

KARAKTERIZACIJA KORENOVOG SISTEMA BILJAKA PRIMENOM SAVREMENIH METODA FENOTIPIZACIJE

Ivica Đalović¹, Yinglong Chen², Zed Rengel², Željana Prijić³, Dušan Adamović¹

Izvod: Osobine korenovog sistema omogućuju biljkama da reaguju, prilagode se i razvijaju u različitim uslovima spoljašnje sredine. Arhitektura korenovog sistema je jedna od osnovnih komponenti produktivnosti biljaka i podrazumeva morfološke, anatomske i fiziološke osobine korena. Danas se sve više istražuje arhitektura korenovog sistema (*Root system architecture*, RSA), kao i njegovo modeliranje (*modelling plant root system*). U radu se ukazuje na značaj i strategije razvoja fenotipizacije biljaka, njihove prednosti i ograničenja, kao i mogućnosti praktične primene u oplemenjivanju biljaka i tehnologiji proizvodnje. Takođe prikazana je i polu–hidroponska platforma za fenotipizaciju korenovog sistema, kao i razvijeni modeli za konstrukciju arhitekture podzemnog dela biljke u određenim uslovima sredine koji omogućuju simuliranje bioloških, fizičkih i hemijskih procesa u zemljištu. Različiti modeli koji prate razvoj korenovog sistema najčešće su rezultat analize važnijih morfoloških i fizioloških osobina, a njihova empirijska primena je do sada testirana na većem broju biljnih vrsta u svetu.

Ključne reči: korenov sistem, fenotipizacija, modeliranje.

Uvod

Biljke rastu u veoma kompleksnim i promenljivim uslovima spoljašnje sredine. Danas sve više dobija na značaju rad na istraživanju i modeliranju rasta korenovog sistema (*modelling plant root system*). Arhitektura korenovog sistema (*Root system architecture*, RSA) podrazumeva morfološke, anatomske i fiziološke osobine korena. RSA je jedna od osnovnih komponenti produktivnosti biljaka (Leitner et al., 2014) i ima važnu ulogu u tolerantnosti prema stresu (Uga et al., 2013). Novija proučavanja zasnovana su na razvoju novih modela kojima je omogućena složenija analiza i vizuelizacija korenovog sistema.

U radu se ukazuje na značaj i strategije razvoja fenotipizacije biljaka, njihove prednosti i ograničenja, kao i mogućnosti praktične primene u oplemenjivanju biljaka i tehnologiji proizvodnje. Takođe ukazuje se i na genetsku osnovu arhitekture korena, polu–hidroponsku platformu za fenotipizaciju korenovog sistema, kao i na do sada razvijene modele za konstrukciju arhitekture podzemnog dela biljke u određenim uslovima sredine koji omogućavaju simuliranje bioloških, fizičkih i hemijskih procesa u zemljištu.

¹ Institut za ratarstvo i povrtarstvo, Maksim Gorki 30, 21 000 Novi Sad, Srbija;

² The UWA Institute of Agriculture, and School of Earth and Environment, The University of Western Australia, Australia;

³ Ministarstvo poljoprivrede i zaštite životne sredine, Beograd, Srbija.

Genetska osnova arhitekture korenovog sistema

Varijabilnost u arhitekturi korenovog sistema može se opisati na nivou genotipa i fenotipa (Chen et al., 2015). Proučavanjem RSA objašnjava se njegov oblik i struktura što doprinosi stvaranju korena sa osobinama traženim za određene agroekološke uslove (Wang i Smith, 2004). Poznavanje osobina korenovog sistema, kao i razumevanje načina nasleđivanja njegovih pojedinih osobina od izuzetnog je značaja za oplemenjivače, posebno ako se ima u vidu uloga korenovog sistema u različitim uslovima spoljašnje sredine, kao što su: previsoka vlažnost, kiselost, alkalnost, suša i dr. (Manske et al. 2001).

Novija istraživanja genetske determinacije osobina korenovog sistema pšenice ukazuju uglavnom na poligeno nasleđivanje (Atkinson et al., 2015). Utvrđeno je da pojedini geni koji utiču na smanjenje visine pšenice – Rht geni – utiču i na redukciju rasta korenovog sistema (Bai et al., 2013). Geni otpornosti prema prouzročivaču lisne rđe – *Lr* geni (*Lr* – leaf rust) (Jerković et al., 2013), takođe utiču na porast korena. Proučavanja važnijih osobina korenovog sistema jare pšenice od strane Narayanan et al. (2014) pokazala su da postoji pozitivna korelacija između nadzemnog dela biljke i korenovog sistema, kao i između površine korena i broja sekundarnih stabljika. Istim istraživanjem je utvrđeno da sorte pšenice poreklom iz sušnijih krajeva: iz Australije, sa Mediterana i iz zapadne Azije imaju dublje razvijen korenov sistem od sorti poreklom iz humidnijih predela: Kanade, Meksika, Latinske Amerike i južne Azije. S druge strane sorte mekih pšenica imale su razvijeniji koren u odnosu na durum sorte. Rezultatima QTL analiza kod pšenice utvrđen je relativno mali broj regiona na hromozomima koji određuju morfologiju korena (Petrarulo et al., 2015). Najvažniji regioni su identifikovani na hromozomima 2A, 6a, 5A i 1B za osobine koje se odnose na dužinu, površinu i zapreminu korenovog sistema. Proučavanjem RSA pirinča QTL analizom utvrđen je *DROI* (*Deeper Rooting 1*) gen koji utiče na brži porast korenovog sistema i manji ugao među korenovima, a zbog dubljeg korena i naglašeniju otpornost prema suši (Uga et al., 2013). U transgenim biljkama duvana dokazano je da gen iz pšenice *TaEXPB23* utiče na povećan razvoj lateralnih korenova, a time i bolju tolerantnost na nedostatak fosfora u zemljištu (Postma et al. 2014). Kod kukuruza QTL analizom utvrđena su dva glavna lokusa koji utiču na arhitekturu korenovog sistema, a time i na druge agronomске osobine, pre svih prinos (Tuberosa i Salvi, 2007).

Metode fenotipizacije

Imajući u vidu da je potrebno pratiti koren različitih biljnih vrsta, različitih genotipova, kao i uticaj pojedinih faktora spoljne sredine, razvijene su različite strategije i tehnike fenotipizacije korena (Herrera et al., 2012). Kod većine metoda i dalje ostaje problem istovremenog praćenja velikog broja biljaka, kao i problem neusklađenosti različitih metodologija za proučavanje RSA u stadijumu sejanaca i u fazi odrasle biljke, s obzirom da korenov sistem nije podjednako razvijen. Savremene metode omogućile su istraživanja RSA u laboratorijskim i poljskim uslovima, kao i u staklari (Tab. 1).

Tab. 1. Strategije i metode za fenotipizaciju korenovog sistema (modifikovano prema Paez-Garcia et al., 2015)

Tab. 1. Strategies and methods for root phenotyping (modified after Paez-Garcia et al., 2015)

Istraživanja Research	Uslovi gajenja Growth Conditions	Prednosti uslova gajenja Advantages	Nedostaci uslova gajenja Disadvantages	Metode Methods
U laboratoriji In Laboratory	Kontrolisani uslovi Highly Controlled	<ul style="list-style-type: none"> • rast se može kontinuirano pratiti • nedestruktivne metode • može se testirati i pratiti širok spektar uslova gajenja • lako ponovljivi metodi • ne zahteva veliki prostor za gajenje biljaka, koren je čist • laka manipulacija biljkama 	<ul style="list-style-type: none"> • RSA može biti pod uticajem kontejnera u kojima se biljke gaje • sterilni uslovi sprečavaju interakcije sa mikroorganizmima • značaj pojedinih fizioloških parametra korena teško je pratiti 	Zemljište GLO-Roots
				U hidroponu Rhizophonics
U staklari In Greenhouse	Umereno kontrolisani uslovi Moderately Controlled	<ul style="list-style-type: none"> • moguće je delimično kontrolisati uslove gajenja kao što su: tip zemljišta, vlaga, intenzitet svetlosti, temperatura, hranjive materije • mogućnost praćenja genetskog potencijala RSA bez kompeticije 	<ul style="list-style-type: none"> • zahteva intenzivan rad • potrebno čišćenje korena • mogućnost pojave patogena na biljkama • RSA može biti pod uticajem kontejnera u kojima se biljke gaje 	Zemljište X-zraci
				Na papiru Rhizoslides
U polju In Field	Minimalno kontrolisani uslovi Minimally Controlled	<ul style="list-style-type: none"> • fiziološki i praktičan značaj 	<ul style="list-style-type: none"> • zahteva intenzivan rad i vreme • destruktivne metode • zahteva čišćenje korena • potrebne dozvole za evaluaciju transgenih biljaka 	Shovelomics
				Soil coring Rhizolysimeters Minirhizotrons

Rezultati dobijeni u poljskim uslovima daju najprecizniju sliku o rastu biljaka u određenim agroekološkim uslovima, ali su ta istraživanja dugotrajna (prati se odrasli stadijum), destruktivna i zahtevaju veliko učešće radne snage (Smit, 2000). Jedna od metoda koja se najčešće primenjuje u poljskim uslovima je: „Shovelomics“ metoda koja podrazumeva ručno iskopavanje biljke, pranje i utvrđivanje osobina korenovog sistema, čime je, prema Trachsel et al. (2011), omogućeno praćenje deset najvažnijih osobina korena kukuruza gajenog u poljskim uslovima. Ukazano je da postoji mogućnost da se ova metoda primeni i kod drugih biljnih vrsta (Selvaraj et al., 2013). „Soil coring“ metoda predstavlja iskopavanje korena putem cilindra, što omogućuje laku ponovljivost, kao i mogućnost utvrđivanja morfologije korenovog sistema, ali je potreban veliki broj uzoraka (Paez-Garcia et al. 2015). Takođe razvijene su i nedestruktivne metode istraživanja u zemljištu *in situ* koje uključuju „Rhizotron“ metod koji se zasniva na gajenju biljaka u providnim panelima. Ova metoda karakterizacije

korena smatra se veoma pogodnom, jer je jednostavna za ponavljanje i minimalno narušava zemljište. Međutim osnovni nedostatak ove metode je što je oprema za snimanje veoma skupa, kao i nemogućnost adekvatnog podešavanja opreme u dubljim slojevima/profilima zemljišta. Od ostalih nedestruktivnih metoda koje se odnose na analizu korenovog sistema u zemljištu *in situ* su primena magnetne rezonance (Gregory et al., 2009; Tracy et al., 2010), X zraka (Mooney et al., 2012) i primena digitalizovane tomografije (CT) (istraživanja ovom metodom sprovedena su na pšenici, ječmu i kukuruzu) (Mairhofer et al. 2013). Međutim, kvalitet slike u značajnom stepenu ograničava širenje ovih metoda.

Razvijeno je i više metoda za proučavanje podzemnog dela biljke u supstratima bez zemljišta–hidroponski, agar (gel) i aeroponski sistem (Gregory et al, 2009). Gel sistem je nedestruktivan i omogućuje posmatranje biljke u realnom vremenu, a time i praćenje njenih fizioloških osobina. Ova metoda takođe omogućuje praćenje velikog broja biljaka ili genotipova u izrazito kontrolisanim uslovima. Hidroponski sistem je zbog niske cene široko rasprostranjen u analizi biljaka u stadijumu sejanaca, lako je ponovljiv i može se istovremeno gajiti veći broj biljaka (Chen et al., 2015). Nova polu–hidroponska platforma razvijena od strane Chen et al. (2011) omogućuje praćenje morfoloških i fizioloških osobina korenovog sistema, jer se jednostavno mogu dodavati voda i hranljive materije. Rezultati dobijeni gajenjem biljaka u zemljištu mogu se značajno razlikovati i/ili biti potpuno suprotni u odnosu na biljke gajene u supstratima bez zemljišta u kontrolisanim uslovima usled razlika u strukturi i sastavu zemljišta, kao i uticaja ostalih faktora spoljašnje sredine (Clark et al., 2011). Ključni napredak platformi za fenotipizaciju je mogućnost nedestruktivnog snimanja pojedinih osobina biljaka. Ovo je posebno značajno za praćenje i merenje uticaja stresa na biljke (Fahlgren et al., 2015). Pored navedenih dizajnirana je i fenoskop platforma za izvođenje eksperimenata u sušnim uslovima, kao i u uslovima primene navodnjavanja (Tisné et al., 2013).

2D i 3D modeliranje

Modeli za proučavanje strukture korenovog sistema počeli su se razvijati krajem 80–ih godina prošlog veka (Dunbabin et al., 2013). Razvojem informacionih tehnologija i modeli su postajali složeniji. Danas se najčešće koriste dvodimenzionalni 2D (Iyer–Pascuzzi et al., 2010) i trodimenzionalni 3D modeli (Fang et al., 2009) u cilju sveobuhvatnije analize korenovog sistema. Takođe razvijeno je nekoliko softverskih paketa za vizualizaciju korenovog sistema i dobijanje kvantitativnih podataka, kao što su: RootScan, RootNav, DART, GiARoots, IJ Rhizo, Root System Analyzer, RootReader, RootReader 3D, RooTrak i dr. (Chen et al., 2015). Međutim, različiti softverski paketi su otežavali razmenu podataka i stoga je razvijen Root System Markup Language (RSML) program koji omogućava razmenu RSA podataka (Fig. 2). Ovaj program takođe omogućava formiranje tzv. „standardnog formata“ koji uključuje centralizaciju podataka o osobinama korenovog sistema u 2D i 3D formatu. RSML format se primenjuje na pet softvera za analizu fotografija korenovog sistema (RhizoScan–2D, RootNav–2D, RooTrak–3D, Root System Analyser–2D i Smart Root–

2D) i trifunkcionalno–strukturne modele (RootBox, ArchiSimple i R–SWMS) (Lobet et al. 2015).

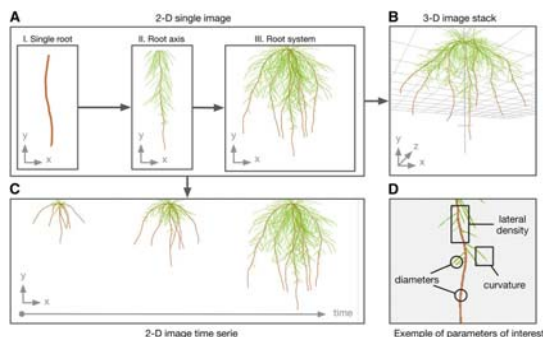


Fig. 1. Opis arhitekture korenovog sistema: 2D i 3D

Fig. 1. *Root system architecture description: 2D and 3D* (Lobet et al., 2015)

[A, Single root image. I, Single root; II, single root axis; III, root system (e.g. for monocots). B, 3D image stack. C, Time series. D, Example of parameters used to describe root architecture. First order roots are shown in red, and second order roots are shown in green] (Lobet et al., 2015)

[A, Koren. I, Koren prvog reda ; II, Koren prvog i drugog reda; III, Korenov sistem (npr. monokotile). B, 3D fotografija C, Vremenska serija. D, Parametri koji se upotrebljavaju za opis RSA. Koreni prvog reda označeni su crvenom bojom, a drugog reda zelenom] (Lobet et al., 2015)

Međutim, postoje i izvesna ograničenja u fenotipizaciji korena vezana za razvoj i primenu pojedinih modela. Ograničenje može biti vezano za softver, kao i visoke troškove infrastrukture. Cena „*imaging technologies*“ je još uvek glavna prepreka širem korišćenju i zbog toga je potrebno razviti jeftiniju tehnologiju fenotipizacije. Manji troškovi omogućili bi istraživanja sa još većim brojem ponavljanja i većim brojem biljaka pri fenotipizaciji korena. Ograničenje je i što se neke tehnologije (kao 2D sistemi) primenjuju za stadijum ponika (Downie et al., 2015).

Zaključna razmatranja

Korenov sistem ima ključnu ulogu u funkcionisanju biljke, jer se od 20–50% ukupnog organskog ugljenika translocira u korenov sistem (Kell., 2012). Razvojem savremenih tehnologija istraživanja na fenotipizaciji korena dobijaju na značaju poslednjih 10-ak godina. Za oplemenjivanje korena na efikasnije usvajanje i iskorišćavanje vode i hranljivih materija kombinuje se veći broj metoda fenotipizacije. Upotrebljavaju se i različiti modeli koji prate razvoj korenovog sistema, koji su najčešće rezultat analize važnijih morfoloških i fizioloških osobina korena. Ispitivanje arhitekture korenovog sistema podrazumeva merenje plastičnosti korena u različitim uslovima stresa: smanjena zemljišna vlažnost, visoka temperatura i ograničena dostupnost hraniva. Dalja istraživanja će ići u pravcu povezivanja strukture i funkcije korenovog sistema na molekularnom nivou. Da bi novi metod bio šire prihvaćen od strane istraživača, a posebno oplemenjivača, on mora da daje zapažene rezultate u istraživanjima u polju. Ograničavajući faktor šire primene različitih metoda i uređaja za fenotipizaciju korenovog

sistema može biti njihova cena. Zbog toga će u budućnosti biti cilj da se postigne jeftin i reproducibilan sistem fenotipizacije korena u poljskim uslovima.

Napomena

Ovaj rad je deo projekta TR 31073 „Unapređenje proizvodnje kukuruza i sirka u uslovima stresa“ koji se finansira od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

Literatura

- Atkinson J.A., Wingen L.U., Griffiths M., Pound M.P., Gaju O., Foulkes M.J., Le Gouis J., Griffiths S., Bennett M.J., King J., Wells D.M. (2015): Phenotyping pipeline reveals major seedling root growth QTL in hexaploid wheat. *J. Exp. Bot.* 66 (8): 2283–2292.
- Clark R.T., MacCurdy B.R., Jung K.J., Shaff E.J., McCouch R.S., Aneshansley J.D., Kochian V.L. (2011): Three-Dimensional Root Phenotyping with a Novel Imaging and Software Platform. *Plant Physiology* 156: 455–465.
- Chen Y.L., Dunbabin V.M., Diggle A.J., Siddique K.H.M., Rengel Z. (2011): Development of a novel semi-hydroponic phenotyping system for studying root architecture. *Functional Plant Biology* 38: 355–363.
- Chen Y.L., Đalović I., Rengel Z. (2015): Phenotyping for root traits. *In: Kumar J, Pratap A, Kumar S (Eds.): Phenomics of Crop Plants: Trends, Options and Limitations. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. pp. 101–128.*
- Bai C., Liang Y., Hawkesford M.J. (2013): Identification of QTLs associated with seedling root traits and their correlation with plant height in wheat. *J. Exp. Bot.* 64 (6): 1745–1753.
- Downie H.F., Adu M.O., Schmidt S., Otten W., Dupuy L.X., White P.J., Valentine T.A. (2015): Challenges and opportunities for quantifying roots and rhizosphere interactions through imaging and image analysis. *Plant Cell and Environment* 38: 1213–1232.
- Dunbabin V.M., Postma J., Schnepf A., Pagès L., Javaux M., Wu L., Leitner D., Chen YL., Rengel Z., Diggle A.J. (2013): Modelling root-soil interactions using three-dimensional models of root growth, architecture and function. *Plant and Soil* 372: 93–124.
- Fahlgren N., Gehan M.A., Baxter I. (2015): Lights, camera, action: high-throughput plant phenotyping is ready for a close-up. *Current Opinion in Plant Biology* 24: 93–99.
- Fang S., Yan X., Liao H. (2009): 3D reconstruction and dynamic modeling of root architecture *in situ* and its application to crop phosphorus research. *Plant J.* 60: 1096–1108.
- Gregory P.J., Bengough G.A., Grinev D., Schmidt S., Thomas B.T., Wojciechowski T., Young M.I. (2009): Root phenomics of crops: opportunities and challenges. *Functional Plant Biology* 36: 922–929.
- Herrera J.M., Verhulst N., Govaerts B. (2012): Strategies to identify genetic diversity in root traits. *In: Physiological Breeding I: Interdisciplinary Approaches to Improve Crop Adaptation, Reynolds M.P., Pask A.J.D., Mullan D. (Eds). Mexico, DF: CIMMYT, pp. 97–108.*

- Iyer–Pascuzzi A.S., Symonova O., Mileyko Y., Hao Y., Belcher H., Harer J., Weitz J. S., Benfey P.N. (2010): Imaging and analysis platform for automatic phenotyping and trait ranking of plant root systems. *Plant Physiology* 152: 1148–1157.
- Jerković Z., Prijčić, Ž., Đurić V. (2013): Efekat akumuliranih gena za otpornost prema prouzrokovачu lisne rđe pšenice na distribuciju proteina iz semena. *Ratarstvo i povrtarstvo* 50 (1): 60–64.
- Kell B.D. (2012): Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. *Phil. Trans. R. Soc. B* 367: 1589–1597.
- Leitner D., Felderer B., Vontobel P., Schnepf A. (2014): Recovering root system traits using image analysis exemplified by two-dimensional neutron radiography images of lupine. *Plant Physiology* 164: 24–35.
- Lobet G., Pound P.M., Diener J., Pradal C., Draye X., Godin C., Javaux J., Leitner D., Meunier F., Nacry F., Pridmore P.T., Schnepf A. (2015): Root System Markup Language: Toward a Unified Root Architecture Description Language. *Plant Physiology* 167: 617–627.
- Mairhofer S., Zappala S., Tracy S., Sturrock C., Bennett J.M., Mooney S.J., Pridmore P.T. (2013): Recovering complete plant root system architectures from soil via X-ray μ -Computed Tomography. *Plant Methods* 9: 1–7.
- Mooney S., Pridmore T., Helliwell J., Bennett M. (2012): Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. *Plant Soil* 352: 1–22.
- Narayanan S., Mohan A., Gill K.S., Prasad P.V. (2014): Variability of root traits in spring wheat germplasm. *PLOS ONE* 9 (6): e100317.
- Paez–Garcia A., Motes C.M., Scheible W.R., Chen R., Elison B., Monteros B., Monteros M.J. (2015): Root Traits and Phenotyping Strategies for Plant Improvement. *Plants* 4: 334–355.
- Petrarulo M., Marone D., Ferragonio P., Cattivelli L., Rubiales D., De Vita P., Mastrangelo A. M. (2015): Genetic analysis of root morphological traits in wheat. *Mol. Genet. Genomics* 290 (3): 785–806.
- Postma A.J., Dathe A., Lynch P.J. (2014): The Optimal Lateral Root Branching Density for Maize Depends on Nitrogen and Phosphorus Availability. *Plant Physiology* 166: 590–602.
- Selvaraj M.G., Ogawa S., Ishitani M. (2013): Root Phenomics – New Windows to Understand Plant Performance and Increase Crop Productivity. *Journal of Plant Biochemistry and Physiology* 1: 1–2.
- Smit A. L. (2000): *Root Methods. A Handbook*. Springer, Berlin.
- Tisné S., Serrand Y., Bach L., Gilbault E., Ben A.R., Balasse H., Voisin R., Bouchez D., Durand–Tardif M., Guerche P., Chareyron G., Da Rugna J., Camilleri C. (2013): Phenoscope: an automated large-scale phenotyping platform offering high spatial homogeneity. *The Plant Journal* 74: 534–544.
- Trachsel S., Kaeppeler S.M., Brown K.M., Lynch J.P. (2011): Shovelomics light throughput phenotyping of maize (*Zea mays* L.) root architecture in the field. *Plant and Soil* 341: 75–87.

- Tracy S.R., Roberts J.A., Black C.R., McNeill A., Davidson R., Mooney S. J. (2010): The X-factor: visualizing undisturbed root architecture in soils using X-ray computed tomography. *J. Exp. Bot.* 61: 311–313.
- Tuberosa R., Salvi S. (2007): From QTLs to Genes controlling Root Traits in Maize. *In: Spiertz J. H. J., Struik P.C., van Laar H. H (Eds): Scale and Complexity in Plant Systems Research: Gene–Plant–Crop Relations* 14–24.
- Uga Y., Sugimoto K., Ogawa S., Rane J., Ishitani M., Hara N., Kitomi Y., Inukai Y., Ono K., Kanno N., Inoue H., Takahisa H., Motoyama R., Nagamura Y., Wu J., Matsumoto T., Takai T., Okuno K., Yano M. (2013): Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. *Nature Genetics* 45: 1097–1102.
- Wang E., Smith C. J. (2004): Modelling the growth and water uptake function of plant root systems: a review. *Aust. J. Agric. Res.* 55: 501–523.

CHARACTERIZATION OF THE ROOT SYSTEM OF PLANTS BY USING MODERN METHODS OF PHENOTYPING

Ivica Đalović¹, Yinglong Chen², Zed Rengel², Željana Prijic³, Dušan Adamović¹

Abstract

The traits of the root system enable the plant to react, adapt and develop in different environmental conditions. The architecture of the root system is a basic component of the productivity of plants and involves morphological, anatomical and physiological characteristics of root. The studies of the architecture of the root system (RSA) and its modelling is in progress. The paper points to the importance and strategies of developing plant phenotyping, their advantages and limitations as well as possibilities of practical application to plant breeding and production technology. Also, a semi-hydroponic platform for phenotyping of the root system is shown, accompanied by developed models for the construction of the architecture of the underground part of the plant under certain environmental conditions that allow the simulation of biological, physical and chemical processes in the soil. Different models that follow the development of the root system are most often the result of the analysis of morphological and physiological characteristics while their empirical approach has so far been tested on a large number of plant species.

Key words: root system, phenotyping, modelling.

¹ Institute of Field and Vegetable Crops, Maxim Gorki 30, 21 000 Novi Sad, Serbia;

² The UWA Institute of Agriculture, and School of Earth and Environment, The University of Western Australia, Australia;

³ Ministry of Agriculture and Environmental Protection, Belgrade, Serbia.