



UOT:

**DUZ STRESSİNƏ MƏRUZ QALMIŞ BUĞDA (TRITICUM AESTIVUM L.)
BİTKİSİNDƏ PROLIN TOPLANMASININ DİNAMİKASI**

Mədinə Həsən qızı Abışova

XÜLASƏ

Tədqiqatın məqsədi - Bu tədqiqatın əsas məqsədi, müxtəlif konsentrasiyalarda duz stressinə (NaCl) məruz qalan buğda (*Triticum aestivum* L.) bitkisiində stressə cavab reaksiyası olaraq sintez olunan prolin amin turşusunun toplanma dinamikasını öyrənmək və bu göstəricinin bitkinin duza davamlılıq dərəcəsi ilə əlaqəsini müəyyən etməkdir.

Tədqiqatın metodologiyası - Prolin miqdarının təyin edilməsi üçün Bates və b. (1971) tərəfindən təklif olunan, prolinin ninhidrin ilə reaksiyasına əsaslanan metoddan istifadə edilmişdir.

Tədqiqatın tətbiqi əhəmiyyəti - Bu tədqiqatın nəticələri şoran torpaqlarda buğda bitkisinin adaptasiya mexanizmlərini anlamağa imkan verir və seleksiya işlərində duza dözümlü genotiplərin sürətli skriningi üçün effektiv fizioloji-biokimyəvi test-sistem kimi tətbiq oluna bilər.

Tədqiqatın nəticələri - Hidrogenlə zəngin su və kükürd nanohissəcikləri ilə birlikdə tətbiq edildikdə, bitkinin duz stresinə qarşı biokimyəvi müdafiə qabiliyyəti maksimum səviyyəyə çatır. Bunun nəticəsində bitkinin osmotik tənzimləməsi güclənir.

Tədqiqatın elmi yeniliyi - Ənənəvi kükürdlü gübrələrin əvəzinə nanohissəciklərdən istifadə edilməsi və "ağıllı gübrə" sayılan hidrogenli suyun tətbiqi ilə duzlu torpaqlarda buğda məhsuldarlığının artırılması üçün yeni, ekoloji cəhətdən təmiz bir metodologiyanın təklif edilməsi.

Açar sözlər: nanohissəcik, hidrogen, ağıllı gübrə, prolin, DİM13

Giriş.

Dənli buğda (*Triticum aestivum*), dünya miqyasında əsasən insanların qidalanması üçün istehsal olunan mühüm təməl bitkilərdən biridir (Giraldo, 2019). Artan əhali sayı səbəbindən dünya ərzaq təminatında buğdadən yüksək dərəcədə asılıdır. Qlobal səviyyədə buğda gündəlik istehlak edilən karbohidratların təxminən 55%-ni, kalorilərin isə 20%-ni təmin edir (Kumar, 2011). Müxtəlif ekoloji amillər məhsuldarlığa təsir göstərir ki, bunlardan biri də şoranlıqdır. Şoranlıq, kənd təsərrüfatı bitkilərinə mənfi təsir göstərən kritik bir abiotik stress formasıdır (Gul, 2022; Alkharabsheh, 2021). İnsan fəaliyyəti və iqlim dəyişikliyi nəticəsində şoranlıq becərilən sahələrin təxminən beşdə birinə, buğda kimi strateji məhsulların yetişdirildiyi suvarılan kənd təsərrüfatı torpaqlarının isə üçdə birinə təsir edir; bu göstərici stabil olaraq artmaqdadır (Arora, 2019). Bununla belə, bu cür stress amilləri altında məhsuldarlığın artırılması istiqamətində tədqiqatlar davam edir.

Torpağın şoranlaşması dünyada bitkiçilik məhsuldarlığını məhdudlaşdıran ən mühüm abiotik stres faktorlarından biridir (Debez et al., 2006; Koyro, 2006). Arid və semiarid regionlarda suvarılan əkin sahələrinin təxminən 20%-i artıq şoranlaşmaya məruz qalmışdır və bu proses genişlənməkdə davam edir (Mühling & Läuchli, 2003). Duz stresi zamanı bitkilər həm xarici mühitin aşağı su potensialı ilə yaranan streslə, həm də bitki daxilində ionların toplanması nəticəsində yaranan ion toksikliyi ilə mübarizə aparmalı olurlar (Romero-Aranda et al., 2006).

Duzluluğa davamlılıq dərəcəsi yalnız müxtəlif cins və növlər arasında deyil, həm də eyni növün müxtəlif orqanları arasında fərqlənir (Flowers & Hajibagheri, 2001; Ismail, 2003). Eyni növə aid sortların duzluluğa reaksiyasının müqayisə edilməsi duza davamlılığın əsas mexanizmlərini aşkar etmək üçün əlverişli və faydalı bir vasitədir.

Duz stresi karbohidrat miqdarına müxtəlif cür təsir göstərir.

Əsas müəllif/Corresponding author: Mədinə Həsən qızı Abışova, ADAU, Ekologiya və meşəçilik kafedrasının baş müəllimi, e-mail: madina.abishova@adau.edu.az



Bəzi tədqiqatçılar şoranlıq şəraitində müxtəlif bitkilərdə karbohidratların toplandığını bildirmişlər (Abd El-Samad & Azooz, 2002; Parida, 2003; Azooz, 2004). Digər tərəfdən, Mostafa (2004) aşağı və orta duzluluq səviyyələrində şəkərlərin və nəticədə ümumi karbohidratların azaldığını müşahidə etmişdir. Həll olunan zülalların miqdarı isə bir qayda olaraq duzluluğa cavab olaraq azalır (Parida, 2002; Abed-Latef, 2005). Bununla yanaşı, bəzi qlikofit bitkilərdə yüksək duz qatılığının azot (N) və zülal miqdarının artmasına (Abed El-Baki, 1996; Jones & Mac Millan, 1987) və ya həll olunan zülalların artmasına (Shaddad, 2005) səbəb olduğu da bildirilmişdir. Ətraf mühit stresinə məruz qalan bitkilərdə bir çox azotlu birləşmələr toplanır (Robe, 1990; Kuznetsov, 2007). Ən çox toplanan birləşmələr sırasına amidlər (qlutamin və asparaqin), amin turşuları (arginin, prolin, sitrullin və ornitin) və amin putressin daxildir. Prolin, asparaqin və aminobutirik turşusu kimi amin turşuları şoranlıq şəraitində bitkilərin osmotik tənzimlənməsində mühüm rol oynaya bilər (Gilbert, 1998). Torpağın yüksək şoranlığı əsas kənd təsərrüfatı bitkilərinin yayılmasını və məhsuldarlığını məhdudlaşdıran mühüm ekoloji amillərdən biridir (Ashraf, 2005; Chandan, 2006). Dünyanın arid (quraq) və semiarid (yarımquraq) bölgələrində kənd təsərrüfatı məhsuldarlığı torpaqlarda duzların toplanması səbəbindən kifayət qədər aşağıdır (Ashraf, 2002; Munns, 2002). Şoran mühit bitki inkişafına bir çox mənfi təsirlər göstərir ki, bu da torpaq məhlulunun aşağı osmotik potensialı (osmotik stres), spesifik ion təsirləri (duz stresi), qida maddələrinin balanssızlığı və ya bu amillərin kombinasiyası ilə əlaqədardır (Marschner, 1995; Ashraf, 2004). Bütün bu amillər bitkinin boy artımı və inkişafına, eləcə də onun fizioloji və biokimyəvi fəaliyyətlərinə neqativ təsir göstərir (Ashraf & Sarwar, 2002; Munns & James, 2003). Duz stresinin törətdiyi mənfi təsirlər osmotik stres, ion stresi, qida maddələrinin disbalansı və reaktiv oksigen növlərinin (RON) yaranması ilə xarakterizə olunur; nəticədə bitkilərdə inkişafın zəifləməsi və fotosintez sürətinin azalması müşahidə edilir, hətta bu proses məhvolma nəticələinə bilər (Wu, 2014). Şoranlıq bitki metabolizmasının bir çox aspektlərinə, eləcə də hüceyrə genişlənməsi üçün zəruri olan turqoru təmin edən müxtəlif üzvi maddələrin toplanmasına təsir göstərir. Bunların arasında prolin və qlisin-betain kimi aşağı molekulyar çəkili maddələrin və uyğun osmolitlərin akkumulyasiyası osmoprotektant funksiyasını yerinə yetirir.

Şoranlıq, ən mühüm abiotik stres faktorlarından biri olmaqla, bitkilərin məhsuldarlığını və coğrafi yayılmasını məhdudlaşdırır. BMT-nin Ərzaq və Kənd Təsərrüfatı Təşkilatının (FAO, 2008) hesabatına əsasən, dünya torpaqlarının 6%-dən çoxu şoranlaşmaya məruz qalmışdır. Şoranlaşmış ərazilərin böyük hissəsi təbii səbəblərdən — yəni arid və semiarid zonalarda uzun müddət ərzində duzların toplanması nəticəsində, həmçinin suvarma kimi insan fəaliyyətləri nəticəsində yaranmışdır (Munns və Tester, 2008).

Şoranlaşmış torpaqların dəqiq sahəsi tam məlum olmasa da, mövcud miqyas kənd təsərrüfatı üçün təhlükə yaradacaq dərəcədə genişdir (Munn, 2002; Munn, 2006). Duz stresi həm osmotik, həm də ion stresi vasitəsilə bitki fiziologiyasına hüceyrə və bütöv orqanizm səviyyəsində təsir göstərir (Hasegawa, 2000; Ranjbarfordoei, 2002). Bitkilərin müxtəlif abiotik streslərə reaksiyası fizioloji tədqiqatların mühüm mövzusu olmuşdur (Bajaj et al., 1999; Hasegawa, 2000). Dünyanın bir çox bölgəsində qida istehsalını davam etdirmək üçün kənd təsərrüfatı bitkilərinin duza davamlılığının artırılması zəruridir.

Suvarılan kənd təsərrüfatında bitkilərin duza dözümlülüyünün yüksəldilməsi yuyulma tələbatını azalda bilər; bu isə həm təmiz suyun gətirilməsi, həm də şor suların kənarlaşdırılması xərclərini minimallaşdıraraq suvarmanın iqtisadi səmərəliliyini artırır (Pitman & Lauchli, 2002). Dəmyə əkinçiliyində isə artan duza davamlılıq məhsuldarlığı yüksəldə bilər. Yağıntılardan az olduğu və duzun alt qatda qaldığı ərazilərdə duza davamlılığın artması bitkilərə torpaqdan daha çox su mənimsəməyə imkan verəcəkdir.



Digər aqronomik məhdudiyyətlər (məsələn, xəstəliklərə davamlılıq və qida çatışmazlığı) aradan qaldırıldıqda, duza dözümlülük təbii şoranlığa malik torpaqlarda yetişən bitkilər üçün ən böyük təsirə malik ola bilər; belə ki, torpağın alt qat şoranlığı bütün yarımquraq (semi-arid) zonalarda kənd təsərrüfatı üçün əsas məhdudlaşdırıcı faktor olaraq qalır. Hətta yağıntılı zonalarda torpaqların təmizlənməsinin qrunut sularının səviyyəsinin qalxmasına və duzların hərəkətinə səbəb olduğu yerlərdə belə, bitkilərin duza davamlılığının artırılması mühüm əhəmiyyət kəsb edəcəkdir. Qrunut sularının səviyyəsini aşağı salmaq üçün dərin kök sisteminə malik çoxillik növlərin tətbiqi zəruridir. Lakin duza davamlılıq təkcə drenaj funksiyası daşıyan növlər üçün deyil, həm də onlardan sonra əkilən birillik bitkilər üçün tələb olunacaqdır; çünki qrunut sularının səviyyəsi aşağı düşdükdə duz torpaq qatında qalmağa davam edir.

Prolinin, osmotik rolu ilə yanaşı, stres şəraitində müxtəlif funksiyalara malik olduğu irəli sürülmüşdür: bura karbon və azotun ehtiyat komponenti kimi saxlanması, RON skavenceri (təmizləyicisi) olması, sitozol pH-nın və hüceyrə redoks balansının buferlənməsi, zülal strukturunun sabitləşdirilməsi (Hare and Cress, 1997) və nəhayət, stressə qarşı adaptiv cavab signalı kimi çıxış etməsi daxildir (Maggio, 2002). Duz stressi kənd təsərrüfatında bitki məhsuldarlığını azaldan əsas amillərdən biridir (Zhu, 2002). Bitkilər bu əlverişsiz ətraf mühit şəraitində sağ qalmaq üçün müxtəlif biokimyəvi və fizioloji reaksiyalar nümayiş etdirirlər ki, bunlara prolin, qlisin-betain və şəkər spirtlərinin toplanması nümunə ola bilər (Delauney and Verma, 1993). Əslində, sərbəst prolin tütün, soya, arpa, buğda və çəltik kimi bir çox ali bitkilərdə toplanır (Yoshida, 1997). Prolin osmotikum, hidrosil radikalı təmizləyicisi, fermentləri qoruyan uyğun həll olan maddə (compatible solute), həmçinin enerji və bərpaedici güc mənbəyi kimi fəaliyyət göstərə bilər (Verbruggen, 1993). İndiyədək bitkilərdə prolin metabolizmi də əsaslı şəkildə nəzərdən keçirilmişdir (Hare, 1999).

Materiallar və metodlar.

Bitkilərin böyüdülməsi. Tədqiqatın obiyekti kimi Əkinçilik Elmi Tədqiqat institutundan təmin edilmiş Murov (*Triticum aestivum* L.) yumşaq buğda sortu götürülmüşdür. Tədqiqat laboratoriyaya şəraitində hidroponik əkimlə həyata keçirilmişdir.

Səpin prosesindən öncə toxumlar etanol (%96) ilə qısamüddətli yuyulmuş, distillə edilmiş sudan keçirilmiş və %5-lik natrium-hipoxlorit məhlulunda 5 dəqiqə ərzində səthi sterilizasiya edilmişdir. Sterilizasiyadan sonra toxumlar 5 dəfə distillə edilmiş su ilə durulanmışdır.

Toxumlar 8 qrup üzrə təsnif edilmişdir:

1. Nəzarət qrupu
2. Hidrogenlə zənginləşdirilmiş su (HZS)
3. 100 µM kükürd nanohissəcikləri (KNH)
4. HZS + 100 µM KNH
5. 100 mM duz (NaCl)
6. 100 mM duz + HZS
7. 100 mM duz + 100 µM KNH
8. 100 mM duz + HZS + 100 µM KNH

Toxumlar cücərmə kabinetində 72 saat ərzində 26°C temperaturda saxlanılaraq cücərdilmiş və daha sonra 1/4 nisbətində durulaşdırılmış Hoagland məhlulu ehtiva edən hidroponik mühitə köçürülmüşdür. İnkişafın doqquzuncu günündə (ikinci yarpaqların formalaşdığı mərhələdə) Hoagland məhluluna müvafiq konsentrasiyalarda HZS, duz və kükürd nanohissəcikləri əlavə edilmişdir; nəzarət qrupuna isə heç bir müdaxilə olunmamışdır. 12-ci gündə buğda cücərtilərinin kök və gövdə hissələri ayrı-ayrılıqda yığılmışdır. Təzə nümunə tələb edən ölçmələr dərhal həyata keçirilmiş, digər analizlər üçün nəzərdə tutulan



nümunələr isə maye azotda dondurularaq -86°C temperaturda dondurucuda mühafizə edilmişdir.

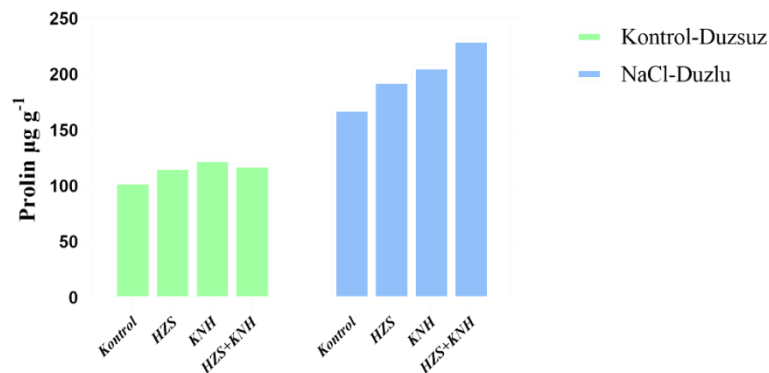
Hidrogenlə Zənginləşdirilmiş Suyun Hazırlanması

Hidrogenlə zənginləşdirilmiş su (HZS) Ryu və b. (2019) tərəfindən təklif olunan metodologiyaya əsasən hazırlanmışdır. Tədqiqatda istifadə olunan %99.9 saflıq dərəcəsinə malik H_2 qazı "Elit Gaz Texnologiyaları" (Ankara, Türkiyə) şirkətindən təmin edilmişdir. H_2 qazı iynəli şlanq vasitəsilə 10 dəqiqə ərzində 1 L/dəq sürətlə Hoagland məhlulu olan suya verilmişdir. Hidroponik qablardakı hidrogen konsentrasiyası və sabitliyi ORP elektrodu (Sensorex, ABŞ) vasitəsilə monitorinq edilmişdir.

Prolin Miqdarının Təyini.

Yarpaq toxumalarında sərbəst prolin miqdarı Bates və b. (1973) tərəfindən təklif edilmiş metod əsasında spektrofotometrik yolla təyin edilmişdir. Bu məqsədlə, 0.5 q təzə yarpaq nümunəsi 10 ml %3-lük sulfosalisil turşusunda homogenləşdirilmiş və filtrasiya edilmişdir. Filtratın 2 ml-i bərabər həcmdə turşu-ninhidrin və buzlu sirkə turşusu ilə qarışdırılaraq 100°C su hamamında 1 saat ərzində inkubasiya edilmişdir. Reaksiya buz hamamında dayandırıldıqdan sonra rəngli fraksiya 4 ml toluol vasitəsilə ekstraksiya edilmiş və spektrofotometrə (UV-Vis) 520 nm dalğa uzunluğunda ölçülmüşdür. Hesablamalar standart prolin əyrisi əsasında aparılmış və nəticələr $\mu\text{g g}^{-1}$ təzə çəki ilə ifadə edilmişdir. Statistik təhlil Grap Phad Prism proqram təminatında "İki tərəfli ANOVA" testi ilə aparılmışdır.

Şəkil 1. "Murov" Yumşaq buğda sortunda "Duz stressi" altında prolin tərkibinə HZS və KNH tətbiqlərinin təsiri



Nəticələr və Müzakirə.

Tədqiqatın ilkin mərhələsində 100 mM NaCl konsentrasiyasının yaratdığı osmotik gərginlik "Murov" buğda sortunda metabolik sürüşmələrə səbəb olmuşdur. Prolinin kök və gövdə toxumalarında kəskin artımı sadəcə bir zədələnmə göstəricisi deyil, hüceyrənin homeostazı bərpa etmək cəhdidir. Prolin hüceyrə şirəsinin osmotik potensialını tənzimləyərək, duzlu mühitdə suyun hüceyrədən xaricə sızmasının (ekzoosmosun) qarşısını alır. Bir aminturşu olaraq prolin hüceyrə membranındakı proteinlərlə qarşılıqlı əlaqəyə girərək onların struktur bütövlüyünü qoruyur. HZS-in tətbiqi prolin sintezini stimullaşdırmaqla yanaşı, hüceyrə daxilində ikincili siqnal ötürücüsü kimi çıxış edir. Hidrogen molekulları (H_2) kiçik ölçüləri sayəsində hüceyrə membranlarından asanlıqla keçərək birbaşa mitoxondri və xloroplastlara nüfuz edir. HZS, xüsusilə hidrosil radikallarını (OH) hədəf alaraq onları su molekuluna çevirir. Bu, prolinin metabolik yükünü azaldır; belə ki, prolin artıq sadəcə



detoksikasiya ilə məşğul olmur, həm də azot ehtiyatı rolunu oynayır. Kükürd nanohissəciklərinin ($100 \mu\text{M KNH}$) tətbiqi nəticələrdə "sürətləndirici" effekti yaratmışdır. Nano-ölçülü kükürd ənənəvi sulfat formaları ilə müqayisədə bitki tərəfindən daha yüksək bio-mənimsənilmə qabiliyyətinə malikdir. Kükürd sintezi stimullaşdırılan sistein və metionin kimi aminurşular prolinlə birlikdə bitkinin "anti-stres kokteyli"ni formalaşdırır. KNH-in metabolik proseslərdə katalizator kimi çıxış etməsi, bitkinin stres amilinə qarşı daha çevik cavab verməsini təmin edir. Tədqiqatın ən vurğulanmalı məqamı HZS və KNH-in birgə tətbiqinin tək-tək tətbiqlərdən daha effektiv olmasıdır. Bu kombinasiya bitkidə "induksiya dözümlülük" yaradır. Bu variantda prolinin ən yüksək həddə çatması (Şəkil 1) göstərir ki, kükürd nanohissəcikləri struktur material təmin edir, hidrogenli su isə bu materialın hansı istiqamətdə istifadə olunacağına dair "əmr" verir. Bitki streslə mübarizə üçün lazım olan enerjini daha səmərəli bölüşdürür. HZS tərəfindən azaldılmış oksidativ stres, bitkinin böyümə enerjisini tamamilə itirməməsinə şərait yaradır.

Təhlillər göstərir ki, "Murov" sortu genetik olaraq bu cür innovativ müdaxilələrə yüksək cavab reaksiyası vermə potensialına malikdir. Hidrogenli suyun antioksidant gücü ilə kükürd nanohissəciklərinin metabolik aktivliyinin vəhdəti, şoranlıq şəraitində buğdanın biokimyəvi müdafiə baryerini maksimum səviyyəyə qaldırır. Bu metodologiya gələcəkdə "ağıllı kənd təsərrüfatı" (smart farming) çərçivəsində tətbiq edilərək həm ekoloji tarazlığı qoruya, həm də iqlim dəyişikliyi fonunda ərzaq təhlükəsizliyinə mühüm töhfə verə bilər. $100 \mu\text{M NaCl}$ + HZS + $100 \mu\text{M KNH}$ konsentrasiyası bitkinin adaptiv potensialını optimallaşdıran ən əlverişli biokimyəvi mühit kimi dəyərləndirilməlidir.

ƏDƏBİYYAT SIYAHISI

1. Alkharabsheh, H. M., et al. (2021). Plant responses to salinity stress and mitigation strategies. *Agriculture*, 11(6), 563.
2. Jones, R. L., & MacMillan, J. (1987). Gibberellins. In M. B. Wilkins (Ed.), *Advanced Plant Physiology* (pp. 21–52). Pitman Publishing.
3. Robe, W. E. (1990). Nitrogen metabolism of plants under environmental stress [Doctoral dissertation, University of Newcastle upon Tyne]. British Library EThOS.
4. Kuznetsov, V. V., Shevyakova, N. I., & Kartashov, A. V. (2007). Proline under stress: Biological functions, metabolism, and regulation. *Russian Journal of Plant Physiology*, 54(1), 3–17.
5. Gilbert, G. A., Gadush, M. V., Wilson, C., & Madore, M. A. (1998). Amino acid accumulation in common bean in response to drought and salinity. *Plant Physiology*, 116(4), 1547–1555.
6. Shaddad, M. A., Abd El-Samad, H. M., & Mostafa, D. (2005). Role of gibberellic acid or benzyladenine in alleviation of adverse effects of salinity on some physiological phenomena of broad bean plants. *Bulletin of the Faculty of Science, Assiut University*, 34(2), 143–158.
7. Abed El-Baki, G. K. (1996). Studies on the adaptation of some plants to salinity [Master's thesis, Minia University]. Minia University Repository.
8. Abd El-Samad, H. M., & Azooz, M. M. (2002). Salt tolerance of crop plants: I. Influence of different levels of NaCl and CaCl_2 on growth and some metabolism of maize and broad bean. *Egyptian Journal of Biology*, 4, 14–25.
9. Abdel Latef, A. A. (2005). Effect of salt stress on growth and some physiological activities of pepper (*Capsicum annum* L.) plants. *Egyptian Journal of Biology*, 7, 71–76.



10. Arora, N. K. (2019). Impact of climate change on agriculture production and its sustainable solutions. *Environmental Sustainability*, 2(2), 95-96.
11. Ashraf, M. (2002). Salt tolerance of cotton: some new advances. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21(1), 1-30.
12. Ashraf, M. (2004). Some important physiological selection criteria for salt tolerance in plants. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 199(5), 361-376.
13. Ashraf, M., & Sarwar, G. (2002). Salt tolerance of some elite lines of cotton. *Biologia Plantarum*, 45(4), 555-559.
14. Ashraf, M., et al. (2005). Role of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 53(2).
15. Azooz, M. M., Shaddad, M. A., & Abdel-Latef, A. A. (2004). The accumulation and compartmentation of proline in relation to salt tolerance of three *Hibiscus esculentus* cultivars. *Indian Journal of Plant Physiology*, 9(1), 1-8.
16. Bajaj, S., Targolli, J., Liu, L. F., Ho, T. H. D., & Wu, R. (1999). Transgenic rice plants overexpressing an HVA1 gene from barley show increased tolerance to water deficit and salinity. *Plant Molecular Biology*, 39(4), 817-831.
17. Chandan, et al. (2006). Impact of salinity on agricultural productivity in arid regions. *Journal of Arid Environments*.
18. Debez, A., Saadaoui, D., Ramani, B., Horner, T., Slama, F., Choukr-Allah, R., & Papenbrock, J. (2006). Optimization of seed germination and seedling growth of *Crithmum maritimum* L., a potential halophytic crop. *Biosystems Engineering*, 95(1), 127-139.
19. Delauney, A. J., & Verma, D. P. S. (1993). Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Plant Journal*, 4(2), 215-223.
20. Flowers, T. J., & Hajibagheri, M. A. (2001). Salinity tolerance in *Hordeum vulgare*: Ion concentrations in isolated protoplasts of a highly salt-tolerant and a salt-sensitive cultivar. *Australian Journal of Plant Physiology*, 28(9), 821-827.
21. Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2008). The state of food and agriculture 2008: Biofuels: Prospects, risks and opportunities.
22. Giraldo, P., et al. (2019). Genetic diversity and wheat breeding: A review. *Frontiers in Plant Science*, 10, 815.
23. Gul, Z., et al. (2022). Effect of salinity on physiological and biochemical characteristics of wheat. *Journal of Plant Nutrition*.
24. Hare, P. D., & Cress, W. A. (1997). Metabolic implications of intracellular proline accumulation in plants. *Plant Growth Regulation*, 21(2), 79-102.
25. Hare, P. D., et al. (1999). Proline metabolism under plant abiotic stress. *Trends in Plant Science*, 4(7), 261-268.
26. Hasegawa, I., Fukushima, T., Ihara, T., & Miyashita, Y. (2000). Neurophysiological examination of memory retrieval in a collection of associative mnemonics. *Science*, 289(5480), 812-815.
27. Kumar, P., et al. (2011). Global wheat production and food security. *Wheat Information Service*.
28. Maggio, A., et al. (2002). Does proline accumulation per se confer salt tolerance in transgenic plants? *Plant Physiology and Biochemistry*, 40(11), 969-976.
29. Marschner, H. (1995). *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
30. Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell & Environment*, 25(2), 239-250.



31. Munns, R., & James, R. A. (2003). Screening methods for salinity tolerance: a case study with tetraploid wheat. *Plant and Soil*, 253(1), 201-218.
32. Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, 59, 651–681.
33. Munn, C. B. (2002). *Marine microbiology: Ecology and applications*. BIOS Scientific Publishers.
34. Munn, C. B., Ariadna, C., & Thompson, F. L. (2006). Role of *Vibrio* species in coral bleaching. *Journal of Applied Microbiology*, 101(3), 503–511.
35. Mühling, K. H., & Läuchli, A. (2003). Interaction of NaCl and Cd stress on compartmentation of Na, Cl and Cd in leaves of *Vicia faba* L. *Plant Biology*, 5(1), 56–67.
36. Mostafa, H. A. M. (2004). Effect of some vitamins on growth and metabolic activities of *Trigonella foenum-graecum* L. plant grown under different salinity levels. *Egyptian Journal of Biology*, 6, 32–40.
37. Parida, A. K., Das, A. B., & Das, P. (2002). NaCl stress causes changes in photosynthetic pigments, proteins and other metabolic components in the leaves of a true mangrove, *Bruguiera parviflora*, in hydrothermal culture. *Journal of Plant Biology*, 45(1), 28–36.
38. Parida, A. K., Das, A. B., & Das, P. (2003). Examination of salt tolerance mechanisms in a mangroove plant *Bruguiera parviflora* by measuring relevant physicochemical parameters. *Chemosphere*, 51(1), 31–36.
39. Pitman, M. G., & Läuchli, A. (2002). Global impact of salinity and agricultural ecosystems. In A. Läuchli & U. Lüttge (Eds.), *Salinity: Environment - Plants - Molecules* (pp. 3–20). Kluwer Academic Publishers.
40. Verbruggen, N., et al. (1993). Proline accumulation in plants: a review. *Plant Physiology*.
41. Wu, et al. (2014). Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*.
42. Yoshiba, Y., et al. (1997). Regulation of levels of proline as an osmolyte in plants under water-stress. *Plant and Cell Physiology*, 38(10), 1095-1102.
43. Zhu, J. K. (2002). Salt control of plant growth and development. *Current Opinion in Plant Biology*, 5(5), 403-406.
44. Ranjbarfordoei, A., Samson, R., Van Damme, P., & Lemeur, R. (2002). Effects of osmotic and salt stress on photosynthesis and antioxidants in *Pistacia vera* L. *Photosynthetica*, 40(3), 433–439.
45. Romero-Aranda, R., Soria, T., & Cuartero, J. (2006). Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science*, 171(5), 581–590.
46. Ismail, A. M. (2003). Effects of salinity on growth, inorganic ions and organic solutes in relation to osmotic adjustment in the halophyte *Suaeda maritima*. *Biologia Plantarum*, 47(1), 129–132.

DYNAMICS OF PROLINE ACCUMULATION IN WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) PLANTS SUBJECTED TO SALT STRESS

SUMMARY

Research Objective: The primary objective of this research is to study the accumulation dynamics of the amino acid proline, synthesized as a stress response in wheat (*Triticum aestivum* L.) plants exposed to various



concentrations of salt stress (NaCl), and to determine the correlation between this indicator and the plant's degree of salt tolerance.

Research Methodology: To determine the proline content, the method proposed by Bates et al. (1971), based on the reaction of proline with ninhydrin, was utilized.

Practical Significance of the Research: The results of this study provide an understanding of the adaptation mechanisms of wheat plants in saline soils and can be applied as an effective physiological-biochemical test system for the rapid screening of salt-tolerant genotypes in breeding programs.

Research Results: When applied in combination with hydrogen-rich water and sulfur nanoparticles, the biochemical defense capacity of the plant against salt stress reaches its maximum level. Consequently, the osmotic regulation of the plant is enhanced.

Scientific Novelty of the Research: The proposal of a new, environmentally friendly methodology for increasing wheat productivity in saline soils through the use of nanoparticles instead of traditional sulfur fertilizers and the application of hydrogen-rich water, considered a "smart fertilizer."

Keywords: nanoparticle, hydrogen, smart fertilizer, proline, SDG13

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ ПРОЛИНА В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ (*Triticum aestivum* L.) ПРИ СОЛЕВОМ СТРЕССЕ

РЕЗЮМЕ

Цель исследования – основной целью данного исследования является изучение динамики накопления аминокислоты пролина, синтезируемой в качестве ответной реакции на стресс у растений пшеницы (*Triticum aestivum* L.), подвергнутых воздействию солевого стресса (NaCl) в различных концентрациях, и определение связи этого показателя со степенью солеустойчивости растения.

Методология исследования – для определения количества пролина был использован метод, предложенный Бейтсом и др. (1971), основанный на реакции пролина с нингидрином.

Практическая значимость исследования – результаты данного исследования позволяют понять механизмы адаптации пшеницы на засоленных почвах и могут быть применены в селекционных работах в качестве эффективной физиолого-биохимической тест-системы для быстрого скрининга солеустойчивых генотипов.

Результаты исследования – при совместном применении водородной воды и наночастиц серы биохимическая защитная способность растения против солевого стресса достигает максимального уровня. В результате этого усиливается осмотическая регуляция растения.

Научная новизна исследования – предложение новой экологически чистой методологии для повышения урожайности пшеницы на засоленных почвах путем использования наночастиц вместо традиционных серных удобрений и применения водородной воды, считающейся «умным удобрением».

Ключевые слова: наночастица, водород, умное удобрение, пролин, ЦУР13

Məqalə daxil olmuşdur: 09.06.2026

Təkrar işləməyə göndərilmişdir:

13.06.2026

Çapa qəbul edilmişdir: 16.06.2026

Дата поступления статьи в

редакцию: 09.06.2026

Отправлено на повторную

обработку: 13.06.2026

Принято к печати: 16.06.2026

The date of the admission of the

article to the editorial office:

09.06.2026

Send for reprocessing: 13.06.2026

Accepted for publication: 16.06.2026