

# Utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kadulje

---

**Margetić, Erik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2025**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Agriculture / Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:204:999382>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-05**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository Faculty of Agriculture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET

# Utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kadulje

DIPLOMSKI RAD

Erik Margetić

Zagreb, veljača, 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET

Diplomski studij:

Poljoprivredna tehnika - Mehanizacija

# **Utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kadulje**

DIPLOMSKI RAD

Erik Margetić

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Ante Galić

Zagreb, veljača, 2025.

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET**

**IZJAVA STUDENTA  
O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI**

Ja, **Erik Margetić**, JMBAG 0068231231, rođen 13.11.1997. u Zagrebu, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom:

**Utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kadulje**

Svojim potpisom jamčim:

- da sam jedina jedini autor ovoga diplomskog rada;
- da su svi korišteni izvori literature, kako objavljeni tako i neobjavljeni, adekvatno citirani ili parafrazirani, te popisani u literaturi na kraju rada;
- da ovaj diplomski rad ne sadrži dijelove radova predanih na Agronomskom fakultetu ili drugim ustanovama visokog obrazovanja radi završetka sveučilišnog ili stručnog studija;
- da je elektronička verzija ovoga diplomskog rada identična tiskanoj koju je odobrio mentor;
- da sam upoznat s odredbama Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu (Čl. 19).

U Zagrebu, dana \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*Potpis studenta*

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
AGRONOMSKI FAKULTET

IZVJEŠĆE

O OCJENI I OBRANI DIPLOMSKOG RADA

Diplomski rad studenta **Erika Margetića**, JMBAG 0068231231, naslova

**Utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kadulje**

obranjen je i ocijenjen ocjenom \_\_\_\_\_, dana \_\_\_\_\_.

Povjerenstvo:

potpisi:

1. Izv. prof. dr. sc. Ante Galić mentor

\_\_\_\_\_

2. Prof. dr. sc. Stjepan Plietić član

\_\_\_\_\_

3. Izv. prof. dr. sc. Martina Grdiša član

\_\_\_\_\_

## Zahvala

Ovime zahvaljujem profesoru i mentoru izv. prof. dr. sc. Anti Galiću na radu i trudu da me usmjeri prema završetku studija, te ostalim profesorima koji su me svojim marljivim radom pratili u obrazovanju, također želim zahvaliti obitelji na neumornoj podršci i strpljenju.

## Sadržaj

1.	Uvod .....	1
1.1.	Cilj rada ..	1
2.	Kadulja .....	2
2.1.	Sistematska podjela i rasprostranjenost .....	2
2.2.	Morfološka i biološka svojstva.....	3
2.3.	Kemijski sastav i upotreba kadulje .....	5
3.	Elektromagnetsko zračenje .....	7
3.1.	Osnovni dijelovi lasera .....	8
3.2.	Vrste i svojstva lasera .....	9
3.3.	Mogućnosti primjene lasera u poljoprivredi .....	11
3.4.	Prednosti primjene lasera u poljoprivredi .....	11
3.5.	Izazovi u implementaciji .....	13
3.6.	Utjecaj laserskog zračenja na klijavost .....	13
4.	Materijali i metode .....	17
4.1.	Biljni materijal.....	17
4.2.	Uređaji i oprema .....	17
4.3.	Tretmani.....	19
4.4.	Analiza klijavosti i energije klijanja .....	20
4.5.	Statistička obrada podataka .....	22
5.	Rezultati i rasprava .....	23
6.	Zaključak .....	27
7.	Popis literature .....	28
	Životopis.....	33

## Sažetak

Diplomskog rada studenta **Erika Margetića**, naslova

### **Utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kadulje**

Kadulja (*Salvia officinalis* L.) je aromatični, djelomično drvenasti višegodišnji grm iz porodice Lamiaceae,. Primarno stanište prirodnih populacija ljekovite kadulje je sredozemno krško područje s istočne strane Jadranskog mora. Uzgaja se za kulinarske i medicinske svrhe. Cilj rada bio je utvrditi mogućnost primjene laserskog zračenja kao stimulatora klijavosti sjemena i energija klijanja kadulje. Laseri kao biostimulatori predaju biljnim stanicama dodatnu energiju u vidu koherentnog zračenja, čime mogu pozitivno utjecati na energiju klijanja i standardnu klijavost sjemenskog materijala. Sjeme kadulje tretirano je u elementarnom sloju laserima izlaznih snaga od 100, 200 i 500 mW u trajanju od 30, 60 i 120 s. Analiza klijavosti provedena je standardnom metodom. Istraživanje je pokazalo da je intenzitet zračenja po sjemenki relativno nizak, što sugerira da laser prvenstveno djeluje na biljni materijal putem biostimulacijskog učinka. Tretmani laserom snage 100 i 200 mW uglavnom su rezultirali povećanjem energije klijanja i standardne klijavosti sjemena. Najbolji učinak zabilježen je kod tretmana laserom snage 100 mW tijekom 120 sekundi, pri čemu je energija klijanja porasla za 12 %, a standardna klijavost za 8 %. Nasuprot tome, tretmani laserom snage 500 mW u trajanju od 30 i 120 sekundi uzrokovali su smanjenje energije klijanja i klijavosti, što ukazuje na mogućnost oštećenja sjemena pri višim dozama zračenja.

**Ključne riječi:** energija klijanja, klijavost, laser, kadulja



## Summary

Of the master's thesis – student **Erik Margetić**, entitled

### **The influence of laser radiation on the germination and germination energy of sage**

Sage (*Salvia officinalis* L.) is an aromatic, partially woody, perennial shrub from the Lamiaceae family. It is native to Mediterranean karst on East side of Adriatic It is cultivated for culinary and medicinal purposes. The aim of the study was to determine the possibility of using laser radiation as a germination stimulator for seeds and the germination energy of sage. Lasers as biostimulators provide the plant cells with additional energy in the form of coherent radiation, which can have a positive effect on germination energy and the standard germination of seed material. Sage seeds were treated in the elementary layer with lasers with output powers of 100, 200 and 500 mW for 30, 60 and 120 s, respectively. The germination analysis was carried out using the standard method. The studies showed that the radiation intensity per seed was relatively low, suggesting that the laser acts primarily through a biostimulant effect on the plant material. Treatments with lasers with a power of 100 and 200 mW mainly led to an increase in germination energy and standard seed germination. The best effect was observed with a 100 mW laser treatment over 120 seconds, increasing germination energy by 12 % and standard germination by 8 %. In contrast, 500 mW laser treatments for 30 and 120 seconds resulted in a decrease in germination energy and germination capacity, indicating the possibility of damage to the seeds at higher radiation doses.

**Keywords:** germination energy, germination, laser, sage

# 1. Uvod

Kadulja (*Salvia officinalis* L.) je višegodišnja biljna vrsta iz porodice usnača (Lamiaceae) koja se koristi zbog svojih ljekovitih svojstava i kao začinska biljka. Poznata je po svom bogatom kemijskom sastavu, koji uključuje eterična ulja, flavonoide i fenolne kiseline, što je čini važnom u farmaceutskoj, prehrambenoj i kozmetičkoj industriji. Zbog svojih aromatičnih i ljekovitih svojstava, uzgoj kadulje proširio se na mnoga područja, a posebno je popularna u mediteranskim regijama, gdje se tradicionalno koristi u narodnoj medicini i kulinarstvu (Kowalska i sur., 2022.).

Kombinacija suvremenih tehnologija i tradicionalnih metoda uzgoja može otvoriti nove mogućnosti u poljoprivredi, povećavajući produktivnost i održivost proizvodnje.

S obzirom na sve veće zahtjeve za održivim poljoprivrednim praksama, istraživanje metoda za poboljšanje klijavosti i energije klijanja sjemena ima ključnu važnost za unapređenje proizvodnje.

Klijavost sjemena ključan je parametar koji određuje uspjeh sjetve i kasniji razvoj biljke. Brže i ujednačeno klijanje doprinosi bujnom razvoju biljaka te boljoj otpornosti na štetnike i nepovoljne okolišne uvjete (Kowalska i sur., 2022.).

U suvremenoj poljoprivredi, lasersko zračenje nameće se kao potencijalna metoda za poboljšanje fizioloških karakteristika sjemena. Laseri emitiraju koherentno svjetlo koje biljnim stanicama može prenijeti dodatnu energiju, čime potiču biološke procese kao što su klijanje i rast (Kowalska i sur., 2022.). U tu svrhu mogu se koristiti različite vrste lasera među kojima su najzastupljeniji He-Ne (helij-neonski) laseri koji su pokazali pozitivan utjecaj na klijavost različitih biljnih vrsta, uključujući kadulju, kao i na poboljšanje otpornosti biljaka na različite stresne uvjete (Al Salhi i sur., 2018.). U posljednje vrijeme sve više na značaju dobivaju i poluvodički laseri zahvaljujući svojim malim dimenzijama, visokoj efikasnosti i niskoj cijeni. Oni emitiraju kontinuirano zračenje čija valna duljina varira ovisno o materijalu izrade, a obično se koriste oni u crvenom ili infracrvenom spektru.

Iako su istraživanja potvrdila pozitivan utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja kod mnogih biljnih vrsta, potrebno je detaljno istražiti optimalne parametre laserske izloženosti kako bi se postigao maksimalan učinak. Pravilna primjena lasera u poljoprivredi mogla bi pružiti inovativne i ekološki prihvatljive načine za poboljšanje kvalitete sjemenskog materijala (Kowalska i sur., 2022.).

## 1.1. Cilj rada

Cilj istraživanja je utvrditi utjecaj laserskog zračenja na klijavost i energiju klijanja sjemena kadulje (*Salvia officinalis*).

## 2. Kadulja

### 2.1. Sistematska podjela i rasprostranjenost

Rod *Salvia* jedan je od najbrojnijih rodova unutar porodice usnača (Lamiaceae) (El-Feky i Aboulthana, 2016.), obuhvaćajući približno 1000 različitih biljnih vrsta (Walker i Sytsma, 2007.). Najpoznatija vrsta roda je *S. officinalis*, koja se najčešće koristi u kulinarstvu i kao biljni lijek. Razvijeni su brojni kultivari ove biljne vrste, koji se odlikuju specifičnim svojstvima, poput izraženije arome ili otpornosti na bolesti (Duke, 2002.). Na području Europe raste 36 vrsta ovog roda (Maksimović i sur., 2007.). Sistematska podjela kadulje prikazana je u tablici 1.

Tablica 2.1. Sistematska podjela ljekovite kadulje (*Salvia officinalis* L.)

Carstvo ( <i>Regnum</i> )	<i>Plantae</i>
Koljeno ( <i>Phylum</i> )	<i>Magnoliophyta</i>
Razred ( <i>Classics</i> )	<i>Magnoliopsida</i>
Red ( <i>Ordo</i> )	<i>Lamiales</i>
Porodica ( <i>Familia</i> )	<i>Lamiaceae</i> (usnače)
Rod ( <i>Genus</i> )	<i>Salvia</i>
Vrsta ( <i>Species</i> )	<i>Salvia officinalis</i> L.

Izvor: <https://www.gbif.org/species/2927004>

Kadulja je aromatična, višegodišnja biljna vrsta koja potječe iz područja Mediterana. Danas se zbog svojih svojstava i široke primjene uzgaja diljem svijeta, a često se naziva i „svetom biljkom“ zbog svoje simbolike zdravlja i mudrosti (Duke, 1985.; Houghton, 1995.).



Slika 2.1. Kadulja

Izvor: <https://azena.hr/hr/herb/kadulja/>

Optimalni uvjeti za uzgoj uključuju sunčana mjesta i dobro drenirana tla. Kadulja preferira suha područja i otpornija je na sušu, što je čini pogodnom za uzgoj u različitim klimatskim uvjetima (Hughes, 2012.). Njena otpornost na niske temperature čini je pogodnom za uzgoj u umjerenim klimatskim zonama. Osjetljivost na visoku vlažnost može se prevladati pravilnom drenažom tla, što je ključno za očuvanje zdravlja biljke (Tuleukhanov i sur., 2013.). Kadulja također ima važnu ekološku ulogu, jer privlači oprašivače poput pčela i leptira, čime doprinosi biološkoj raznolikosti u poljoprivrednim sustavima (Kleijn i van Langevelde, 2006.). Upotreba kadulje u vrtovima i agroekosustavima može poboljšati zdravlje tla i potaknuti prisutnost korisnih kukaca, što dodatno naglašava njen značaj u održivim praksama poljoprivrede. Različiti kultivari kadulje razvijene su kako bi se poboljšali prinosi i otpornost na bolesti, čime se omogućava održiva poljoprivreda (Zhang i sur., 2013.).

## **2.2. Morfološka i biološka svojstva**

Ova biljna vrsta je višegodišnji grm koji može narasti do 60 cm visine. Prepoznatljiva je po svojim uspravnim stabljikama i izdašnim, aromatičnim listovima. Biljka razvija snažan korijen (Marušić, 1984.) te stabljiku s drvenastim donjim dijelom i zeljastim gornjim dijelom (Willfort, 2002.). Stabljika je uspravna, a listovi su uski, eliptični, sitno naborani i smješteni na duguljastoj peteljci (Marušić, 1984.). Cijela biljka, a posebno listovi, prekrivena je gustim dlačicama (Marčinković, 2001.), što joj daje karakterističnu zeleno-sivu boju (Willfort, 2002.). Veliki svjetloljubičasti cvjetovi grupirani su u vršne klasove (Bittner, 2010.). Cvijet kadulje je dvousnat, dok su čaška i vjenčić prekriveni žljezdastim dlakama (Marušić, 1984.). Razdoblje cvatnje traje od svibnja do srpnja.

Kadulja se razmnožava sjemenom. Sjeme kadulje varira u veličini i obliku, ovisno o kultivaru i uvjetima uzgoja a obično je maleno i ovalno, tamno smeđe do crne boje. Prosječna masa sjemena iznosi između 0,02 i 0,04 grama (Tuleukhanov i Abu-Elsaoud, 2013.).



Slika 2.2. Morfologija kadulje

Izvor: <https://bs.wikipedia.org/wiki>

Sjeme kadulje također ima izražene adaptacije na uvjete okoline, poput suše. Sjemenke se često razvijaju u manjoj količini i podložne su ekološkim stresovima. Klijavost sjemena ovisi o uvjetima kao što su temperatura, vlažnost i kvaliteta tla. Klijanje obično započinje nakon 14 do 21 dan, pri optimalnoj temperaturi od 20 do 25 °C.

Kao i kod drugih biljnih vrsta, kvaliteta sjemena kadulje ključna je za uspješan uzgoj. Za optimalnu klijavost, sjeme treba biti čisto, zdravo i bez kontaminanata. Preporučuje se dezinfekcija sjemena fungicidima kako bi se smanjila mogućnost razvoja bolesti koje mogu utjecati na klijanje. Standardi kvalitete sjemena kadulje, uključujući minimalnu klijavost i sadržaj vlage, važni su za uspješnu proizvodnju (Pavlović i sur., 2020.).

U skladu s tim, pravilna priprema i izbor sjemena ključni su koraci u procesu sjetve, a utjecaj laserskog zračenja na klijavost sjemena kadulje može otvoriti nove mogućnosti u optimizaciji klijanja i povećanju prinosa.

## 2.3. Kemijski sastav i upotreba kadulje

Kadulja je poznata po sadržaju eteričnog ulja koje uključuje različite spojeve poput 1,8-cineola, kamfora,  $\alpha$ -tujona,  $\beta$ -tujona i dr. Spojevi tujon i kamfor, imaju antimikrobna i protuupalna svojstva, što kadulju čini korisnom u liječenju raznih zdravstvenih problema (Mikulić-Petkovšek i sur., 2014.). Pored eteričnog ulja kadulja sadrži različite bioaktivne komponente poput tanina, flavonoida i fenolnih kiselina, koje doprinose njenim ljekovitim svojstvima (Cavanagh i Wilkinson, 2002.).

Kadulja se koristi i u farmaceutskoj industriji, gdje se iz nje pripremaju različiti ekstrakti i suplementi koji su namijenjeni jačanju imunološkog sustava i poboljšanju probave (Cavanagh i Wilkinson, 2002.). Zbog svojih mnogostrukih primjena i svojstava, kadulja je postala predmet mnogih znanstvenih istraživanja, koja se fokusiraju na njene biološke aktivnosti i potencijalne koristi u tradicionalnoj i suvremenoj medicini.

Antioksidativna svojstva kadulje povezana su s visokom koncentracijom flavonoida i fenolnih spojeva. Ova svojstva su važna za zaštitu stanica od oksidativnog stresa, koji može doprinijeti razvoju raznih bolesti, uključujući rak (Khan i sur., 2008.; Liang i sur., 2010.). Također, poznato je da ekstrakti kadulje mogu imati pozitivan učinak na razne probavne smetnje, kao što su nadutost i grčevi, zbog svojih antispazmolitičkih svojstava (Caniato i sur., 2007.; Deans i Ritchie, 1987.).

Osim toga, kadulja se koristi i za smanjenje stresa i anksioznosti, budući da njezina eterična ulja mogu djelovati kao prirodni sedativi, pomažući u opuštanju i poboljšanju kvalitete sna (Khan i sur., 2010.). Koristi se i u aromaterapiji zbog svojih umirujućih i opuštajućih učinaka (Buchbauer i sur., 1993.). Tradicionalno, kadulja se često koristi i za liječenje prehlada, grlobolje i infekcija, čime se dodatno naglašava njezina važnost (Buchbauer i sur., 1993.).

Sveukupno gledajući, kadulja je biljka koja ima značajnu ulogu u ljudskoj prehrani, medicini i kulturi iz više razloga:

1. Ljekovita svojstva: Kadulja se koristi u tradicionalnoj medicini zbog svojih antimikrobnih, antiinflamatornih i antioksidativnih svojstava. Njeni ekstrakti često se primjenjuju za liječenje probavnih smetnji, upala grla, kašlja i drugih respiratornih problema (Khan i sur., 2021.; Panahi i sur., 2016.).
2. Aromatična svojstva: Kao začim, kadulja dodaje karakterističan okus mnogim jelima, uključujući mesna jela, umake i juhe. Zbog svoje aromatičnosti, često se koristi u kulinarstvu i prehrambenoj industriji (Ghorbani i sur., 2019.).
3. Nutritivna vrijednost: Kadulja sadrži razne hranjive tvari, uključujući vitamine A, C i K, te minerale poput kalcija, magnezija i željeza. Ove tvari doprinose općem zdravlju i jačaju imunitet (Brewster, 2014.; Figueiredo i sur., 2018.).
4. Prilagodljivost uzgoju: Kadulja je biljka koja se lako uzgaja u različitim klimatskim uvjetima, što je čini dostupnom i popularnom među vrtlarima i poljoprivrednicima. Njena otpornost na sušu čini je idealnom za uzgoj u sušnim regijama (Ranjbar i sur., 2016.).

5. **Kulturna važnost:** Kadulja je važna u mnogim kulturama, gdje se koristi ne samo kao začim, već i u ritualima i tradicionalnim obredima. Njezina simbolika često uključuje zdravlje, zaštitu i mudrost (Zohary i Spiegel-Roy, 1975.).
6. **Ekološki doprinos:** Kadulja, kao medonosna biljka, privlači pčele i druge oprašivače, što pridonosi bioraznolikosti i zdravlju ekosustava (Buchmann i Nabhan, 1996.).
7. **Ekonomski značaj:** Uzgoj kadulje ima ekonomski potencijal, kako na lokalnoj, tako i na globalnoj razini (Duke, 2002.).

### 3. Elektromagnetsko zračenje

Elektromagnetsko zračenje, kao oblik energije koji se širi kroz prostor putem elektromagnetskih valova, nalazi široku primjenu u različitim disciplinama poput medicine, telekomunikacija i različitih drugih tehnologija. Prema Maxwelllovoj teoriji, elektromagnetski val sastoji se od promjenjivog električnog i magnetskog polja, pri čemu se magnetsko polje opisuje magnetskom indukcijom. Oba polja titraju u istoj fazi, periodično se mijenjajući, a uvijek su međusobno okomita. Smjer širenja elektromagnetskog vala također je okomit na smjer električnog i magnetskog polja, što ih čini transverzalnim valovima. Energija se prenosi titranjem ovih polja. Najvažnije svojstvo elektromagnetskog vala je sposobnost da prenosi energiju prolaskom kroz tvari ili kroz zrakoprazan prostor. Energija koju elektromagnetski val u jedinici vremena pronese kroz jediničnu površinu naziva se intenzitet elektromagnetskog vala i iskazuje jedinicom  $Wm^{-2}$ . Intenzitet ovisi o jakosti električnog polja i njemu pridruženog magnetskog polja te o električnim i magnetskim svojstvima tvari.

U vakuumu se elektromagnetski valovi šire brzinom svjetlosti dok je u materijalnim sredstvima (poput kristala, tekućina ili plinova) brzina vala manja i ovisi o svojstvima te tvari.

Elektromagnetski spektar, temeljen na valnoj duljini i frekvenciji, dijeli se na različita područja: radiovalove, mikrovalove, infracrveno zračenje, vidljivu svjetlost, ultraljubičasto zračenje, rendgenske zrake, gama zrake i kozmičko zračenje. Unutar navedenih područja valovi variraju prema valnoj duljini i frekvenciji, pa tako različiti dijelovi spektra donose specifične koristi, ali i potencijalne opasnosti. Prilikom širenja kroz prostor elektromagnetski valovi ponašaju se slično, bez obzira na valnu duljinu. Razlike u valnoj duljini postaju značajne tek kada val dođe u kontakt s nekom tvari. Ovo međudjelovanje uzrokuje brojne fizikalne pojave i procese, omogućujući široku primjenu elektromagnetskih valova.

Na najenergičnijem dijelu spektra nalaze se gama zrake, koje prodiru u tkiva i mogu uzrokovati ozbiljna oštećenja, ali se koriste u medicini, primjerice za liječenje tumora. Slično, X-zračenje, s kraćom valnom duljinom, koristi se u dijagnostici kao što su rendgenske slike, no također zahtijeva oprez zbog rizika od oštećenja tkiva. Rendgenske zrake također imaju značajnu ulogu u istraživanju kristalnih struktura materijala (Matoničkin, 2007.).

Ultraljubičasto (UV) zračenje poznato je po svojim ionizirajućim svojstvima, što je korisno u dezinfekciji, no pretjerana izloženost može dovesti do oštećenja kože. Vidljivo svjetlo, iako samo uski dio spektra, igra ključnu ulogu u svakodnevnom životu jer omogućuje vizualnu percepciju boja. Na dužem kraju spektra nalaze se infracrveni valovi, koji imaju široku primjenu u tehnologiji kao što su daljinski upravljači, dok mikrovalovi omogućuju rad modernih komunikacijskih sustava.

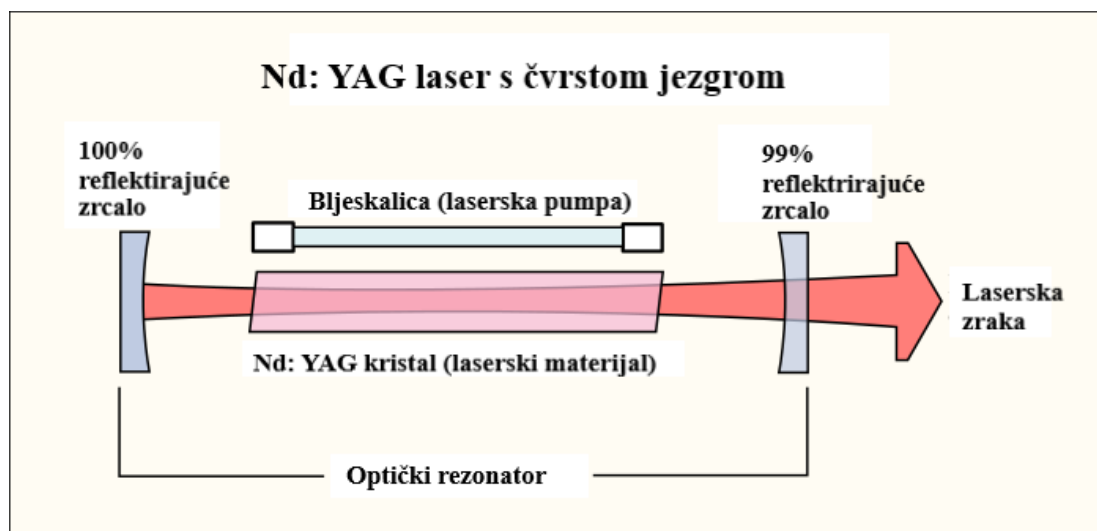
Najduže valne duljine pripadaju radio valovima, koji omogućuju prijenos podataka putem televizije i radija. Radio valovi, poput onih iz svemira, također se koriste za proučavanje svemirskih fenomena (Matoničkin, 2007.).



### 3.1. Osnovni dijelovi lasera

Laserski uređaji temelje se na preciznoj interakciji svjetlosti i materijala, a svaki laser ima tri osnovna dijela: aktivni medij, izvor pobude i optički rezonator. Njihova međusobna interakcija omogućuje stvaranje koherentne i intenzivne svjetlosti specifičnih svojstava (Matoničkin, 2007.; Puljić, 2017.).

1. Aktivni medij: Aktivni medij je ključni element u kojem dolazi do pojačavanja svjetlosti. Može biti plin, tekućina, čvrsti kristal ili poluvodič, ovisno o vrsti lasera. Atomi ili molekule u aktivnom mediju pobuđuju se pomoću vanjske energije, prelazeći u stanje više energije. Kada se vrate u osnovno stanje, emitiraju fotone koji sudjeluju u stvaranju laserskog snopa (Matoničkin, 2007.).
2. Izvor pobude: Osigurava energiju potrebnu za prijenos atoma ili molekula u pobuđeno stanje. U različitim vrstama lasera, ovaj izvor može biti električna struja, bljeskalica, kemijska reakcija ili čak drugi laserski uređaj (Grgić, 2017.).
3. Optički rezonator: Optički rezonator sastoji se od dvaju paralelnih zrcala, od kojih jedno potpuno reflektira svjetlost, dok drugo djelomično propušta. Ova konfiguracija omogućuje fotonima da se reflektiraju između zrcala i prolaze kroz aktivni medij, čime se svjetlost dodatno pojačava. Kada svjetlost postigne dovoljnu energiju i koherentnost, izlazi kroz djelomično propusno zrcalo u obliku laserskog snopa (Puljić, 2017.).



Slika 2.3. Prikaz lasera s čvrstom jezgrom

Izvor: [https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Laser\\_1.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Laser_1.png)

Laserska svjetlost nastaje procesom koji se naziva pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja (eng. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Proces uključuje:

1. Apsorpciju energije: Izvor pobude prenosi energiju atomima ili molekulama u aktivnom mediju, što ih potiče na prelazak u više energetske stanje (Puljić, 2017.).

2. Spontanu emisiju: Kada se atom ili molekula spontano vraća u osnovno stanje, emitira foton određene valne duljine (Matoničkin, 2007.).
3. Stimuliranu emisiju: Foton generiran spontanom povratkom potiče druge pobuđene atome ili molekule da emitiraju dodatne fotone iste valne duljine, faze i smjera. Ovaj lančani proces rezultira intenzivnim i koherentnim snopom svjetlosti, koji izlazi kroz rezonator (Grgić, 2017.).

### 3.2. Vrste i svojstva lasera

Laseri su iznimno složeni uređaji koji se dijele na više vrsta ovisno o različitim kriterijima poput agregacijskog stanja, načina rada ili pobude. S obzirom na navedeno, ovisno o svojstvima koja se promatraju, lasere možemo podijeliti:

1. prema načinu rada:
  - pulsni, koji generiraju svjetlosne impulse,
  - kontinuirani, koji neprekidno emitiraju svjetlost.
2. prema agregacijskom stanju optičkog pojačala:
  - plinski, koji koriste plin kao optičko pojačalo,
  - laseri čvrstog stanja, koji koriste čvrstu tvar kao pojačalo,
  - tekući laseri, koji koriste tekućinu kao pojačalo,
  - poluvodički laseri, koji koriste poluvodički materijal kao pojačalo.
3. prema načinu pobude:
  - pobuda optičkim sredstvom,
  - pobuda kemijskom reakcijom,
  - pobuda sudarima elektrona i atoma u plinskom izboju.

U suvremenoj industriji i znanosti, laserska tehnologija nalazi široku primjenu zbog svojih izuzetnih karakteristika – visoke koherentnosti, usmjerenosti, i sposobnosti emitiranja svjetlosti vrlo specifične valne duljine. Te karakteristike omogućuju preciznost i kontrolu, što je od velike važnosti u brojnim disciplinama. Razumijevanje različitih vrsta lasera i njihovih svojstava ključno je za odabir odgovarajuće tehnologije u pojedinim primjenama.

Pulsni i kontinuirani laseri razlikuju se prema načinu generiranja svjetlosti. Pulsni laseri proizvode svjetlosne impulse velike snage u kratkim vremenskim razmacima, što ih čini pogodnima za istraživačke aplikacije u spektroskopiji, mjerenju materijala i preciznoj mikroobradbi. Njihova sposobnost generiranja vrlo kratkih impulsa od nekoliko nanosekundi omogućava proučavanje iznimno brzih fizikalnih fenomena (Puljić, 2017.). Nasuprot tome, kontinuirani laseri emitiraju stabilnu i neprekidnu svjetlost te se koriste u aplikacijama gdje je potrebna konstantna energija, poput medicinske terapije, telekomunikacija i obrade materijala (Grgić, 2017.).

Plinski laseri, kao što su CO<sub>2</sub> i helij-neonski (He-Ne) laseri, nalaze široku primjenu. CO<sub>2</sub> laseri emitiraju infracrvenu svjetlost valne duljine od 10,6 μm, što ih čini posebno korisnima

za rezanje, graviranje i zavarivanje materijala. Njihova velika izlazna snaga, koja može dosegnuti 50 kW, čini ih pogodnima za industrijske primjene u kojima je potrebna velika energija. CO<sub>2</sub> laseri funkcioniraju pomoću mješavine plinova – ugljikovog dioksida, dušika i helija – pri čemu se pobuđene molekule CO<sub>2</sub> vraćaju u osnovno stanje, emitirajući fotone i stvarajući laserski snop. Održavanje niskih temperatura (do 200 °C) bitno je za optimalan rad lasera (Puljić, 2017.).

Helij-neonski laseri, koji koriste smjesu helija i neona, emitiraju crvenu svjetlost pri valnoj duljini od 632,8 nm. Iako slabije snage, ovi laseri se često koriste u optičkim sustavima, znanstvenim eksperimentima i preciznim mjernim uređajima. Njihova jednostavna konstrukcija i stabilna izlazna snaga čine ih popularnim izborom u laboratorijima i industriji (Matoničkin, 2007.).

Laseri čvrstog stanja, poput rubinskih i Nd (neodimij-itrij-aluminij-granat) lasera, koriste čvrste kristale kao medij za pojačavanje svjetlosti. Rubinski laseri, prvi razvijeni laseri čvrstog stanja, emitiraju svjetlost valne duljine oko 694 nm, dok Nd laseri emitiraju infracrvenu svjetlost na 1064 nm. Ovi laseri su izrazito popularni u medicinskim primjenama, posebice u kirurgiji, dermatologiji, te u laserskoj ablaciji tkiva i rezanju materijala (Puljić, 2017.). Visoka preciznost Nd lasera omogućuje njegovo korištenje u delikatnim zahvatima poput korekcije vida i uklanjanja tetovaža.

Poluvodički laseri, ili diodni laseri, predstavljaju tehnološki napredak u laserskoj industriji zahvaljujući njihovoj maloj veličini, visokoj efikasnosti i niskoj cijeni. Koriste se u mnogim svakodnevnim uređajima, kao što su CD i DVD uređaji, bar-kod skeneri, optički senzori, kao i u komunikacijskim sustavima. Emitiraju svjetlost kontinuirano, u rasponu snaga od nekoliko milivata pa do većih snaga kada se poveže više dioda na jednu podlogu. Valna duljina poluvodičkih lasera varira ovisno o materijalu poluvodiča, ali obično emitiraju u crvenom ili infracrvenom spektru (Grgić, 2017.).

Tekući laseri, koji koriste organske ili anorganske tekućine kao radni medij, specifični su po tome što omogućuju jednostavno hlađenje cirkulacijom tekućine. Međutim, termička ekspanzija tekućine često dovodi do promjena u indeksu loma, što može utjecati na kvalitetu laserskog snopa. Iako imaju određene prednosti, tekući laseri se rjeđe koriste u usporedbi s drugim vrstama, no i dalje nalaze primjenu u specifičnim znanstvenim i industrijskim postavkama (Matoničkin, 2007.).

Razvoj laserske tehnologije kroz proteklih nekoliko desetljeća omogućio je stvaranje širokog spektra laserskih uređaja prilagođenih specifičnim potrebama. Od snažnih industrijskih lasera do preciznih znanstvenih instrumenata, laseri su postali nezamjenjivi alati u brojnim disciplinama i industrijama.

### **3.3. Mogućnosti primjene lasera u poljoprivredi**

Primjena lasera u poljoprivredi donosi brojne prednosti, ali i određene izazove koje je potrebno uzeti u obzir. U području poljoprivrede, primjena lasera postala je privlačna zbog svoje visoke preciznosti i mogućnosti prilagodbe specifičnim potrebama. Neke od ključnih mogućnosti njihove upotrebe uključuju:

- preciznu obradu i rezanje raznih materijala, poput drveta, plastike i metala, što je korisno pri izradi specijaliziranih dijelova poljoprivredne opreme,
- označavanje različitih materijala čime se olakšava identifikaciju i praćenje opreme i proizvoda,
- sortiranje i pakiranje poljoprivredno prehrambenih proizvoda prema veličini, obliku i boji,
- uklanjanje korova bez primjene kemikalija ili mehaničkog uklanjanja, pritom štiteći okolne usjeve,
- osvjetljavanje proizvodnih površina,
- praćenje stanja usjeva prikupljajući podatke o visini, gustoći, boji i zdravlju biljaka, omogućujući poljoprivrednicima donošenje boljih odluka o zalijevanju, gnojenju i zaštiti,
- zaštitu od divljači i ptica stvarajući vizualne efekte koji odvrćaju životinje od usjeva,
- preciznu aplikaciju zaštitnih sredstava smanjujući količinu kemikalija i njihov utjecaj na okoliš,
- biostimulaciju biljaka,
- navođenje strojeva i opreme,
- niveliranje terena, čime se poboljšava upravljanje vodom i učinkovitost uzgoja.

Ove tehnologije pokazuju kako laseri doprinose unaprijeđenu poljoprivredne proizvodnje i povećanju njezine učinkovitosti. No, unatoč mnogim potencijalnim koristima, neki izazovi vezani uz tehničku implementaciju i troškove trebaju biti riješeni kako bi ova tehnologija bila u potpunosti prihvaćena u široj poljoprivrednoj proizvodnji. S nadolazećim napretkom u području laserskih tehnologija, očekuje se pad cijena takvih uređaja što bi omogućilo većem broju poljoprivrednika korištenje ove korisne tehnologije.

### **3.4. Prednosti primjene lasera u poljoprivredi**

Smith (2015.) kao jednu od glavnih prednosti laserske tehnologije navodi njezinu sposobnost preciznog rada, bilo da se koristi u niveliranju tla, prskanju pesticida ili sjetvi. Precizna kontrola omogućuje poljoprivrednicima da optimiziraju resurse, smanjujući upotrebu pesticida i herbicida, a time i negativan utjecaj na okoliš. Na primjer, primjena lasera u preciznoj poljoprivredi može smanjiti količinu kemijskih sredstava potrebnih za zaštitu usjeva, što doprinosi ekološkoj održivosti i smanjenju troškova. Navedenom metodom se smanjuje utjecaj na okolne usjeve i tlo, što ovu tehnologiju čini energetski učinkovitom alternativom

(Johnson i sur., 2020.), a također se umanjuju štete od štetnika i poboljšava zdravlje usjeva, čime se povećavaju prinosi i kvaliteta proizvoda (Liu i sur., 2018.). Automatiziranim praćenjem i integracijom laserske tehnologije sa suvremenim osjetnicima omogućuje praćenje zdravlja usjeva i pravovremeno prepoznavanje problema poput štetnika ili bolesti, što omogućuje pravovremene intervencije (Zhao i sur., 2019.).

Jedno od ključnih svojstava lasera je i mogućnost uklanjanja štetnih mikroorganizama, što pomaže u očuvanju zdravlja biljaka i smanjenju potrebe za kemijskim zaštitnim sredstvima. Ovo je posebno važno u ekološkoj poljoprivredi, gdje je smanjenje kemikalija prioritet (Nenadić i sur., 2008.).

Osim u primarnoj proizvodnji, primjena lasera također pokazuje potencijal u posliježetvenoj obradi. U tu svrhu, laseri se mogu koristiti za označavanje proizvoda bez upotrebe tinte ili naljepnica. Ova metoda je ekološki prihvatljiva i omogućuje trajno označavanje koje ne utječe na kvalitetu proizvoda. Na primjer, lasersko graviranje može se koristiti za označavanje različitih proizvoda, s informacijama o proizvodu. Laserski sustavi u kombinaciji s optičkom tehnologijom koriste se za otkrivanje unutarnjih defekata u proizvodima, poput udubljenja, pukotina ili stranih materijala. Ovo omogućuje brzu i točnu inspekciju, što povećava sigurnost i standarde kvalitete.

Upotreba lasera za sortiranje i pakiranje omogućava brže i točnije odvajanje plodova prema kvaliteti, boji i veličini, što može poboljšati učinkovitost lanca opskrbe.

Nenadić i sur. (2007.) te Galić i sur. (2017.) navode da laserski tretman može izazvati reakcije na biljnom materijalu koje se iskazuju prvenstveno u procesu sušenja. Autori opisuju laser kao generator monokromatske, koherentne i usmjerene svjetlosti čija upotreba kao predtretmana procesu sušenja može utjecati na vrijeme sušenja čime se ujedno pospješuje i očuvanje bioaktivnih spojeva.

Precizna laserska tehnologija može se koristiti za otkrivanje kontaminacije hrane ili kvarenja proizvoda prije nego što stignu na tržište, čime se povećava sigurnost hrane i smanjuju gubitci (Nicolai i sur., 2022.).

Jedan od najzanimljivijih aspekata primjene lasera u poljoprivredi je istraživanje njihovog potencijala za biostimulaciju biljaka. Biostimulacija predstavlja upotrebu različitih prirodnih ili sintetičkih tvari koje mogu potaknuti rast biljaka i povećati njihovu otpornost na stresne uvjete. Studije su pokazale da laserska svjetlost može pozitivno utjecati na rast i razvoj biljaka, povećavajući fotosintetsku aktivnost i poboljšavajući otpornost na stresne uvjete, kao što su suša ili nedostatak hranjivih tvari. Hasan i sur. (2020.) navode da se biostimulacija uglavnom odnosi na apsorpciju laserske svjetlosti od strane sjemena ili biljke te pretvorbu te svjetlosti u kemijsku energiju za kasnije korištenje. Laserska svjetlost, osobito, može potaknuti aktivaciju enzima i metabolita odgovornih za rast biljaka, što vodi do veće produktivnosti. Ova tehnologija pokazuje potencijal u različitim aspektima poljoprivredne proizvodnje, pomažući u povećanju prinosa i kvalitete usjeva. Istraživanja su pokazala da laserska biostimulacija može potaknuti sintezu klorofila, što rezultira povećanom učinkovitošću fotosinteze. Osim toga, laseri mogu stimulirati metabolizam biljaka, što dovodi do boljeg rasta korijena i nadzemnih dijelova (Budić i sur., 2015.; Galić i sur., 2014.).

### **3.5. Izazovi u implementaciji**

Unatoč brojnim prednostima, postoje izazovi u primjeni lasera u poljoprivredi. Jedan od glavnih izazova je visoka početna investicija potrebna za uvođenje ovih tehnologija, uključujući nabavu sofisticiranih laserskih sustava i potrebne infrastrukture. Održavanje ovih sustava također može biti zahtjevno, posebno u ruralnim područjima gdje često nije dostupna adekvatna tehnička podrška. Nadalje, osjetljivost opreme na prašinu, vlagu i druge vanjske faktore može predstavljati dodatne probleme, osobito u intenzivnim poljoprivrednim okruženjima (Brown i sur., 2018.).

Drugi izazov je potreba za educiranjem poljoprivrednika o prednostima i pravilnoj upotrebi laserske tehnologije. Iako laseri imaju velik potencijal, njihova učinkovitost ovisi o ispravnom korištenju i integraciji s postojećim sustavima. Uvođenje ove tehnologije zahtijeva prilagodbu i promjenu tradicionalnih poljoprivrednih praksi, što može izazvati otpor kod nekih proizvođača (Jones, 2019.).

### **3.6. Utjecaj laserskog zračenja na klijavost**

Klijavost sjemena predstavlja ključni faktor u uspješnoj proizvodnji usjeva. Optimizacija ovog procesa može značajno doprinijeti povećanju prinosa i kvalitete usjeva. U posljednjim godinama, laserska tehnologija se ističe kao inovativna metoda koja može poboljšati klijavost sjemena različitih biljnih vrsta. Različita istraživanja pokazuju da primjena laserskog zračenja, može pozitivno utjecati na biokemijske i fiziološke procese unutar sjemena, čime se povećava njihova klijavost.

Galić (2014.) istraživao je utjecaj laserskog zračenja na sjeme kukuruza, ječma i pšenice te utvrdio da tretman pozitivno djeluje na povećanje energije klijanja i standardne klijavosti. Autor ističe da je primjena lasera ekonomična i ekološki prihvatljiva metoda koja ne zagađuje okoliš.

Vasilevski (2003.) ističe da se utjecaj fizikalnih čimbenika na žive organizme temelji na povećanju energetske bilance putem transformacije energije, neovisno o njezinom izvoru. Prema autoru, transformirana energija, uzrokuje povećanje energetske bilance organizma što za posljedicu ima intenziviranje razmjene tvari te aktivaciju procesa rasta i razvoja pozitivno utječući na klijanje i rast biljaka.

Slične rezultate iznijeli su Cai i sur. (2000.), koji su zaključili da koherentna svjetlost potiče metaboličke reakcije u biljkama i ubrzava staničnu diobu, što rezultira bržim rastom i razvojem. Kao objašnjenje ubrzanog metabolizma, ovi autori navode sposobnost živih organizama da izmjenjuju energiju s okolinom.

Danie (1996.) predlaže dodatno objašnjenje, tvrdeći da koherentna svjetlost ubrzava metaboličke procese povećanjem aktivnosti enzima koji kontroliraju te reakcije. Prema njegovim istraživanjima, povećana enzimatska aktivnost ključni je faktor ubrzanog metabolizma i rasta.

Prema Galiću i sur. (2024.), primjena laserskog tretmana na sjeme pšenice (*Triticum aestivum* L.) povećava postotak klijavosti i energiju klijanja. U njihovom istraživanju, pokazalo se da se nakon izlaganja sjemena laserskom zračenju povećava brzina klijanja i razvoj korijena, što sugerira da laserska biostimulacija može aktivirati metaboličke procese koji su ključni za uspješan razvoj biljaka.

Krawiec i sur. (2016.) navode da se laserska tehnologija može koristiti kao ekološki prihvatljiva metoda za poboljšanje klijavosti sjemena, zamjenjujući konvencionalne kemijske tretmane. Autori sugeriraju da bi laserski tretmani mogli smanjiti potrebu za kemijskim stimulansima, čime se poboljšava održivost poljoprivrednih praksi.

Tehseen i sur. (2016.) analizirali su učinke tretiranja sjemena soje (*Glycine max* L.) laserom i magnetskim poljem na udio šećera, proteine, dušik, biljne metabolite, sadržaj klorofila i aktivnosti enzima. Autori su utvrdili da su aktivnost enzima (tijekom klijanja i ranog rasta), sadržaj biljnih metabolita i sadržaj klorofila značajno povećani pod djelovanjem laserskih i magnetskih predstjetvenih tretmana. Učinak tretmana magnetskim poljem bio je nešto veći od tretmana laserom. Međutim, učinak oba tretmana (laser i magnetsko polje) bio je značajno veći u odnosu na kontrolu (netretirano sjeme). Rezultati su otkrili da tretiranje sjemena laserom i magnetskim poljem prije sjetve ima potencijal za poboljšanje klijavosti, sadržaja klorofila i metabolički važnih enzima.

Liyan i sur. (2012.) istraživali su učinak He-Ne lasera na pšenicu izloženu UV-B zračenju. Njihova istraživanja su pokazala da lasersko zračenje može ublažiti oštećenja uzrokovana UV-B zračenjem, čime se poboljšava klijavost sjemena. Klijavost je mjerena u smislu broja proklijalog sjemena, a rezultati su ukazali na značajno poboljšanje u grupi tretiranoj laserom u usporedbi s kontrolnom grupom. Ovo istraživanje naglašava važnost laserske biostimulacije kao potencijalnog rješenja za povećanje klijavosti sjemena u uvjetima stresa.

Swathy i sur. (2021.) također su istraživali učinak He-Ne lasera na klijanje sjemena, ovaj put na sjemenke patlidžana. Njihova studija je pokazala da lasersko zračenje ne samo da ubrzava klijanje, već i povećava hormone rasta unutar sjemena, kao što su giberelini, koji su ključni za klijanje i razvoj biljaka. Povećanje razine ovih hormona doprinosi bržem razvoju biljaka, čime se poboljšava ukupna klijavost.

Krawiec i sur. (2016.) su se usredotočili na učinke laserskog zračenja na sjemenke španjolske murave (*Scorzonera hispanica* L.). U njihovom istraživanju, laserski tretmani su značajno povećali klijavost sjemena, a rezultati su pokazali i poboljšanje morfoloških karakteristika mladih biljaka. Ova istraživanja dodatno potvrđuju da laserska stimulacija može poboljšati klijavost i rast biljaka kroz aktivaciju metaboličkih putova i poboljšanje fizioloških funkcija sjemena.

Al Salhi i sur. (2018.) istraživali su učinke He-Ne lasera na klijavost pšenice. Njihovi rezultati su pokazali da lasersko zračenje povećava postotak klijavosti, ali i poboljšava fizičko-biohemijske karakteristike sjemena. To uključuje poboljšanu strukturu sjemena, što može olakšati proces klijanja i poboljšati zdravlje mladih biljaka. Osim toga, laserski tretmani su utjecali na porast koncentracije antioksidativnih komponenti, što može dodatno povećati otpornost mladih biljaka na stres.

Kuzmić (2024.) istraživao je učinke različitih laserskih tretmana na aktivaciju potencijala klijavosti sjemena dalmatinskog buhača (*Tanacetum cinerariifolium* /Trevir./ Sch.Bip.) . Prosječna energija klijanja kontrolnog uzorka iznosila je 2,00 %. Povećanje energije klijanja zabilježeno je kod svih uzoraka tretiranih laserom snage 100 mW i 500 mW. Kod tretmana laserom snage 200 mW, porast energije klijanja uočen je kod uzoraka tretiranih 60 i 120 sekundi, dok kod tretmana od 30 sekundi nije bilo promjene u odnosu na kontrolu. Standardna klijavost kontrolnog uzorka iznosila je prosječno 6,00 %. Slično kao kod energije klijanja, porast standardne klijavosti zabilježen je kod gotovo svih tretiranih uzoraka, osim kod uzoraka tretiranih laserom od 500 mW tijekom 60 sekundi, gdje je zabilježeno smanjenje standardne klijavosti od 0,33 %. Najveći porast energije klijanja od 2,00 % postignut je tretmanom laserom snage 100 i 500 mW u trajanju od 120 sekundi, dok je najveći porast standardne klijavosti od 4,00 % uočen kod tretmana laserom snage 100 mW u trajanju od 120 sekundi. Analiza dozračene energije sugerira da je intenzitet zračenja po sjemenki relativno nizak, što ukazuje na to da laserski tretmani na biljni materijal djeluju prvenstveno putem biostimulacije.

Hasan i sur. (2020.) proveli su istraživanje o učincima laserskog predtretmana na klijanje zrna kukuruza (*Zea mays* L.). U pokusu su zrna bila izložena laserskom zračenju na tri različite valne duljine: 632,8 nm (He-Ne), 532 nm (Nd:YAG) i 410 nm (poluvodički laser), uz četiri vremenska intervala (45, 65, 85 i 105 sekundi). Intenziteti zračenja korišteni u tretmanima iznosili su 2 i 4 mW/cm<sup>2</sup>. Rezultati su pokazali da plavo lasersko svjetlo značajno poboljšava morfološka svojstva i prinos kukuruza u usporedbi s kontrolnim uzorcima.

Janayon i Guerrero (2019.) istraživali su učinke He-Ne i Ar lasera niske izlazne snage na rani razvoj sjemena mungo graha (*Vigna radiata* L.). Sjeme je bilo izloženo laserima valnih duljina 632,8 nm (He-Ne) i 488 nm (Ar) tijekom vremena od 0 (kontrolni uzorak), 30, 60, 120, 300 i 600 sekundi. Sve tretirane skupine pokazale su bolje rezultate u klijanju i razvoju u odnosu na kontrolu, dok su optimalni rezultati postignuti kod tretmana u trajanju od 120 sekundi za oba lasera. U usporedbi s kontrolnim uzorcima, tretmani laserima povećali su duljinu hipokotila, korijena i masu biljaka za 22,5/15,9%, 28,8/10,5% i 29,2/15,5%. Autori su zaključili kako laseri niske snage s valnim duljinama u vidljivom spektru mogu biti učinkoviti za unapređenje rasta biljaka.

Samiya i sur. (2020.) ispitivali su učinke poluvodičkih lasera valnih duljina 630 nm (crveni) i 532 nm (zeleni) na klijavost i biokemijska svojstva sjemena pšenice. Tretmani su provedeni snage 1 mW tijekom 20 minuta i 5 mW tijekom 2 minute. Rezultati su pokazali povećanje postotka klijavosti za 25 % kod tretiranih uzoraka u usporedbi s netretiranim. Zeleni laser (532 nm) pokazao je bolje rezultate u povećanju duljine korijena i izbojaka, dok je crveno zračenje (630 nm) bilo učinkovitije u povećanju težine živih i osušenih biljnih dijelova.

Iz navedenih istraživanja može se zaključiti da primjena lasera ima budućnost u poljoprivredi jer se njihovim djelovanjem, bilo na sjeme ili na same biljke, ostvaruju poboljšani parametri u smislu klijanja, rasta, a samim time i prinosa poljoprivrednih kultura. Pored navedenog može se izdvojiti još nekoliko ključnih utjecaja laserskog zračenja na biljni materijal, među kojima se ističu:



- Inhibicija klijavosti: lasersko zračenje određene valne duljine ili intenziteta može inhibirati klijavost sjemena, što rezultira manjom stopom klijanja ili sporijim rastom biljaka. Ovaj učinak može biti posljedica prekomjernog izlaganja ili nepravilnog odabira valne duljine (Swathy i sur., 2021.).
- Promjena fizioloških procesa: lasersko zračenje može utjecati na fiziološke procese u biljkama, uključujući fotosintezu, apsorpciju vode i hranjivih tvari te transpiraciju. Ovi učinci mogu varirati ovisno o valnoj duljini svjetlosti i snazi lasera. Na primjer, povećana fotosinteza može dovesti do bržeg rasta biljaka (Al Salhi i sur., 2018.).
- Promjene u morfologiji: Lasersko zračenje može utjecati na morfološke karakteristike biljaka, kao što su duljina stabljike, broj listova i oblik lišća. Ove promjene mogu biti rezultat poboljšanih fizioloških procesa, koji dovode do zdravijih i otpornijih biljaka (Galić i sur., 2024.).
- Samooporavljivost: U nekim slučajevima, lasersko zračenje se koristi za poticanje reparacije oštećenja biljaka. Laserski tretmani mogu aktivirati mehanizme samooporavka, čime se povećava otpornost biljaka na fizičke i kemijske stresove što u uvjetima klimatskih promjena, može igrati ključnu ulogu u održivosti poljoprivrede. (Liyani i sur., 2012.).

Uz sve navedeno, potrebno je naglasiti da je daljnje istraživanje potrebno kako bi se optimizirali uvjeti za primjenu laserskih tretmana u različitim vrstama sjemena. Svaka biljka ima specifične zahtjeve kada je u pitanju lasersko zračenje, uključujući valnu duljinu, snagu i trajanje izlaganja. Razumijevanje ovih faktora može pomoći u postizanju maksimalnog učinka laserske biostimulacije na klijavost sjemena.

## **4. Materijali i metode**

### **4.1. Biljni materijal**

Analize određivanja energije klijanja i standardne klijavosti su provedene u tri ponavljanja. Kao kontrola korišteno je netretirano sjeme kadulje. Radni uzorak sačinjavalo je  $4 \times 100$  sjemenki, odabranih nasumce iz osnovne skupine i izjednačeno raspoređenih na podlogu za klijanje. Oštećeno sjeme je unaprijed izuzeto.

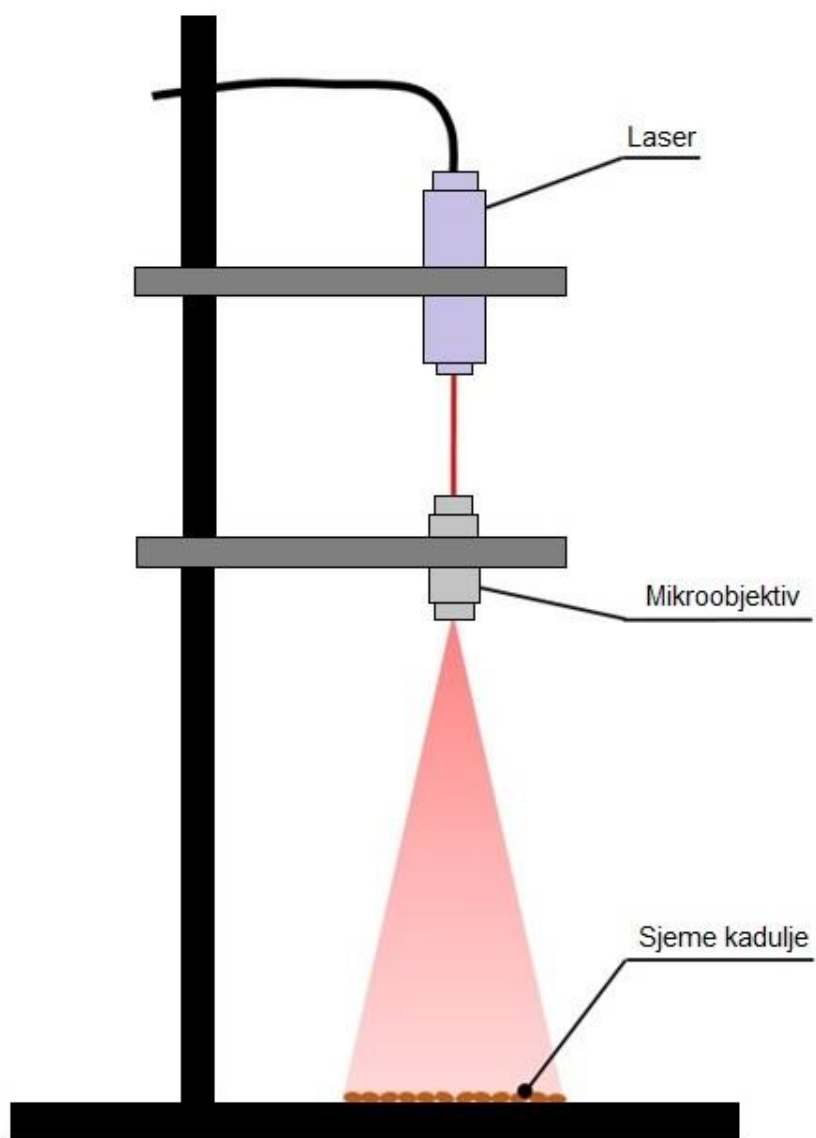
U analizama je korišteno sjeme proizvođača World Of Flowers Sp. z o.o. Varšava, Poljska.

### **4.2. Uređaji i oprema**

Osnovni elementi opreme za laserski tretman uključuju izvore koherentne svjetlosti (lasere) i mikroobjektiv sastavljen od dvije optičke leće, koji omogućuje širenje laserske zrake.

Sjeme kadulje tretirano je trima izvorima koherentne svjetlosti različitih izlaznih snaga: 100 mW (model HLM1845), 200 mW (model HLP18130) i 500 mW (model HJ-308). Različite snage korištene su kako bi se istražio njihov utjecaj na energiju klijanja i standardnu klijavost. Svi izvori svjetlosti emitiraju svjetlost valne duljine 650 nm, što pripada crvenom dijelu vidljivog spektra.

Tretman sjemena proveden je stacionarno unutar osvijetljenog područja promjera 5 cm, pri čemu je sjemenski materijal bio izložen koherentnoj svjetlosti u trajanju od 30, 60 i 120 sekundi. Da bi se postiglo širenje koherentne svjetlosti u okviru zadanog radijusa udaljenost lasera i mikroobjektiva iznosila je 60 mm a udaljenost između mikroobjektiva i tretiranog sjemena 170 mm (slika 3.1.).



Slika 3.1. Smještaj izvora koherentne svjetlosti i položaj mikroobjektiva

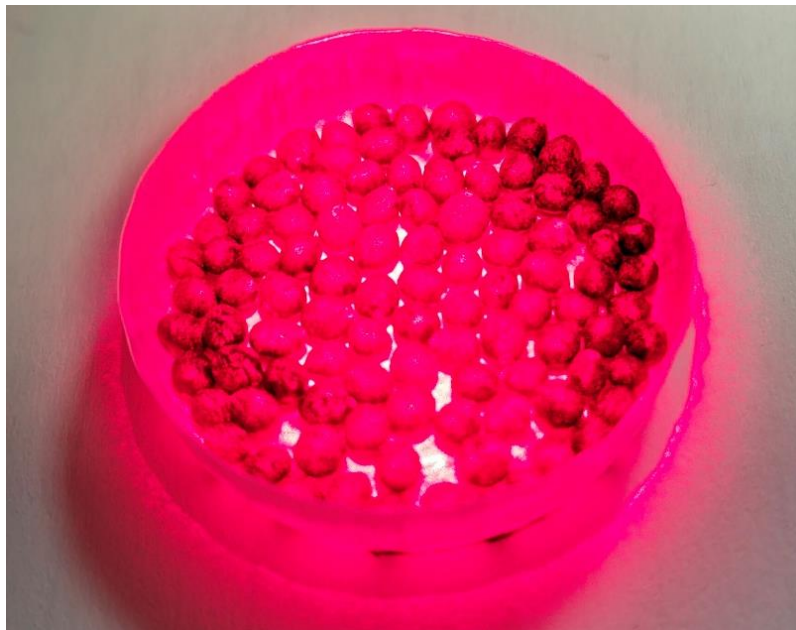
Izvor: Plietić (2007.)

### 4.3. Tretmani

Tretiranje sjemena provedeno je tijekom lipnja 2024. godine u laboratoriju Zavoda za održive tehnologije i obnovljive izvore energije. Provedeni tretmani prikazani su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. Opis tretmana

Tretman	Oznaka tretmana	Opis tretmana
-	Kontrola	Kontrolni uzorak
Tretman 1.	100 mW/30 s	Laser snage 100 mW/ trajanje tretmana 30 s
Tretman 2.	100 mW/60 s	Laser snage 100 mW/ trajanje tretmana 60 s
Tretman 3.	100 mW/120 s	Laser snage 100 mW/ trajanje tretmana 120 s
Tretman 4.	200 mW/30 s	Laser snage 200 mW/ trajanje tretmana 30 s
Tretman 5.	200 mW/60 s	Laser snage 200 mW/ trajanje tretmana 60 s
Tretman 6.	200 mW/120 s	Laser snage 200 mW/ trajanje tretmana 120 s
Tretman 7.	500 mW/30 s	Laser snage 500 mW/ trajanje tretmana 30 s
Tretman 8.	500 mW/60 s	Laser snage 500 mW/ trajanje tretmana 60 s
Tretman 9.	500 mW/120 s	Laser snage 500 mW/ trajanje tretmana 120 s



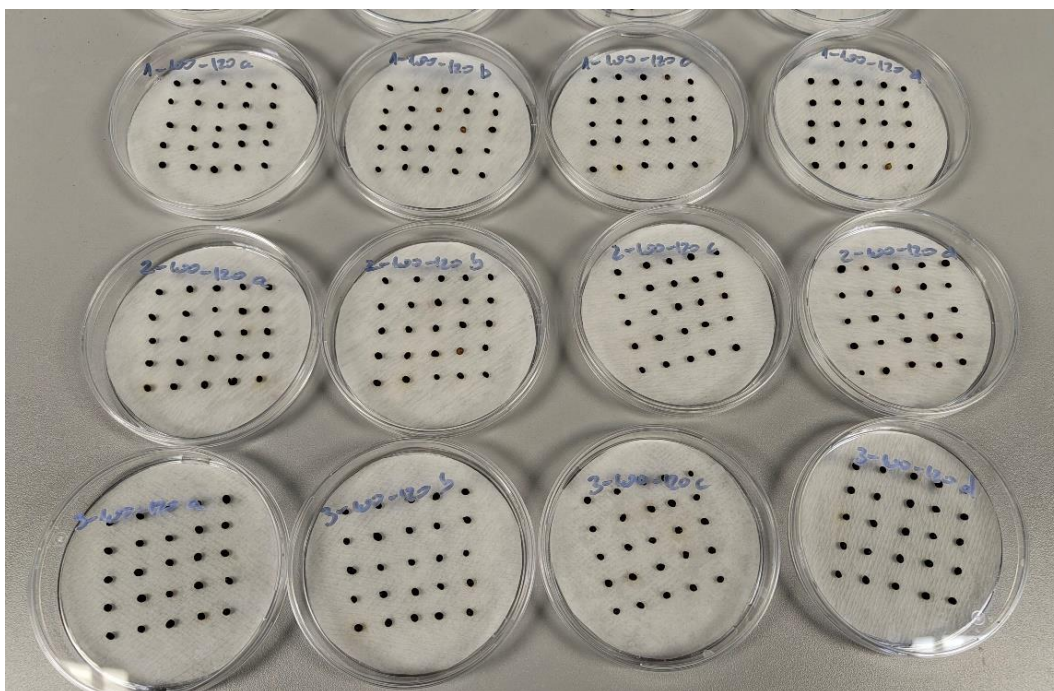
Slika 3.2. Prikaz sjemena kadulje tijekom tretmana

Izvor: Vlastita fotografija – Erik Margetić

#### 4.4. Analiza klijavosti i energije klijanja

Postupak naklijavanja je proveden prema Pravilniku o temeljnim zahtjevima kakvoće, načinu ispitivanja, pakiranju i deklariranju sjemena poljoprivrednog bilja (NN 4/2005). Kao podloga za klijanje korišten je visokoupijajući papir izrađen od 100 % čistog drveta, pamuka ili pročišćenih celuloznih vlakana. Ova podloga ne sadrži gljivice, bakterije niti toksične dodatke koji bi mogli negativno utjecati na klijavost sjemena. Istovremeno je porozna, ali dovoljno kompaktna da spriječi prodor korijena u podlogu, omogućujući mu rast na površini. Podloga mora zadržavati dovoljnu količinu vode kako bi ostala vlažna tijekom cijelog ispitivanja klijavosti, pri čemu je pH vrijednost u rasponu od 6,0 do 7,5. Za vlaženje je korištena destilirana voda bez prisutnosti organskih i anorganskih primjesa.

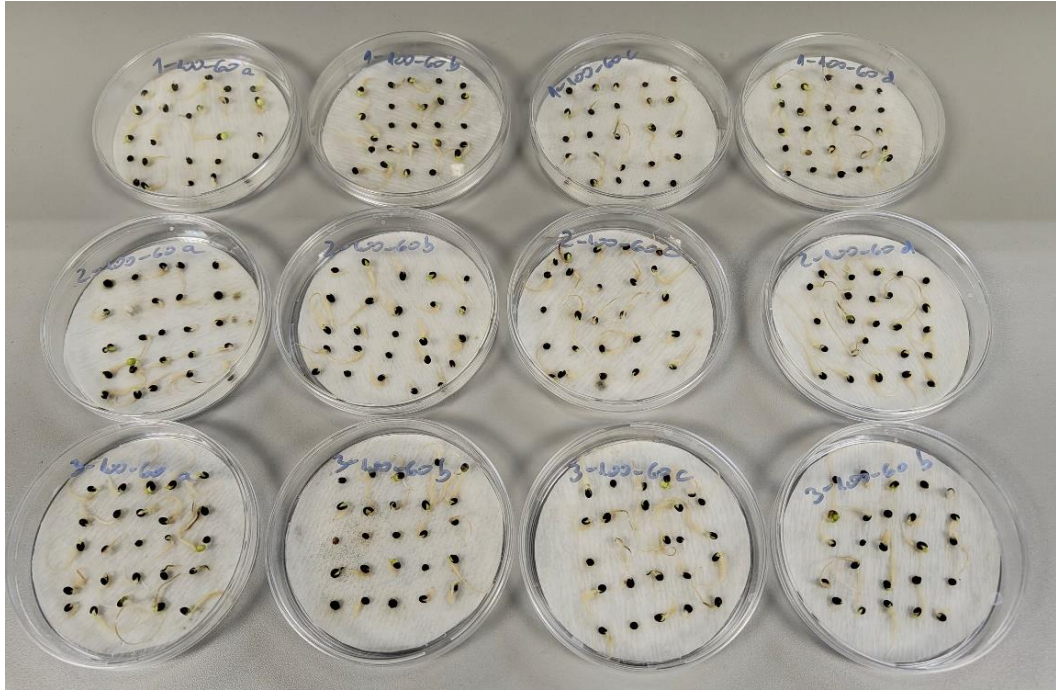
Za naklijavanje je korišten kontrolni uzorak te uzorci tretirani na način prikazan u tablici 3.1. Nakon laserskog tretmana, sjeme kadulje je pravilno raspoređeno u Petrijeve zdjelice, u kojima je prethodno postavljena papirnata podloga navlažena s 2 ml destilirane vode (slika 3.3.). Napunjene Petrijeve zdjelice stavljene su na naklijavanje. Broj proklijalih sjemenki kontroliran je svakih 48 sati, pri čemu se proklijalom sjemenkom smatrala ona čiji je korjenčić  $\geq 2$  mm. Energija klijavosti određena je 6., a standardna klijavost 12. dan provođenja eksperimenta (slike 3.4. i 3.5.).



Slika 3.3. Određivanje klijavosti – 1. dan

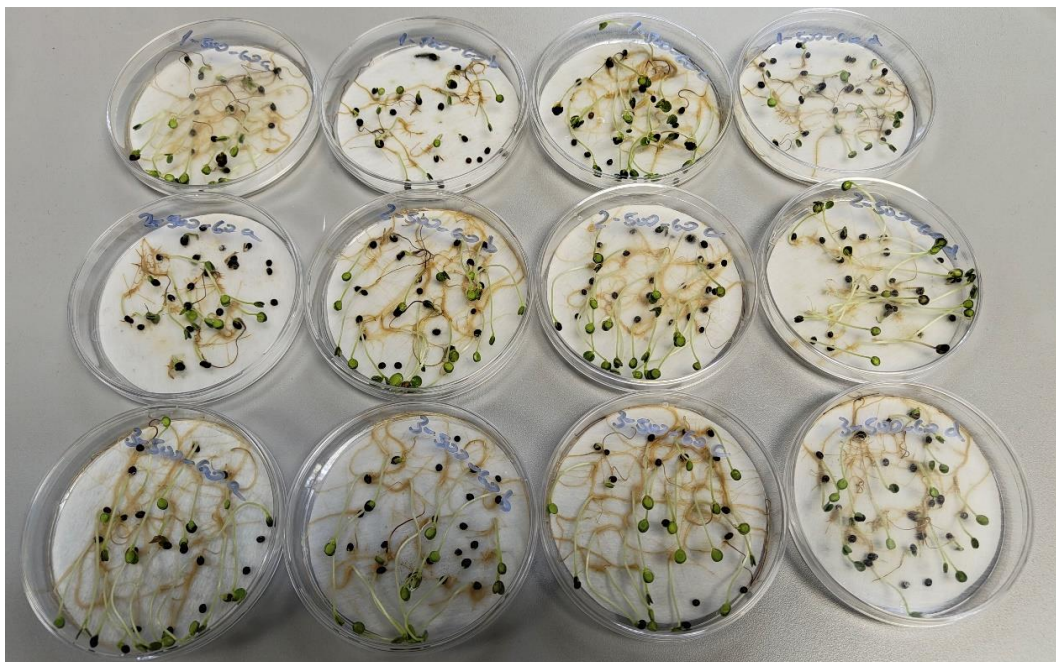
Izvor: Vlastita fotografija – Erik Margetić





Slika 3.4. Određivanje klijavosti – 6. dan

Izvor: Vlastita fotografija – Erik Margetić



Slika 3.5. Određivanje klijavosti – 12. dan

Izvor: Vlastita fotografija – Erik Margetić

#### **4.5. Statistička obrada podataka**

Za analizu je korišten generalizirani linearni model, s uključenim ponavljanjem, kao i svim interakcijama uzorka, izlazne snage lasera i trajanja tretmana. Za analizu je korišten postupak PROC GLM iz SAS programskog paketa, verzija 9.3. (2010.). Dobiveni podaci obrađeni su analizom varijance, dok su razlike između srednjih vrijednosti testirane LSD testom, pri čemu je  $p = 1\%$  smatrana statističkim pragom značajnosti.

## 5. Rezultati i rasprava

Svjetlosni podražaja imaju značajan utjecaj na žive organizme a tom činjenicom se može objasniti djelovanje koherentnog zračenja niskoenergetskih netermalnih lasera koji su korišteni u ovim pokusima. Unatoč tome što takvi laseri imaju znatno manju izlaznu snagu od termalnih oni ipak mogu imati određeni utjecaj na žive organizme. S ciljem utvrđivanja svojstava koherentnog zračenja valne duljine 650 nm, provedena su mjerenja dozračene energije tretiranom materijalu.

Energija pojedinačnog fotona izračunata je pomoću prikazane formule:

$$E_f = hv = (hc)/\lambda = 3,05815 \times 10^{-18} \text{ J/foton}$$

gdje su:

- $h$  – Plankova konstanta ( $6,626 \times 10^{-34}$  Js),
- $\nu$  – frekvencija fotona =  $4,61538 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$  (za poluvodički laser),
- $c$  – brzina svjetlosti =  $2,99 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ ,
- $\lambda$  – valna duljina (650 nm).

Iz navedenog slijedi da broj fotona iznosi:

$$n_{100mW} = \frac{E_{lasera}}{E_{fotona}} = \frac{0,1}{3,05815 \times 10^{-18}} = 3,27 \times 10^{16} \text{ fotona/s za 100 mW laser}$$

$$n_{200mW} = \frac{E_{lasera}}{E_{fotona}} = \frac{0,2}{3,05815 \times 10^{-18}} = 6,54 \times 10^{16} \text{ fotona/s za 200 mW laser}$$

$$n_{500mW} = \frac{E_{lasera}}{E_{fotona}} = \frac{0,5}{3,05815 \times 10^{-18}} = 16,35 \times 10^{16} \text{ fotona/s za 500 mW laser}$$

Promjer osvijetljenog područja iznosio je 25 mm i te je na osnovu toga izračunata i njegova površina:

$$A = r^2\pi = 4,91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

gdje je:

- $A$  – površina osvijetljenog područja ( $\text{m}^2$ ),
- $r$  – polumjer osvijetljenog područja (m)



Površina osvijetljenog dijela pojedinačnog sjemena iznosila je približno 3,94 mm<sup>2</sup> (3,94 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>) (n=30). Imajući u vidu da se tijekom tretmana unutar osvijetljenog područja nalazilo 100 sjemenki njihova ukupna (aktivna) površina iznosila je približno 394 mm<sup>2</sup> (3,94 x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>). Pošto je površina osvijetljenog područja iznosila 4,91 x 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>, aktivna površina (A<sub>ak</sub>) koju su zauzimale sjemenke unutar osvijetljenog područja iznosila je 80,41 %.

Intenziteti zračenja korištenih lasera unutar osvijetljenog područja tijekom jedne sekunde tretmana izračunat je pomoću formule:

$$I = \frac{E_L}{A} \times T \left( \frac{Ws}{m^2} \right)$$

gdje su:

- $E_L$  – izlazna snaga lasera (W)
- $T$  – vrijeme trajanja tretmana (s).
- $A$  – površina osvijetljenog područja (m<sup>2</sup>)

Na osnovu navedene formule izračunati su intenziteti zračenja tijekom jedne sekunde i oni su iznosili 203,66 Jm<sup>-2</sup> za 100 mW laser, 407,33 Jm<sup>-2</sup> za 200 mW laser i 1018,32 Jm<sup>-2</sup> za 500 mW laser.

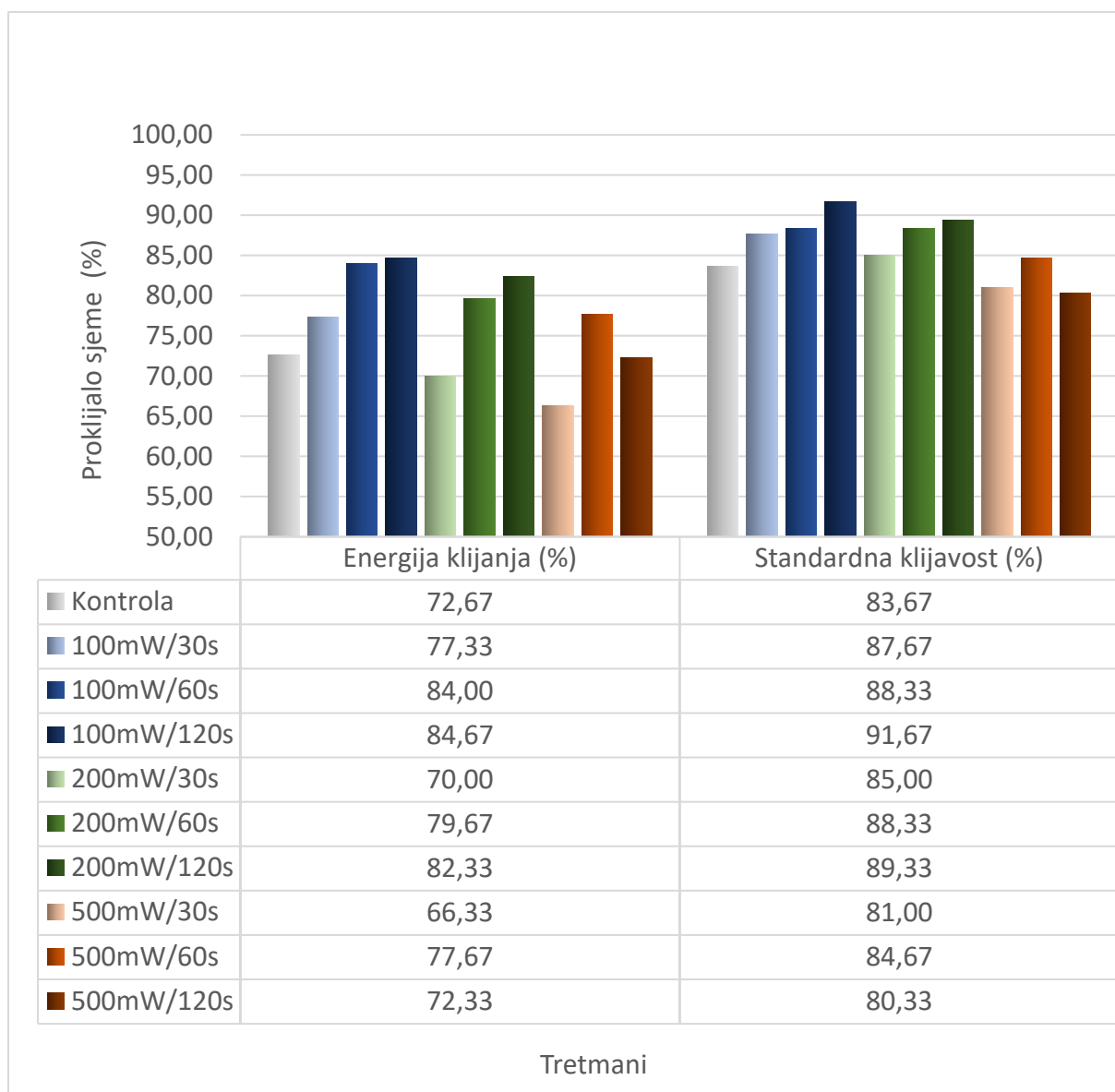
Uzevši u obzir da je sjemenski materijal zauzimao prosječno 80,41 % ozračene površine, intenziteti zračenja po aktivnoj površini u intervalu od jedne sekunde iznosili su 163,77 Jm<sup>-2</sup> za 100 mW laser, 327,53 Jm<sup>-2</sup> za 200 mW laser i 818,84 Jm<sup>-2</sup> za 500 mW laser.

S obzirom da je svaki tretman sadržavao 100 sjemenki određen je intenzitet zračenja po pojedinačnoj sjemenki i rezultati su prikazani u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Intenzitet zračenja po pojedinačnoj sjemenki tijekom tretmana.

Izlazna snaga laser (mW)	Trajanje tretmana(s)	Intenzitet zračenja po pojedinačnoj sjemenki (Jm <sup>-2</sup> )
100	30	49,13
	60	98,26
	120	196,52
200	30	98,26
	60	196,52
	120	393,04
500	30	245,65
	60	491,30
	120	982,61

Dobiveni rezultati pokazuju da je intenzitet zračenja po pojedinoj sjemenki relativno nizak, što upućuje na to da se učinak lasera na biljni materijal primarno temelji na biostimulaciji.



Slika 4.1. Grafički prikaz prosječne energije klijanja i standardne klijavosti

Izvor: Vlastiti grafički prikaz – Erik Margetić

Prosječna vrijednost energije klijanja kontrolnog uzorka iznosila je 72,67 %. Nakon provedenih tretmana porast energije klijanja zabilježen je kod svih uzoraka tretiranih 100 mW laserom i to za 4,66 % kod uzorka tretiranih 30 s, 11,33 % kod uzorka tretiranih 60 s i 12,00 % kod uzorka tretiranih 120 s. Kod uzorka tretiranih 200 mW laserom porast energije klijanja od 7,00 % i 9,66 % zabilježen je kod uzorka tretiranih 60 i 120 s, dok kod uzorka tretiranih 30 s zabilježena je promjena, odnosno bila je manja u odnosu na kontrolu za 2,67 %. Kod tretmana 500 mW laserom porast energije klijanja od 5,00 % zabilježen je samo pri trajanju tretmana od 60 s. Navedeni laser izazvao je smanjenje energije klijanja od 6,34 % pri trajanju tretmana 30 s i 0,34 % pri trajanju tretmana od 120 s.

Prosječna vrijednost standardne klijavosti kod kontrolnog uzorka iznosila je 83,67 %. Kao i kod energije klijanja povećanje klijavosti zabilježeno je kod svih uzoraka tretiranih 100 mW laserom i to za 4,00 % kod uzorka tretiranih 30 s, 4,66 % kod uzorka tretiranih 60 s i 8,00

% kod uzoraka tretiranih 120 s. Kod svih uzoraka tretiranih 200 mW laserom također je zabilježeno povećanje klijavosti i to za 1,33 % pri tretmanu od 30 s, 4,66 % pri tretmanu od 60 s i 5,66 % pri tretmanu od 120 s. Kod uzoraka tretiranih 500 mW laserom povećanje klijavosti od 1,00 % zabilježeno je samo kod tretmana od 60 s. Kod tretmana 500 mW laserom u trajanju od 30 i 120 s zabilježeno je smanjenje klijavosti od 2,67 % odnosno 3,34 % u odnosu na kontrolni uzorak.

Uzevši u obzir izlazne snage lasera vidljivo je da je tretman od 100 mW laserom u trajanju od 120 s uzrokovao najveći porast energije klijanja i standardne klijavosti.

Rezultati koji su dobiveni očekivani su s obzirom na literaturne podatke koji uglavnom pokazuju pozitivan učinak laserskog tretmana na energiju klijanja i standardnu klijavost. Međutim, u ovom istraživanju zabilježeno je smanjenje energije klijanja i standardne klijavosti kod uzoraka koji su tretirani s 500 mW laserom u trajanju od 30 i 120 sekundi. Ova pojava može se objasniti činjenicom da određeni tipovi zračenja mogu biti neprikladni zbog svoje sposobnosti da prodru duboko u sjeme. Stoga je ključno prilagoditi količinu primijenjene energije prema morfološkim karakteristikama tretiranog materijala. Smanjenje klijavosti i energije klijanja u skladu je s istraživanjima Fanara i sur. (2007.) te Zago i Rela (2007.), koji su pokazali da prekomjerna apsorpcija energije unutar sjemena može oštetiti embrionalne stanice, izazvati smrtnost ili mutacije, što na kraju dovodi do smanjene klijavosti.

Statističke analize utjecaja tretmana na energiju klijanja i standardnu klijavost prikazane su u tablici 4.2.

Tablica 4.2. Analiza utjecaja tretmana na energiju klijanja i standardnu klijavost sjemena kadulje

	Energija klijanja (%)	Standardna klijavost (%)
Kontrola	72,67 <sup>bdc</sup> ± 9,29	83,67 <sup>bdc</sup> ± 4,16
100mW/30s	77,33 <sup>bdac</sup> ± 6,51	87,67 <sup>bac</sup> ± 5,13
100mW/60s	84,00 <sup>ba</sup> ± 1,00	88,33 <sup>ba</sup> ± 2,08
100mW/120s	84,67 <sup>a</sup> ± 2,52	91,67 <sup>a</sup> ± 1,15
200mW/30s	70,00 <sup>dc</sup> ± 2,65	85,00 <sup>bdac</sup> ± 1,73
200mW/60s	79,67 <sup>bac</sup> ± 1,53	88,33 <sup>a</sup> ± 1,53
200mW/120s	82,33 <sup>ba</sup> ± 3,06	89,33 <sup>ba</sup> ± 0,58
500mW/30s	66,33 <sup>d</sup> ± 7,09	81,00 <sup>dc</sup> ± 4,58
500mW/60s	77,67 <sup>bdac</sup> ± 3,51	84,67 <sup>bdac</sup> ± 2,52
500mW/120s	72,33 <sup>bdc</sup> ± 4,51	80,33 <sup>d</sup> ± 3,51
ANOVA	p ≤ 0,0052	p ≤ 0,0075

Statističkom obradom rezultata istraživanih parametara kod energije klijanja p ≤ 0,0052 i kod standardne klijavosti sjemena kadulje p ≤ 0,0075 zabilježene su značajne statističke razlike s obzirom na sve varirane faktore (tretman i vrijeme trajanja tretmana). Oba rezultata pokazuju da su varijacije u energiji klijanja i standardnoj klijavosti značajne, tj. promjene koje su primijećene nisu slučajne i vjerojatno su posljedica istraživanih faktora.

## 6. Zaključak

Rezultati istraživanja pokazuju da je intenzitet zračenja po sjemenki relativno nizak, što upućuje na to da laser djeluje na biljni materijal prvenstveno putem biostimulacijskog učinka. Tretmani s laserom snage 100 i 200 mW općenito su pokazali povećanje energije klijanja i standardne klijavosti sjemena. Najbolji učinak pokazao je tretman laserom od 100 mW u trajanju od 120 sekundi, pri čemu je energija klijanja porasla za 12,00 %, a standardna klijavost za 8,00 %.

S druge strane, smanjenje energije klijanja i klijavosti kod tretmana laserom od 500 mW u trajanju od 30 i 120 sekundi ukazuje na mogućnost oštećenja sjemena pri višim dozama zračenja.

Kako bi lasersko zračenje bilo što učinkovitije u biostimulaciji, ključno je prilagoditi količinu energije dozračene sjemenu morfologiji tretiranog materijala. To zahtijeva uspostavljanje ravnoteže između izlazne snage lasera, trajanja tretmana i fokusiranja laserskog snopa.

## 7. Popis literature

1. Al Salhi M. S., Tashish W., Al-Osaif S. S., Atif M. (2018). Effects of He–Ne Laser and Argon Laser Irradiation on Growth, Germination, and Physico-Biochemical Characteristics of Wheat Seeds (*Triticum aestivum* L.). *Laser Physics*, 29(1), 015602.
2. Bittner M. (2010). *Salvia officinalis*: Historical Uses and Modern Applications. *Journal of Medicinal Plants*. 6(2), 123-130.
3. Brewster J. (2014). *Onions and Other Vegetable Alliums*. CABI Publishing.
4. Brown P., Zhang M., Li Y., Patel R. (2018). Sustainable farming through advanced technologies. *Sustainable Agriculture Journal*, 44(1), 52-67.
5. Buchbauer G., Jirovetz L., Hieber U. (1993). Aromatherapy: The use of essential oils for therapeutic purposes. *Journal of Essential Oil Research*, 5(5), 451-454.
6. Buchmann S. L., Nabhan G. P. (1996). *The Forgotten Pollinators*. Island Press.
7. Cai S. W., Qi Z., Ma X. L. (2000), The effect of He–Ne laser irradiation on soluble protein synthesis of corn seedling, *Chin. J. Lasers*. 27: 284-288.
8. Caniato R., Macciola V., Barba F. (2007). Chemical composition of essential oils from *Salvia* species and their biological activities. *Journal of Essential Oil Research*, 19(2), 115-120.
9. Cavanagh H. M. A., Wilkinson J. M. (2002). Biological activities of lavender essential oil. *Phytotherapy Research*, 16(4), 301-308.
10. Danie R. M. (1996). The upper limits of enzyme thermal stability, *Enzyme Microb. Technol.* 19: 74-79.
11. Deans S. G., Ritchie G. (1987). Antimicrobial properties of plant essential oils. *Journal of Essential Oil Research*, 5(4), 243-249.
12. Duke J. A. (1985). *Handbook of Edible Weeds*. CRC Press.
13. Duke J. A. (2002). *Handbook of Medicinal Herbs*. CRC Press.
14. El-Feky A. M., Aboulthana W. M. (2016.). Phytochemical and biochemical studies of sage (*Salvia officinalis* L.). *Pharmaceutical and Biosciences Journal*.
15. Figueiredo A. C., Barroso J. G., Pedro L. G., Scheffer J. J. (2018). Herbs: Genus *Salvia*. Essential Oils and Bioactive Compounds. In *Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety*.. Academic Press. 89-104.
16. Galić A. (2014). Primjena laserske stimulacije u sušenju žitarica. Doktorski rad, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.
17. Galić A., Plietić S., Dobričević N., Voća S., Šic Žlabur J. (2017). Predsušenje lista stevije (*stevia rebaudiana*) kao dodatka za krmne smjese uporabom niskoenergetskog laserskog zračenja. *Agronomski glasnik : Glasilo Hrvatskog agronomskog društva*, 79 (1-2): 3-14.
18. Galić A., Plietić S., Vučina D. (2024). Utjecaj laserskih tretmana na klijavost pšenice. Zbornik radova 59. hrvatskog i 19. međunarodnog Simpozija agronoma. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet, 554-558.

19. Ghorbani A., Naderi R., Zare M. (2019). Antioxidant and Antimicrobial Activities of *Salvia Officinalis*. *Journal of Ethnopharmacology*, 243, 112148.
20. Grgić A. (2017). Primjena lasera u industriji i medicini. Split: Sveučilište u Splitu. (str. 47, 73).
21. Grgić D. (2017). Osnove laserskih sustava. *Hrvatski časopis za tehnološki razvoj*, 23(1), 45-60.
22. Hasan M., Hanafiah M. M., Aeyad Taha Z., Al Hilfy I. H. H., Said M. N. M. (2020) Laser irradiation effects at different wavelengths on phenology and yield components of pretreated maize seed. *Appl. Sci.* 10, 1189.
23. Houghton P. J. (1995). *The Science of Herbs*. London: Herbal Press.
24. Hughes J. (2012). *Growing Herbs in Pots: An Essential Guide*. Timber Press.
25. Janayon R. V. B., Guerrero R. A. (2019). Laser irradiation of mung bean (*Vigna radiata* L.) at two wavelengths for enhanced seedling development. *Int. J. Opt.* 3; 1-7.
26. Johnson R., Liu W., Parker T. (2020). Laser technology in modern agriculture: Potentials and challenges. *Precision Farming Review*, 29(3), 78-90.
27. Jones D. (2019). Innovations in Agricultural Practices: Adapting to New Technologies. *AgroTech*, 15(7), 34-38.
28. Khan F. A., Rahman S. U., Zaman W. (2021). Phytochemical and Pharmacological Properties of *Salvia officinalis*. *International Journal of Herbal Medicine*, 9(1), 54-62.
29. Khan M. I., Al-Dosari M., Al-Omari F., Al-Balushi M. (2008). "Antioxidant properties of *Salvia officinalis*". *Phytotherapy Research*, 22(8), 1015-1018.
30. Khan M. I., Aslam M., Ahmed S. (2010). *Salvia officinalis* and its pharmacological effects: A review. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 3(1), 10-14.
31. Kleijn D., van Langevelde F. (2006). Interrelationship between landscape structure and species richness in the Netherlands. *Ecological Indicators*, 6(4), 759-771.
32. Kowalska B., Brzezińska E., Woźniak E. (2022). Influence of Sage (*Salvia officinalis*) Seed Treatment on Germination and Seedling Growth. *Plant Cell Reports*, 41(3), 101-107.
33. Krawiec M., Dziwulska-Hunek A., Palonka S., Kaplan M., Baryla P. (2016). Effect of laser irradiation on seed germination and root yield of scorzonera (*Scorzonera hispanica* L.). *Acta Agrophysica*, 23, 621–631.
34. Kuzmić D. (2024). Aktivacija potencijala klijavosti dalmatinskog buhača primjenom koherentnog zračenja, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet.
35. Liang Z., Li, J., Zhang S., Chen X. (2010). Antioxidant activity of sage (*Salvia officinalis*) and its potential benefits in human health. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(7), 3885-3891.
36. Liu Y., Zhang X., Wu S. (2018). Laser Treatment for Pest Control in Crops. *Agricultural Engineering Research*, 29(2), 99-106.
37. Liyan Y., Rong H., Yi S. (2012). Damage repair effect of He-Ne laser on wheat exposed to enhanced ultraviolet-B radiation. *Plant Physiology and Biochemistry*, 57, 218-221.
38. Maksimović M., Vidic D., Miloš M., Šolić M. E., Abadžić S., Siljak-Yakovlev S. (2007). Effect of the environmental conditions on essential oil profile in two Dinaric *Salvia*

- species: *S. brachyodon* Vandas and *S. officinalis* L.. *Biochemical Systematics and Ecology*. 35 (8): 473-478.
39. Marušić R. (1984). *Ljekovitim biljem do zdravlja*. Mladost. Zagreb.
  40. Matoničkin I. (2007). *Osnove elektromagnetskih valova*. Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb.
  41. Matoničkin V. (2007). *Osnove laserske fizike*. Rijeka: Tehnička knjiga. (str. 52, 80).
  42. Mikulić-Petkovšek M., Jukić V., Šojat S. (2014). Antioxidant activity and bioactive compounds in the leaves of selected sage species. *Food Chemistry*, 163, 124-130.
  43. Nenadić K., Jović F., Plietić S. (2008). An Investigation of Automatic Treatment of Seeds With Low Power Laser Beam, *Automatics* 49 (3-4): 127-134.
  44. Nicolai B., Singh J., Devreese S. (2022). Enhancing Food Safety with Laser Scanning. *Food Quality and Safety Review*, 28(1), 12-20.
  45. Narodne novine (2005). *Pravilnik o temeljnim zahtjevima kakvoće, načinu ispitivanja, pakiranju i deklariranju sjemena poljoprivrednog bilja*. Zagreb: Narodne novine d.d.
  46. Panahi Y., Khalili N., Saadat M. (2016). Efficacy of *Salvia officinalis* L. Extracts in the Treatment of Inflammatory Bowel Disease. *Clinical Laboratory*, 62(6), 1145-1153.
  47. Pavlović R., Pavlović M. (2020). Quality of Sage Seeds (*Salvia officinalis* L.) from Different Geographic Origins. *Agricultural Sciences*, 8(4), 249-257.
  48. Puljić I. (2017). *Laserska tehnologija i njene primjene*. Zagreb: Tehničko sveučilište. (str. 33, 60, 90).
  49. Ranjbar A., Bahrami S., Pirdashti H. (2016). Drought Resistance Mechanisms of Medicinal Plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 108, 211-221.
  50. Samiya S., Younus A. (2020). Effect of low power laser irradiation on bio-physical properties of wheat seeds. *Inf. Process. Agric.* 7; 456-465.
  51. Smith J. (2015). Advanced agricultural technologies: laser applications. *Journal of Agricultural Science*, 34(2), 145-150.
  52. Swathy P. S., Kiran K. R., Joshi M. B., Mahato, K. K., Muthusamy A. (2021). He–Ne laser accelerates seed germination by modulating growth hormones and reprogramming metabolism in brinjal. *Sci Rep*, 11, 7948. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86984-8>
  53. Tehseen A., Yasir J., Munawar I., Zia-ul H., Mazhar A. (2016). Laser light and magnetic field stimulation effect on biochemical, enzymes activities and chlorophyll contents in soybean seeds and seedlings during early growth stages, *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 165, 283-290, <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2016.10.022>.
  54. Tuleukhanov S. T., Abu-Elsaoud A. M. (2013). Can He–Ne Laser Induce Changes in Oxidative Stress and Antioxidant Activities of Wheat Cultivars from Kazakhstan and Egypt? *Science International*, 1, 39-50.
  55. Vasilevski G. (2003). Perspectives of the Application of Biophysical Methods in Sustainable Agriculture, *Bulg. J. Plant Physiol., Special Issue*, 179–186.

56. Walker J. B., Sytsma K. J. (2007). Staminal Evolution in the Genus *Salvia* (Lamiaceae): Molecular Phylogenetic Evidence for Multiple Origins of the Staminal Lever. *Annals of Botany*, 100: 375-391.
57. Willfort R. (2002). Ljekovito bilje i njegova upotreba. *Erudit Zagreb*, Zagreb.
58. Zago C., Rela P. R. (2007). Technical Feseability for Electron Beam Application on Maize Seeds Disinfection for Maize Cultivation in Brazil, International Nuclear Atlantic Conference INAC 2007 Santos, SP, Brazil, September 30 to October 5, 2007 Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN
59. Zhang M., Li J., Zhang X., Wu Z. (2013). Genetic diversity and relationship among *Salvia* species revealed by RAPD and ISSR markers. *Horticulture Research*, 43, 23-29.
60. Zhao L., Tan Z., He X. (2019). Laser Sensing in Precision Agriculture. *Journal of Agricultural Sensors*, 34(4), 305-312.
61. Zohary D., Spiegel-Roy P. (1975). Geographical Origin and Domestication of the Wild Wheats. *Economic Botany*, 29(4), 336-351.

### Mrežni izvori

62. Kadulja <<https://azena.hr/hr/herb/kadulja/>> Pristupljeno: 11. prosinca 2024.
63. Morfologija kadulje  
<[https://bs.wikipedia.org/wiki/Kadulja#/media/Datoteka:Salvia\\_officinalis\\_-\\_K%C3%B6hler%E2%80%93s\\_Medizinal-Pflanzen-126.jpg](https://bs.wikipedia.org/wiki/Kadulja#/media/Datoteka:Salvia_officinalis_-_K%C3%B6hler%E2%80%93s_Medizinal-Pflanzen-126.jpg)> Pristupljeno: 6. prosinca 2024.
64. Prikaz lasera s čvrstom jezgrom <[https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Laser\\_1.png](https://hr.wikipedia.org/wiki/Datoteka:Laser_1.png)> Pristupljeno: 11. prosinca 2024.
65. Sistematska podjela ljekovite kadulje (*Salvia officinalis* L.) <<https://www.gbif.org/species/2927004>> Pristupljeno: 1. prosinca 2024.



## Popis slika

Slika 2.1. Kadulja.....	2
Slika 2.2. Morfologija kadulje.....	4
Slika 2.3. Prikaz lasera s čvrstom jezgrom.....	8
Slika 3.1. Smještaj izvora koherentne svijetlosti i položaj mikroobjektiva.....	18
Slika 3.2. Prikaz sjemena kadulje tijekom tretmana.....	19
Slika 3.3.: Određivanje klijavosti – 1. dan.....	20
Slika 3.4. Određivanje klijavosti – 6. dan.....	21
Slika 3.5. Određivanje klijavosti – 12. dan.....	21
Slika 4.1. Grafički prikaz prosječne energije klijanja i standardne klijavosti.....	25

## Popis tablica

Tablica 2.1. Sistematska podjela ljekovite kadulje ( <i>Salvia officinalis</i> L.).....	2
Tablica 3.1. Opis tretmana.....	19
Tablica 4.1. Intenzitet zračenja po pojedinačnoj sjemenki tijekom tretmana.....	24
Tablica 4.2. Analiza utjecaja tretmana na energiju klijanja i standardnu klijavost sjemena kadulje.....	26

## **Životopis**

Erik Margetić rođen je 13. studenog, 1997. godine u Zagrebu. Pohađao je osnovnu školu Žuti brijeg u Zagrebu, nakon završenog osnovnog obrazovanja upisao je srednju Poljoprivrednu školu Zagreb. Godine 2017. godine upisuje Agronomski fakultet u Zagrebu, smjer Poljoprivredna tehnika. Posjeduje znanje engleskog jezika razine B2. Završio preddiplomski smjer Poljoprivredna tehnika 2022. godine i upisao smjer Poljoprivredna tehnika- mehanizacija.