Sanja Radman[1], Sanja Fabek Uher[1], Jana Šic Žlabur[1], Božidar Benko[1], Nevena Opačić[1] ***Stručni rad***

Hidroponski uzgoj šafrana

Sažetak

Klimatske promjene sve snažnije utječu na stabilnost proizvodnje šafrana (Crocus sativus L.), jednog od najvrjednijih začina na svijetu, čime se nameće potreba za primjenom inovativnih i održivih sustava uzgoja. Tradicionalni načini uzgoja na otvorenom otežano se prilagođavaju klimatskim varijacijama, što dovodi do smanjenih i nestabilnih prinosa, ograničene ponude te slabije konkurentnosti na tržištu. Visoka tržišna vrijednost šafrana rezultat je njegovih specifičnih i zahtjevnih uvjeta uzgoja, koji su izrazito osjetljivi na vanjske čimbenike i ograničenja konvencionalne poljoprivrede. Kao održiva alternativa, sve veći značaj dobiva uzgoj u zaštićenom prostoru uz primjenu suvremenih hidroponskih tehnika. Uzgoj bez supstrata osigurava čišći biljni materijal i značajno smanjuje rizik od bolesti koje se prenose tlom, čime se povećava zdravstvena ispravnost i kvaliteta proizvoda. Takvi sustavi omogućuju preciznu kontrolu okolišnih čimbenika te učinkovito korištenje vode i hranivih tvari, uz istodobno smanjenje negativnog utjecaja na okoliš. Proizvodnja u potpuno kontroliranim i automatiziranim uvjetima, uz mogućnost integracije sustava nadzora temeljenih na IoT tehnologiji, dodatno doprinosi smanjenju proizvodnih rizika, optimizaciji korištenja resursa te preciznom upravljanju rastom i razvojem šafrana. Time se postiže stabilna, ujednačena i visokokvalitetna proizvodnja, u velikoj mjeri neovisna o vanjskim klimatskim oscilacijama. Poseban naglasak pritom se stavlja na optimizaciju uzgojnih uvjeta s ciljem maksimiziranja prinosa i kvalitete stigmi, koje predstavljaju komercijalno najvrjedniji dio biljke. Kontrolom sastava hranive otopine, primjenom kontroliranog sušnog stresa te prilagodbom svjetlosnog spektra i fotoperioda moguće je utjecati na rast, razvoj i nakupljanje bioaktivnih spojeva, osobito karotenoida. Preostala biomasa može se iskoristiti za ekstrakciju vrijednih fenolnih spojeva, čime se potiče cjelovito iskorištavanje sirovine temeljeno na načelima kružnog gospodarstva.

Primjena suvremenih hidroponskih sustava u kontroliranim uvjetima predstavlja učinkovit model održive proizvodnje šafrana te doprinosi diversifikaciji poljoprivredne proizvodnje. Ovakav pristup otvara mogućnosti uzgoja šafrana i u regijama u kojima se tradicionalno ne uzgaja, uz istodobno povećanje konkurentnosti i stabilnosti proizvodnje na globalnom tržištu.

Ključne riječi: *ljekovito i aromatično bilje, kontrolirani uzgoj, održiva poljoprivreda, klimatske promjene, diverzifikacija proizvodnje, šafran*

1 izv. prof. dr. sc. ***Sanja Radman****, izv. prof. dr. sc.* ***Sanja Fabek Uher****, izv. prof. dr. sc.* ***Jana Šic Žlabur****, prof. dr. sc.* ***Božidar Benko****, dr. sc.* ***Nevena Opačić****, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, Svetošimunska cesta 25, Zagreb, Hrvatska*
Autor za koresponednciju: ***sradman@agr.hr***

Uvod

Uzgoj aromatičnog i ljekovitog bilja (ALJB) ima značajan potencijal u Republici Hrvatskoj, ponajprije zbog sve veće potražnje za takvim proizvodima na tržištu. Unatoč tome, sirovina (biljna droga) se još uvijek u velikoj mjeri osigurava uvozom, najčešće iz trećih zemalja, ili sakupljanjem samoniklih biljnih vrsta s prirodnih staništa, što često rezultira nestandardiziranim i kvalitativno neujednačenim biljnim materijalom. Osim toga, nekontrolirano ili nepravilno sakupljanje može uzrokovati degradaciju prirodnih staništa te negativno utjecati na bioraznolikost. Dodatni problem predstavlja nedovoljno poznavanje biljnih vrsta kod sakupljača, što povećava mogućnost zamjene morfološki sličnih ili srodnih vrsta. Sakupljanje samoniklog bilja također je regulirano sustavom dozvola i kvota, što dodatno naglašava važnost razvoja organiziranog i kontroliranog uzgoja ljekovitog i aromatičnog bilja.

Prema dostupnim podacima, proizvodnja ALJB se trenutno odvija na oko 7000 hektara, s naglaskom na manja obiteljska poljoprivredna gospodarstva (DZS, 2025.). Dominira kamilica (*Matricaria chamomilla* L.), koja zauzima približno 90 % ukupnih površina pod ljekovitim biljem, dok se na preostalim površinama u manjoj mjeri uzgaja paprena metvica (*Mentha×piperita* L.), lavanda (*Lavandula angustifolia Mill.*), lavandin (*Lavandula × intermedia* Emeric ex Loisel.) i matičnjak (*Melissa officinalis* L.). Stalne promjene zahtjeva tržišta te sve veća potražnja za novim proizvodima nameću potrebu za introdukcijom novih biljnih vrsta, koje se tradicionalno sakupljaju kao samonikle ili se uzgajaju konvencionalnim poljoprivrednim tehnikama na otvorenom. Međutim, konvencionalna poljoprivredna proizvodnja suočava se s brojnim izazovima, ponajprije zbog sve izraženijih klimatskih promjena, što dovodi u pitanje stabilnost proizvodnje, konkurentnost i dugoročnu održivost opskrbe tržišta, kao i proizvodnju ujednačenog i kvalitetnog biljnog materijala (Voća i sur., 2023.). Sve veći naglasak stavlja se na introdukciju biljnih vrsta visoke nutritivne i funkcionalne vrijednosti koje se dobro prilagođavaju uzgoju u kontroliranim uvjetima te omogućuju održiv i ekonomski isplativ uzgoj (Opačić i sur., 2022.). Prednosti introdukcije i kontroliranog uzgoja ALJB su višestruke: osiguravanje ujednačene kvalitete biljne sirovine; mogućnost planiranja proizvodnje i kontinuirane opskrbe tržišta; smanjenje nekontroliranog sakupljanja iz prirode i degradacije staništa; primjena suvremenih tehnologija uz precizno upravljanje agrotehničkim čimbenicima tijekom uzgoja. Dodatno, introdukcija novih izvora hrane otvara mogućnost povećanja konkurentnosti na tržištu kroz ponudu visokovrijednih i specijaliziranih proizvoda. Primjenom prilagođene tehnologije uzgoja i suvremenih proizvodnih tehnika otvara se mogućnost uzgoja i onih biljnih vrsta koje nisu prirodno prilagođene umjerenom klimatskom pojasu. Među takvim vrstama posebno se ističe šafran (*Crocus sativus* L.), iznimno cijenjena biljka od koje se dobiva jedan od najskupljih začina na svijetu, često popularno nazivan „crveno zlato“. U posljednjem desetljeću šafran se sve češće uzgaja kao visokovrijedna kultura koja poljoprivrednicima može omogućiti diversifikaciju proizvodnje i stabilniji izvor prihoda (Caser i sur., 2019.).

Šafran kao začin

Važno je razlikovati ukrasni proljetni šafran (*Crocus vernus* (L.) Hill subsp. *vernus*, porodica Iridaceae), koji u klimatskim uvjetima Republike Hrvatske cvjeta u rano proljeće (Kremer, 2018), od pravog ili kultiviranog šafrana (*Crocus sativus* L., porodica Iridaceae). *Crocus sativus* ima specifične zahtjeve za uzgoj te cvjeta u jesen. Smatra se da potječe iz područja Grčke i Irana, gdje se tradicionalno uzgaja u regijama s umjerenom do suhom klimom, na nadmorskim visinama do oko 1 800 m. Dominantan proizvođač šafrana u svijetu je Iran, s više od 95



Slika 1. Ručna berba cvjetova šafrana (*Crocus sativus*), (Sanja Radman)
Figure 1. Manual harvesting of saffron (*Crocus sativus* L.) flowers, (Sanja Radman)



Slika 2. Lukovice šafrana (*Crocus sativus* L.), (Sanja Radman)
Figure 2. Saffron bulbs (*Crocus sativus* L.), (Sanja Radman)



Slika 3. Stigme tuška šafrana (*Crocus sativus* L.), (Sanja Radman)
Figure 3. Saffron stigmas (*Crocus sativus* L.), (Sanja Radman)

% globalne proizvodnje, te potom slijede Indija i Kina. U Europi uzgoj je najrašireniji u Italiji, Španjolskoj, Grčkoj, Francuskoj i Velikoj Britaniji (Ziani i sur., 2025.). Za razliku od proljetnog šafrana, *Crocus sativus* razvija dugačke, crvene i nitaste njuške tučka (stigme) koje se beru i suše te predstavljaju osnovnu sirovinu za dobivanje začina šafrana (*Stigma Croci*). Osim kao začin, šafran je cijenjen i zbog svojih biološki aktivnih spojeva, zbog čega nalazi primjenu u farmaceutskoj i kozmetičkoj industriji.

Osim ograničene dostupnosti i specifičnih zahtjeva za rast, visoku cijenu šafrana uvjetuje radno intenzivan proces proizvodnje. Uzgoj uključuje pažljivu sadnju lukovica, ručnu berbu cvjetova (Slika 1) te složen i dugotrajan postupak izdvajanja njuški tučka (stigmi), koje čine osnovnu sirovinu za začin (Dewir i sur., 2022.; Nardi i sur., 2022.).

Svaki cvijet sadrži tri stigme koje daju približno 5 miligrama suhe mase, što znači da je za proizvodnju jednog kilograma suhih stigmi potrebno između 110 000 i 165 000 cvjetova te više od 400 sati rada (Caser i sur., 2019.). Berba se odvija samo jednom godišnje u kasnu jesen, a uzgoj je moguć isključivo u specifičnim klimatskim uvjetima, što dodatno ograničava broj pogodnih lokacija.

U većini slučajeva uzgoj se provodi na otvorenom, primjenom konvencionalnih agronomskih praksi, čime je proizvodnja izložena rizicima klimatskih promjena, što posebno utječe na prinos stigmi. Smanjena količina oborina, porast temperature te degradacija tla dovode do smanjenja prinosa cvjetova, što proizvodnju čini manje isplativom i nedostatnom za zadovoljavanje rastuće potražnje na globalnom tržištu (El Merzougui i sur., 2024.; Farahani i sur., 2024.). Upravo zbog ograničene dostupnosti i složenosti uzgoja, na tržištu se često mogu pojaviti patvorine šafrana, najčešće u obliku dijelova kurkume ili indijskog šafrana (*Curcuma longa* L.), šafranike (*Carthamus tinctorius* L.) ili nevena (*Calendula officinalis* L.).

Morfološka i biološka svojstva

Kultivirani šafran je višegodišnja lukovičasta biljka, triploidna i sterilna, što znači da se razmnožava isključivo vegetativno pomoću lukovica promjera 2,5–5 cm (Slika 2).

Vegetativno razmnožavanje doprinosi standardizaciji i genetskoj uniformnosti biljaka, što omogućuje proizvodnju materijala sa stabilnim kemijskim sastavom, osobito u pogledu koncentracije karotenoida i drugih bioaktivnih spojeva, važnih za kvalitetu začina (Zubor i sur., 2003.). S druge strane, ovaj način razmnožavanja zahtijeva nabavu lukovica koje se beru samo u ograničeno vrijeme u godini (početkom ljeta), što predstavlja logistički izazov i povećava ovisnost uzgajivača o dostupnosti sadnog materijala. Cvjetovi šafrana cvatu u jesen i imaju ljubičaste ili purpurne perigone iz kojih izlaze tri izrazito crvene, nitaste strukture – stigme (Slika 3), povezane s dugim žutim vratom tučka (stilus), (Ziani i sur., 2025.).

Svaka lukovica razvija jedan do četiri cvijeta godišnje, pri čemu svaki cvijet sadrži tri prašnika, koji se obično ne koriste jer ne utječu na kvalitetu začina. Za razliku od većine biljaka, šafran ima obrnut biološki ciklus – cvjeta u listopadu i studenom, dok se vegetativno razvija od zime do svibnja. Generativna faza prethodi vegetativnoj fazi, a razvoj listova i lukovica ključan je za proizvodnju novog sadnog materijala, odnosno za vegetativnu reprodukciju u sljedećoj sezoni (Naseri i sur., 2025.).

Kemijski sastav

Posebna vrijednost šafrana upravo proizlazi iz bogatog sastava bioaktivnih spojeva sadržanih u stigmi koji pridonose boji, okusu, ali i funkcionalnoj vrijednosti. Tri su spoja primarno pokazatelji kvalitete šafrana, a to su krocin, pikrokrocin i safranal (Caser i sur., 2019.). Krocin je karotenoid odgovoran za karakterističnu žuto-narančastu boju, a pokazuje snažna antioksidativna svojstva te je povezan s neuroprotektivnim i antikancerogenim svojstvima šafrana (Lachmas i sur., 2017.; Lachguer i sur., 2024.). Pikrokrocin pridonosi senzornom profilu dajući mu karakterističnu gorčinu, a ujedno je i prekursor safranala, hlapljivog spoja koji šafranu daje karakterističnu aromu, a njegov sadržaj u stigmama uvelike ovisi o uvjetima kasnije dorade postupkom sušenja i čuvanja (Mzabri i sur., 2019.). Istraživanja ukazuju da upravo zbog safranala šafran ima snažna antioksidativna i antidepresivna svojstva. Uz navedeno šafran sadrži i druge karotenoide poput zeaksantina i likopena, a-karotena, b-karotena i dr., zatim flavonoide poput kempferola te vitamine (primarno B, C i E), što pridonosi farmakološkoj i nutritivnoj vrijednosti (Lachmas i sur., 2017.; Lachguer i sur., 2024.; Mzabri i sur., 2019.; Othman i sur., 2020.).

Osim stigmi, i ostali dijelovi šafrana, poput latica i listova, bogati su bioaktivnim spojevima, uključujući flavonoide, polifenole i karotenoide (Baba i sur., 2015.; Al-Snafi, 2016.; Mykhailenko i sur., 2021.; Stelluti i Scariot, 2024.). S obzirom da je primarni cilj uzgoja šafrana stigma, značajan dio nadzemne biomase ostaje neiskorišten. Industrija šafrana time generira značajne količine nusproizvoda koji se najčešće tretiraju i zbrinjavaju kao biootpad iako potencijalno pokazuju dodanu vrijednost s obzirom na visok udio biaoktivnih spojeva te bi trebalo razmotrit segment valorizacije nusproizvoda šafrana nakon uklanjanja stigmi.

Hidroponski uzgoj šafrana

Suvremeni pristupi uzgoju šafrana usmjereni su na identifikaciju optimalnih uvjeta rasta, primjenu arbuskularnih mikoriznih gljiva i rizobakterija koje mogu značajno unaprijediti usvajanje hraniva, rast i razvoj biljaka (Caser i sur., 2019.; Stelluti i Scariot, 2024.). Uz to, istražuju se postupci vernalizacije, odnosno izlaganja biljaka niskim temperaturama (Slika 4), s ciljem ubrzavanja i sinkronizacije cvatnje (Molina i sur., 2005.), kao i unapređenje tehnika razmnožavanja, primjerice metodama kulture tkiva.





Slika 4. Šafran nakon vernalizacije (Sanja Radman)
Figure 4 Saffron plants after vernalization (Sanja Radman)

Slika 5. Uzgoj šafrana u NFT hidroponskoj tehnici (Sanja Radman)
Figure 5 Growing saffron in NFT system (Sanja Radman)

Važan cilj suvremenih istraživanja je i povećanje prinosa stigmi uz istodobnu maksimalnu akumulaciju bioaktivnih spojeva poput krocina, pikrokrocina i safranala, koji određuju kvalitetu šafrana (Nardi i sur., 2022.; Farahani i sur., 2024.). U tom kontekstu istraživanja primjene LED rasvjete ukazuju na njezin značajan potencijal u regulaciji rasta biljaka i sinteze sekundarnih metabolita. Budući da šafran pripada biljkama kratkog dana, dulji fotoperiod može inhibirati cvatnju, dok kraći potiče formiranje cvjetnih pupova (Li i sur., 2024.). U cilju postizanja stabilnije proizvodnje i viših prinosa, uzgoj šafrana u zaštićenim prostorima (ZP) te primjena suvremenih hidroponskih sustava predstavljaju perspektivne pristupe (Kour i sur., 2022.; Schroeder i sur., 2020.). Uzgoj u ZP omogućuje preciznu kontrolu i upravljanje agrotehničkim čimbenicima, čime se osiguravaju optimalni uvjeti za rast biljaka, povećava prinos i osigurava visoka kvaliteta biljnog materijala. Hidroponski sustavi dodatno uklanjaju neka od ograničenja uzgoja na otvorenom, poput opasnosti od kontaminacije tla. Odlikuju se učinkovitim korištenjem vode i hraniva, niskim utjecajem na okoliš te mogućnošću precizne i uravnotežene ishrane biljaka prema specifičnim potrebama uzgajane vrste, čime se osiguravaju visok prinos i kvalitetna sirovina (Opačić i sur., 2022.).

Zahvaljujući mogućnosti precizne kontrole abiotičkih čimbenika zraka (temperatura i relativna vlaga zraka) te parametara hranive otopine (pH i električna provodljivost – EC), hidroponski sustavi pružaju prikladnu osnovu za prilagodbu specifičnim biološkim karakteristikama i ekološkim zahtjevima šafrana, čime se značajno poboljšavaju uvjeti njegova uzgoja (Dewir i sur., 2022.).

Hraniva otopina predstavlja jedan od ključnih elemenata hidroponske proizvodnje, budući da se biljne vrste mogu značajno razlikovati u usvajanju pojedinih hranivih tvari. Na taj proces utječu brojni abiotički čimbenici zraka, poput temperature, relativne vlage zraka, intenziteta svjetlosti i koncentracije CO_2, kao i parametri hranive otopine, uključujući temperaturu, pH vrijednost, električnu provodljivost i sadržaj otopljenog kisika. Uz navedene čimbenike, važnu ulogu imaju i biotički čimbenici, poput razvojne faze biljke te prisutnosti štetnih organizama.

Šafran (*Crocus sativus* L.) razvija podzemni organ – lukovicu, koja je osjetljiva na prekomjernu vlagu i slabu aeraciju supstrata, pa se u konvencionalnom uzgoju često javljaju problemi povezani s truležima i patogenima iz tla. Zbog toga se može pretpostaviti da su hidroponski sustavi, koji omogućuju dobru kontrolu vlažnosti, opskrbe kisikom i dostupnosti hraniva, posebno prikladni za njegov uzgoj.

Među njima se osobito ističu sustavi dotjecanja i otjecanja (ebb and flow technique – EFT), tehnika hranivog filma (nutrient film technique – NFT) te aeroponski sustav (aeroponics system – AES), koji omogućuju učinkovitu opskrbu biljaka vodom i hranivima uz istodobno održavanje dobre aeracije korijenske zone.

Sustav dotjecanja i otjecanja (EFT) temelji se na cikličkom poplavljivanju korijenovog sustava biljaka hranivom otopinom u određenim vremenskim intervalima. Takav pristup omogućuje kontroliranu i ravnomjernu opskrbu biljaka vodom, hranivim tvarima i kisikom. Nakon određenog vremenskog razdoblja, koje se programira ovisno o zahtjevima uzgajane vrste, hraniva otopina se odvodi iz uzgojnog sustava. Ova metoda temelji se na izmjeni razdoblja dostupnosti hranive otopine i suhih razdoblja tijekom kojih su biljke izložene blagom vodnom stresu. Jedna od ključnih prednosti sustava je sprječavanje zadržavanja hranive otopine i posljedičnog nakupljanja soli u zoni korijena, što doprinosi zdravom rastu i razvoju lukovica šafrana. Regulacija vremenskog intervala između dva navodnjavanja (kontrolirani vodni stres) može pozitivno utjecati na morfološka i nutritivna svojstva biljaka, ovisno o njegovu trajanju, genetskim svojstvima biljnog materijala te fenološkoj fazi biljke (Opačić i sur., 2022.).

Tehnika hranivog filma (NFT) predstavlja hidroponsku tehniku u kojoj tanak sloj hranive otopine kontinuirano teče duž korijenovog sustava biljaka (Slika 5). Ovakav sustav omogućuje stalnu opskrbu hranivim tvarima uz istodobno osiguravanje dovoljne količine kisika u zoni korijena. Preciznom regulacijom sastava hranive otopine i njezine temperature moguće je optimizirati rast i razvoj biljaka te smanjiti rizik od pojave stresa i bolesti (Opačić i sur., 2022.).

Aeroponika je hidroponska metoda uzgoja u kojoj se korijenje biljaka opskrbljuje hranivom otopinom raspršenom u obliku sitnih kapljica ili maglice. Ovakav način opskrbe omogućuje maksimalnu dostupnost kisika korijenskom sustavu, što rezultira bržim rastom i razvojem biljaka, većim prinosima te općenito zdravijim biljkama (Kour i sur., 2022.). Zbog svoje učinkovitosti aeroponski sustavi posebno su pogodni za visokotehnološke proizvodne sustave i urbanu poljoprivredu, gdje su prostor i resursi ograničeni.

Iako se hidroponski uzgoj šafrana istražuje posljednjih dvadesetak godina (Caser i sur., 2019.; Molina i sur., 2005.; Maggio i sur., 2006.; Valenzuela i sur., 2024.), njegova primjena u praksi još uvijek je relativno ograničena u usporedbi s tradicionalnim uzgojem na tlu.

Budući da se radi o sustavima uzgoja bez tla, odabir odgovarajućeg supstrata ima ključnu ulogu. Kao što je već navedeno, šafran je osjetljiv na prekomjernu vlagu u zoni korijena, što može uzrokovati trulež lukovica i značajno smanjenje prinosa (Bhagat i sur., 2022.; Mirghasempour i sur., 2022.; Zhang i sur., 2022.). Važno je koristiti dobro drenirane supstrate te pažljivo kontrolirati razinu vlage kako bi se smanjio rizik od razvoja patogena. Prema dostupnoj literaturi kao prikladni supstrati za uzgoj šafrana navode se vermikulit, perlit, mješavine treseta i perlita te kokosova vlakna (Maggio i sur., 2006.; Dewir i sur., 2022.; Naseri i sur., 2025.).

Zaključak

Zaključno, šafran pokazuje značajan potencijal za uzgoj u klimatskim uvjetima jugoistočne i srednje Europe, uključujući područje Hrvatske, gdje umjereno-kontinentalna klima s toplim ljetima i relativno hladnim zimama može zadovoljiti osnovne ekološke zahtjeve ove vrste. Tradicionalni uzgoj na otvorenom moguć je na dobro dreniranom tlu i na lokacijama s dovoljno sunčeve svjetlosti, no proizvodnja često ovisi o varijacijama klimatskih čimbenika, osobito količini oborina i temperaturnim ekstremima, što može utjecati na stabilnost prinosa i kvalitetu stigmi.

Suvremeni pristupi uzgoju, posebice primjena hidroponskih sustava i uzgoj u zaštićenom prostoru, otvaraju nove mogućnosti za optimizaciju proizvodnje šafrana i u kontinentalnim klimatskim uvjetima Republike Hrvatske. Takvi sustavi omogućuju preciznu kontrolu ključnih abiotičkih čimbenika, čime se osigurava stabilnost proizvodnje i standardizirani biljni materijal. Osim toga, primjena odgovarajućih supstrata, optimizacija navodnjavanja i ishrane biljaka te integracija novih tehnologija, LED rasvjete i biostimulatora, mogu dodatno unaprijediti rast, prinos i kvalitetu šafrana.

Iako hidroponski uzgoj šafrana još uvijek nije široko primijenjen u komercijalnoj proizvodnji, dosadašnja istraživanja ukazuju na njegov značajan potencijal za intenzivniju i standardiziranu proizvodnju visoko vrijedne sirovine. Stoga su daljnja istraživanja usmjerena na optimizaciju uzgojnih sustava, izbor odgovarajućih supstrata i formulaciju hranivih otopina od ključne važnosti za razvoj održive i ekonomski isplative proizvodnje šafrana u našim agroekološkim uvjetima.

Literatura

Al-Snafi, A. E. (2016). *The pharmacology of Crocus sativus: A review. IOSR Journal of Pharmacy, 6(6), 8–38.*

Baba, S. A., Mohiuddin, T., Basu, S., Swarnkar, M. K., Malik, A. H., Wani, Z. A., Abbas, N., Singh, A. K., & Ashraf, N. (2015). *Comprehensive transcriptome analysis of Crocus sativus for discovery and expression of genes involved in apocarotenoid biosynthesis. BMC Genomics, 16, 1–14.*

Bhagat, N., Magotra, S., Gupta, R., Sharma, S., Verma, S., Verma, P. K., Ali, T., Shree, A., & Vakhlu, J. (2022)*. Invasion and colonization of pathogenic Fusarium oxysporum R1 in Crocus sativus L. during corm rot disease progression. Journal of Fungi, 8(12), 1246. https://doi.org/10.3390/jof8121246*

Caser, M., Demasi, S., Victorino, Í. M. M., Donno, D., Faccio, A., Lumini, E., Bianciotto, V., & Scariot, V. (2019). *Arbuscular mycorrhizal fungi modulate the crop performance and metabolic profile of saffron in soilless cultivation. Agronomy, 9(5), 232. https://doi.org/10.3390/agronomy9050232*

Dewir, Y. H., Alsadon, A., Ibrahim, A., & El-Mahrouk, M. (2022)*. Effects of growing substrate, mode of nutrient supply, and saffron corm size on flowering, growth, photosynthetic competence, and cormlet formation in hydroponics. HortTechnology, 32(2), 234–240. https://doi.org/10.21273/HORTTECH04980-21*

Državni zavod za statistiku. (2015). *Žetvena površina, proizvodnja i prirod oraničnih usjeva. https://web.dzs.hr/PxWeb/pxweb/hr/Poljoprivreda,%20lov,%20%C5%A1umarstvo%20i%20ribarstvo/Poljoprivreda,%20lov,%20%C5%A1umarstvo%20i%20ribarstvo__Biljna%20proizvodnja/BP2.px*
(Pristupljeno 10. ožujka 2026.)

El Merzougui, S., Boudadi, I., Lachguer, K., Beleski, D. G., Lagram, K., Lachheb, M., Ben El Caid, M., Pereira, V. M., Nongdam, P., Serghini, M. A., & Vendrame, W. A. (2024). *Propagation of saffron (Crocus sativus L.) using cross-cuttings under a controlled environment. International Journal of Plant Biology, 15(1), 54–63. https://doi.org/10.3390/ijpb15010005*

Farahani, E., Tabatabai, S. J., & Khanqoli, S. (2024). *Quantitative and qualitative response of saffron (Crocus sativus L.) to light intensity and nutrition in hydroponic cultivation. Journal of Plant Nutrition, 1–11. https://doi.org/10.1080/01904167.2024.2439873*

Kour, K., Gupta, D., Gupta, K., Dhiman, G., Juneja, S., Viriyasitavat, W., & Islam, M. A. (2022). *Smart-hydroponic-based framework for saffron cultivation: A precision smart agriculture perspective. Sustainability, 14(3), 1120. https://doi.org/10.3390/su14031120*

Kremer, D. (2018). *Ljekovito bilje Farmaceutskog botaničkog vrta Fran Kušan (D. Kremer, ur.). Javna ustanova Maksimir.*

Lachguer, K., Boudadi, I., Lachheb, M., Beraouz, I., El Merzougui, S., Ben El Caid, M., Lagra, K., &

Serghini, M. A. (2024). *Saffron (Crocus sativus L.) cultivation and properties: A review. International Journal of Horticultural Science and Technology, 365–384. https://doi.org/10.22059/IJHSTxxxxx*

Lahmass, I., Lamkami, T., Delporte, C., Sikdar, S., Van Antwerpen, P., Saalaoui, E., & Megalizzi, V. (2017). *The waste of saffron crop, a cheap source of bioactive compounds. Journal of Functional Foods, 35, 341–351. https://doi.org/10.1016/j.jff.2017.05.057*

Li, L., Zhou, Y., Wang, J., Qi, X., Fang, H., Bai, Y., & Liang, C. (2024). *Effects of supplementary light treatment on saffron: Integrated physiological, metabolomic, and transcriptome analyses. BMC Plant Biology, 24(1), 1247. https://doi.org/10.1186/s12870-024-05944-2*

Maggio, A., Raimondi, G., Martino, A., & De Pascale, S. (2006). *Soilless cultivation of saffron in Mediterranean environment. Acta Horticulturae, 718, 515–522. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2006.718.60*

Mirghasempour, S. A., Studholme, D. J., Chen, W., Zhu, W., & Mao, B. (2022). *Molecular and pathogenic characterization of Fusarium species associated with corm rot disease in saffron from China. Journal of Fungi, 8(5), 515. https://doi.org/10.3390/jof8050515*

Molina, R. V., Valero, M., Navarro, Y., García-Luis, A., & Guardiola, J. L. (2005). *Low temperature storage of corms extends the flowering season of saffron (Crocus sativus L.). The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 80(3), 319–326. https://doi.org/10.1080/14620316.2005.11511937*

Mykhailenko, O., Ivanauskas, L., Bezruk, I., Sidorenko, L., Lesyk, R., & Georgiyants, V. (2021). *Characterization of phytochemical components of Crocus sativus leaves: A new attractive by-product. Scientia Pharmaceutica, 89(2), 28. https://doi.org/10.3390/scipharm89020028*

Mzabri, I., Addi, M., & Berrichi, A. (2019). *Traditional and modern uses of saffron (Crocus sativus). Cosmetics, 6(4), 63. https://doi.org/10.3390/cosmetics6040063*

Nardi, L., Metelli, G., Garegnani, M., Villani, M. E., Massa, S., Bennici, E., & Desiderio, A. (2022). *Farming for pharming: Novel hydroponic process in contained environment for efficient pharma-grade production of saffron. Molecules, 27(24), 8972. https://doi.org/10.3390/molecules27248972*

Naseri, E., Dalir, N., Mokhtassi-Bidgoli, A., Ebadi, M. T., & Rahnemaie, R. (2025). *Optimizing saffron cormlet production through substrate composition, nutrient concentration, and irrigation management in soilless cultivation. Scientific Reports, 15(1), 36.*

Opačić, N., Radman, S., Fabek Uher, S., Benko, B., Voća, S., & Šic Žlabur, J. (2022). *Nettle cultivation practices—From open field to modern hydroponics: A case study of specialized metabolites. Plants, 11(4), 483. https://doi.org/10.3390/plants11040483*

Othman, R., Hatta, F. A. M., Hassan, N. M., & Kamoona, S. (2020). *Characterization of carotenoids content and composition of saffron from different localities. Journal of Pharmacy and Nutrition Sciences, 10(1), 34–40.*

Schroeder, F. G., Lozoya, D. R., & Ruser, P. (2020). Hydroponic forcing of saffron (Crocus sativus L.). Acta Horticulturae, 1273, 281–288. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2020.1273.38

Stelluti, S., & Scariot, V. (2024). *Bioinoculants for sustainable production of saffron spice and by-products: Overview and prospects. Italus Hortus, 79–94. https://doi.org/10.26353/j.itahort/2024.1.7994*

Valenzuela, J. L., Díaz, J. G., & Salas-Sanjuán, M. C. (2024). *Improvement in productivity and quality of soilless saffron crops by implementing fertigation. AgriEngineering, 6(2), 1649–1659. https://doi.org/10.3390/agriengineering6020094*

Voća, S., Šic Žlabur, J., Radman, S., Opačić, N., & Dujmović, M. (2023). *Uzgoj koprive (J. Šic Žlabur, ur.). Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet. https://urtica.agr.hr/wp-content/uploads/2023/12/Uzgoj-koprive-Prirucnik.pdf*

Zhang, J., Lu, J., Zhu, Y., Huang, Q., Qin, L., & Zhu, B. (2022). *Rhizosphere microorganisms of Crocus sativus as antagonists against pathogenic Fusarium oxysporum. Frontiers in Plant Science, 13, 1045147.*

https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1045147
Ziani, A., Bekkouch, O., Ouahhoud, S., Baddaoui, S., Ben'Mbarek, S., Bekkouch, A., & Saalaoui, E. (2025). *Phytochemistry, biological activities, molecular mechanisms, and toxicity of saffron (Crocus sativus L.): A comprehensive overview. Antioxidants, 14(12), 1433. https://doi.org/10.3390/antiox14121433*
Zubor, A. A., Surányi, G., Győri, Z., Borbély, G., & Prokisch, J. (2003). *Molecular biological approach of the systematics of Crocus sativus L. and its allies. Acta Horticulturae, 650, 85–93. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.650.8*

Prispjelo/Received: 7.4.2026. ***Prihvaćeno/Accepted: 8.5.2026.***

Professional paper

Hydroponic cultivation of saffron

Abstract
Climate change is increasingly affecting the stability of saffron (Crocus sativus L.) production, one of the most valuable spices in the world, highlighting the need for innovative and sustainable cultivation systems. Traditional open-field cultivation struggles to adapt to climatic variations, resulting in reduced and unstable yields, limited supply, and decreased market competitiveness. The high market value of saffron stems from its specific and demanding cultivation requirements, which are highly sensitive to external factors and the limitations of conventional agriculture. As a sustainable alternative, protected cultivation with modern hydroponic techniques is gaining importance. Soilless cultivation ensures cleaner plant material and significantly reduces the risk of soil-borne diseases, enhancing product safety and quality. These systems allow precise control of abiotic factors, efficient use of water and nutrients, and a reduced environmental footprint. Production under fully controlled and automated conditions, with the possibility of integrating IoT-based monitoring systems, further mitigates production risks, optimizes resource use, and enables precise management of saffron growth and development. This approach achieves stable, uniform, and high-quality yields largely independent of external climatic fluctuations. Special emphasis is placed on optimizing cultivation conditions to maximize stigma yield and quality, the commercially most valuable part of the plant. By controlling nutrient solution composition, applying controlled drought stress, and adjusting light spectrum and photoperiod, it is possible to influence plant growth, development, and accumulation of bioactive compounds, particularly carotenoids. The remaining biomass can be valorized through extraction of valuable phenolic compounds, promoting complete utilization of the raw material and the principles of a circular economy.
The application of modern hydroponic systems under controlled conditions represents an efficient model for sustainable saffron production and contributes to agricultural diversification. This approach opens opportunities for saffron cultivation in regions where it is not traditionally grown, while enhancing competitiveness and production stability in the global market.

Keywords: *medicinal and aromatic plants, controlled cultivation, sustainable agriculture, climate change, production diversification, saffron*