

PRIMJENA GAMA ZRAČENJA NA SJEMENKE GRAHA (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) I NJEGOVI UČINCI NA RAST I RAZVOJ BILJAKA

MONIKA VIDAK^{1,2}, T. JAVORNIK^{1,2}, B. LAZAREVIĆ^{2,3},
KLAUDIJA CAROVIĆ-STANKO^{1,2}

¹Zavod za biljnu bioraznolikost, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet
Department of plant biodiversity, University of Zagreb Faculty of Agriculture
²Znanstveni centar izvrsnosti za bioraznolikost i molekularno oplemenjivanje bilja
Centre of excellence for biodiversity and molecular plant breeding
³Zavod za ishranu bilja, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet
Department of plant nutrition, University of Zagreb Faculty of Agriculture

SAŽETAK

Grah (*Phaseolus vulgaris* L.) ima visoku globalnu gospodarsku i nutritivnu vrijednost te je ključna mahunarka za ljudsku prehranu, osobito u zemljama s dugom tradicijom uzgoja. Proizvodnja je pod sve većim pritiskom klimatskih i agroekoloških ograničenja, što povećava potrebu za inovativnim metodama unapređenja prilagodljivosti i prinosa. Gama zračenje kao fizikalni mutagen pokazuje se učinkovitim alatom za povećanje genetske varijabilnosti i poboljšanje agronomskih svojstava. Istovremeno, napredak digitalnih tehnologija omogućio je razvoj fenotipizacije visoke propusnosti, koja znatno ubrzava i precizira detekciju ključnih fenotipskih promjena. Cilj ovog istraživanja bio je ispitati učinke niskih doza gama zračenja (100 i 150 Gy) na sjemenu tri hrvatska tradicijska kultivara graha ('Trešnjevac', 'Biser' i 'Zelenčec'). Istraživanje je provedeno 2021. i 2022. godine u plasteniku. Istraživanje je obuhvatilo nicanje biljaka, morfološke promjene te fiziološke reakcije praćene mjerenjima spektralnih svojstava i klorofilne fluorescencije. Prva generacija (2021. godina) pokazala je 100 % nicanje biljaka uz pojavu kimera i varijabilnosti listova, dok je razvoj plodova i sjemenki ostao stabilan. U drugoj generaciji (2022. godina) uočene su izraženije morfološke promjene, uključujući pojavu biljaka bez vegetacijskog vrha, dok su morfološki stabilne biljke dale normalan plod i sjeme. Mjerenjem klorofilne fluorescencije i multispektralnom analizom utvrđeno je da odgovor varira među kultivarima i ovisi o dozi zračenja. Niže doze zračenja (100 Gy) povećale su svojstva klorofilne fluorescencije kod 'Biser' i 'Trešnjevac', dok je kod 'Zelenčec' veća doza (150 Gy) poboljšala većinu svojstava; zasićenje boje poraslo je samo kod 'Trešnjevac' i 'Zelenčec' pri 150 Gy. Daljnja istraživanja trebala bi se usmjeriti na genotipsku stabilnost, ekspresiju mutacija i prijenos poželjnih osobina kroz više generacija.

Ključne riječi: fenotipizacija visoke propusnosti, nicanje, morfološka svojstva, tradicijski kultivari

UVOD

Globalni rizik od nesigurnosti hrane sve je izraženiji uslijed klimatskih promjena, rastuće populacije i neodrživih poljoprivrednih praksi, što naglašava hitnu potrebu za unaprjeđenjem strategija uzgoja i održivih pristupa u poljoprivredi (Çelik i Atak, 2017.; Mohammed i Feleke, 2022.). S obzirom na potrebu za otpornim i nutritivno bogatim kulturama koje doprinose sigurnosti hrane i očuvanju okoliša, grah se svojim svojstvima ističe kao strateška kultura s ključnom ulogom u održivim poljoprivrednim sustavima (Uebersax i sur., 2023.).

Grah (*Phaseolus vulgaris* L.) je najčešće konzumirana mahunarka u svijetu i ključna je vrsta iz porodice mahunarki za izravnu ljudsku prehranu (Murube i sur., 2021.; Uebersax i sur., 2023.). Njegova komercijalna vrijednost premašuje vrijednost svih ostalih mahunarki zajedno (OECD, 2015.). U 2023. godini, svjetska proizvodnja graha za zrno bila je veća od 28,5 milijuna tona na više od 37,7 milijuna hektara (FAOSTAT, 2025.). Osim ekonomske, grah ima i iznimnu nutritivnu vrijednost; bogat je bjelančevinama, prehrambenim vlaknima, mastima, vitaminima i mineralima (Broughton i sur., 2003.; Petry i sur., 2015.; Murube i sur., 2021.). Zbog gotovo potpune aminokiselinske kompozicije (osim ograničenog sadržaja metionina i cisteina, koji se nalaze u žitaricama), u kombinaciji sa žitaricama grah predstavlja funkcionalnu zamjenu za meso (Broughton et al., 2003.; Bennetau-Pelissero, 2018.). U Hrvatskoj je grah najraširenija mahunarka, a proizvodnja se temelji na tradicijskim kultivarima velike genetske i morfološke raznolikosti (Čupić i sur., 2012.; Vidak, 2019.). U Europi i na Bliskom istoku, grah je tradicionalno bio hrana siromašnih, često poznat kao „meso siromašnih“ (Semba i sur., 2021.). Također, grah ima veliku agroekološku važnost u svijetu jer doprinosi očuvanju bioraznolikosti, pospješuje plodnost tla putem simbiotske fiksacije dušika i podržava održive sustave proizvodnje (Uebersax i sur., 2023.). Proizvodnja graha često je ograničena klimatskim uvjetima i nepovoljnim agroekološkim čimbenicima, zbog čega se istražuju inovativne metode poboljšanja prilagodljivosti i prinosa (Broughton i sur., 2003.; Suárez i sur., 2020.).

Primjena alternativnih tehnika za unapređenje biljaka, poput mutacijskog oplemenjivanja, postaje sve važnija, pri čemu se zračenje pokazalo učinkovitim sredstvom za izazivanje korisnih genetskih promjena (Çelik i Atak, 2017.). Primjena fizikalnih mutagena, kao što je gama zračenje, u oplemenjivanju biljaka poznata je još od otkrića rendgenskih zraka krajem 19. stoljeća (Jan i sur., 2012.). Ionizirajuće zračenje može izravno izazvati fizičke, biološke i kemijske promjene u stanicama mijenjajući kemijsku prirodu molekula te može izazvati specifične promjene u genomu (Riviello-Flores i sur., 2022.). Smatra se učinkovitim i jedinstvenom metodom za povećanje genetske varijabilnosti biljnih vrsta jer može izazvati korisne mutacije koje poboljšavaju agronomske osobine, nutritivni sastav i toleranciju na stres (Çelik i Atak, 2017.). U nižim dozama (10–200 Gy), gama zračenje može stimulirati rast, klijavost i fotosintetske procese, dok više doze često smanjuju vitalnost biljaka i uzrokuju morfološke promjene u stanicama (Atteh i Adeyeye, 2022.).

Kako ionizirajuće zračenje može izazvati kompleksne genetske i fiziološke promjene, fenotipizacija visoke propusnosti postaje ključna za njihovu pravodobnu, preciznu i sveobuhvatnu detekciju. Fenotipizacija visoke propusnosti (eng. *high-throughput plant phenotyping*, HTP) obuhvaća suvremene digitalne i automatizirane metode za brzo i nedestruktivno praćenje fenotipskih svojstava. HTP uključuje primjenu kamera (spektralnih, hiperspektralnih i kamera za mjerenje klorofilne fluorescencije) koje precizno detektiraju i najsuptilnije promjene na biljkama, omogućavajući identifikaciju ključnih fenotipskih svojstava potrebnih za daljnje oplemenjivanje bilja (Javornik i sur., 2025.).

STUDIJA SLUČAJA: UTJECAJ GAMA ZRAČENJA NA RAST I RAZVOJ HRVATSKIH TRADICIJSKIH KULTIVARA GRAHA

Cilj ovog istraživanja bio je ispitati kako niske doze gama zračenja primijenjene na sjeme triju hrvatskih tradicijskih kultivara graha ('Trešnjevac', 'Biser' i 'Zelenčec') utječu na nicanje, rani rast i razvoj klijanaca.

ISTRAŽIVANJE

Biljni materijal i tretman gama zračenjem

Istraživanje je provedeno 2021. i 2022. godine u zaštićenom prostoru (plasteniku) Zavoda za sjemenarstvo (sada: Zavod za biljnu bioraznolikost) Sveučilišta u Zagrebu Agronomskog fakulteta. U istraživanju su korištena tri hrvatska tradicijska kultivara graha: 'Trešnjevac', 'Biser' i 'Zelenčec'. Sjeme svakog kultivara ozračeno je gama zračenjem u dozama od 100 i 150 Gy na Plant Breeding and Genetics Laboratory, Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture, Department of Nuclear Sciences and Applications, International Atomic Energy Agency, Vienna International Centre, Beč, Austrija. Odabrane doze temelje se na prethodnim istraživanjima o stimulativnim učincima niskih doza ionizirajućeg zračenja na rast i razvoj biljaka (Jan i sur., 2012.; Atteh i Adeyeye, 2022.). Kao kontrola korištene su neozračene sjemenke istih kultivara.

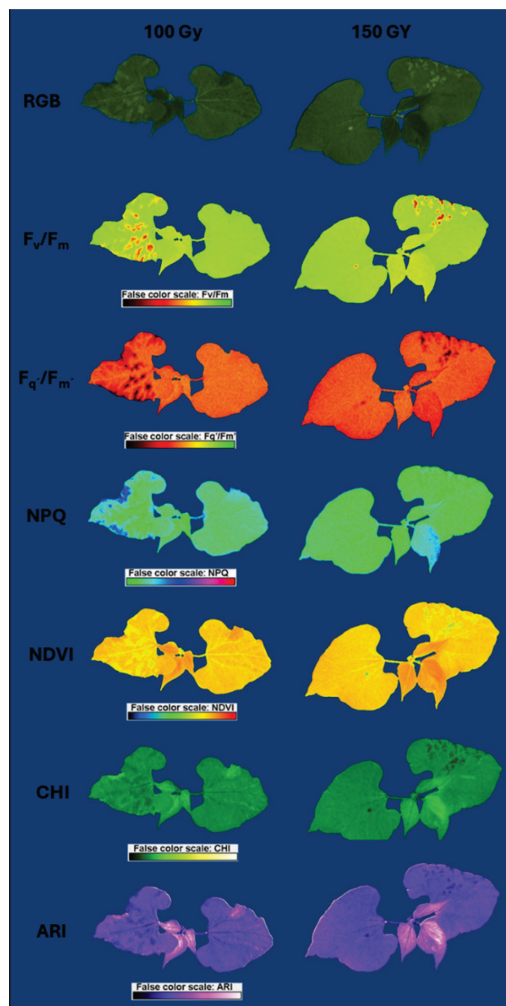
Sjetva i uzgoj biljaka

U svibnju 2021. godine ukupno 900 sjemenki graha (po 100 sjemenki za svaku kombinaciju kultivar × tretman i kontrolnih sjemenki svakog kultivara) posijano je u kontejnere od polistirena ispunjene supstratom Substrat 1 (Klasmann-Deilmann GmbH). Nicanje i početni rast biljaka odvijali su se na srednjoj dnevnoj temperaturi od 20 ± 2 °C. Osam dana nakon nicanja sadnice graha presađene su u 2 L posude sa 460 g supstrata Substrat 1 (Klasmann-Deilmann GmbH). Tijekom vegetacije biljke su navodnjavane po potrebi i održavane u standardnim agrotehničkim uvjetima. Rast i razvoj biljaka praćen je tijekom cijele vegetacije, a berba graha provedena je dvofazno, u srpnju i kolovozu 2021. godine.

Od biljaka prve generacije odabrano je sjeme s 30 ozračenih biljaka svakog kultivara (15 biljaka ozračenih sa 100 Gy i 15 biljaka ozračenih sa 150 Gy). U travnju 2022. godine su sjemenke druge generacije (M2), dobivene od plodova prethodne sezone, posijane u polistirenske kontejnere. Ukupno je posijano 90 tretiranih sjemenki (po 30 sjemenki za svaku kombinaciju kultivar × tretman kultivara 'Biser', 'Trešnjevac' i 'Zelenčec', uz jednak broj kontrolnih sjemenki za svaki kultivar). Postupak sjetve, presađivanja i njege biljaka bio je jednak kao u prethodnoj sezoni, a berba graha provedena je dvofazno u srpnju 2022. godine.

Fenotipska mjerenja: klorofilna fluorescencija i multispektralna analiza

Na drugoj generaciji biljaka (2022. godina) analizirani su parametri klorofilne fluorescencije kao i multispektralna svojstva pomoću fenotipizacijske komore CropReporter™ (PhenoVation B.V., Wageningen, Nizozemska) (Javornik i sur., 2024.). Analizirana svojstva prikazana su na Slici 1.



Slika 1. Multispektralne slike i slike klorofilne fluorescencije biljaka graha izloženih tretmanima zračenja 100 i 150 Gy. Multispektralna svojstva su prikazana kroz vidljivi dio spektra boja (RGB) te vegetacijske indekse: Normalizirani diferencijalni vegetacijski indeks (NDVI), indeks klorofila (CHI) i indeks antocijana (ARI). Slike klorofilne fluorescencije prikazuju: maksimalnu efikasnost fotosustava II (F_v/F_m), efektivnu efikasnost fotosustava II (F_q'/F_m') i nefotokemijsko čišćenje (NPQ).

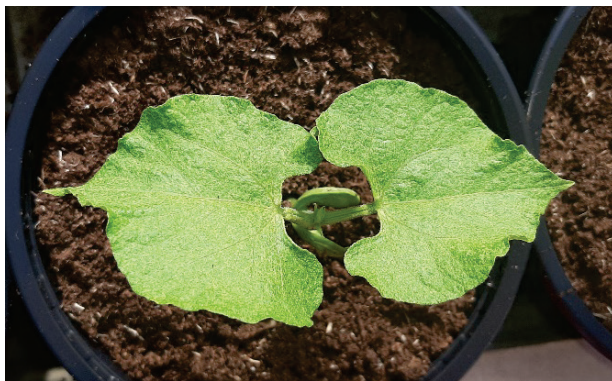
Figure 1 Multispectral images and chlorophyll fluorescence images of common bean plants exposed to radiation treatments of 100 and 150 Gy. The multispectral properties are presented through the visible colour spectrum (RGB) and vegetation indices: Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Chlorophyll Index (CHI), and Anthocyanin Reflectance Index (ARI). The chlorophyll fluorescence images show maximum efficiency of photosystem II (F_v/F_m), effective efficiency of photosystem II (F_q'/F_m'), and non-photochemical quenching (NPQ).

REZULTATI I RASPRAVA

U ovom istraživanju analizirani su učinci niskih doza gama zračenja primijenjenih na sjeme triju hrvatskih tradicijskih kultivara graha ('Trešnjevac', 'Biser' i 'Zelenčec') s fokusom na nicanje, rani rast i morfološke te fenotipske promjene biljaka graha.

Nicanje sjemenki graha, uključujući ozračene gama zračenjem (100 i 150 Gy) te neozračene (kontrolne) sjemenke, iznosilo je 100 %. Ovi rezultati ukazuju da niske doze gama zračenja nisu negativno utjecale na nicanje, što je u skladu s opažanjima specifične stimulacije rasta pri hormesis efektu, odnosno niske doze gama zračenja imale neutralan učinak na nicanje biljaka (Jan i sur., 2012.). U skladu s tim, Ulukapi i Ozmen (2018.) utvrdili su da različiti kultivari graha reagiraju različito na doze gama zračenja, pri čemu niske doze stimuliraju rast i razvoj, dok više doze izazivaju morfološke promjene i smanjenje preživljenja M1 biljaka. Suprotno tome, u istraživanju Roshdy i sur. (2023.) utvrđeno je da je zračenje sjemenki graha dozom od 100 Gy rezultiralo značajno nižom klijavošću sjemenki graha u usporedbi s kontrolom i nižim dozama zračenja (20–80 Gy). Slično tome, Nurmansyah i sur. (2017.) u svom su istraživanju na bobu (*Vicia faba* L.) utvrdili značajno nižu klijavost već pri nižim dozama zračenja (25 i 50 Gy) i to već u M1 generaciji.

Tijekom rasta, kod biljaka čije je sjeme ozračeno gama zračenjem uočene su vidljive abnormalnosti na listovima, što nije zabilježeno kod kontrolnih biljaka. Uočene su kimere na listovima (Slika 2.) te razlike u veličini i obliku listova na istoj biljci (Slika 3.) što je u skladu s rezultatima istraživanja Nurmansyah i sur. (2017.). Kimere predstavljaju fiziološki poremećaj koji se javlja kod graha u obliku različito obojenih nepravilnih pjega na listu (tamno do svijetlo zelene, žute ili bijele boje), a izazvane su genetskim abnormalnostima (Carović-Stanko i sur., 2022.). Tretman ozračivanjem nije imao vidljiv utjecaj na razvoj plodova i sjemenki, budući da su sve presađene biljke, uključujući kontrolne, razvile morfološki normalne generativne organe (Slika 4.). Jan i sur. (2012.) utvrdili su da gama zračenje sjemena može značajno utjecati na rast i razvoj biljaka, pri čemu niže doze često pokazuju stimulativne učinke na morfološke parametre, poput visine biljke i broja formiranih plodova, te mogu pridonijeti većem reproduktivnom uspjehu i boljoj tolerantnosti na stresne uvjete, uključujući nedostatak vode. Sličnu kultivarnu specifičnost reakcije na gama zračenje opisali su i Kotsyubinskaya i sur. (2025.).



Slika 2. Kimere na listovima graha ozračenog niskim dozama gama zračenja

Figure 2 Chimeras on the leaves of common bean plants irradiated with low doses of gamma radiation



Slika 3. Morfološke promjene na biljkama graha M1 generacije

Figure 3 Morphological changes in M1 generation common bean plants

U 2022. godini uočene su izraženije morfološke promjene na biljkama (Slika 4.). Biljke su razvijale prva dva jako velika lista, kod nekih biljaka je broj prvih listova bio tri, kod nekih biljaka je uočen fiziološki poremećaj nedostatka vegetacijskog vrha, odnosno čelavost (Slika 5.). One biljke, koje su se morfološki razvile, dale su normalan plod i sjeme.



Slika 4. Morfološke promjene na M2 generaciji

Figure 4 Morphological changes in M2 generation common bean plants



Slika 5. Poremećaj nedostatka vegetacijskog vrha

Figure 5 Vegetative apex deficiency disorder

Javornik i sur. (2024.) utvrdili su da su sva svojstva klorofilne fluorescencije biljaka bila značajno veća kod kultivara 'Biser' i 'Trešnjevac' kod biljaka čije je sjeme ozračeno sa 100 Gy u usporedbi sa 150 Gy, osim maksimalne efikasnosti fotosustava II (Fv/Fm) i kvantnog prinosa gubitka neregulirane nefotokemijske energije u fotosustavu II (Φ_{no}), gdje je veća doza zračenja povećala ove osobine. U slučaju kultivara

'Zelenčec', kod biljaka čije je sjeme ozračeno sa 150 Gy bila su povećana sva svojstva klorofilne fluorescencije u usporedbi sa 100 Gy, osim svojstva Fv/Fm, gdje je niža doza zračenja imala značajniji utjecaj. Od multispektralnih svojstava, jedino je kod saturacije (zasićenje boje) zabilježena značajna razlika; porast saturacije zabilježen je na biljkama čije je sjeme ozračeno sa 150 Gy kod kultivara 'Trešnjevac' i 'Zelenčec'. Dobiveni rezultati upućuju na to da različite doze gama zračenja značajno mijenjaju učinkovitost iskorištavanja svjetlosne energije i stabilnost fotosustava II te ukazuju na promjene u sadržaju fotosintetskih pigmenta.

Ovi rezultati potvrđuju da učinci gama zračenja ovise o kultivaru, dozi i generaciji biljke. Studija pruža uvid u reakcije hrvatskih tradicijskih kultivara graha na niske doze gama zračenja i može poslužiti kao temelj za daljnje istraživanje mutacijskog oplemenjivanja biljaka i optimizaciju proizvodnje graha.

ZAKLJUČAK

Rezultati pokazuju da gama zračenje, unatoč izazivanju određenih morfoloških abnormalnosti, ne sprječava nicanje ni plodnost biljaka graha. Rezultati sugeriraju da niske doze gama zračenja mogu djelovati stimulativno, čime se potencijalno unapređuje adaptabilnost i stabilnost uroda, bez značajnijeg negativnog utjecaja na nicanje i reproduktivni potencijal. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na genotipsku stabilnost, ekspresiju mutacija i prijenos poželjnih osobina kroz više generacija, kako bi se preciznije odredile optimalne doze i uvjeti primjene gama zračenja. Dodatno, istraživanja na drugim biljnim vrstama mogla bi pomoći u procjeni šire primjenjivosti ove metode u mutacijskom oplemenjivanju i održivoj poljoprivrednoj proizvodnji.

APPLICATION OF GAMMA RADIATION ON COMMON BEAN (*PHASEOLUS VULGARIS* L.) SEEDS AND ITS EFFECTS ON PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT

SUMMARY

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) has high global economic and nutritional value and is a key legume for human consumption, especially in countries with a long tradition of cultivation. Production is increasingly challenged by climatic and agroecological constraints, highlighting the need for innovative methods to improve adaptability and yield. Gamma radiation as a physical mutagen has proven to be an effective tool for increasing genetic variability and improving agronomic traits. At the same time, advances in digital technologies have enabled the development of high-throughput phenotyping, which significantly accelerates and refines the detection of key phenotypic changes. The aim of this study was to investigate the effects of low doses of gamma radiation (100 and 150 Gy) on the seeds of three Croatian landraces ('Trešnjevac', 'Biser', and 'Zelenčec').

The study was conducted in 2021 and 2022 in a greenhouse at the University of Zagreb Faculty of Agriculture, Department of Plant Biodiversity. Seed germination, morphological changes, and phenotypic traits, including chlorophyll fluorescence and multispectral properties, were analyzed. The first generation (2021) showed 100 % germination with the appearance of chimeras and leaf variability, while pod and seed development remained stable. In the second generation (2022), more pronounced morphological changes were observed, including plants lacking a vegetative apex, while morphologically stable plants produced normal pods and seeds. By measuring chlorophyll fluorescence and performing multispectral analysis, it was determined that the response varies among cultivars and depends on the radiation dose. Lower radiation doses (100 Gy) increased chlorophyll fluorescence in 'Biser' and 'Trešnjevac', whereas in 'Zelenčec' higher doses (150 Gy) improved most traits; color saturation increased only in 'Trešnjevac' and 'Zelenčec' at 150 Gy. Further research should focus on genotypic stability, mutation expression, and the transmission of desirable traits across multiple generations.

Keywords: germination, high-throughput phenotyping, landraces, morphological traits

LITERATURA

1. Atteh, A.; Adeyeye, A. (2022.). Effect of Low Gamma Irradiation on the Germination and Morphological Characteristics of Broad Beans (*Vicia faba* L.), Mung Beans (*Vigna radiata* L.), and Peas (*Pisum sativum* L.) Seedlings. *Natural Resources*, 13 (5): 105–125. DOI: <https://doi.org/10.4236/nr.2022.135008>
2. Bennetau-Pelissero, C. (2018.). Plant proteins from legumes. U: *Bioactive Molecules in Food. Reference Series in Phytochemistry* (Mérillon, J. M., Ramawat, K., ur.), 2–34. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54528-8_3-1
3. Broughton, W. J., Hernández, G., Blair, M., Beebe, S. Gepts, P., Vanderleyden, J. (2003.). Beans (*Phaseolus* spp.) – model food legumes. *Plant and Soil*, 252: 55–128. <https://doi.org/10.1023/A:1024146710611>
4. Carović-Stanko, K., Gunjača, J., Lazarević, B., Vidak, M. (2022.). Čarobni grah. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet i Znanstveni centar izvrsnosti za bioraznolikost i molekularno oplemenjivanje bilja (CroP-BioDiv).
5. Çelik, Ö., Atak, Ç. (2017.) Applications of Ionizing Radiation in Mutation Breeding. U: *New Insights on Gamma Rays* (Maghraby, A. M., ur.). London: InTechOpen Limited. <http://dx.doi.org/10.5772/66925>
6. Čupić, T., Gantner, R., Popović, S., Tucak, M., Sudar, R., Stjepanović, M. (2012.). Rasprostranjenost jednogodišnjih mahunarki u Hrvatskoj. U: *Proceedings & abstracts of the 5th international scientific/professional conference Agriculture in nature and environment protection* (Stipešević, B., Sorić, R., ur.), Osijek: Glas Slavonije d.d., 220–225.

7. FAO STAT (2025.). Food and Agriculture Organization of the United Nation, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
8. Jan, S., Parween, T., Siddiqi, T. O., Mahmooduzzafar (2012.). Effect of gamma radiation on morphological, biochemical, and physiological aspects of plants and plant products. *Environmental Reviews*, 20 (1): 17–39.
9. Javornik, T., Carović-Stanko, K., Gunjača, J., šatović, Z., Vidak, M., Safner, T., Lazarević, B. (2025.). Phenotyping Common Bean Under Drought Stress: High-Throughput Approaches for Enhanced Drought Tolerance. *Agronomy*, 15: 1344. <https://doi.org/10.3390/agronomy15061344>
10. Javornik, T., Lazarević, B., Vidak, M., Carović-Stanko, K. (2024.). Influence of gamma radiation on traditional common bean landraces. Book of abstracts of 59th Croatian & 19th International Symposium on Agriculture (Carović-Stanko, K., Kljak, K., ur.), 23 str., 11 – 16 veljače 2024., Dubrovnik.
11. Kotsyubinskaya, O. A., Bondarenko, E., Kazydub, N. G., Blinova, Ya. A. (2025.). Effect of gamma irradiation of seeds on the development of *Phaseolus vulgaris* L. plants. *Vegetable Crops of Russia*, 1: 37–44. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2025-1-37-44>
12. Mohammed, A., Feleke, E. (2022.). Future climate change impacts on common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) phenology and yield with crop management options in Amhara Region, Ethiopia. *CABI Agriculture and Bioscience*, 3 (29): 1–14. <https://doi.org/10.1186/s43170-022-00103-9>
13. Murube E, Beleggia R, Pacetti D, Nartea A, Frascarelli G, Lanzavecchia G, et al. (2021.). Characterization of nutritional quality traits of a common bean germplasm collection. *Foods*, 10 (7): 1572. <https://doi.org/10.3390/foods10071572>
14. Nurmansyah, Alghamdi, S. S., Migdadi, H. M. Farooq, M. (2018.). Morphological and chromosomal abnormalities in gamma radiation-induced mutagenized faba bean genotypes. *International journal of radiation biology*, 94 (2): 174–185. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1409913>
15. OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) (2015.). Consensus Document on the Biology of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). OECD Environment, Health and Safety Publications, Series on Harmonisation of Regulatory Oversight in Biotechnology No. 47. Pariz: OECD Publishing. [https://one.oecd.org/document/env/jm/mono\(2015\)47/en](https://one.oecd.org/document/env/jm/mono(2015)47/en)
16. Petry, N.; Boy, E.; Wirth, J. P.; Hurrell, R. F. (2015.). Review: The Potential of the Common Bean (*Phaseolus vulgaris*) as a Vehicle for Iron Biofortification. *Nutrients*, 7: 1144–1173. <https://doi.org/10.3390/nu7021144>
17. Riviello-Flores, M. d. I. L.; Cadena-Iñiguez, J.; Ruiz-Posadas, L. d. M.; Arévalo-Galarza, M. d. L.; Castillo-Juárez, I.; Soto Hernández, M.; Castillo-Martínez, C. R. (2022.). Use of Gamma Radiation for the Genetic Improvement of Underutilized Plant Varieties. *Plants*, 11: 1161. <https://doi.org/10.3390/plants11091161>

18. Roshdy, A. E.-D. H., Abd El-Wahab, G. M. M., Abdel-Hamid, F. H. R. (2023.). Impact of using gamma irradiation on germination, growth, yield, and enzymes activity under damping-off disease stress in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Fayoum Journal of Agricultural Research and Development*, 37 (2): 359–373. <https://doi.org/10.21608/fjard.2023.297707>
19. Semba, R. D., Ramsing, R., Rahman, N., Kraemer, K. Bloem, M. W. (2021.). Legumes as a sustainable source of protein in human diets. *Global Food Security*, 28: 100520. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2021.100520>
20. Suárez, J.C., Polanía, J.A., Contreras, A.T. *et al.* (2020). Adaptation of common bean lines to high temperature conditions: genotypic differences in phenological and agronomic performance. *Euphytica*, 216: 28. <https://doi.org/10.1007/s10681-020-2565-4>
21. Uebersax, M. A., Cichy, K. A., Gomez, F. E., Porch, T. G., Heitholt, J., Osorno, J. M., Kamfwa, K., Snapp, S. S., & Bales, S. (2023.). Dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) as a vital component of sustainable agriculture and food security - A review. *Legume Science*, 5 (1), e155. <https://doi.org/10.1002/leg3.155>
22. Ulukapi, K., Ozmen, S. F. (2018.). Study of the effect of irradiation (^{60}Co) on M_1 plants of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars and determined of proper doses for mutation breeding. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11(2): 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.12.004>
23. Vidak, M. (2019.). Podrijetlo i raznolikost hrvatskih tradicijskih kultivara graha (*Phaseolus vulgaris* L.). Doktorski rad. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.

Adresa autora - Authors' address:

doc. dr. sc. Monika Vidak*
E-mail: mvidak@agr.hr
Tomislav Javornik, mag. ing. agr.
E-mail: tjavornik@agr.hr
izv. prof. dr. sc. Boris Lazarević
E-mail: blazarevic@agr.hr
prof. dr. sc. Klaudija Carović-Stanko
E-mail: kcarovic@agr.hr

Primljeno - Received:

27.11.2025.

Revidirano – Revised:

10.02.2026.

Prihvaćeno - Accepted:

10.03.2026.

Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet,
Sveošimunska cesta 25, 10000 Zagreb.
Znanstveni centar izvrsnosti za bioraznolikost i molekularno oplemenjivanje bilja,
Sveošimunska cesta 25, 10000 Zagreb