

STRESZCZENIE

Wzrastająca liczba ludności, kurczące się areale uprawne i zmiany klimatyczne skłaniają do poszukiwania nowych rozwiązań w rolnictwie. W zrównoważonym podejściu rolnictwo powinno opierać się podnoszeniu jakości i ilości plonów przy zachowaniu bioróżnorodności i ochrony środowiska naturalnego. Nanotechnologia, obecna w wielu dziedzinach życia, stwarza możliwości wspierania rozwoju zrównoważonego rolnictwa na wielu płaszczyznach. Spośród licznych rozwiązań i nanomateriałów na szczególną uwagę zasługuje krzem, który jest naturalnym komponentem ekosystemu, a w postaci nanocząsteczkowej nabywa nowych, unikatowych właściwości. Niniejszy artykuł koncentruje się na istotnej roli nanocząstek krzemu w rolnictwie organicznym, ze szczególnym uwzględnieniem ich działania jako nanonawozów. Autorki analizują wpływ nanocząstek krzemu na wzrost i rozwój roślin oraz ich potencjał w łagodzeniu negatywnych efektów czynników abiotycznych wywołanych przez suszę, zasolenie oraz narażenie na metale. Ponadto, przedstawiono korzystny wpływ nanocząstek krzemu na rośliny rosnące w warunkach stresu biotycznego wywołanego przez aktywność mikroorganizmów tj. bakterii i grzybów. Praca uwzględnia przegląd wyników oryginalnych badań przeprowadzonych w ostatnich latach w tym obszarze, a także przedstawia możliwe mechanizmy i strategie działania nanocząstek krzemu na poziomie fizjologicznym, komórkowym i molekularnym. Omówiono również kwestię bezpieczeństwa stosowania nanocząstek w rolnictwie, a także perspektywy ich dalszego wykorzystania jako czynnika zwiększającego odporność i produktywność roślin uprawnych.

WPROWADZENIE

Rolnictwo to istotny sektor gospodarki, który wytwarza i dostarcza produkty spożywcze dla ludzi oraz paszę dla zwierząt [1]. Obecnie stajemy w obliczu wyzwania jakim jest rosnąca liczba ludzi na świecie, co stwarza konieczność zwiększenia produkcji żywności. Przewiduje się, że światowa konsumpcja żywności wzrośnie do 2050 roku o 59–98% [1]. Z drugiej strony zderzamy się z limitem zasobów naturalnych (w postaci gruntów rolnych, wody, gleby, itp.), zmianami klimatu i zanieczyszczeniami środowiska [2]. W kontekście tych wyzwań szuka się sposobów, aby umożliwić ekonomiczny rozwój rolnictwa, tak aby nie tylko produkcja rolna była opłacalna, ale także wydajna i przyjazna dla środowiska [3]. Różnorodność biologiczna w kontekście żywności i rolnictwa powinna obejmować hodowlę zwierząt, uprawy rolne, leśnictwo i systemy akwakultury, ponieważ warunkuje to bezpieczeństwo żywieniowe. Wszystko co przyczynia się do braku równowagi ekologicznej pomiędzy tymi elementami zaburza tę stabilność [2]. W ostatnich latach bezpieczeństwo żywieniowe stało się celem wielu agend światowych, a badania naukowe i wiedza dotycząca szeroko rozumianych mechanizmów wpływających na bioróżnorodność stanowią podstawę zrównoważonego rolnictwa. Nie ulega wątpliwości, że będzie ono w następnych dekadach uzależnione od nowych technik i innowacyjnych rozwiązań, w dużej mierze bazujących na nanotechnologii. O znaczeniu tej nowej dyscypliny w rozwoju rolnictwa świadczy wzrastająca liczba publikacji w tym obszarze (Ryc. 1).

Nanotechnologia obecna jest w wielu sferach rolnictwa i przetwórstwa rolno-spożywczego. To między innymi opakowania, które zawierają inteligentne nanomateriały [4], systemy detekcji drobnoustrojów i zanieczyszczeń (np. metali ciężkich) w glebie [5] oraz składniki produktów spożywczych. Nanotechnologia w rolnictwie to jednak przede wszystkim nawozy i środki ochrony roślin. Rolnictwo od dawna bazuje na różnego rodzaju agrozwiązkach, które generują potencjalne problemy (związane z zanieczyszczeniem wody, gleby oraz ich pozostałościami w końcowych produktach), stąd potrzeba nie tylko ograniczenia ich stosowania, ale także większego bezpieczeństwa, precyzyjnego zarządzania i kontrolowanego uwalniania do środowiska w celu poprawy wydajności i jakości plonów [1,3]. Zastosowanie nawozów opartych na nanomateriałach ma na celu zredukowanie strat składników odżywczych w plonach w celu zwiększenia ich jakości i ilości oraz zmniejszenie zużycia środków ochrony roślin tak, by przy minimalnych kosztach produkcji uzyskać jak największą wydajność [2]. Produk-

dr hab. Renata Szymańska✉,
dr Aleksandra Orzechowska,
dr inż. Agnieszka Trela-Makowej

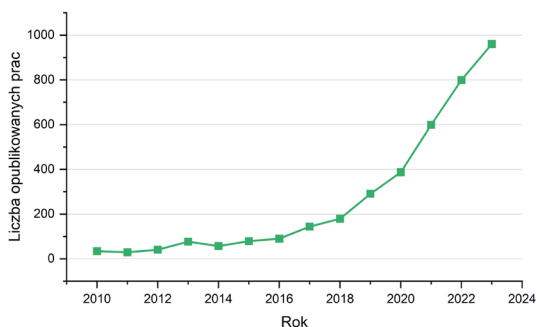
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie

https://doi.org/10.18388/pb.2017_574

✉ autor korespondujący: renata.szymanska@fis.agh.edu.pl

Słowa kluczowe: krzem, nanocząstki, nanotechnologia, nawozy, rolnictwo, stres abiotyczny, stres biotyczny

Podziękowania: Artykuł powstał podczas realizacji projektu OPUS 24 nr 2022/47/B/NZ9/00225 finansowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki.



Rycina 1. Liczba prac naukowych opublikowanych w latach 2000–2023 wg bazy Scopus, przy uwzględnieniu słów kluczowych: „nano”, „food” i „agriculture” (dostęp: 06.08.2024).

ty oparte na nanotechnologii są wykorzystywane także jako inteligentne systemy dostarczania środków agrochemicznych wykorzystujące np. nanocząstki jako nośniki składników aktywnych. Co więcej, nanotechnologia ma duży udział w gospodarowaniu odpadami rolniczymi, takimi jak łupiny, łuski, pędy czy słoma, w celu przekształcenia ich w zaawansowane bionanokompozyty o udoskonalonych właściwościach mechanicznych i fizycznych aby mogły znaleźć zastosowanie w wielu innych gałęziach przemysłu. Jednak aby móc dobrze wykorzystać narzędzia nanotechnologii i uzyskać z nich praktyczne korzyści potrzebne są holistyczne badania. Muszą one odpowiedzieć na pytania dotyczące bezpośredniego wpływu nanotechnologii na rośliny, uwzględniając modele procesów zachodzących w naturze, analizę oceny ryzyka stosowania nanopestycydów i nanonawozów oraz regulacje prawne dotyczące komercjalizacji nanoagroproduktów [2].

NANOTECHNOLOGIA I NANOMATERIAŁY W ROLNICTWIE

Nanometr to miliardowa część metra. Nanocząstki to materiały, których rozmiar mieści się w zakresie 1-100 nm. W porównaniu do swoich mikro- czy makroodpowiedników wykazują wiele specyficznych cech fizykochemicznych, tj. mały rozmiar, struktura powierzchni, ładunek powierzchniowy, zdolność do agregacji, większy stosunek powierzchni do objętości, inna aktywność chemiczna, cechy optyczne, itd. [6,7]. To powoduje, że nanomateriały pomimo takiego samego składu chemicznego jak ich makro- czy mikroodpowiedniki, mogą wykazywać inne właściwości – te pożądane, ale i te związane z ogólnie pojętą nanotoksycznością [3]. Nanotechnologia w ostatnim czasie zrewolucjonizowała

wiele dziedzin naszego życia, w tym medycynę, farmację, energetykę oraz rolnictwo [6].

Udział nanotechnologii w rolnictwie przejawia się na wielu płaszczyznach, od kontrolowanego dostarczania i uwalniania składników odżywczych w glebie, poprawy mikrobiomu glebowego do systemów nanofiltracji wody używanej w rolnictwie (Ryc. 2). Pracuje się nad nanoczuJNIkami połączonymi ze stacjami do fenotypowania roślin, urządzeniami rolniczymi, stacjami meteorologicznymi lub kamerami, które umożliwią monitorowanie w czasie rzeczywistym szeregu parametrów dotyczących czynników biotycznych i abiotycznych, tak aby w porę reagować i łagodzić objawy, czy dokonywać selekcji roślin chorych. Inteligentne czujniki roślin wydają się być podstawą nowoczesnego, zrównoważonego rolnictwa, jednak nadal wymagają testów w warunkach polowych, które uwzględniłyby złożoność tego środowiska.

Nanocząstki mogą wnikać do roślin poprzez naziemne organy m.in. przez kutykulę, epidermę, aparaty szparkowe, hydrotody (przepuszczalne dla wody miejsca w epidermie) oraz organy podziemne (m.in. przez wierzchołki korzeniowe czy korzenie boczne). Jak wynika z badań, bardzo małe nanocząstki (poniżej 5 nm) przechodzą swobodnie przez ścianę komórkową, a większe wnikają poprzez hydrotody, znamiona słupek lub aparaty szparkowe [8]. Przez aparaty szparkowe mogą przenikać nanocząstki o średnicy 15-500 nm [7]. Nanocząstki po wnikięciu w częściach naziemnych, zgodnie z mechanizmem przepływu masowego, są transportowane w dół rośliny poprzez floem. Zaabsorbowane przez korzenie są transportowane drogą symplastyczną (poprzez cytozol i plasmodesmy sąsiadujących komórek) lub apoplastyczną (poprzez system połączonych ścian komórkowych i przestworów międzykomórkowych) w górę rośliny [6].

W ostatnich latach nastąpił olbrzymi postęp w produkcji i optymalizacji składu nawozów. Nawozy dostępne na rynku w swoim składzie zawierają m.in. nanocząstki cynku, krzemu, żelaza, tlenku tytanu (IV), złota, kropki kwantowe (typu *core shell* ZnCdSe/ZnS, InP/ZnS, Mn/ZnSe) [3]. Na rynku krajowym dostępne są nawozy, w składzie których znajdują się nanocząstki żelaza (np. *AgroFerrum Hortus Supplies*), krzemionki (np. *Panergetic*) czy nanocząstki srebra (np. *SilverPlant Uni-Farma, NanoMi Agrami*).

Zastosowanie nanonawozów może pomóc w zmniejszeniu zanieczyszczenia gleby, które związane jest z nagroma-

NANOCZĄSTKI W ROLNICTWIE

NANONAWOZY

↑ kiełkowanie nasion
↑ wzrost roślin
↑ plon

NANOSENSORY

↑ wykrywanie czynników stresowych

NANOREMEDIACJA

↑ usuwanie zanieczyszczeń z gleby i wody

NANOPESTYCYDY

↑ ochrona przed patogenami

NANOMATERIAŁY

↑ ochrona przed zasoleniem i suszą
↑ redukcja akumulacji metali ciężkich
↑ wzmocnienie tolerancji na stres abiotyczny

Rycina 2. Sposoby wykorzystania nanocząstek w rolnictwie.

dzeniem substancji chemicznych przy nawożeniu konwencjonalnym [6]. Kwestia ta musi być rozpatrywana globalnie w kontekście dostępnego areалу upraw, wpływu czynników biotycznych i abiotycznych oraz zachodzących zmian klimatu. Spośród konwencjonalnych praktyk (tj. stosowanie nawozów) i innowacyjnych podejść (np. uprawy roślin genetycznie zmodyfikowanych) mających na celu zwiększenie produkcji i wydajności plonów duży potencjał wykazują metody oparte na nanocząstkach krzemu.

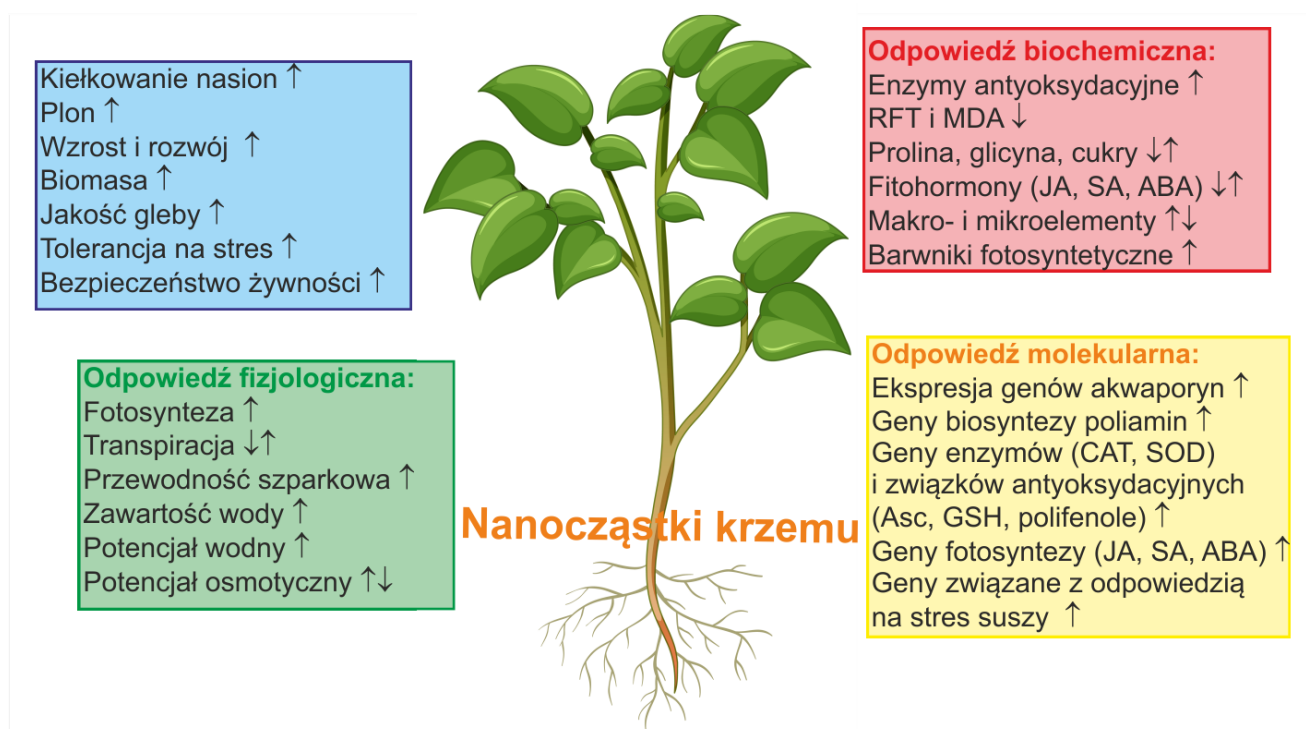
KRZEM - CHARAKTERYSTYKA I WŁAŚCIWOŚCI

Krzem to drugi po tlenie najbardziej rozpowszechniony pierwiastek w skorupie ziemskiej. W czystej formie występuje bardzo rzadko, natomiast jest składnikiem wielu minerałów, w tym kwarcu, skaleni, miki i minerałów ilastych [9]. W układach biologicznych krzem występuje w różnych postaciach amorficznej krzemionki ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), zwanej fitolitami (np. w roślinach bogatych w krzemionkę). W glebie krzem w większości występuje w formie tlenku krzemu - SiO_2 , który jest niedostępny dla roślin. Dostępną dla roślin formą krzemu jest kwas ortokrzemowy ($\text{Si}(\text{OH})_4$), który naturalnie występuje w glebie [10,11]. Stężenie krzemu w roztworze glebowym (ciecz wypełniająca glebę pomiędzy jej stałymi cząstkami; źródła wody i soli mineralnych dla korzeni roślin) mieści się w zakresie od 0,1 do 0,6 mM (przy $\text{pH} < 9$) [7,12]. Zawartość krzemu w roślinach waha się w granicach 0,1–10% suchej masy [10]. Różnice w zawartości krzemu w tkankach roślin są znacznie mniejsze w obrębie danego gatunku niż pomiędzy różnymi gatunkami, co w głównej mierze jest spowodowane różnicami w wydajności pobierania krzemu przez system korzeniowy [13]. Za różnice w akumulacji krzemu odpowiadają mechanizmy molekularne związane z transporterami białkowymi krzemu. Pobieranie krzemu zachodzi zarówno drogą symplastywną jak i apoplastyczną. Mechanizm pobierania i dystrybucji krzemu został dobrze poznany u ryżu, który jest typowym akumulatorem krzemu [14]. Badania z udziałem jego mutantów pozwoliły na identyfikację kanałów i transporterów krzemu (w tym Lsi1, Lsi2, Lsi3 i Lsi6, ang. *low silicon*) należących do rodziny białek nodulinowych (NIP) [14,15]. Liczne transportery akwaporynowe, takie jak białka wewnętrzne Nod-podobne (Nod26) czy homologi akwaporyn Lsi zidentyfikowano zarówno u jednoliściennych jak i dwuliściennych [16]. Krzem jest pobierany ze środowiska zewnętrznego przez transportery Lsi1, a następnie jest przemieszczany dalej przez transportery Lsi2, Lsi3, Lsi4 i Lsi6 do ksylemu, potem do naziemnych części roślin, gdzie osadza się w postaci amorficznej krzemionki w różnych organach i komórkach [7,15]. Na pobieranie i translokację krzemu wpływają zarówno jego właściwości (rozmiar, kształt, ładunek powierzchniowy) jak i uwarunkowania ze strony roślin (m.in. gatunek, stadium wzrostu). Analiza pobierania krzemu przez różne gatunki (np. pszenica, ogórek, tytoń) pokazała, że mniejsze cząstki są absorbowane znacznie łatwiej niż większe [7]. Dokładny mechanizm pobierania, transportu oraz magazynowania krzemu przez rośliny jest szeroko omawiany w literaturze [13,15,17].

Międzynarodowy Instytut Żywienia Roślin (IPNI, www.ipni.net/nutrifacts-northamerican) zaklasyfikował krzem jako korzystny pierwiastek dla roślin. Podobną deklarację

można znaleźć na stronie *Association of American Plant Food Control Officials* (AAPFCO) (<http://www.aapfco.org/>). Dane literaturowe dotyczące badań laboratoryjnych oraz polowych wskazują bezsporną rolę krzemu w stymulowaniu wzrostu, ochronie przed stresem biotycznym (np. pasożyty owadzie, patogeny) i abiotycznym (np. susza, zasolenie, metale ciężkie) [7,18]. Dodatkowo, porowata natura krzemu czyni z niego idealny materiał do stosowania jako nośnik różnych substancji (nawozów, pestycydów, regulatorów wzrostu) czy związków bioaktywnych (np. DNA, białka) w celu zwiększenia produkcji rolnej oraz w biotechnologii roślin [19].

Dane literaturowe ostatniej dekady wskazują na pozytywny wpływ krzemu na wzrost i rozwój roślin, w szczególności w warunkach stresu biotycznego i abiotycznego [10]. Pokazano, że krzem wzmacnia odporność na stres abiotyczny w przypadku wielu roślin użytkowych: ryżu [20], pszenicy, pomidora [21], kopru włoskiego [22] czy sorgo [23]. Dobrze udokumentowana jest aktywność przeciwdrobnoustrojowa krzemu. Dane te spowodowały, że krzem jest wykorzystywany jako nawóz w rolnictwie na całym świecie i choć wiele mechanizmów jego działania już zostało rozwikłanych, to część wciąż czeka na rozpoznanie. Nawozy krzemowe dzieli się ze względu na rodzaj obecnego w nich krzemianu na nawozy: krzemianowo-wapniowe, krzemianowo-sodowe, krzemianowo-potasowe, krzemiany oparte na popiole i nawozy mineralne. Wśród nich, krzemiany sodowe i krzemiany potasowe są obecnie najczęściej stosowane w rolnictwie. Bowen i in. [24] wykazali, że stosowanie nawozów krzemowych (krzemian potasu) znacznie zmniejszyło zakres infekcji mączniakiem prawdziwym w czterech gatunkach roślin uprawnych: melon, ogórek, cukinia i winorośl. Stosowanie nawozów zawierających krzem rodzi pytania o ilość krzemu dostępnego dla roślin. Uwalnianie krzemu z konwencjonalnych nawozów jest bowiem uzależnione od właściwości gleby (pH, zawartości materii organicznej czy obecności tlenków metali) [10]. Ponadto pokazano, że krzem uwolniony z nawozów krzemowych może ulegać w glebie przemianom (np. polimeryzacji albo tworzeniu kompleksów z glebowymi tlenkami metali), co dodatkowo zmniejsza dostępną frakcję krzemu dla roślin [25]. Hogan i in. [26] pokazali, że ilość krzemu uwolnionego z metakrzemianu sodu (komercyjny nawóz „Pro-Tekt”) oraz nawozu na bazie popiołu była znacznie niższa niż ta pochodząca z naturalnych źródeł krzemu (łuski ryżowe). Dane pokazują, że stosowanie nawozów krzemianowych odgrywa ważną rolę w poprawie wzrostu i rozwoju roślin, zwłaszcza w warunkach stresowych. Nowym podejściem w wykorzystaniu krzemu i jego potencjału w rolnictwie jest nanotechnologia. Dzięki jej narzędziom nie tylko jesteśmy w stanie poprawić wydajność stosowania krzemu jako nawozu. Nanocząstki krzemu są relatywnie lepiej rozpuszczalne i mają większą aktywność w porównaniu do mikroodpowiednika, co głównie wynika z ich małego rozmiaru (poniżej 100 nm), dużej powierzchni oraz łatwości penetracji do komórek oraz dystrybucji w obrębie tkanek roślinnych. Co więcej, nanocząstki krzemu mogą być pozyskiwane różnymi metodami, które umożliwiają pełną kontrolę ich cech fizykochemicznych, a co za tym idzie – właściwości.



Rycina 4. Wpływ nanocząstek krzemu na rośliny. Nanocząstki krzemu wpływają na aktywność roślin na wielu jej poziomach

korze [31]. Najbardziej ekologiczne podejście zakłada wykorzystanie resztek z przetwórstwa rolno-spożywczego do pozyskiwania nanocząstek krzemu, tj. odpadów z trzciny cukrowej, łusek ryżowych czy kolb kukurydzy [32], resztek manioku, łupin kokosa, liści miodli indyjskiej i liściokrzewu *Phyllanthus* spp. [33-36]. Nowatorskim podejściem jest pozyskiwanie nanocząstek krzemu z chwastów turzycowych [11]. Nanocząstki krzemu o właściwościach antybakteryjnych pozyskano z cynodonu palczastego (*Cynodon dactylon*) gatunku należącego do traw [37]. W większości przytoczonych badań nanocząstki krzemu były syntetyzowane dwuetapowo i obejmowały ekstrakcję krzemianu sodu za pomocą NaOH, a następnie metodą zol-żel, która polegała na neutralizacji soli w obecności HCl. Zespół Adinarayana i in. [31] zsyntetyzował nanocząstki krzemu ze skrzypu *Equisetum arvense* z zastosowaniem pirolyzy w piecu muflowym. Otrzymane cząstki miały średnicę ok. 2-3 nm i właściwości fluorescencyjne. Współczynnik odzysku nanocząstek krzemu pozyskanych z odpadów rolniczych (łuski ryżowe, liście bambusa, wytloki z trzciny cukrowej i łupiny orzeszków ziemnych) oscyluje w zakresie 52-78% [38].

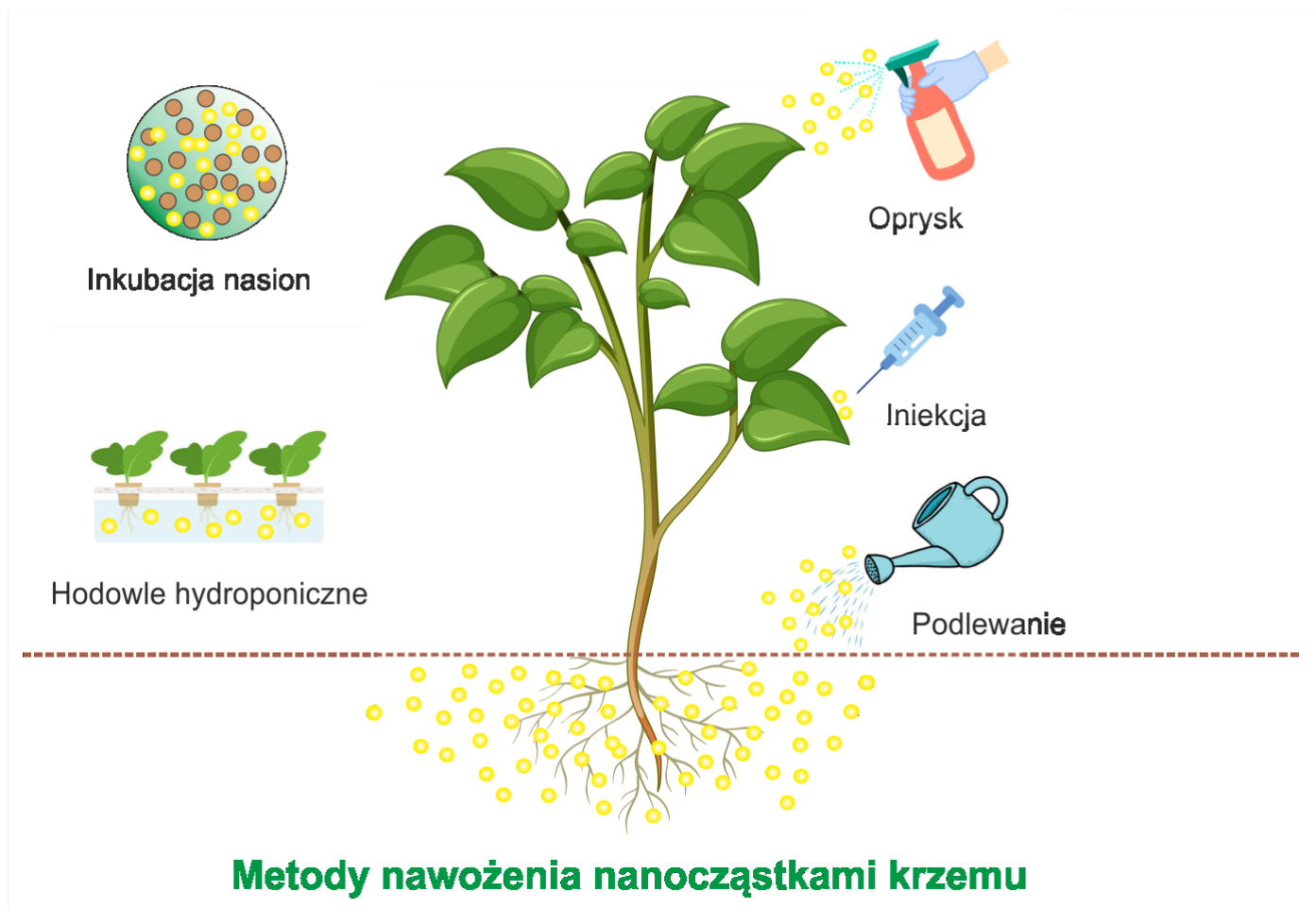
WPLYW NANOCZĄSTEK KRZEMU NA ROŚLINY

Pomimo, że znaczenie krzemu dla roślin zostało przez biologów roślin rozpoznane już na początku XIX w., jego udział w metabolizmie roślin jest wciąż badany, a jego rola jako niezbędnego makroelementu ustalana [9,39]. Wczesne prace (z lat 80. XX w.) sugerują, że krzem jest niezbędny do prawidłowego wzrostu roślin, stanowi mechaniczną barierę przed patogenami i roślinożercami [40]. Nie bez znaczenia jest wysoka zawartość krzemu w niektórych gatunkach roślin, która nie może być tylko efektem biernego pobierania tego pierwiastka z gleby [41]. Pobieranie krzemu przez ko-

rzenie roślin ma charakter adaptacyjny w odpowiedzi na zmieniające się warunki wzrostu, a dotyczy to zwłaszcza stresu abiotycznego i biotycznego [9]. Pod względem akumulacji krzemu rośliny zostały podzielone na hiperakumulujące (1,5-10%), akumulujące (0,2-1,5%), słabo akumulujące (poniżej 0,2%) i nieakumulujące.

Liczne prace pokazują, że krzem w postaci nanocząsteczkowej odgrywa znaczącą rolę w aktywności metabolicznej roślin na każdym jej poziomie: ekologicznym, fizjologicznym, komórkowym i molekularnym [42,43] (Ryc. 4). Suplementacja roślin nanocząstkami krzemu poprawia lignifikację ściany komórkowej, zwiększa zawartość wolnych aminokwasów, rozpuszczalnych cukrów, białek i makroelementów (np. potas, fosfor) [44]. Chain i in. [45] zaobserwowali, że nanocząstki krzemu wpływają na ekspresję 47 genów u pszenicy (*Triticum aestivum*), a w przypadku ryżu aż 221 genów, z których 28 było związanych z ochroną przed stresem, natomiast reszta odpowiadała za podstawowe procesy metaboliczne lub miały nieznane funkcje [46]. Dodatkowo wykazano, że nanokrzem wpływa na wzrost wydajności fotosyntetycznej, metabolizm aminokwasów, anatomię korzeni oraz opóźnianie procesu starzenia się liści roślin hodowanych w warunkach niestresowych [47-49]. Co więcej, badania ostatnich lat pokazują, że nanocząstki krzemu wykazują działanie prewencyjne w warunkach stresowych oraz mają właściwości znoszące niekorzystny wpływ czynników środowiskowych (np. zasolenia, suszy itd.) [9,50,51].

Nanocząstki krzemu powodują wzrost zawartości barwników fotosyntetycznych oraz zwiększają wydajność fotosyntetyczną. Dane pokazują, że dolistna aplikacja nanocząstek krzemu wpływa na poprawę wydajności fotosyntezy



Metody nawożenia nanocząstkami krzemu

Rycina 5. Najczęstsze sposoby nawożenia roślin nanocząstkami krzemu. Dostarczanie nanocząstek krzemu odbywa się najczęściej poprzez oprysk, doglebowo lub w wyniku inkubacji nasion w zawieszynie nanocząstek. Do mniej rozpowszechnionych sposobów należy iniekcja i hodowle hydroponiczne.

poprzez zwiększenie absorpcji światła przy jednoczesnej redukcji transpiracji. Zdeponowanie krzemu na powierzchni blaszki liściowej trzciny cukrowej powodowało jej wzmocnienie i utrzymywanie jej w naprężonej, rozprostowanej pozycji, co z kolei poprawiało absorpcję światła [50]. Przegląd literatury w tym zakresie oraz badania prowadzone przez Autorki niniejszego artykułu pokazują, że pozytywny efekt działania nanocząstek krzemu na fotosyntezę jest wielopłaszczyznowy. Wykazano, że pod wpływem nanocząstek krzemu powiększeniu ulegają chloroplasty oraz zwiększa się liczba gran [52,53]. Dodatkowo, nanocząstki krzemu wzmagają aktywność fotosystemu II, szybkość transportu elektronów, stymulują wymianę gazową i biosyntezę barwników fotosyntetycznych (chlorofilu i karotenoidów) [44,54]. Ponadto nanocząstki krzemu wpływają na ekspresję genów zaangażowanych w proces fotosyntezy, takich jak *PsbW*, *Psb28* (centrum reakcji PSII), *PetE* (plastocjanina), *PetF* (ferredoksyna) czy inne (*Q222S1*, *Q7F8E8*), które zwiększają wydajność PSI i PSII, usprawniają formowanie anten fotosyntetycznych czy błon tylakoidalnych [55,56]. Pokazano także, że suplementacja nanocząstkami krzemu wpływa na wzrost asymilacji CO₂ poprzez amplifikację białek błon tylakoidalnych (LHCI, LHCI i F1-ATPazy) [44,57,58]. Wykazano, że nanocząstki krzemu stymulują wiele procesów

fizjologicznych, w tym kiełkowanie nasion, wzrost i rozwój wegetatywny, jak również wydajność plonów [44].

Nanocząstki krzemu w rolnictwie suplementowane są różnymi drogami (Ryc. 5), z których trzy należą do najczęstszych: dolistna, dokorzeniowa (doglebowa) oraz poprzez tzw. „zaprawianie” nasion (z ang. *seed priming*) (Ryc. 5). Najczęściej stosowane są nanocząstki mezoporowe, o średnicy w zakresie 20 nm - 100 nm, co zapewnia skuteczną absorpcję przez rośliny [59]. Korzenie wydzielają do środowiska glebowego różne związki (m.in. kwasy organiczne, aminokwasy, fenole, białka), które tworzą z nanocząstkami krzemu kompleksy wiążące do białek transbłonowych lub nośników i wraz z nimi penetrują kanały jonowe lub akwaporyny drogą endocytozy [11]. Efektywność doglebowego podawania nanocząstek krzemu jest w dużym stopniu uzależniona od właściwości fizykochemicznych gleby, gatunku, wieku roślin, warunków środowiskowych, wielkości nanocząstek, czy ich stabilności w środowisku glebowym oraz wodnym [60]. W przypadku stosowania oprysku na powierzchnię liści zawieszyną nanocząstek krzemu, są one najczęściej absorbowane przez aparaty szparkowe skórki liści. Nanocząstki krzemu są skuteczniej pobierane i zdeponowane przez organy generatywne roślin, tj. owoce, kwiaty i nasiona, co skutkuje poprawą wydajności kiełkowania,

wzrostu siewek czy przyrostu biomasy [11]. Z kolei zaprawienie nasion wpływa na ich kiełkowanie i przekłada się na bardziej wydajną produkcję roślinną. Stosowanie nanocząstek krzemu przyspiesza ten proces, co zostało bardzo dobrze udokumentowane w literaturze [7,44]. Dzięki małowielkości nanocząstki mogą łatwo penetrować przez osłonkę nasienną i wpływać na procesy fizjologiczne w ich wnętrzu, takie jak uruchomienie szlaków sygnałowych prowadzących do zahamowania syntezy kwasu abscysynowego i aktywacji wydzielania giberelin w celu przerwania spoczynku nasion [61]. Dodatkowo wykazano, że pod wpływem nanocząstek krzemu wzmocnieniu ulega aktywność enzymów antyoksydacyjnych – katalazy i dysmutazy ponadtlenkowej, co może być efektem zwiększonego metabolizmu w kiełkujących nasionach [62].

UDZIAŁ NANOCZĄSTEK KRZEMU W ODPOWIEDZI ROŚLIN NA STRES ABIOTYCZNY

Ostatnie badania pokazują, że nanocząstki krzemu mogą skutecznie ograniczyć skutki stresu abiotycznego, głównie w przypadku suszy, zasolenia czy metali ciężkich. Dostępne w literaturze wyniki badań dotyczące wpływu nanocząstek krzemu na rośliny rosnące w warunkach stresowych wskazują, że efekty ich działania dotyczą procesów fizjologicznych, komórkowych i molekularnych. Odpowiedź roślin na nanocząstki krzemu różni się w zależności od zastosowanego stężenia, zakresu działania stresora, wieku czy gatunku rośliny.

Wiele prac dotyczy pozytywnego wpływu nanocząstek krzemu na cechy fizjologiczne i morfologiczne roślin rosnących w warunkach stresowych, takich jak biomasa, długość siewek i pędów, anatomia korzeni czy liści, wydajność kiełkowania nasion, czas kwitnięcia [11,63]. W odniesieniu do cech fizjologicznych wykazano korzystny wpływ nanocząstek krzemu na wiele roślin o kluczowym znaczeniu w rolnictwie: pszenicy *Triticum aestivum*, łubinu *Lupinus albus* oraz ziemniaka *Solanum tuberosum* L. U roślin tych, mezoporowate nanocząstki krzemu powodowały zwiększenie zawartości chlorofilu oraz wzrost aktywności fotosyntezy, bez oznak stresu oksydacyjnego [64,65]. Prace dotyczące różnych gatunków roślin uprawnych pokazują, że nanocząstki krzemu wpływają na poprawę lignifikacji ściany komórkowej np. u owsa [63] czy kozieradki [66]. W kontekście cech molekularnych obserwowany efekt działania nanocząstek krzemu dotyczy wzrostu biosyntezy i aktywności enzymów, w tym antyoksydacyjnych (katalazy, dysmutazy czy peroksydazy), syntezy metabolitów wtórnych, zmiany profilu ekspresji genów związanych z procesami obronnymi [9,66,67]. Zestawienie przykładowych badań dotyczących wpływu nanocząstek krzemu na rośliny rosnące w warunkach stresu abiotycznego przedstawiono w tabeli 1.

Niestety, pomimo ogromnej bazy danych dotyczących wpływu na rośliny, niewiele wiemy na temat mechanizmów działania nanocząstek krzemu (czy też krzemu w ogóle) w przypadku konkretnych czynników stresowych. Dostępna w tym zakresie wiedza wskazuje bowiem, że mechanizmy te są różne. Na przykład, w przypadku stresu suszy stosowanie nanocząstek zwiększa wysycenie tkanek krzemem powodując tworzenie powłoki na powierzchni

liści, przez co zmniejsza się intensywność transpiracji, w wyniku czego straty wody są mniejsze. Rośliny traktowane nanocząstkami krzemu wykazują zwiększony turgor liści, lepszą stabilność błony komórkowej oraz większą zawartość proliny w liściach, co wskazuje na aktywację regulacji osmotycznej, która reguluje gospodarkę wodną i wspiera prawidłowy metabolizm komórkowy u roślin poddanych stresowi suszy [69]. Dodatkowo, wykazano, że w warunkach niedoboru wody pod wpływem nanocząstek krzemu zmienia się profil ekspresji genów [76]. Na przykład Liu i in. [68] wykazali, że nanocząstki krzemu aktywują ekspresję genów kodujących korzeniowe akwaporyny, co w konsekwencji wzmacnia absorpcję wody i powoduje rozcieńczenie nadmiaru jonów Na^+ , które mogą być dla roślin toksyczne. Wzmożenie ekspresji genów akwaporyn w tym przypadku przywracało homeostazę wodno-jonową. U sorgo pod wpływem nanocząstek krzemu aktywowane były geny biosyntezy poliamin, które miały udział w aktywacji czynników transkrypcyjnych (*OsNAC5*, *OsDREB2A*) i innych genów (np. *OsRAB16*, *OsCMO*) zaangażowanych w łagodzenie stresu suszy [76-79].

Stres solny jest głównym stresem abiotycznym w produkcji rolnej. Dotyka ok. 20% całkowitej powierzchni gruntów rolnych na całym świecie [7]. W przypadku stresu związanego z zasoleniem sugerowane działanie nanocząstek krzemu może opierać się na zwiększaniu zawartości wody w tkankach, zmniejszaniu potencjału osmotycznego, wzroście ciśnienia turgorowego w liściach [80], a także zwiększeniu stabilności błon biologicznych oraz ograniczeniu stresu oksydacyjnego poprzez zmniejszenie peroksydacji lipidów i akumulacji reaktywnych form tlenu (RFT) [71]. W odporności roślin na stres solny kluczową rolę odgrywa homeostaza sodowo-potasowa [80]. Udokumentowano, że zastosowanie nanocząstek krzemu reguluje równowagę Na^+/K^+ u ryżu i pomarańczy poprzez regulację ekspresji genów transporterów Na^+/K^+ , w tym HKT, SOS i NHX [72,81]. Ponadto, nanocząstki krzemu wzmacniają produkcję wosku naskórkowego, tworzenie dwuwarstwowej kutykuli wysyczonej krzemem oraz krzemionkowych depozytów o różnych kształtach, co ogranicza parowanie i nagrzewanie się roślin [71,82]. Co więcej, aplikacja nanocząstek krzemu roślinom rosnącym w warunkach zasolenia wzmacnia absorpcję potasu i jego translokację do komórek szparkowych, gdzie potas reguluje przewodność szparkową [83]. W eksperymentach polowych, użycie 2% roztworu nanocząstek krzemu spowodowało wzrost wydajności plonów odpowiednio o 28 i 32% u bobu (*Vicia faba*) rosnącego w warunkach zasolenia [70]. W odpowiedzi roślin na stres ważną rolę odgrywają hormony roślinne [2]. Nanocząstki krzemu wpływają na gibereliny, które biorą udział w odpowiedzi na suszę, zacinienie, zalanie i niską temperaturę [2]. Z udziałem nanocząstek można też dostarczać hormony roślinom. Na przykład mezoporowate nanocząstki krzemu z wbudowanym kwasem abscysynowym wykazywały przedłużone uwalnianie tego hormonu, co skutkowało znacznie lepszą odpornością na suszę u *Arabidopsis* [84].

W wyniku działalności człowieka (np. górnictwo, stosowanie nawozów chemicznych) zanieczyszczenie metalami stało się jednym z głównych zagrożeń zrównoważonej produkcji rolnej i bezpieczeństwa żywności. W przypadku

Tabela 1. Przykłady wpływu nanocząstek krzemu na rośliny rosnące w warunkach stresu abiotycznego.

Roślina	Czynnik stresowy	Sposób aplikacji	Dawka	Efekt działania	Ref.
Kukurydza (<i>Zea mays</i>)	Susza	Dolistnie	100–200 ppm	Efektywniejsze wchłanianie składników odżywczych przez roślinę	[11]
Oliwka europejska (<i>Olea europaea</i> cv. <i>Kalamata</i>)	Susza	Dolistnie	150–200 ppm	Zmniejszony poziom uszkodzeń błon komórkowych, zwiększona jakość owoców oraz ich masa, zmniejszony procent opadających owoców	[11]
Jęczmień (<i>Hordeum vulgare</i>)	Susza	Doglebowo	125–250 ppm	Zwiększony całkowity poziom karotenoidów oraz chlorofili, zwiększona masa pędów, zmiany w profilu osmolitów i metabolitów, zmiany we wskaźnikach uszkodzeń komórkowych oraz w aktywności enzymów antyoksydacyjnych	[11]
Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i> L.)	Susza	Hodowla hydroponiczna	1,67 mM	Zwiększone pobieranie wody przez korzenie	[68]
Wrotycz maruna (<i>Tanacetum parthenium</i>)	Susza	Dolistnie	1,5–3 mM	Zwiększona zawartość wody w roślinie oraz zawartość fosforu i proliny w liściach, zwiększona powierzchnia oraz sucha masa liści	[69]
Kukurydza (<i>Zea mays</i>)	Zasolenie	Donasiennie	10 mg/ml	Zwiększona zdolność kiełkowania nasion, wyższy indeks wigoru siewek, zwiększona aktywność enzymów antyoksydacyjnych	[11]
Kabaczek (<i>Cucurbita pepo</i> L.)	Zasolenie	Donasiennie	1,5–7,5 g/l	Zwiększona zdolność kiełkowania nasion, zmniejszony poziom wskaźników uszkodzeń komórkowych, poprawa poziomu elektrolitów, zwiększony poziom barwników fotosyntetycznych i enzymów antyoksydacyjnych, zwiększony wzrost rośliny	[6]
Ryż (<i>Oryza sativa</i>)	Zasolenie	Hodowla hydroponiczna	0,5–2 mM	Zmniejszona akumulacja sodu, ograniczony wyciek elektronów oraz proces peroksydacji lipidów, wpływ na reakcje zależne od fitohormonów	[16]
Bób (<i>Vicia faba</i> L.)	Zasolenie	Donasiennie	1–3 mM	Zwiększona jakość nasion oraz ich zdolność kiełkowania, zwiększona wydajność plonu	[70]
Truskawka (<i>Fragaria x anansa</i>)	Zasolenie	Hodowla hydroponiczna	50, 100 mg/l	Ograniczony niekorzystny wpływ zasolenia na warstwę wosku epikutylarnego, zwiększony poziom barwników fotosyntetycznych	[71]
Pomarańcza (<i>Citrus x sinensis</i> L. Osbeck)	Zasolenie	Dolistnie	200–600 mM	Zwiększony wzrost korzeni, zwiększona zawartość chlorofilu, regulacja zawartości sodu	[72]
Kukurydza (<i>Zea mays</i>)	Glin	Doglebowo	4 mg/kg	Zwiększona akumulacja kwasów organicznych, zwiększona wydajność detoksykacji metalu w korzeniach, aktywacja systemu obrony antyoksydacyjnej	[73]
Kolendra (<i>Coriandrum Sativum</i>)	Kadm	Dolistnie	1,5 mM	Zwiększony stopień kiełkowania, zwiększona wydajność fotosyntezy i systemu obrony antyoksydacyjnej	[11]
Rzepak (<i>Brassica napus</i> L.)	Kadm	Dolistnie	1,5 mM	Zwiększona zawartość glutationu, askorbinianu i proliny, zmniejszona zawartość kadmu w pędach i korzeniach, zwiększona masa pędów i korzeni	[74]
Kukurydza (<i>Zea mays</i>)	Arsen	Hodowla hydroponiczna	10 μM	Zmniejszona akumulacja arsenu i obniżony poziom stresu oksydacyjnego, zwiększony poziom składników cyklu glutationowo-askorbinianowego	[11]
Soja (<i>Glycine max</i>)	Rtęć	Hodowla hydroponiczna	100–2000 mg/l	Zwiększona zawartość chlorofilu, zwiększona aktywność enzymatyczna, ograniczona redukcja wzrostu, zmniejszona akumulacja i translokacja rtęci w korzeniu, łodydze i liściach	[11]
Groch zwyczajny (<i>Pisum sativum</i> L.)	Chrom	Donasiennie	10 μM	Zwiększona aktywność enzymów antyoksydacyjnych, zmniejszona akumulacja chromu w roślinie, zwiększona zawartość składników odżywczych	[75]

stresu powodowanego przez metale ciężkie stosowanie nanocząstek krzemu może ograniczyć ich stężenie w glebie. U roślin rosnących w obecności metali ciężkich stosowanie nanocząstek krzemu prowadziło do zmiany profilu ekspresji

genów, poprawy parametrów fizjologicznych, zwiększenia aktywności antyoksydacyjnej oraz produkcji ochronnych substancji takich jak sekretoniny korzeniowe, fitochelatyny, czy kwasy organiczne [6].

Stres związany z metalami prowadzi do zniszczenia aparatu fotosyntetycznego oraz stresu oksydacyjnego. Traktowanie nanocząstkami krzemu grochu rosnącego w obecności chromu prowadziło do wzrostu aktywności enzymów antyoksydacyjnych, takich jak peroksydaza askorbinianowa, katalaza i dysmutaza ponadtlenkowa, łagodząc tym samym skutki stresu oksydacyjnego [7,75]. Dodatkowo, obserwowano wzrost zawartości glutationu, askorbinianu i proliny [74], Aktywacja obrony antyoksydacyjnej przez nanocząstki krzemu zmniejszała toksyczność glinu [73], kadmu [85], arsenu [86], rtęci [87] i ołowiu [88].

WPŁYW NANOCZĄSTEK KRZEMU NA ROŚLINY ROSNĄCE W WARUNKACH STRESU BIOTYCZNEGO

W warunkach polowych rośliny narażone są na biotyczne czynniki stresowe związane z aktywnością bakterii, wirusów, grzybów, pasożytów czy owadów [9]. Zabezpieczeniem roślin przed atakiem ze strony mikroorganizmów czy roślinożerców są ich natywne bariery fizyczne, chemiczne oraz mechaniczne. Fizyczną obronę roślin przed szkodnikami (głównie infekcją grzybową) stanowią fitolity złożone głównie z amorficznej SiO_2 , które deponowane są w tkankach [13]. Fitolity ograniczają penetrację grzybów, ale także ścierają struktury aparatów gębowych owadów oraz zmniejszają ogólną strawność roślin dla ssaków roślinożernych [89,90]. Rośliny rosnące w warunkach stresu biotycznego wykorzystują różne mechanizmy obronne, aby nie dopuścić do infekcji, zahamować czy ograniczyć jej negatywne skutki. Indukowana przez nanocząstki krzemu odporność na stres biotyczny u roślin opiera się w dużej mierze na obronie na poziomie fizjologicznym i molekularnym, poprzez wzmocnienie metabolizmu związków obronnych, wzroście zawartości i aktywności przeciwutleniaczy oraz regulacji szlaków sygnałowych [7]. Stres biotyczny indukuje szlaki zależne od kwasu absycynowego, etylenu, kwasu jasmonowego czy kwasu salicylowego [91,92]. Nanocząstki krzemu wykazywały ochronne działanie u *Arabidopsis* zainfekowanych bakterią *Pseudomonas* sp. Mechanizm ten opierał się na aktywacji przez krzem zależnych od kwasu salicylowego odpowiedzi odpornościowych roślin, związanych z powolnym uwalnianiem Si(OH)_4 z nanocząstek do aparatów szparkowych i dystrybuowaniu ich w miększym gąbczastym [27]. Pokazano, że pod wpływem infekcji w tkankach roślin dochodzi do wzrostu aktywności enzymów takich jak: chitynaza, β -1,3-glukanaza, amoniakolizaza L-fenylalaniny, oksydaza polifenolowa, peroksydazy [9,93]. Czestym mechanizmem związanym z obroną przeciwpatogenową jest produkcja RFT i stymulacja metabolizmu przeciwutleniającego [94], która w konsekwencji aktywuje szlaki zależne od fitohormonów [95]. RFT pełnią tu mogą podwójną rolę – jako cząsteczki sygnałowe oraz jako reaktywne, toksyczne formy o działaniu obronnym. Dodatkowo, RFT mogą stymulować ekspresję genów odpowiedzialnych za reakcje obronne, w rezultacie czego wzrasta akumulacja białek ochronnych takich jak fitoaleksyny [96]. W warunkach stresu biotycznego zmienia się także profil ekspresji genów. U zainfekowanego ryżu geny ochronne były stymulowane, podczas gdy ekspresja genów podstawowego metabolizmu ulegała obniżeniu. Po aplikacji nanocząstek krzemu, ekspresja genów ochronnych była znacznie mniejsza, praktycznie elimi-

nując oznaki stresu na poziomie transkrypcyjnym [94,97]. W przypadku pomidora zainfekowanego bakterią *Ralstonia solanacearum* zaobserwowano wzrost ekspresji genów aktywny, alfa-tubuliny czy kinazy fosfoglicerynianowej [98]. Co ważne gatunki, które należą do słabych akumulatorów krzemu, takie jak pomidor, papryka (*Capsicum annuum*) czy róża (*Rosa* sp.) suplementowane krzemem znacznie zwiększają odporność na stres [80,99]. W przypadku *Arabidopsis thaliana* infekcja grzybem *Erysiphe cichoracearum* wpłynęła na zwiększenie poziomu ekspresji ponad 4000 genów, który był ponadto znacznie wyższy w roślinach traktowanych krzemem. [97]. Regulację ekspresji genów obronnych (m.in. POD, JERF3) wykazano także u winorośli zainfekowanych mączniakiem prawdziwym i traktowanych nanokrzemem [53]. Aktywacja genu POD kodującego oksydoreduktazę wskazuje na mechanizmy angażujące szlaki zależne od RFT i systemu antyoksydacyjnego w obronie przed patogenami, z kolei gen JERF3 pośredniczy w aktywacji szlaku zależnego od fitohormonów, głównie na drodze etylen-kwas jasmonowy [53]. Wśród innych mechanizmów ochronnego działania krzemu w zakażeniach grzybowych można wymienić akumulację substancji o działaniu przeciwgrzybiczym (np. związków fenolowych) oraz wpływ nanocząstek na aparaty szparkowe (np. mechanizm ich otwierania i zamykania, powierzchnię szparek oraz wielkość otworów szparkowych) [53]. Mając na uwadze, że w przypadku niektórych gatunków np. mączniaka rzekomego, aparaty szparkowe są jedyną drogą infekcji, precyzyjna kontrola ich zamykania w momencie zakażenia ma tu kluczowe znaczenie zarówno dla wnikania zoospor jak i sporulacji [53].

Pokazano, że oprysk roślin zawiesiną nawozu wapniowo-krzemianowego w przypadku pszenicy (*Triticum* spp.), bawełny (*Gossypium* spp.), trzciny (*Saccharum* spp.) oraz ogórka (*Cucumis* spp.) znacznie zwiększa śmiertelność larw muchy białej, która jest przyczyną znacznych strat w uprawach tych roślin [100]. Suplementacja nanocząstkami krzemu nadawała odporność siewkom ryżu na larwy pluskwia-ków i gąsienic różnych gatunków [101].

Wielokrotnie dowiedziono ochronną rolę krzemu w przypadku zakażeń różnymi gatunkami grzybów [53,102,103]. Zaprawianie nasion nanocząstkami krzemu wpływa nie tylko na poprawę wydajności ich kiełkowania i wzrost, ale ma także duże znaczenie w ich ochronie przed infekcjami biotycznymi [7]. W łagodzeniu stresu biotycznego najczęściej jednak stosuje się oprysk [53]. Przykłady wpływu nanocząstek krzemu na rośliny rosnące w warunkach stresu biotycznego zestawiono w tabeli 2.

W ochronie przed patogenami nanocząstki krzemu mogą być wykorzystane pośrednio jako nośniki dla pestycydów. Na przykład Bilal i in. [105] wykazali, że indoksakarb wbudowany w nanocząstki wykazywał znacznie lepszą aktywność oraz kontrolowane uwalnianie w odniesieniu do *Plutella xylostella* w porównaniu do wolnego związku. Takie same efekty uzyskano dla prochlorazu, awermektyny czy azoksystrobiny [7]. W opracowaniu są inteligentne nośniki, oparte na nanocząstkach krzemu, które uwalniają pestycydy w kontrolowany sposób, pod wpływem zmian temperatury, pH czy wilgotności [7]. Takie systemy mogą znacznie ograniczyć nadmierne stosowanie syntetycznych

Tabela 2. Przykłady wpływu nanocząstek krzemu na rośliny rosnące w warunkach stresu biotycznego.

Roślina	Czynnik stresowy	Sposób aplikacji	Dawka	Efekt działania	Ref.
Papryka (<i>Capsicum annuum</i>)	<i>Colletotrichum gloeosporioides</i>	Hodowla hydroponiczna	75 mg/l	Zwiększona grubość kutykiuli i jędrność owoców	[16]
Ryż (<i>Oryza sativa</i>)	<i>Magnaporthe Oryzae</i>	Doglebowo	1–8 t/ha	Zwiększona aktywność chitynazy, β -1,3-glukanazy, peroksydazy i amoniakolizy fenylalaniny	[16]
Arbuz (<i>Citrullus lanatus</i>)	<i>Fusarium oxysporum</i> f. sp. <i>Niveum</i>	Dolistnie	500 mg/l	Obniżona ekspresja genów związanych ze stresem	[104]
Ryż (<i>Oryza sativa</i>)	<i>Fusarium fujikuroi</i>	Dolistnie	50 mg/l	Zwiększona aktywność peroksydazy	[104]
Kukurydza (<i>Zea mays</i>)	<i>Fusarium oxysporum</i> , <i>Aspergillus niger</i>	Doglebowo	5–15 kg/ha	Zwiększona zawartość związków fenolowych, aktywacja enzymów związanych z obroną	[104]
Pomidor (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	<i>Alternaria solani</i>	Doglebowo	1,7 mM	Zwiększona aktywność enzymów antyoksydacyjnych, zwiększona ekspresja genów związanych z obroną	[95]
Winorośl (<i>Vitis vinifera</i> L.)	<i>Plasmopara viticola</i>	Dolistnie	50–150 ppm	Deregulowana ekspresja genów związanych z obroną, zwiększony poziom kwasu fenolowego, zwiększona liczba zamkniętych aparatów szparkowych, wzrost wielkości otworów aparatów szparkowych	[53]
Proso afrykańskie (<i>Eleusine coracana</i>)	<i>Pyricularia grisea</i>	Doglebowo	1–3 g/kg	Zmniejszony odsetek występowania choroby, zwiększona wysokość rośliny, długość korzeni, zawartość chlorofilu oraz masa pędów i korzeni	[102]
Cmówka (<i>Phalaenopsis lowii</i>)	<i>Dickeya dadantii</i>	Dolistnie	7,5–30 ppm	Zwiększony wzrost rośliny	[104]
Papryka (<i>Capsicum annuum</i> L.)	<i>Ralstonia solanacearum</i>	Doglebowo	0,25–3 g/kg	Zwiększone stężenie białka całkowitego, katalazy, peroksydazy askorbinianowej i chitynazy	[16]
Rzodkiewnik pospolity (<i>Arabisidopsis thaliana</i>)	<i>Pseudomonas syringae</i>	Dolistnie	25–1600 mg/l	Indukcja nabytej odporności systemicznej u rośliny	[27]
Groch zwyczajny (<i>Pisum sativum</i>)	<i>Meloidogyne incognita</i> , <i>Pseudomonas syringae</i>	Donasiennie, Dolistnie	0,1 mg/ml	Zwiększony wzrost rośliny, zwiększona odporność na zarazę bakteryjną	[67]
Burak (<i>Beta vulgaris</i> L.)	<i>Meloidogyne incognita</i> , <i>Pectobacterium betaovascularum</i> , <i>Rhizoctonia solani</i>	Donasiennie, dolistnie	100, 200 mg/l	Zwiększona aktywność enzymów związanych z obroną, zwiększony wzrost rośliny, zwiększona odporność na patogeny	[67]
Pomidor (<i>Lycopersicon esculentum</i>)	<i>Tuta absoluta</i>	Dolistnie	0,5–8 t/ha	Oderwanie nablonka jelita środkowego od błony podstawnej u owadów, a tym samym zmniejszenie ich zdolności trawiennych	[16]
Trzcina cukrowa (<i>Saccharum officinarum</i>)	<i>Eldana saccharina</i>	Doglebowo	4 t/ha i 8 t/ha	Zmniejszony stopień uszkodzeń lodyg	[16]
Ogórek (<i>Cucumis</i> L.)	<i>Bemisia tabaci</i>	Doglebowo	3 g/kg	Zwiększona śmiertelność larw	[100]
Kabaczek (<i>Cucurbita pepo</i> L.)	<i>Spodoptera littoralis</i>	Dolistnie	200–500 ppm	Zwiększona śmiertelność larw	[67]

pestycydów w rolnictwie, które zagrażają bezpieczeństwu żywności i zrównoważonemu rozwojowi. Zmniejszenie dawki i uwalnianie 'w razie potrzeby' mogą zmniejszyć pozostałości pestycydów w częściach jadalnych roślin. Na przykład, zastosowanie nanocząstek krzemu jako nośnika w dostarczaniu prochlorazu i spirotetramatu zmniejszyło końcową zawartość pestycydów i ich metabolitów w jadalnych częściach ogórka [106]. Nie bez znaczenia pozostają także zdolności remediacyjne nanocząstek krzemu. Duży stosunek powierzchni do objętości i porowata struktura powoduje, że nanocząstki te mogą być wykorzystane do „wylapywania” niechcianych związków z wody czy z gleby. Korrani i in. [107] wykazali, że nanocząstki krzemu skutecznie ekstrahowały z wody pestycydy organiczne (dikrotofos, chloropiryfos i diazinon). Podobne prace dotyczyły

usuwania diazinonu z roztworu [108]. Dalsza optymalizacja tego podejścia polega na tym, aby nanocząstki krzemu nie tylko wychwytywały pestycydy, ale także je rozkładały. Na przykład Yang i in. [109] wykorzystali nanocząstki krzemu do unieruchomienia lakazy w celu degradacji 2,4-dichlorofenolu, a wyniki wykazały, że zastosowanie nanocząstek krzemu zwiększyło skuteczność degradacji i możliwość ponownego użycia lakazy. Dalsze badania w tym kierunku będą bardzo cenne.

BEZPIECZEŃSTWO STOSOWANIA NANOCZĄSTEK KRZEMU W ROLNICTWIE

Stosowanie krzemu i nanocząstek krzemu jest uznawane za bezpieczne i ekologiczne, biorąc pod uwagę jego natural-

ne występowanie w tkankach roślin, czasami w bardzo wysokich stężeniach [110]. Niemniej jednak istnieją doniesienia dotyczące toksycznego działania nanocząstek krzemu w pewnych warunkach hodowlanych. Ujemnie naładowane nanocząstki krzemionki o średnicy 50 nm i 200 nm i przy pH 8 powodowały opóźnienie rozwoju i chlorozę u *Arabidopsis thaliana* w hodowli hydroponicznej [111]. Zniesienie ujemnego ładunku lub obniżenie pH do 5,8 znosiło skutki toksycznego działania, nawet przy stężeniu 1000 ppm (ang. *parts per million*; liczba gramów związku przypadająca na milion gramów/mililitrów roztworu) Cytotoksyczny efekt nanocząstek krzemu jest ściśle zależny od ich stężenia, rozmiaru, kształtu i i opisywany jest głównie w badaniach *in vitro* [112]. Wysokie stężenia nanocząstek krzemu wykazywały działanie cytotoksyczne (mierzone jako spadek indeksu mitotycznego) w komórkach merystematycznych cebuli *Allium cepa* [113]. Nanocząstki krzemu zakłócały przebieg mitozy, uniemożliwiając komórkom wejście w profazę i utrudniając cykl mitotyczny podczas interfazy. Efekt ten ograniczał syntezę DNA i białek, co ostatecznie skutkowało zmniejszeniem wzrostu korzeni i szybkości kiełkowania. Zależny od stężenia efekt toksyczności nanocząstek krzemu obserwowany był także u *Arabidopsis* [114]. Zjawisko związane z zależnym od stężenia działaniem nanocząstek krzemu, w czasie którego obserwowany jest pozytywny efekt przy niższych koncentracjach oraz negatywny przy wyższych, znane jest jako zjawisko hormezy. Hormetyczną odpowiedź wykazują także inne czynniki chemiczne i fizyczne, w tym inne nanocząstki [115].

Mały rozmiar nanocząstek umożliwia im penetrację niektórych błon komórkowych i wnikanie w nowe miejsca, niedostępne dla większych cząstek. Wiadomo, że mały rozmiar nanocząstek umożliwia im przechodzenie przez barierę krew-mózg. To sprawia, że nanocząstki mogą wiązać się i wpływać na makrocząsteczki i organelle komórkowe, prowadząc do cytotoksyczności i genotoksyczności. Dlatego bezpieczeństwo stosowania nanocząstek z uwzględnieniem stężenia, rozmiaru i innych cech, powinno być brane pod uwagę we wszystkich prowadzonych badaniach.

PODSUMOWANIE I PERSPEKTYWY PRZYSZŁYCH BADAŃ

Nanocząstki krzemu stanowią obiecującą perspektywę poprawy praktyk w rolnictwie ekologicznym. Stymulują wzrost roślin, ułatwiają pobieranie składników odżywczych, wspomagają utrzymanie prawidłowego bilansu wodnego w roślinach, zwiększają odporność na stres biotyczny i abiotyczny, jak również chronią rośliny przed patogenami i szkodnikami, co przyczynia się do zdrowszych i bardziej odpornych upraw. Ich rola we wzmacnianiu ścian komórkowych roślin i aktywacji mechanizmów obronnych pomaga roślinom lepiej przetrwać niekorzystne warunki, takie jak susza, zasolenie i choroby. Ponadto, ich przyjazna dla środowiska natura i potencjał do zmniejszenia zanieczyszczeń w przyrodzie czynią je atrakcyjną alternatywą dla konwencjonalnych środków obecnie stosowanych w rolnictwie. Liczne badania wykazały, że nanocząstki krzemu mogą zarówno znacząco zwiększyć plony i jakość upraw jak i przyczynić się do zachowania bioróżnorodności. Zastosowanie nanocząstek krzemu może złagodzić niedobory składników

odżywczych i ataki szkodników, skutkując bardziej wydajną produkcją rolną. Dzięki stosowaniu nanocząstek krzemu realna staje się wizja całkowitej eliminacji nawozów i pestycydów, których powszechne użycie nie pozostaje bez wpływu na ekosystem oraz bezpieczeństwo żywieniowe. Krzem może być bowiem zielonym i ekologicznym stymulatorem wzrostu roślin oraz alternatywą dla nawozów syntetycznych, które zanieczyszczają środowisko.

Stosowanie nanocząstek krzemu w rolnictwie wpisuje się w zasady rolnictwa zrównoważonego – zwiększeniu produktywności, ochronie środowiska, zapewnieniu bezpieczeństwa żywnościowego. Ciągłe jednak niewiele wiadomo na temat mechanizmów działania krzemu zwłaszcza w formie nanocząsteczkowej. Przyszłe badania powinny koncentrować się na poznaniu mechanizmów molekularnych i roli nanocząstek krzemu w tolerancji roślin na stres oraz regulacji szlaków sygnałowych i związanej z nimi ekspresją genów w biosyntezie kluczowych związków w rozwoju roślin. Konieczne są także kompleksowe badania dotyczące długoterminowych skutków nanocząstek krzemu na jakość gleby, fizjologię roślin i dynamikę ekosystemu.

PIŚMIENNICTWO

1. Gupta A, Rayeen F, Mishra R, Tripathi M, Pathak N (2023) Nanotechnology applications in sustainable agriculture: An emerging eco-friendly approach. *Plant Nano Biology* 4: 100033
2. Mittal D, Kaur G, Singh P, Yadav K, Ali SA (2020) Nanoparticle-based sustainable agriculture and food science: Recent advances and future outlook. *Front Nanotechnol* 2: 579954
3. Prasad R, Bhattacharyya A, Nguyen Q (2017) Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Front Microbiol* 8: 1014
4. Bumbudsanpharoke N, Ko S (2015) Nano-food packaging: an overview of market, migration research, and safety regulations. *J Food Sci* 80: R910–R923
5. Ion AC, Ion I, Culetu A (2010) Carbon-based nanomaterials. *Environmental applications*. *Univ Politehn Bucharest* 38: 129–132
6. El-Saadony MT, Saad AM, Soliman SM, Salem HM, Desoky E-SM, Babalghith AO, El-Tahan AM, Ibrahim OM, Ebrahim AAM, Abd El-Mageed TA (2022) Role of nanoparticles in enhancing crop tolerance to abiotic stress: A comprehensive review. *Front Plant Sci* 13: 946717
7. Yan G, Huang Q, Zhao S, Xu Y, He Y, Nikolic M, Nikolic N, Liang Y, Zhu Z (2024) Silicon nanoparticles in sustainable agriculture: Synthesis, absorption, and plant stress alleviation. *Front Plant Sci* 15: 1393458
8. Hossain Z, Mustafa G, Sakata K, Komatsu S (2016) Insights into the proteomic response of soybean towards Al₂O₃, ZnO, and Ag nanoparticles stress. *J Hazard Mater* 304: 291–305
9. Song X-P, Verma K, Tian D-D, Zhang X-Q, Liang Y-J, Huang X, Li C, Li Y (2021) Exploration of silicon functions to integrate with biotic stress tolerance and crop improvement. *Biol Res* 54: 19
10. Bhat J, Rajora N, Raturi G, Sharma S, Dhiman P, Sanand S, Shivaraj SM, Sonah H, Deshmukh R (2021) Silicon nanoparticles (SiNPs) in sustainable agriculture: Major emphasis on the practicality, efficacy and concerns. *Nanoscale Adv* 3: 4019–4028
11. Yuvaraj M, Sathya Priya R, Jagathjothi N, Saranya M, Suganthi N, Sharmila R, Cyriac J, Anitha R, Subramanian KS (2023) Silicon nanoparticles (SiNPs): Challenges and perspectives for sustainable agriculture. *Physiol Mol Plant Pathol* 128: 102161
12. Knight CTG, Kinrade SD (2001) Chapter 4 A primer on the aqueous chemistry of silicon, W: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (red) *Studies in Plant Science. Silicon in Agriculture*. Elsevier, str 57–84
13. Ma JF, Yamaji N (2006) Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends Plant Sci* 11: 392–397

14. Mitani-Ueno N, Ma JF (2021) Linking transport system of silicon with its accumulation in different plant species. *Soil Sci Plant Nutr* 67: 10–17
15. Mandlik R, Thakral V, Raturi G, Shinde S, Nikolic M, Tripathi D, Sonah H, Deshmukh R (2020) Significance of silicon uptake, transport, and deposition in plants. *J Exp Bot* 71: 6703–6718
16. Zargar SM, Mahajan R, Bhat JA, Nazir M, Deshmukh R (2019) Role of silicon in plant stress tolerance: Opportunities to achieve a sustainable cropping system. *3 Biotech* 9: 73
17. Imtiaz M, Rizwan MS, Mushtaq MA, Ashraf M, Shahzad SM, Yousaf B, Saeed DA, Rizwan M, Nawaz MA, Mehmood S, Tu S (2016) Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. *J Environ Manage* 183: 521–529
18. Bansal K, Hooda V, Verma N, Kharewal T, Tehri N, Dhull V, Gahlaut A (2022) Stress alleviation and crop improvement using silicon nanoparticles in agriculture: A review. *Silicon* 14: 10173–10186
19. Zhang J, Kothalawala S, Yu C (2023) Engineered silica nanomaterials in pesticide delivery: Challenges and perspectives. *Environ Pollut* 320: 121045
20. Mahdih M, Habibollahi N, Amirjani M, Abnosi MH, Ghorbanpour M (2015) Exogenous silicon nutrition ameliorates salt-induced stress by improving growth and efficiency of PSII in *Oryza sativa* L. cultivars. *J Soil Sci Plant Nutr* 15: 1050–1060
21. Almutairi ZM (2016) Effect of nano-silicon application on the expression of salt tolerance genes in germinating tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under salt stress. *Plant Omics* 9: 106–114
22. Asgharipour M, Mosapour H (2016) A foliar application silicon enhances drought tolerance in fennel. *J Anim Plant Sci* 26: 1056–1062
23. Yin L, Wang S, Tanaka K, Fujihara S, Itai A, Den X, Zhang S (2016) Silicon-mediated changes in polyamines participate in silicon-induced salt tolerance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Cell Environ* 39: 245–258
24. Bowen P, Menzies J, Ehret D, Samuels L, Glass ADM (1992) Soluble silicon sprays inhibit powdery mildew development on grape leaves. *J Am Soc Hortic Sci* 117: 906–912
25. Babu T, Tubana B, Datnoff L, Yzenas J, Maiti K (2016) Release and sorption pattern of monosilicic acid from silicon fertilizers in different soils of Louisiana: A laboratory incubation study. *Commun Soil Sci Plant Anal* 47: 1559–1577
26. Hogan B, McDermott F, Schmidt O (2018) Silicon concentrations in soil and bark in Irish Sitka spruce forests. *J Plant Nutr Soil Sci* 181: 231–239
27. El-Shetehy M, Moradi A, Macerani M, Reinhardt D, Petri-Fink A, Rothen-Rutishauser B, Mauch F, Schwab F (2021) Silica nanoparticles enhance disease resistance in Arabidopsis plants. *Nat Nanotechnol* 16: 344–353
28. Lehman SE, Mudunkotuwa IA, Grassian VH, Larsen SC (2016) Nano-bio interactions of porous and nonporous silica nanoparticles of varied surface chemistry: A structural, kinetic, and thermodynamic study of protein adsorption from RPMI culture medium. *Langmuir* 32: 731–742
29. Lee JY, Kim MK, Nguyen TL, Kim J (2020) Hollow mesoporous silica nanoparticles with extra-large mesopores for enhanced cancer vaccine. *ACS Appl Mater Interfaces* 12: 34658–34666
30. Selvarajan V, Obuobi S, Ee PLR (2020) Silica nanoparticles – A versatile tool for the treatment of bacterial infections. *Front Chem* 8: 602
31. Adinarayana TVS, Mishra A, Singhal I, Koti Reddy DVR (2020) Facile green synthesis of silicon nanoparticles from *Equisetum arvense* for fluorescence based detection of Fe(III) ions. *Nanoscale Adv* 2: 4125–4132
32. Wang W, Martin JC, Fan X, Han A, Luo Z, Sun L (2012) Silica nanoparticles and frameworks from rice husk biomass. *ACS Appl Mater Interfaces* 4: 977–981
33. Agunsoye JO, Adebisi JA, Bello SA, Haris M, Agboola JB, Hassan SB (2018) Synthesis of silicon nanoparticles from cassava periderm by reduction method. *Mater Sci Tech-Lond* 701–709
34. Anuar MF, Fen YW, Zaid MHM, Matori KA, Khaidir REM (2018) Synthesis and structural properties of coconut husk as potential silica source. *Results Phys* 11: 1–4
35. Maqbool Q, Jabeen N, Sajjad S, Minhas A, Younas U, Anwaar S, Nazar M, Kausar R, Hussain S (2016) Biosynthesis and characterization of nano-silica as potential system for carrying streptomycin at nano-scale drug delivery. *IET Nanobiotechnol* 11: 557–561
36. Sankareswaran M, Vanitha M, Rajiv P, Anbukumar A (2022) *Phyllanthus emblica* mediated silica nanomaterials: Biosynthesis, structural and stability analysis. *Silicon* 14: 10123–10127
37. Babu RH, Yugandhar P, Savithramma N (2018) Synthesis, characterization and antimicrobial studies of bio silica nanoparticles prepared from *Cynodon dactylon* L.: A green approach. *Bull of Mater Sci* 41: 1–8
38. Vaibhav V, Vijayalakshmi D, Roopan S (2014) Agricultural waste as a source for the production of silica nanoparticles. *Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc* 139C: 515–520
39. Lewin J, Reimann BEF (1969) Silicon and plant growth. *Annu Rev Plant Biol* 20: 289–304
40. Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. *Proc Natl Acad Sci* 91: 11–17
41. Coskun D, Deshmukh R, Sonah H, Menzies JG, Reynolds O, Ma JF, Kronzucker HJ, Bélanger RR (2019) The controversies of silicon's role in plant biology. *New Phytol* 221: 67–85
42. Cooke J, DeGabriel JL, Hartley SE (2016) The functional ecology of plant silicon: Geoscience to genes. *Funct Ecol* 30: 1270–1276
43. Manivannan A, Ahn YK (2017) Silicon regulates potential genes involved in major physiological processes in plants to combat stress. *Front Plant Sci* 8: 1346
44. Mukarram M, Petrik P, Mushtaq Z, Khan MMA, Gulfishan M, Lux A (2022) Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. *Environ Pollut* 310: 119855
45. Chain F, Côté-Beaulieu C, Belzile F, Menzies JG, Bélanger RR (2009) A comprehensive transcriptomic analysis of the effect of silicon on wheat plants under control and pathogen stress conditions. *Mol Plant-Microb Interact* 22: 1323–1330
46. Brunings AM, Datnoff LE, Ma JF, Mitani N, Nagamura Y, Rathinasapathi B, Kirst M (2009) Differential gene expression of rice in response to silicon and rice blast fungus *Magnaporthe oryzae*. *Ann Appl Biol* 155: 161–170
47. Detmann KC, Araújo WL, Martins SC V, Sanglard LMVP, Reis J V, Detmann E, Rodrigues FÁ, Nunes-Nesi A, Fernie AR, DaMatta FM (2012) Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. *New Phytol* 196: 752–762
48. Fleck AT, Nye T, Repenning C, Stahl F, Zahn M, Schenk MK (2011) Silicon enhances suberization and lignification in roots of rice (*Oryza sativa*). *J Exp Bot* 62: 2001–2011
49. Markovich O, Steiner E, Kouřil Š, Tarkowski P, Aharoni A, Elbaum R (2017) Silicon promotes cytokinin biosynthesis and delays senescence in Arabidopsis and Sorghum: Silicon and cytokinin. *Plant Cell Environ* 40: 1189–1196
50. Verma K, Singh P, Song X-P, Malviya M, Singh R, Chen G-L, Solomon S, Li Y (2020) Mitigating climate change for sugarcane improvement: Role of silicon in alleviating abiotic stresses. *Sugar Tech* 22: 741–749
51. Frew A, Weston LA, Reynolds OL, Gurr GM (2018) The role of silicon in plant biology: A paradigm shift in research approach. *Ann Bot* 121: 1265–1273
52. Xie Z, Song F, Xu H, Shao H, Song R (2014) Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. *Sci World J* 2014: 718716
53. Rashad Y, El-Sharkawy H, Belal B, Abdel Razek E, Galilah D (2021) Silica nanoparticles as a probable anti-oomycete compound against downy mildew, and yield and quality enhancer in grapevines: Field evaluation, molecular, physiological, ultrastructural, and toxicity investigations. *Front Plant Sci* 12: 763365
54. Ahmad B, Khan MM, Jaleel H, Shabbir A, Sadiq Y, Uddin M (2020) Silicon nanoparticles mediated increase in glandular trichomes and regulation of photosynthetic and quality attributes in *Mentha piperita* L. *J Plant Growth Regul* 39: 346–357

55. Zhang Y, Shi Y, Gong H, Zhao H, Li H, Hu Y, Wang Y (2018) Beneficial effects of silicon on photosynthesis of tomato seedlings under water stress. *J Integr Agric* 17: 2151–2159
56. Lesharadevi K, Parthasarathi T, Muneer S (2021) Silicon biology in crops under abiotic stress: A paradigm shift and cross-talk between genomics and proteomics. *J Biotechnol* 333: 21–38
57. Frazao JJ, Prado R de M, de Souza Júnior JP, Rossatto DR (2020) Silicon changes C: N: P stoichiometry of sugarcane and its consequences for photosynthesis, biomass partitioning and plant growth. *Sci Rep* 10: 12492
58. Hassan H, Alatawi A, Abdulmajeed A, Emam M, Khattab H (2021) Roles of Si and SiNPs in improving thermotolerance of wheat photosynthetic machinery via upregulation of PsbH, PsbB and PsbD genes encoding PSII core proteins. *Hortic* 7: 16
59. Wang Z, Yue le, Dhankher OP, Xing B (2020) Nano-enabled improvements of growth and nutritional quality in food plants driven by rhizosphere processes. *Environ Int* 142: 105831
60. Rico C, Majumdar S, Duarte-Gardea M, Peralta-Videa J, Gardea-Torresdey J (2011) Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. *J Agric Food Chem* 59: 3485–3498
61. Yuvakkumar R, Elango V, Venkatachalam R, Kannan N, Periasamy P (2011) Influence of nanosilica powder on the growth of maize crop (*Zea mays* L.). *Int J Green Nanotechnol* 3: 180–190
62. Alsaeedi AH, El-Ramady H, Alshaal T, El-Garawani M, Elhawat N, Almohsen M (2017) Engineered silica nanoparticles alleviate the detrimental effects of Na⁺ stress on germination and growth of common bean (*Phaseolus vulgaris*). *Environ Sci Pollut Res* 24: 21917–21928
63. Asgari F, Majd A, Jonoubi P, Najafi F (2018) Effects of silicon nanoparticles on molecular, chemical, structural and ultrastructural characteristics of oat (*Avena sativa* L.). *Plant Physiol Biochem* 127: 152–160
64. Sun D, Hussain HI, Yi Z, Siegle R, Cresswell T, Kong L, Cahill DM (2014) Uptake and cellular distribution, in four plant species, of fluorescently labeled mesoporous silica nanoparticles. *Plant Cell Rep* 33: 1389–1402
65. Mushinskiy AA, Aminova EV, Korotkova AM (2018) Evaluation of tolerance of tubers *Solanum tuberosum* to silica nanoparticles. *Environ Sci Pollut Res* 25: 34559–34569
66. Nazaralian S, Majd A, Irian S, Najafi F, Ghahremaninejad F, Landberg T, Greger M (2017) Comparison of silicon nanoparticles and silicate treatments in fenugreek. *Plant Physiol Biochem* 115: 25–33
67. Naidu S, Pandey J, Mishra LC, Chakraborty A, Roy A, Singh IK, Singh A (2023) Silicon nanoparticles: Synthesis, uptake and their role in mitigation of biotic stress. *Ecotoxicol Environ Saf* 255: 114783
68. Liu P, Yin L, Deng X, Wang S, Tanaka K, Zhang S (2014) Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L. *J Exp Bot* 65: 4747–4756
69. Esmaili S, Tavallali V, Amiri B (2021) Nano-silicon complexes enhance growth, yield, water relations and mineral composition in *Tanacetum parthenium* under water deficit stress. *Silicon* 13: 2493–2508
70. Qados A, Mofteh A (2015) Influence of silicon and nano-silicon on germination, growth and yield of faba bean (*Vicia faba* L.) under salt stress conditions. *Am J Exp Agric* 5: 509–524
71. Avestan S, Ghasemnezhad M, Eshfahani M, Byrt CS (2019) Application of nano-silicon dioxide improves salt stress tolerance in strawberry plants. *Agronomy* 9: 246
72. Mahmoud L, Shalan A, El-Boray M, Vincent C, MI E, Dutt M (2022) Application of silicon nanoparticles enhances oxidative stress tolerance in salt stressed “Valencia” sweet orange plants. *Sci Hortic* 295: 110856
73. De Sousa A, Saleh A, Habeeb T, Hassan Y, Zrieq R, Wadaan M, Hozzein W, Selim S, Matos M, Abdelgawad H (2019) Silicon dioxide nanoparticles ameliorate the phytotoxic hazards of aluminum in maize grown on acidic soil. *Sci Total Environ* 693: 133636
74. Zhao S, Kamran M, Rizwan M, Ali S, Yan L, Alwahibi M, Elshikh M, Riaz M (2023) Regulation of proline metabolism, AsA-GSH cycle, cadmium uptake and subcellular distribution in *Brassica napus* L. under the effect of nano-silicon. *Environ Pollut* 335: 122321
75. Tripathi D, Singh V, Prasad S, Chauhan D, Dubey N (2015) Silicon nanoparticles (SiNp) alleviate chromium (VI) phytotoxicity in *Pisum sativum* (L.) seedlings. *Plant Physiol Biochem* 96: 189–198
76. Malik M, Wani A, Rehman I, Tahir I, Mir S, Ahmad P, Rashid I (2021) Elucidating the Role of silicon in drought stress tolerance in plants. *Plant Physiol Biochem* 165: 187–195
77. Yin L, Shiwen W, Peng L, Wang W, Cao D, Deng X-P, Zhang S (2014) Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor* L. *Plant Physiol and Biochem* 80C: 268–277
78. Khattab H, Emam M, Emam M, Helal N, Mohamed M (2014) Effect of selenium and silicon on transcription factors NAC5 and DREB2A involved in drought-responsive gene expression in rice. *Biol Plant* 58: 265–273
79. Lenka S, Katiyar DrA, Chinnusamy V, Bansal K (2011) Comparative analysis of drought-responsive transcriptome in Indica rice genotypes with contrasting drought tolerance. *Plant Biotechnol J* 9: 315–327
80. Romero-Aranda M, Jurado O, Cuartero J (2006) Silicon alleviates the deleterious salt effect on tomato plant growth by improving plant water status. *J Plant Physiol* 163: 847–855
81. Ijaz U, Ahmed T, Rizwan M, Noman M, Shah AA, Azeem F, Alharby HF, Bamagoos AA, Alharbi BM, Ali S (2023) Rice straw based silicon nanoparticles improve morphological and nutrient profile of rice plants under salinity stress by triggering physiological and genetic repair mechanisms. *Plant Physiol Biochem* 201: 107788
82. Prychid C, Rüdall P, Gregory M (2003) Systematics and biology of silica bodies in monocotyledons. *Bot Rev* 69: 377–440
83. Liang Y, Nikolic M, Bélanger R, Gong H, Song A (2015) Silicon in agriculture: From theory to practice, Springer Dordrecht Heidelberg New York London
84. Sun D, Hussain H, Yi Z, Rookes J, Kong L, Cahill D (2018) Delivery of abscisic acid to plants using glutathione responsive mesoporous silica nanoparticles. *J Nanosci Nanotechnol* 18: 1615–1625
85. Riaz M, Zhao S, Kamran M, Rehman N, Mora-Poblete F, Maldonado C, Hamzah Saleem M, Parveen A, Al-Ghamdi A, Al-Hemaid F, Ali S, Elshikh M (2022) Effect of nano-silicon on the regulation of ascorbate-glutathione contents, antioxidant defense system and growth of copper stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Front Plant Sci* 13: 986991
86. Yang J-Y, Sun M-Q, Chen Z-L, Xiao Y-T, Wei H, Zhang J-Q, Huang L, Zou Q (2022) Effect of foliage applied chitosan-based silicon nanoparticles on arsenic uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.). *J Hazard Mater* 433: 128781
87. Li Y, Zhu N, Liang X, Bai X, Zheng L, Zhao J, Li Y, Zhang Z, Gao Y (2020) Silica nanoparticles alleviate mercury toxicity via immobilization and inactivation of Hg(II) in soybean (*Glycine max*). *Environ Sci Nano* 7: 1807–1817
88. Hussain B, Lin Q, Hamid Y, Sanaullah M, Di L, Khan MB, He Z, Yang X (2020) Foliage application of selenium and silicon nanoparticles alleviates Cd and Pb toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Sci Total Environ* 712: 136497
89. Massey F, Ennos R, Hartley S (2007) Grasses and the resource availability hypothesis: The importance of silica-based defences. *J Ecol* 95: 414–424
90. Massey FP, Hartley SE (2006) Experimental demonstration of the anti-herbivore effects of silica in grasses: impacts on foliage digestibility and vole growth rates. *Proc Roy Soc B Biol Sci* 273: 2299–2304
91. Hu S, Wang C, Sanchez DL, Lipka AE, Liu P, Yin Y, Blanco M, Lübberstedt T (2017) Gibberellins promote brassinosteroids action and both increase heterosis for plant height in maize (*Zea mays* L.). *Front Plant Sci* 8: 1039
92. Liu J, Zhu J, Zhang P, Han L, Reynolds O, Zeng R, Wu J, Shao Y, You M, Gurr G (2017) Silicon supplementation alters the composition of herbivore induced plant volatiles and enhances attraction of parasitoids to infested rice plants. *Front Plant Sci* 8: 1265

93. Fortunato AA, da Silva WL, Rodrigues FÁ (2014) Phenylpropanoid pathway is potentiated by silicon in the roots of banana plants during the infection process of *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*. *Phytopathology* 104: 597–603
94. Van Bockhaven J, De Vleeschauwer D, Höfte M (2013) Towards establishing broad-spectrum disease resistance in plants: Silicon leads the way. *J Exp Bot* 64: 1281–1293
95. Gulzar N, Ali S, Shah MA, Kamili AN (2021) Silicon supplementation improves early blight resistance in *Lycopersicon esculentum* Mill. by modulating the expression of defense-related genes and antioxidant enzymes. *3 Biotech* 11: 1–13
96. Thoma I, Loeffler C, Sinha A, Gupta M, Krischke M, Steffan B, Roitsch T, Mueller M (2003) Cyclopentenone isoprostanes induced by reactive oxygen species trigger defense gene activation and phytoalexin accumulation in plants. *Plant J* 34: 363–375
97. Fauteux F, Chain F, Belzile F, Menzies JG, Bélanger RR (2006) The protective role of silicon in the Arabidopsis–powdery mildew pathosystem. *Proc Natl Acad Sci* 103: 17554–17559
98. Ghareeb H, Bozsó Z, Ott PG, Repenning C, Stahl F, Wydra K (2011) Transcriptome of silicon-induced resistance against *Ralstonia solanacearum* in the silicon non-accumulator tomato implicates priming effect. *Physiol Mol Plant Pathol* 75: 83–89
99. Jayawardana HARK, Weerahewa HLD, Saparamadu MDJS (2015) Enhanced resistance to anthracnose disease in chili pepper (*Capsicum annuum* L.) by amendment of the nutrient solution with silicon. *J Horticult Sci Biotechnol* 90: 557–562
100. Correa RSB, Moraes JC, Auad AM, Carvalho GA (2005) Silicon and acibenzolar-S-methyl as resistance inducers in cucumber, against the whitefly *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Hemiptera: Aleyrodidae) biotype B. *Neotrop Entomol* 34: 429–433
101. Malhotra C, Kapoor R, Ganjewala D (2016) Alleviation of abiotic and biotic stresses in plants by silicon supplementation. *Sci Agric* 13: 59–73
102. Jadhao K, Rout G (2020) Silicon (Si) enhances the resistance in finger millet genotypes against blast disease. *J Plant Pathol* 102: 985–1006
103. Kaur S, Bhardwaj R, Kaur J, Kaur S (2021) Induction of defense-related enzymes and pathogenesis-related proteins imparts resistance to barley genotypes against spot blotch disease. *J Plant Growth Regul* 41: 682–696
104. Wang L, Ning C, Pan T, Cai K (2022) Role of silica nanoparticles in abiotic and biotic stress tolerance in plants: A review. *Int J Mol Sci* 23: 1947
105. Bilal M, Xu C, Cao L, Zhao P, Cao C, Li F, Huang Q (2020) Indoxacarb-loaded fluorescent mesoporous silica nanoparticles for effective control of *Plutella xylostella* L. with decreased detoxification enzymes activities. *Pest Manag Sci* 76: 3749–3758
106. Zhao P, Cao L, Ma D, Zhou Z, Qi H, Pan C (2018) Translocation, distribution and degradation of prochloraz-loaded mesoporous silica nanoparticles in cucumber plant. *Nanoscale* 10: 1798–1806
107. Korrani Z, Wan Ibrahim WA, Rashidi Nodeh H, Aboul-Enein H, Sanagi MM (2016) Simultaneous preconcentration of polar and non-polar organophosphorus pesticides from water samples by using a new sorbent based on mesoporous silica. *J Sep Sci* 39: 1144–51
108. Amani MA, Latifi AM, Tahvildari K, Karimian R (2018) Removal of diazinon pesticide from aqueous solutions using MCM-41 type materials: isotherms, kinetics and thermodynamics. *Int J Environ Sci Technol* 15: 1301–1312
109. Yang Y, Xu Y, Yang Y, Yang H, Yuan H, Huang Y, Liu X (2016) Lacase immobilized on mesoporous SiO₂ and its use for degradation of chlorophenol pesticides. *Russ J Phys Chem A* 90: 2044–2054
110. Liman R, Acikbas Y, Cigerci İ, Ali MM, Demirel Kars M (2020) Cytotoxic and genotoxic assessment of silicon dioxide nanoparticles by allium and comet tests. *Bull Environ Contam Toxicol* 104: 215–221.
111. Slomberg D, Schoenfisch M (2012) Silica nanoparticle phytotoxicity to *Arabidopsis thaliana*. *Environ Sci Technol* 46: 10247–10254
112. Dong X, Wu Z, Li X, Xiao L, Yang M, Li Y, Duan J, Sun Z (2020) The size-dependent cytotoxicity of amorphous silica nanoparticles: A systematic review of in vitro studies. *Int J Nanomedicine* 15: 9089–9113
113. Da Silva GH, Monteiro RTR (2017) Toxicity assessment of silica nanoparticles on *Allium cepa*. *Ecotoxicol and Environ Contam* 12: 25–31
114. Lee CW, Mahendra S, Zodrow K, Li D, Braam J, Alvarez P (2010) Developmental phytotoxicity of metal oxide nanoparticles to *Arabidopsis thaliana*. *Environ Toxicol Chem* 29: 669–675
115. Trela-Makowej A, Orzechowska A, Szymańska R (2024) Less is more: The hormetic effect of titanium dioxide nanoparticles on plants. *Sci Total Environ* 910: 168669

Silica nanoparticles in sustainable agriculture

Renata Szymańska✉, Aleksandra Orzechowska, Agnieszka Trela-Makowej

Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Krakow

✉corresponding author: renata.szymanska@fis.agh.edu.pl

Keywords: agriculture, abiotic stress, biotic stress, fertilizers, silicon, nanoparticles, nanotechnology

ABSTRACT

The increasing population, shrinking arable land, and climate change prompt the search for new solutions in agriculture. In a sustainable approach, agriculture should be based on improving the quality and quantity of yields while maintaining biodiversity and protecting the natural environment. Nanotechnology, present in many areas of our lives, offers opportunities to support the development of sustainable agriculture on many levels. Among the numerous solutions and nanomaterials, silicon, which is a natural component of the ecosystem, deserves special attention. In its nanoparticle form, it acquires new, unique properties. This article focuses on the significant role of silicon nanoparticles in organic farming, with particular emphasis on their function as nanofertilizers. The authors analyze the impact of silicon nanoparticles on plant growth and development and their potential in mitigating the negative effects of abiotic stress factors caused by drought, salinity, and exposure to metals. Additionally, the beneficial effects of silicon nanoparticles on plants growing under biotic stress conditions induced by microorganisms such as bacteria and fungi are presented. The paper includes a review of original research results conducted in recent years in this area, as well as possible mechanisms and strategies of silicon nanoparticle action at the physiological, cellular, and molecular levels. The issue of the safety of using nanoparticles in agriculture and the prospects for their further use as a factor enhancing the resistance and productivity of crops are also discussed.

