŁYW STĘŻENIA SOLI SELENU NA WSKAŹNIK WZGLĘDNEJ ZAWARTOŚCI WODY (RWC) W LIŚCIACH POMIDORA	53
RYC. 30. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „A” W LIŚCIACH POMIDORA	60
RYC. 31. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „A” W LIŚCIACH POMIDORA	60
RYC. 32. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „B” W LIŚCIACH POMIDORA	62

RYC. 33. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „B” W LIŚCIACH POMIDORA	62
RYC. 34. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU CAŁKOWITEGO W LIŚCIACH POMIDORA	64
RYC. 35. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU CAŁKOWITEGO W LIŚCIACH POMIDORA	64
RYC. 36. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA ZAWARTOŚĆ KAROTENOIDÓW W LIŚCIACH POMIDORA	66
RYC. 37. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA ZAWARTOŚĆ KAROTENOIDÓW W LIŚCIACH POMIDORA.....	67
RYC. 38. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA NATĘŻENIE PROCESU ASYMLACJI CO ₂ (A) W LIŚCIACH POMIDORA	68
RYC. 39. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA NATĘŻENIE PROCESU ASYMLACJI CO ₂ (A) W LIŚCIACH POMIDORA.....	69
RYC. 40. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA INTENSYWNOŚĆ TRANSPIRACJI (E) W LIŚCIACH POMIDORA	70
RYC. 41. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA INTENSYWNOŚĆ TRANSPIRACJI (E) W LIŚCIACH POMIDORA	71
RYC. 42. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI PRZEWODNICTWA SZPARKOWEGO DLA WODY (G _s) W LIŚCIACH POMIDORA.....	72
RYC. 43. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA WARTOŚCI PRZEWODNICTWA SZPARKOWEGO DLA WODY (G _s) W LIŚCIACH POMIDORA.....	73
RYC. 44. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA STĘŻENIE CO ₂ W PRZESTWORACH MIĘDZYKOMÓRKOWYCH MIĘKISZU ASYMLACYJNEGO (C _i) W LIŚCIACH POMIDORA	75
RYC. 45. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA STĘŻENIE CO ₂ W PRZESTWORACH MIĘDZYKOMÓRKOWYCH MIĘKISZU ASYMLACYJNEGO (C _i) W LIŚCIACH POMIDORA	75
RYC. 46. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA FLUORESCENCJĘ MAKSYMALNĄ (F _M) W LIŚCIACH POMIDORA	77
RYC. 47. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA FLUORESCENCJĘ MAKSYMALNĄ (F _M) W LIŚCIACH POMIDORA.....	77
RYC. 48. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA FLUORESCENCJĘ POCZĄTKOWĄ (F ₀) W LIŚCIACH POMIDORA.....	79
RYC. 49. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA FLUORESCENCJĘ POCZĄTKOWĄ (F ₀) W LIŚCIACH POMIDORA	79
RYC. 50. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA FLUORESCENCJĘ ZMIENNĄ (F _V) W LIŚCIACH POMIDORA	81
RYC. 51. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA FLUORESCENCJĘ ZMIENNĄ (F _V) W LIŚCIACH POMIDORA.....	81
RYC. 52. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA FOTOCHEMICZNĄ WYDAJNOŚĆ PS II (F _V /F _M) W LIŚCIACH POMIDORA	83
RYC. 53. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA FOTOCHEMICZNĄ WYDAJNOŚĆ PS II (F _V /F _M) W LIŚCIACH POMIDORA	83
RYC. 54. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WARTOŚCI WSKAŹNIKA WITALNOŚCI PS II (PI) W LIŚCIACH POMIDORA.....	85
RYC. 55. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA WARTOŚCI WSKAŹNIKA WITALNOŚCI PS II (PI) W LIŚCIACH POMIDORA	85
RYC. 56. WPŁYW POZIOMU ZASOLENIA NA WSKAŹNIK WZGLĘDNEJ ZAWARTOŚCI WODY (RWC) W LIŚCIACH POMIDORA	87
RYC. 57. WPŁYW STĘŻENIA SOLI KRZEMU NA WSKAŹNIK WZGLĘDNEJ ZAWARTOŚCI WODY (RWC) W LIŚCIACH POMIDORA....	87

Spis tabel

TABELA 1. ZASTOSOWANE W PRZEPROWADZONYCH DOŚWIADCZENIACH POZIOMY CZYNNIKÓW DOŚWIADCZALNYCH	17
TABELA 2. ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „A” W LIŚCIACH POMIDORA [MG·G ⁻¹ ŚW. M.].....	27
TABELA 3. ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „B” W LIŚCIACH POMIDORA [MG·G ⁻¹ ŚW. M.].....	29
TABELA 4. ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU CAŁKOWITEGO W LIŚCIACH POMIDORA [MG·G ⁻¹ ŚW. M.].....	31
TABELA 5. ZAWARTOŚĆ KAROTENOIDÓW W LIŚCIACH POMIDORA [MG·G ⁻¹ ŚW. M.]	33
TABELA 6. INTENSYWNOŚĆ ASYMLACJI CO ₂ (A) W LIŚCIACH POMIDORA [μMOL·M ⁻² ·S ⁻¹]	35
TABELA 7. NATĘŻENIE TRANSPIRACJI (E) W LIŚCIACH POMIDORA [MMOL H ₂ O·M ⁻² ·S ⁻¹].....	37
TABELA 8. WARTOŚCI PRZEWODNICTWA SZPARKOWEGO (G _s) DLA WODY W LIŚCIACH POMIDORA [MMOL H ₂ O·M ⁻² ·S ⁻¹]	40
TABELA 9. STĘŻENIE CO ₂ W PRZESTWORACH MIĘDZYKOMÓRKOWYCH MIĘKISZU ASYMLACYJNEGO (C _i) W LIŚCIACH POMIDORA [μMOL CO ₂ ·MOL ⁻¹].....	42
TABELA 10. WARTOŚCI FLUORESCENCJI MAKSYMALNEJ (F _M) W LIŚCIACH POMIDORA	44
TABELA 11. WARTOŚCI FLUORESCENCJI POCZĄTKOWEJ (F ₀) W LIŚCIACH POMIDORA	46
TABELA 12. WARTOŚCI FLUORESCENCJI ZMIENNEJ (F _V) W LIŚCIACH POMIDORA	48
TABELA 13. WARTOŚCI STOSUNKU FLUORESCENCJI ZMIENNEJ DO MAKSYMALNEJ (F _V /F _M) W LIŚCIACH POMIDORA	50
TABELA 14. WARTOŚCI WSKAŹNIKA WITALNOŚCI PS II (PI) W LIŚCIACH POMIDORA	52
TABELA 15. WSKAŹNIK WZGLĘDNEJ ZAWARTOŚCI WODY W LIŚCIACH POMIDORA - RWC [%]	54
TABELA 16. ZAWARTOŚĆ PROLINY W LIŚCIACH POMIDORA [MG·G ⁻¹ ŚW. M.]	55
TABELA 17. AKTYWNOŚĆ KATALAZY W LIŚCIACH POMIDORA [MMOL H ₂ O ₂ ·G ⁻¹ ŚW.M.·MIN ⁻¹].....	55
TABELA 18. AKTYWNOŚĆ PEROKSYDAZY W LIŚCIACH POMIDORA [MMOL H ₂ O ₂ ·G ⁻¹ ŚW.M.·MIN ⁻¹]	56

TABELA 19. WYCIEK ELEKTROLITÓW (L_T/L_0) W LIŚCIACH POMIDORA [%]	56
TABELA 20. ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH PIERWIĄTKÓW W CZĘŚCI NADZIEMNEJ POMIDORA [$G \cdot KG^{-1}$]	58
TABELA 21. STOSUNEK RÓWNOWAŻNIKOWY ZAWARTOŚCI K: (CA+MG) W CZĘŚCI NADZIEMNEJ POMIDORA	58
TABELA 22. SUMARYCZNA POWIERZCHNIA ASYMLACYJNA LIŚCI POMIDORA [$CM^2/ROŚLINA$].....	59
TABELA 23. ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „A” W LIŚCIACH POMIDORA [$MG \cdot G^{-1}$ ŚW. M.].....	61
TABELA 24. ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU „B” W LIŚCIACH POMIDORA [$MG \cdot G^{-1}$ ŚW. M.].....	63
TABELA 25. ZAWARTOŚĆ CHLOROFILU CAŁKOWITEGO W LIŚCIACH POMIDORA [$MG \cdot G^{-1}$ ŚW. M.].....	65
TABELA 26. ZAWARTOŚĆ KAROTENOIDÓW W LIŚCIACH POMIDORA [$MG \cdot G^{-1}$ ŚW. M.]	67
TABELA 27. NATĘŻENIE ASYMLACJI CO_2 (A) W LIŚCIACH POMIDORA [$\mu MOL \cdot M^{-2} \cdot S^{-1}$]	69
TABELA 28. INTENSYWNOŚĆ TRANSPIRACJI (E) W LIŚCIACH POMIDORA [$MMOL H_2O \cdot M^{-2} \cdot S^{-1}$].....	71
TABELA 29. WARTOŚCI PRZEWODNICTWA SZPARKOWEGO (G_s) DLA WODY W LIŚCIACH POMIDORA [$MMOL H_2O \cdot M^{-2} \cdot S^{-1}$].....	74
TABELA 30. STĘŻENIA CO_2 W PRZESTWORACH MIĘDZYKOMÓRKOWYCH MIĘKISZU ASYMLACYJNEGO (C_i) W LIŚCIACH POMIDORA [$\mu MOL CO_2 \cdot MOL^{-1}$].....	76
TABELA 31. WARTOŚCI FLUORESCENCJI MAKSYMALNEJ (F_M) W LIŚCIACH POMIDORA	78
TABELA 32. WARTOŚCI FLUORESCENCJI POCZĄTKOWEJ (F_0) W LIŚCIACH POMIDORA	80
TABELA 33. WARTOŚCI FLUORESCENCJI ZMIENNEJ (F_V) W LIŚCIACH POMIDORA	82
TABELA 34. WARTOŚCI WSKAŹNIKA FOTOCHEMICZNEJ WYDAJNOŚCI PS II (F_V/F_M) W LIŚCIACH POMIDORA	84
TABELA 35. WARTOŚCI WSKAŹNIKA WITALNOŚCI PS II (PI) W LIŚCIACH POMIDORA	86
TABELA 36. WSKAŹNIK WZGLĘDNEJ ZAWARTOŚCI WODY W LIŚCIACH POMIDORA - RWC [%]	88
TABELA 37. ZAWARTOŚĆ PROLINY W LIŚCIACH POMIDORA [$MG \cdot G^{-1}$ ŚW. M.]	89
TABELA 38. AKTYWNOŚĆ KATALAZY W LIŚCIACH POMIDORA [$MMOL H_2O_2 \cdot G^{-1}$ ŚW.M. $\cdot MIN^{-1}$]	89
TABELA 39. AKTYWNOŚĆ PEROKSYDAZY W LIŚCIACH POMIDORA [$MMOL H_2O_2 \cdot G^{-1}$ ŚW.M. $\cdot MIN^{-1}$].....	90
TABELA 40. WYCIEK ELEKTROLITÓW (L_T/L_0) W LIŚCIACH POMIDORA [%]	91
TABELA 41. ZAWARTOŚĆ WYBRANYCH PIERWIĄTKÓW W ROŚLINACH POMIDORA [$G \cdot KG^{-1}$].....	92
TABELA 42. STOSUNEK RÓWNOWAŻNIKOWY ZAWARTOŚCI K : (CA+MG) W CZĘŚCI NADZIEMNEJ POMIDORA	92
TABELA 43. SUMARYCZNA POWIERZCHNIA ASYMLACYJNA LIŚCI POMIDORA [$CM^2/ROŚLINA$].....	93
