

Effect of nanoparticles on increasing the tolerance of plants to water deficit stress caused by soil drought

Wpływ nanocząstek na zwiększenie tolerancji roślin na stres deficytu wody wywołany suszą glebową



DOI: 10.15199/62.2025.8.6

A review, with 39 refs., of research on the interaction of nanoparticles with plants exposed to water stress was presented. Examples of how nanoparticles can enhance plant tolerance to water stress by affecting plant defense mechanisms were presented. The potentially negative environmental consequences of nanoparticle use were also described, emphasizing the need for research to eliminate their harmful effects on plants, the environment, and human health.

Keywords: nanoparticles, abiotic stress, water deficit, oxidative stress

Deficyt wody wywołany suszą glebową jest jednym z głównych stresów abiotycznych, który stanowi poważny problem w rolnictwie. Do obiecujących rozwiązań, które miałyby wspomóc rośliny w radzeniu sobie w warunkach niedoboru wody jest zastosowanie nanocząstek (NPs). Przeprowadzono przegląd wyników badań interakcji NPs z roślinami narażonymi na deficyt wody. Przedstawiono przykłady, jak NPs, wpływając na mechanizmy obronne roślin, mogą zwiększyć tolerancję roślin na stres deficytu wody. Omówiono również potencjalne negatywne konsekwencje środowiskowe stosowania NPs, podkreślając tym samym potrzebę prowadzenia badań w celu wyeliminowania ich szkodliwego wpływu na rośliny, środowisko oraz zdrowie człowieka.

Słowa kluczowe: nanocząstki, stres abiotyczny, deficyt wody, stres oksydacyjny

Rośliny w warunkach naturalnych narażone są na działanie wielu czynników stresowych biotycznych i abiotycznych¹⁾. Czynniki abiotyczne to: promieniowanie (nadmiar, niedobór UV), temperatura (zbyt wysoka, chłód, mróz), woda (suche powietrze, susza glebową, zatopienie), gazy (niedobór O₂, gazy wulkaniczne), składniki mineralne (nadmiar, niedobór, zasolenie, zachwianie równowagi, toksyny i metale ciężkie, zakwaszenie, alkalizacja) oraz czynniki mechaniczne (wiatr, pokrywa śnieżna, pokrywa lodowa, zasypanie)²⁾. Deficyt wody wywołany suszą glebową jest jednym z głównych stresów abiotycznych, wpływającym na wzrost i rozwój roślin³⁾, i stanowi poważny problem w rolnictwie oraz gospodarce, ograniczając zyski z upraw na całym świecie¹⁾. U roślin nara-

żonych na deficyt wody dochodzi do wielu zmian związanych z fizjologią, morfologią i metabolizmem. Na przykład u roślin rosnących w warunkach deficytu wody odnotowano m.in.: spowolnienie procesu fotosyntezy^{4, 5)}, zmniejszenie zawartości chlorofilu, zwiększenie przepuszczalności błon komórkowych, zwiększenie produkcji reaktywnych form tlenu (RFT)⁵⁾ i zakłócenie pobierania składników odżywczych i wody (rys. 1). Zmiany, które zachodzą w roślinie zależą od intensywności, czasu trwania deficytu wody⁶⁾ oraz od wykształconych przez rośliny mechanizmów obronnych, które ułatwiają im radzenie sobie ze stresem. Przy czym reakcja rośliny zależy od jej odporności, co jest cechą gatunkową, a nawet odmianową²⁾.



Dr Beata WIELKOPOLAN (ORCID: 0000-0001-5734-9148) w roku 2010 ukończyła studia na Wydziale Biologii Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. W 2023 r. uzyskała stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk rolniczych w dyscyplinie rolnictwo i ogrodnictwo. Od 2010 r. pracuje w Zakładzie Monitorowania i Sygnalizacji Agrofagów w Instytucie Ochrony Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym w Poznaniu. Specjalność – monitoring szkodników rzepaku, badanie wpływu nanocząstek na odporność roślin narażonych na stres suszy oraz badanie trójczynnika interakcji pomiędzy owadem (skrzyżonką), rośliną (pszenica) i bakteriami związanymi z owadem.



Mgr inż. Sandra MAŁAS (ORCID: 0009-0000-7580-2591) w roku 2013 ukończyła studia na Wydziale Zootechniki Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Od 2022 r. jest pracownikiem Zakładu Monitorowania i Sygnalizacji Agrofagów w Instytucie Ochrony Roślin – Państwowym Instytucie Badawczym w Poznaniu. Specjalność – modernizacja i dostosowywanie metod monitoringu wykorzystywanego zarówno do krótkoterminowego, jak i długoterminowego prognozowania występowania agrofagów.

* Adres do korespondencji:

Zakład Monitorowania i Sygnalizacji Agrofagów, Instytut Ochrony Roślin – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Władysława Węgorka 20, 60-318 Poznań, tel: (61) 864-90-70, e-mail: b.wielkopolan@iorpib.poznan.pl

Poszukuje się nowych strategii, które miałyby wspomóc rośliny w radzeniu sobie w warunkach deficytu wody. Do obiecujących rozwiązań należą nanocząstki (NPs). Zainteresowanie zastosowaniem NPs w rolnictwie wynika z ich potencjału do poprawy wydajności i jakości upraw poprzez ich interakcję z roślinami na poziomie molekularnym⁷⁾. Rośliny potraktowane NPs często wykazują zwiększoną tolerancję na stres abiotyczny/biotyczny. Efektywność działania i ostateczny wpływ NPs na rośliny, środowisko i inne organizmy zależą od wielu czynników (rys. 2). Sposób⁸⁾ i czas aplikacji NPs na uprawy⁵⁾, warunki środowiskowe (pH, temperatura, obecność innych jonów i materii organicznej)³⁾ oraz wielkość i stężenie NPs są podstawowymi czynnikami wpływającymi na ich absorpcję przez roślinę⁹⁾. Również morfologia liści, obecność trichomów (gęstość i ich morfologia) oraz wosków (ilość oraz skład chemiczny) mogą mieć znaczenie dla wychwytywania NPs przez powierzchnię liści i ich stabilność wiązania¹⁰⁾. Ponadto efektywność działania NPs zależy od gatunku rośliny, oddziaływania NPs, ich stabilności, interakcji z mikroorganizmami glebowymi¹¹⁾ oraz od obecności substancji chemicznych w pestycydach⁵⁾ (rys. 2).

Celem pracy był przegląd wyników badań dotyczących interakcji NPs z roślinami narażonymi na deficyt wody.

Wybrane metody aplikacji NPs

Nanocząstki mogą zostać wprowadzone do rośliny z wykorzystaniem różnych metod aplikacji (moczenie

nasion w zawiesinie z dodatkiem NPs, opryski dolistne, aplikacja doglebowa, uprawa w systemach hydroponicznych), na różnych etapach jej rozwoju, począwszy od nasion, poprzez sadzonki, po dojrzałe rośliny. Każda z metod wprowadzania NPs do rośliny ma swoje zalety, ale również ograniczenia¹²⁾ (rys. 1).

Moczenie nasion w zawiesinie z dodatkiem NPs

Kielkowanie jest bardzo ważnym etapem rozwoju roślin, a spowolnienie tego procesu może mieć istotny wpływ na produktywność roślin. Podstawową metodą nanoszenia NPs na nasiona jest ich moczenie w zawiesinie z dodatkiem NPs albo ich kielkowanie w pożywce lub glebie nasyconej NPs¹³⁾ (rys. 1). Nanocząstki dzięki swoim unikatowym właściwościom oraz niewielkim rozmiarom łatwo przenikają przez łupinę nasienną i docierają do tkanek nasion. Sembada i Lenggono¹⁴⁾ wykazali, że NPs krzemionki mogą zmieniać strukturę okrywy nasiennej, umożliwiając łatwiejsze wchłanianie wody, co ma wpływ na szybkość kielkowania nasion. Ponadto NPs wpływają na tempo rozwoju roślin¹⁴⁾ i ich odporność na czynniki stresowe, mają wpływ na jakość i ilość uzyskanego plonu.

Aplikacja dolistna

NPs ze względu na swój mały rozmiar mogą wnikać do korzeni lub liści roślin bezpośrednio poprzez kanały jonowe i transportery lub za pośrednictwem różnych mechanizmów, takich jak dyfuzja i endocytoza^{7, 14)}.

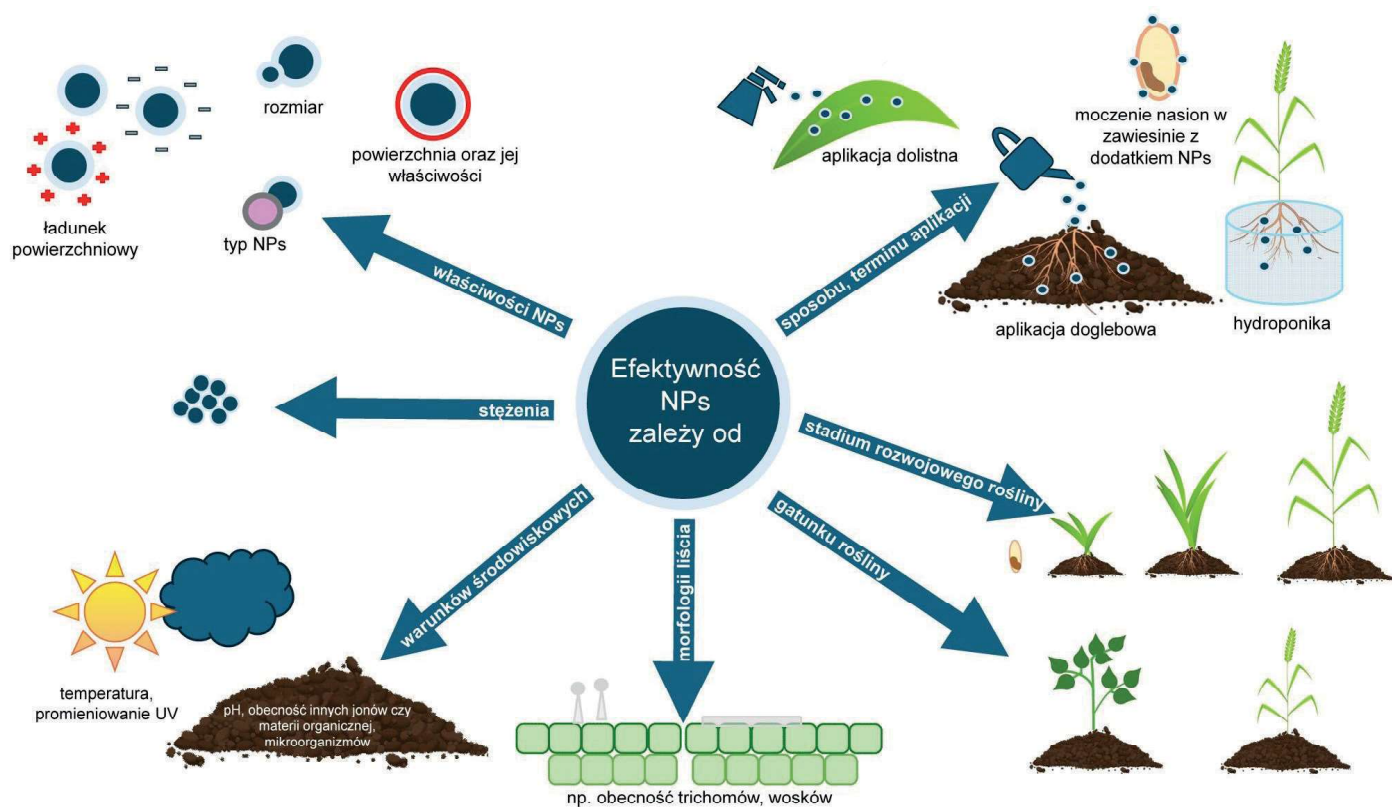
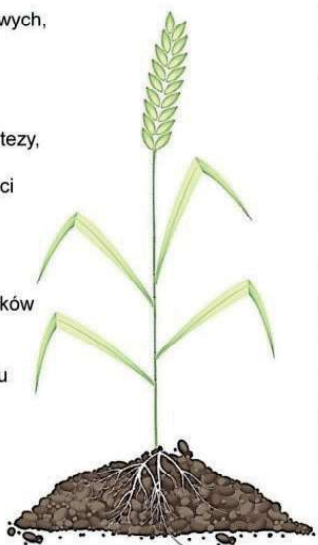


Fig. 1. Factors affecting nanoparticles (NPs) interaction with plants

Rys. 1. Czynniki wpływające na interakcję nanocząstek (NPs) z roślinami

Deficyt wody

- Ograniczenie transpiracji, zamykanie aparatów szparkowych,
- zredukowanie zawartości chlorofilu,
- spowolnienie procesu fotosyntezy,
- zwiększenie przepuszczalności błon komórkowych,
- stres oksydacyjny,
- zakłócenie pobierania składników odżywczych i wody,
- spowolnienie wzrostu, rozwoju roślin
- gorsze plonowanie roślin.



Deficyt wody + NPs

- Zwiększenie wydajności fotosyntezy,
- łagodzenie stresu oksydacyjnego,
- poprawa stabilności błon,
- poprawa gospodarki wodnej,
- lepsze pobieranie składników odżywczych,
- pozytywny wpływ na wzrost i rozwój roślin,
- lepsze plonowanie roślin.



Fig. 2. Examples of how nanoparticles (NPs) affecting various plant processes can reduce the effects of water deficit

Rys. 2. Przykłady, w jaki sposób nanocząstki (NPs) wpływając na różne procesy roślinne, mogą zredukować skutki związane z deficytem wody

Aplikacja dolistna (rys. 1) eliminuje interakcję NPs z substancjami (np. pestycydami) znajdującymi się w glebie, co mogłoby mieć wpływ na ich stabilność oraz dostępność dla roślin^{14, 15}). Stopień absorpcji NPs przez liście zależy m.in. od czynników środowiskowych (światło, temperatura, wilgotność), właściwości fizycznych i chemicznych NPs, gatunku rośliny, morfologii liścia, czyli rodzaju struktur powierzchniowych, warstwy wosku, które mogłyby stanowić barierę dla wchłaniania NPs¹⁶) (rys. 1).

Aplikacja doglebowa

NPs mogą dostać się do rośliny przez system korzeniowy wraz z pobieraną wodą i składnikami odżywczymi, przy czym ich absorpcja przez roślinę i efektywność działania zależy przede wszystkim od ich wielkości, ładunku i gatunku rośliny¹⁴) (rys. 1). Aplikacja doglebowa może okazać się bardziej skuteczna niż dolistna, ponieważ NPs mogą być mniej podatne na warunki atmosferyczne i degradację¹⁴), ale z kolei mogą wpływać na mikroorganizmy glebowe (w tym bakterie, grzyby, nicienie)¹⁷). Bardzo istotna dla zrównoważonych praktyk rolniczych jest trwałość NPs i ich potencjalne wypłukiwanie do źródeł wody.

Wpływ nanocząstek na zwiększenie tolerancji roślin na deficyt wody wywołany suszą glebową

Jakość oraz ilość uzyskanego plonu uwarunkowana jest wieloma czynnikami, a wśród najważniejszych należy wyróżnić czynnik abiotyczny, czyli stres związany z deficy-

tem wody wywołany suszą glebową. Poniżej przedstawiono przykłady, w jaki sposób NPs wpływając na różne procesy roślinne, mogą zredukować skutki związane z deficytem wody, co przekłada się na zdrowotność, kondycję roślin oraz jakość i ilość uzyskanego plonu (rys. 2, tabela).

Łagodzenie stresu oksydacyjnego, poprawa stabilności błon komórkowych

Reaktywne formy tlenu (RFT) biorą udział w różnych procesach fizjologicznych roślin, ponieważ stanowią ważny składnik przekazu sygnału. Jednak w warunkach, gdy roślina jest narażona na stres i dochodzi do zachwiania równowagi pomiędzy produkcją a eliminacją RFT (która jest niezbędna do utrzymania homeostazy komórkowej), dochodzi do powstania uszkodzeń w komórkach (degradacja białek, lipidów, węglowodanów, śmierć komórek), czyli stresu oksydacyjnego. Komórki chronią się przed nim poprzez wzrost ekspresji genów kodujących enzymy antyoksydacyjne, takie jak dysmutaza nadrośnikowa (SOD), katalaza (CAT), peroksydaza askorbinianowa (APX), peroksydaza gwaszajolowa (GPX), reduktaza glutationowa (GR), reduktaza monodehydroaskorbinianowa (MDHAR) i reduktaza dehydroaskorbinianowa (DHAR) oraz nieenzymatyczne przeciwutleniacze, takie jak kwas askorbinowy (AA), glutation zredukowany (GSH), α - tokoferol, karotenoidy, flawonoidy i prolina, które chronią komórki przed szkodliwym działaniem RFT¹⁸).

NPs mają doskonały potencjał do poprawy aktywności przeciwutleniającej u roślin narażonych na deficyt wody. Na przykład Faraji i Sepehri¹⁹) odnotowali u siewek

pszenicy narażonych na stres suszy i potraktowanych ditlenkiem tytanu (TiO_2 , aplikacja doglebowa) wzrost aktywności enzymów antyoksydacyjnych, czyli CAT oraz APX. Ponadto u tych roślin wykazano większą względną zawartość wody (RWC), proliny, chlorofilu, karotenoidów, zawartość suchej masy roślin, większe przewodnictwo szparkowe i transpirację. Efekt działania NPs zależał od ich stężenia oraz nasilenia stresu suszy (tabela). Z kolei Sun i współpr.²⁰⁾ wykazali, że rośliny kukurydzy potraktowane tlenkiem cynku (ZnO , aplikacja doglebowa) przejawiały zwiększoną tolerancję na stres suszy. U tych roślin odnotowano mniejsze uszkodzenia mitochondriów, chloroplastów oraz wzrost względnej liczebności transkryptów Fe/Mn SOD, Cu/Zn SOD, APX, CAT, dekarboksylazy tryptofanu (TDC), *N*-acetylotransferazy serotoninowej (SNAT), *O*-metylotransferazy kwasu kawowego (COMT) oraz *O*-metylotransferazy *N*-acetyloserotoniny (ASMT) w porównaniu z roślinami niepotraktowanymi ZnO . Ponadto u roślin kukurydzy narażonych na stres suszy i potraktowanych ZnO odnotowano większą zawartość proliny, tryptofanu, tryptaminy, serotonininy, melatoniny oraz mniejsze stężenie nadtlenu wodoru (H_2O_2) (tabela). El-Zohri i współpr.²¹⁾ wykazali, że nanocząstki ZnO (aplikacja dolistna) łagodzą stres oksydacyjny u roślin pomidorów narażonych na stres suszy. Dla roślin potraktowanych ZnO odnotowano zmniejszoną ilość dialdehydu malonowego (MDA) oraz H_2O_2 , większe stężenie AA, wolnych fenoli oraz większą aktywność SOD, CAT, APX (tabela). Aplikacja doglebowa/dolistna tlenkiem krzemu (SiO) zwiększyła tolerancję grochu na suszę poprzez wzrost aktywności enzymów przeciwutleniających (CAT, APX, GR, SOD), redukcję H_2O_2 i peroksydacji lipidów w tkance roślinnej. Dla roślin potraktowanych SiO odnotowano również większą zawartość związków fenolowych, wzrost aktywności nieenzymatycznych przeciwutleniaczy (2,2-difenylo-1-pikrylohydrazyl (DPPH) i kwas 2,2'-azy-no-bis(3-etylo-6-benzotiazolinowy) (ABTS)), wzrost RWC oraz powierzchni liści²²⁾. Z kolei Ali i współpr.²³⁾ dowiedli, że potraktowanie barwinka różowego (*Catharanthus roseus*) nanocząstkami chitozanu wpłynęło pozytywnie na wzrost roślin poddanych stresowi suszy. U tych roślin odnotowano wzrost akumulacji proliny, aktywności CAT i APX oraz mniejsze stężenie H_2O_2 i MDA, co wpłynęło na zachowanie integralności błony (tabela).

Poprawa gospodarki wodnej roślin

Nanotechnologia oferuje innowacyjne podejścia do poprawy efektywności wykorzystania wody i tolerancji roślin wobec stresu suszy. Nanocząstki mogą zmienić właściwości fizyczne gleby, zwiększając jej zdolność do zatrzymywania wody³⁾, mogą również wzmocnić tolerancję roślin na stres suszy poprzez regulację otwierania i zamykania aparatów szparkowych, optymalizując w ten sposób zużycie wody³⁾. Rośliny gromadzą różne osmoprotektanty (np. prolinę) w celu zwiększenia ich tolerancji na stres

suszy. Prolina może łagodzić skutki związane ze stresem suszy poprzez poprawę stabilności błon, wzrost zawartości chlorofilu, obniżenie stresu oksydacyjnego, polepszenie retencji azotu (N), potasu (K) i fosforu (P)³⁰⁾. Faraji i Sepehri¹⁹⁾ udokumentowali, że połączenie nanocząstek TiO_2 z donorem tlenu azotu powodowało zwiększenie zawartości proliny w liściach pszenicy, w rezultacie czego doszło do zmniejszenia stresu osmotycznego, wzrostu ciśnienia osmotycznego w komórkach roślinnych, zwiększenia poboru wody oraz poprawy RWC w liściach (tabela). Z kolei Mohammadi i współpr.²⁴⁾ wykazali, że w warunkach suszy rośliny pszczelnika mołdawskiego (*Dracocephalum moldavica* L.) potraktowane TiO_2 (w stężeniu 10 ppm) zawierały więcej proliny, za to mniej H_2O_2 i MDA. Ponadto przy roślinach potraktowanych TiO_2 odnotowano wyższą wartość suchej masy pędów i korzeni, RWC w liściach, liczbę liści i rozgałęzień łodygi w porównaniu z roślinami niepotraktowanymi NPs (tabela).

Poprawa pobierania składników odżywczych

Deficyt wody znacząco zaburza homeostazę składników odżywczych i indukuje ich niedobór, co niekorzystnie wpływa na wzrost³¹⁾ oraz wartość odżywczą roślin²⁶⁾. Nanocząstki odgrywają ważną rolę w utrzymaniu homeostazy składników odżywczych i znacznie poprawiają ich pobieranie, translokację i alokację do różnych części roślin^{5, 32)} (rys. 2). Nanocząstki mogą być wykorzystane do transportu mikroelementów (np. żelaza (Fe), cynku (Zn)) do komórek roślinnych¹⁴⁾. Dimkpa i współpr.²⁶⁾ zauważyli, że potraktowanie roślin sorgo ZnO (aplikacja doglebowa) znacznie poprawiło pobieranie i translokację N, K, Zn w roślinach, co wpłynęło na złagodzenie stresu związanego z suszą (tabela). Z kolei Jaberzadeh i współpr.²⁵⁾ udowodnili, że dolistna aplikacja TiO_2 miała pozytywny wpływ na rozwój roślin, czyli ich wysokość, plon, biomasę, zawartość glutenu i skrobi (tabela).

Pozytywny wpływ na wydajność fotosyntezy

Deficyt wody ma niekorzystny wpływ na wydajność fotosyntezy z uwagi na zmniejszenie syntezy chlorofilu, wydajności fotosystemu II (PSII) i szybkości przepływu elektronów^{5, 33)}. Podstawową reakcją roślin na stres związany z deficytem wody jest zamknięcie aparatów szparkowych, co wpływa na dyfuzję CO_2 , fotosyntezę i wzrost roślin⁵⁾. Aplikacja Na_2SiO_3 zwiększyła tolerancję roślin kukurydzy na suszę poprzez zwiększenie wydajności fotosyntezy, przewodnictwa szparkowego, integralności błony komórkowej, co miało korzystny wpływ na wzrost roślin, ich produktywność oraz wydajność zużycia wody²⁷⁾ (tabela). Zabieg dolistny nanocząstkami tlenu ceru (CeO_2) zwiększył wskaźnik chlorofilu, wydajność PSII, przewodnictwo szparkowe, wskaźnik asymilacji węgla, skutecznie zmniejszył poziom H_2O_2 , peroksydację lipidów błon komórkowych roślin sorgo w warunkach suszy²⁸⁾ (tabela). Z kolei traktowanie roślin kukurydzy nanocząstkami miedzi

Table. Examples of the effect of nanoparticles (NPs) on increasing plant tolerance to water deficit caused by soil drought

Tabela. Przykłady wpływu nanocząstek (NPs) na zwiększenie tolerancji roślin na deficyt wody wywołany suszą glebową

Nanocząstki	Aplikacja	Uprawa	Efekt działania NPs
TiO ₂	doglebowa	pszenica	wzrost: suchej masy siewek pszenicy; względnej zawartości wody; aktywności CAT, APX; zawartości proliny, chlorofilu, karotenoidów; przewodnictwa szparkowego; transpiracji ¹⁹⁾
	dolistna	pszczelnik moldawski (<i>Dracocephalum moldavica</i> L.)	wzrost: zawartości proliny; suchej masy pędów i korzeni; względnej zawartości wody w liściach; liczby liści; rozgałęzień łodygi spadek poziomu: MDA; H ₂ O ₂ ²⁴⁾
	dolistna	pszenica	pozytywny wpływ na rozwój roślin (np. wysokość, plon, biomasa), większa zawartość glutenu i skrobi ²⁵⁾
ZnO	doglebowa	kukurydza	wzrost: względnej liczebności transkryptów Fe/Mn SOD, Cu/Zn SOD, APX, CAT, TDC, SNAT, COMT, ASMT; zawartości proliny, tryptofanu, tryptaminy, serotoniny, melatoniny w liściach spadek poziomu H ₂ O ₂ ²⁰⁾
	dolistna	pomidor	wzrost: stężenia AA; wolnych fenoli; aktywności SOD, CAT, APX spadek poziomu: MDA; H ₂ O ₂ ²¹⁾
	doglebowa	sorgo	pozytywny wpływ na pobieranie i translokację N, K, Zn ²⁶⁾
SiO	doglebowa/ dolistna	groch	wzrost: aktywności CAT, APX, SOD, GR, aktywności nieenzymatycznych przeciwutleniaczy; zawartości związków fenolowych; względnej zawartości wody; powierzchni liści spadek: poziomu H ₂ O ₂ ; peroksydacji lipidów błon komórkowych ²²⁾
Na ₂ SiO ₃	dolistna	kukurydza	wzrost: wydajności fotosyntezy; przewodnictwa szparkowego; integralności błony komórkowej ²⁷⁾
Nanocząstki chitozanu	dolistna	barwinek różowy (<i>Catharanthus roseus</i>)	wzrost: wysokości roślin; aktywności CAT, APX; zawartości alkaloidów spadek poziomu: MDA; H ₂ O ₂ ²³⁾
CeO ₂	dolistna	sorgo	wzrost: wskaźnika chlorofilu; wydajności PSII; przewodnictwa szparkowego; wskaźnika asymilacji węgla spadek: poziomu H ₂ O ₂ ; peroksydacji lipidów błon komórkowych ²⁸⁾
Cu ⁰	doglebowa	kukurydza	wzrost: zawartości antocyjanów, chlorofilu, karotenoidów, liczby nasion, plonu ²⁹⁾

CAT – katalaza, APX – peroksydaza askorbinianowa, MDA – dialdehyd malonowy, H₂O₂ – nadtlenek wodoru, SOD – dysmutaza ponadtlenkowa, GR – reduktaza glutationowa, TDC – dekarboksylaza tryptofanu, SNAT – *N*-acetylotransferaza serotoninowa, COMT – *O*-metylotransferaza kwasu kawowego, ASMT – *O*-metylotransferaza *N*-acetyloserotoniny, N – azot, K – potas, Zn – cynk, PSII – fotosystem II

(Cu⁰) w warunkach suszy powodowało wzrost zawartości antocyjanów, chlorofilu i karotenoidów w porównaniu z roślinami stanowiącymi kontrolę (narażone na stres suszy bez traktowania NPs)²⁹⁾ (tabela). Karotenoid działa jako przeciwutleniacz, chroniąc chlorofil przed uszkodzeniami oksydacyjnymi w warunkach stresowych³⁴⁾.

Potencjalne negatywne konsekwencje stosowania nanocząstek

Badania nad bezpiecznym i zrównoważonym zastosowaniem nanotechnologii w rolnictwie pozostają kluczowe. Należy zwrócić uwagę nie tylko na skuteczność NPs w poprawie kondycji i produktywności roślin, ale również na minimalizację ich potencjalnego wpływu na środowisko. Bardzo ważna jest optymalizacja metody stosowania NPs, ponieważ można uzyskać odwrotny efekt do zamierzonego. Na przykład stosowanie NPs, szczególnie przy większych stężeniach, może być toksyczne dla roślin i może powodować m.in. zahamowanie wzrostu rośliny, zmiany w jej fizjologii i metabolizmie^{3, 35)}, zahamowanie kiełkowania nasion i procesu fotosyntezy^{7, 36)}, zakłócenie pobierania i dystrybucji składników odżywczych oraz wody¹⁴⁾, nasilenie stresu oksydacyjnego poprzez generowanie RFT³⁷⁾ i uszkodzenie DNA⁷⁾. Dostępność oraz toksyczność nanoczątek jest silnie

uzależniona od warunków glebowych. Na przykład, gdy pH gleby jest niższe niż 5, Al³⁺ wnika do komórek wierzchołka korzenia, prowadząc do zahamowania wzrostu korzenia, zmniejszenia pobierania wody i składników odżywczych³⁸⁾. Nanocząstki mogą również oddziaływać na mikroorganizmy znajdujące się w glebie oraz środowisku wodnym^{7, 39)}. Wpływ NPs na mikroorganizmy może mieć znaczenie dla utrzymania żyzności gleby i zdrowego ekosystemu⁷⁾. Wykazano, że NPs mogą gromadzić się w różnych tkankach roślinnych, co ma wpływ na bezpieczeństwo żywności i środowisko. Stopień akumulacji NPs zależy od czasu trwania ekspozycji i procesów metabolicznych gatunków roślin³⁾.

Podsumowanie

Należy poszukiwać alternatywnych, nowoczesnych, przyjaznych dla środowiska strategii zarządzania uprawami, które umożliwią utrzymanie produkcji roślinnej na zadowalającym poziomie w warunkach deficytu wody. Jedną z nowych metod, która ma potencjał do ograniczania skutków związanych z deficytem wody, może być zastosowanie NPs. Choć nanotechnologia oferuje duże możliwości do stosowania NPs w poprawie tolerancji roślin na deficyt wody, to istnieje nadal wiele niewiadomych, które wymagają przeprowadzenia badań. Przede wszystkim

należy określić, ile NPs jest absorbowanych przez roślinę, jak ich właściwości fizykochemiczne wpływają na ich zdolność penetracji do rośliny oraz translokacji wewnątrz niej. Kluczowe znaczenie ma również zrozumienie ich potencjalnego wpływu na środowisko i zdrowie człowieka. Opracowanie biodegradowalnych NPs, rozpadających się na nietoksyczne składniki, może zapobiec ich długotrwałemu utrzymywaniu się w środowisku i tym samym znacznie zmniejszy ich wpływ na środowisko.

Temat naukowo-badawczy pt. „Wykorzystanie nanocząstek żelaza oraz miedzi dla poprawy zdrowotności roślin rzepaku ozimego narażonych na stres związany z deficytem wody oraz żerowaniem mszyc” realizowany w ramach subwencji Ministerstwa Nauki (2024–2025).

Otrzymano: 11-07-2025

Zrecenzowano: 20-07-2025

Zaakceptowano: 24-07-2025

Opublikowano: 11-08-2025

LITERATURA

- [1] M.T. El-Saadony, A.M. Saad, S.M. Solima, H.M. Salem, E.S.M. Desoky, A.O. Babalghith, A.M. El-Tahan, O.M. Ibrahim, A.A.M. Ebrahim, T.A.A. El-Mageed, A.S. Elrys, A.A. Elbadawi, K.A. El-Tarabily, A.F. AbuQamar, *Front. Plant Sci.* 2022, **13**, 1.
- [2] A. Sikorska, E. Pietrzak, M. Gugala, *Herbalism* 2025, **1**, nr 11, 129.
- [3] S.G. Thabet, A.M. Alqudah, *Plant Soil* 2024, **503**, 313.
- [4] A. Rasheed, S. Fahad, M. Aamer, M.U. Hassan, M.M. Tahir, Z.M. Wu, *Appl. Ecol. Environ.* 2020, **18**, 4005.
- [5] A. Rasheed, H. Li, M.M. Tahir, A. Mahmood, M. Nawaz, A.N. Shah, M.T. Aslam, S. Negm, M. Moustafa, M.U. Hassan, Z. Wu, *Front. Plant Sci.* 2022, **13**, 1.
- [6] H.B. Shao, L.Y. Chu, C.A. Jaleel, C.X. Zhao, *Comptes Rendus Biol.* 2008, **331**, 215.
- [7] M. Bouhadi, Q. Javed, M. Jakubus, M. Elkouali, H. Fougrach, A. Ansar, S.G. Ban, D. Ban, D. Heath, M. Černe, *Agronomy* 2025, **15**, 1.
- [8] J. Lian, L. Zhao, J. Wu, H. Xiong, Y. Bao, A. Zeb, J. Tang, W. Liu, *Chemosphere* 2020, **239**, 124794.
- [9] W.N. Wang, J.C. Tarafdar, P. Biswas, *J. Nanoparticle Res.* 2013, **15**, 1417.
- [10] C. Larue, H. Castillo-Michelb, S. Sobanskac, L. Cécillona, S. Bureau, V. Barthèsd, L. Ouerdane, M. Carrière, G. Sarreta, *J. Hazard. Mater.* 2014, **264**, 98.
- [11] S. Ali, A. Mehmood, N. Khan, *J. Nanomater.* 2021, nr 1, 6677616.
- [12] M. Djanaguiraman, V. Anbazhagan, O.P. Dhankher, P.V.V. Prasad, *Plants* 2024, **13**, 1.
- [13] A.A. Sembada, I.W. Lengggoro, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2023, **1271**, nr 1, 012085.
- [14] A.A. Sembada, I.W. Lengggoro, *Nanomaterials* 2024, **14**, 1.
- [15] C. García-Gómez, R.A. Pérez, B. Alberto, A. Obradora, P. Almendros, *Agronomy* 2023, **13**, 2004.
- [16] J. Hong, C. Wang, D.C. Wagner, J.L. Gardea-Torresdey, F. He, C.M. Rico, *Environ. Sci. Nano* 2021, **8**, 1196.
- [17] B. Asadishad, S. Chahal, A. Akbari, V. Cianciarelli, M. Azodi, S. Ghoshal, N. Tufenkji, *Environ. Sci. Technol.* 2018, **52**, 1908.
- [18] K. Das, A. Roychoudhury, *Front. Environ. Sci.* 2014, **2**, 1.
- [19] J. Faraji, A. Sepehri, *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 2020, **20**, 703.
- [20] L. Sun, S. Fengbin, J. Guo, X. Zhu, S. Liu, F. Liu, X. Li, *Int. J. Mol. Sci.* 2020, **21**, 1.
- [21] M. El-Zohri, N.A. Al-Wadaani, S.O. Bafeel, *Plants* 2021, **10**, 2400.
- [22] R. Sutuliene, L. Rageliene, G. Samuoliene, A. Brazaityte, M. Urbutis, J. Miliauskien, *Horticulturae* 2022, **8**, 35.
- [23] E.F. Ali, A.M. El-Shehawi, O.H.M. Ibrahim, E.Y. Abdul-Hafeez, M.M. Mussa, F.A.S. Hassan, *Plant Physiol. Biochem.* 2021, **161**, 166.
- [24] H. Mohammadi, M. Esmailpour, A. Gheranpaye, *Acta Agric. Slov.* 2016, **107**, 385.
- [25] A. Jaberzadeh, P. Moaveni, H.R. Tohidi Moghadam, H. Zahedi, *Not. Bot. Horti Agrobot. Cluj-Napoca* 2013, **41**, 201.
- [26] C.O. Dimkpa, U. Singh, P.S. Bindrabab, W.H. Elmer, J.L. Gardea-Torresdey, J.C. White, *Sci. Total Environ.* 2019, **688**, 926.
- [27] T.A. Abd El-Mageed, A. Shaaban, S.A. Abd El-Mageed, W.M. Semida, M.O.A. Rady, *Silicon* 2021, **13**, 2165.
- [28] M. Djanaguiraman, R. Nair, J.P. Giraldo, P.V.V. Prasad, *ACS Omega* 2018, **3**, 14406.
- [29] D. Van Nguyen, H.M. Nguyen, N.T. Le, K.H. Nguyen, H.T. Nguyen, H.M. Le. *J. Plant Growth Regul.* 2022, **41**, 364.
- [30] P. Khan, A.M.M. Abdelbacki, M. Albaqami, R. Jan, K.M. Kim, *Biology (Basel)* 2025, **14**, 1.
- [31] M.U. Hassan, M. Aamer, M.U. Chattha, T. Haiying, B. Shahzad, L. Barbanti, M. Nawaz, A. Rasheed, A. Afzal, Y. Liu, H. Guoqin, *Agriculture* 2020, **10**, 1.
- [32] P.M. Kopittke, E. Lombi, P. Wang, J.K. Schjoerring, S. Husted, *Environ. Sci. Nano* 2019, **6**, 3513.
- [33] W.M. Semida, A. Abdelkhalik, G.F. Mohamed, T.A. Abd El-Mageed, S.A. Abd El-Mageed, M.M. Rady, E.F. Ali, *Plants* 2021, **10**, nr 2, 421.
- [34] J.D. Emiliani, L. Andrea, M. Lorena Falcone Ferreyra, E. Mauliñ, E. Rodriguez, M. Rodriguez-Concepción, P. Casati, *J. Exp. Bot.* 2018, **69**, nr 20, 4921.
- [35] M.K. Azameti, A.-W.M. Imoro, *Crop Des.* 2023, **2**, 100037.
- [36] M. Hartmann, J. Six, *Nat. Rev. Earth Environ.* 2023, **4**, 4.
- [37] A. Rastogi, M. Zivcak, O. Sytar, H.M. Kalaji, X. He, S. Mbarki, M. Brestic, *Front. Chem.* 2017, **5**, 1.
- [38] S.K. Panda, F. Baluska, H. Matsumoto, *Plant Signal. Behav.* 2009, **4**, 592.
- [39] W. Ren, H. Liu, Y. Teng, [w:] *The role of nanoparticles in plant nutrition under soil pollution* (red. V.D. Rajput, K.K. Verma, N. Sharma, T. Minkina), Springer, Cham 2022.



**Odkrywaj
publikuj
inspiruj**

czasopismo naukowo-techniczne science technical journal

CHEMIK

nauka • technika • rynek science • technique • market

CZASOPISMO PEŁNE CHEMII

Chemia stosowana: badania stosowane, technika, technologia przemysłowa, kontrola procesów, zarządzanie: jakością, środowiskiem i bezpieczeństwem oraz zagadnienia organizacyjno-prawne.



nauka



technika



rynek

Decyzją Zarządu Głównego SITPChem, publikacja prac naukowych do końca 2024 r. jest dla autorów bezpłatna. Warunkiem przyjęcia pracy jest pozytywna ocena recenzentów (obowiązuje dwustopniowy proces recenzji).

CHEMIK Czasopismo Naukowo-Techniczne założone w 1948 roku. Wydawane od 2022 r. przez Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Przemysłu Chemicznego i Politechnikę Wrocławską