

.....

Valentina ŠOŠTARČIĆ

*Sveučilište u Zagrebu Agronomski fakultet Zavod za herbologiju
vsostarcic@agr.hr*

TOPLINSKE METODE FIZIKALNOG SUZBIJANJA KOROVA

SAŽETAK

Toplinske metode fizikalnog suzbijanja korova temelje se na korištenju različitih oblika energije, poput topline, svjetlosti i zračenja, kao dio integriranog suzbijanja korova. Podizanjem svijesti o negativnim posljedicama kemijski sintetiziranih tvari na okoliš, ali i sve manje dostupnu broju aktivnih tvari na tržištu, fizikalne metode suzbijanja sve se češće primjenjuju u zemljama diljem svijeta. Jedna od prvih poznatih primjena topline (plamen) za suzbijanje korova zabilježena je još 1852. godine u uzgoju šećerne trske u SAD-u, te u proizvodnji pamuka 1940-ih. Uz primjenu plamena, metoda solarizacije razvijena 1970-te smatra se jednom od najstarijih toplinskih metoda fizikalnog suzbijanja korova. Od 1990-ih nadalje razvijene su suvremenije metode poput upotrebe vruće vode, vruće pare i pjene. Krajem 1990-ih i danas sve više se istražuju mogućnosti suzbijanja korova primjenom električne energije, mikrovalnog zračenja i lasera. Prednosti fizikalnog suzbijanja primjenom topline usporedive su s herbicidima, koji imaju neselektivan učinak te ne ostavljaju rezidue, ne izazivaju zanošenje i ne pogoduju razvoju rezistentnosti. Fizikalne metode suzbijanja korova mogu se primijeniti u tri roka primjene: prije sjetve, prije nicanja ili nakon nicanja. Vrijeme primjene ovisi o odabranoj metodi, a cilj može biti suzbijanje nadzemne mase korova ili reduciranje banke sjemena korova u tlu. Svaka od tih mjera ima specifičan način primjene i postiže različite temperature na ciljanom području. Cilj je ovoga preglednoga rada prikazati vrste toplinskih metoda fizikalnog suzbijanja korova, objasniti njihove mehanizme djelovanja te navesti prednosti, ograničenja i mogućnosti primjene u suvremenoj poljoprivredi.

Ključne riječi: integrirano suzbijanje korova, plamen, vruća voda, solarizacija

UVOD

Suzbijanje korova jedna je od najvažnijih mjera u biljnoj proizvodnji jer korovi smanjuju prinose, otežavaju berbu i pogoduju razvoju štetnika i bolesti. Korovi konkuriraju usjevima za svjetlost, prostor, vodu i hranjive tvari te mogu znatno utjecati na kvalitetu i prinos usjeva. Tradicionalno se u konvencionalnoj poljoprivredi koriste kemijska sredstva (herbicidi) zbog njihove učinkovitosti i jednostavne primjene. No, dugotrajna i široka primjena herbicida dovela je do problema kao što su razvoj rezistentnih populacija, kontaminacija tla i voda,

ostatci pesticida u hrani i negativan utjecaj na ne ciljane organizme i zdravlje ljudi (Kristoffersen i sur., 2008.; Koch i sur., 2020.). Osim toga, regulatorna politika EU-a teži smanjenju i/ili potpunu ukidanju kemijskih sredstava, što dovodi do potrebe pronalaska ekološki prihvatljivijih rješenja u suzbijanju korova. Nekemijske metode suzbijanja korova, osobito fizikalne metode, sve više dolaze u fokus kao moguća zamjena ili dopuna kemijskim sredstvima. Njihova primjena može biti samostalna ili kao dio integriranog suzbijanja, posebno u ekološkoj proizvodnji, urbanim sredinama, na javnim površinama, u rasadnicima i arheološkim lokalitetima, gdje je uporaba herbicida zakonski ograničena (Slaven i sur., 2023.; Kanellou i sur., 2023.).

Toplinske metode fizikalnog suzbijanja korova mogu se podijeliti u dvije skupine prema načinu djelovanja: (a) metode izravnog zagrijavanja koje uključuju primjenu plamena, infracrvenog zračenja, vruće vode, pare ili vruće pjene te (b) metode neizravnog zagrijavanja koje uključuju primjenu struje, mikrovalove, lasersko zračenje i ultraljubičasto zračenje (Rana i Derr, 2018.). Toplinske metode fizikalnog suzbijanja korova temelje se na korištenju različitih oblika energije: toplinske (plamen, vruća voda, para, pjena), električne (visokofrekventna struja), mikrovalne i laserske s ciljem uništavanja nadzemne mase korova, a u nekim slučajevima i podzemnih organa i sjemena (Datta i Knezevic, 2013.; Moretti i Pedroso, 2023.). Osnovni mehanizam djelovanja kod svih ovih metoda je toplinska ili električna destrukcija biljnih stanica, što dovodi do dehidracije, denaturacije proteina i odumiranja biljke. Velika je prednost toplinskih metoda fizikalnog suzbijanja korova u tome što ne ostavljaju kemijske rezidue, ne uzrokuju pojavu rezistentnosti te su prihvatljive u sustavima visoke dodane vrijednosti i proizvodnji hrane s naglaskom na sigurnost i održivost (Chehade i sur., 2018.; Bauer i sur., 2020.).

Cilj je ovoga rada prikazati osnovne toplinske metode fizikalnog suzbijanja, njihove tehničke značajke, učinkovitost i mogućnosti primjene.

PRIMJENA PLAMENA U SUZBIJANJU KOROVA

Suzbijanje korova plamenom najstarija je poznata toplinska metoda fizikalnog suzbijanja. Plamen se prvi put koristio u SAD-u još 1852. godine u uzgoju šećerne trske, a od tada se razvijao kao metoda za niz kultura, poput kukuruza, soje, pamuka i povrća. Princip suzbijanja korova plamenom temelji se na korištenju propanskih plamenika s ciljem suzbijanja nadzemnih biljnih dijelova. Plamen, odnosno temperatura koja se postiže primjenom plamena, djeluje na biljne stanice tako da dolazi do denaturacije proteina, pucanja staničnih membrana te dehidracije biljne mase. Rezultat je desikcija i odumiranje biljnih dijelova unutar nekoliko dana (Rahkonen i Jokela 2003.; Cisneros i Zandstra, 2008.). Temperatura koja se postiže primjenom plamena može doseći čak do 1900°C (Ascard, 1995.), no za učinkovito suzbijanje korova dovoljna je

.....

izloženost temperaturama od oko 95 do 100°C u trajanju od barem 0,1 sekunde (Knežević i sur., 2017.).

Primjena plamena kao alternativne metode kemijski sintetiziranim sredstvima ili kao dio integriranog suzbijanja korova broji mnogo prednosti. Primjena plamena vrlo je slična primjeni bilo kojega neselektivnog, totalnog herbicida što s druge strane zahtjeva pažljivu izvedbu koja će biti sigurna za usjev. Plamen je moguće primijeniti jednako kao i herbicide, prije sjetve (pre-sowing), prije nicanja (pre-em) i poslije nicanja (post-em). Međutim, učinkovitost te metode nije univerzalna i uvelike ovisi o nekoliko čimbenika: razvojnoj fazi korova, vrsti i morfologiji biljaka, količini korištena plina, brzini prolaza stroja te uvjetima okoliša poput temperature zraka i vlage.

Vrijeme suzbijanja utjecat će na učinkovitost same metode. Primjena plamena prije sjetve ili prije nicanja suzbit će nadzemnu masu korova ako je prisutna na parceli, a ujedno će djelovati na sjeme korova jednogodišnjih širokolisnih i uskolisnih korova manjih dimenzija (npr. *Amaranthus retroflexus* L., *Setaria pumila* (Poir.) Roem. & Schult. i sl.) koje se nalazi u plitkom površinskom sloju tla. S druge strane, učinkovitost primjene u post-em roku najviše ovisi o razvojnem stadiju korovne vrste i životnom ciklusu (jednogodišnji ili višegodišnji korovi). Datta i Knežević (2013.) zaključuju da je manje korove (visine 2 – 8 cm, s 1 – 6 listova) mnogo lakše suzbiti plamenom nego veće (visine 8 – 50 cm, s 7 – 20+ listova). Primjerice, za postizanje 90 % redukcije nadzemne mase vrste *Abutilon theophrasti* Medik. u fazi pet listova bila je dovoljna doza od 42 kg/ha propana, dok je za istu učinkovitost u fazi 16 listova bila potrebna znatno veća doza od 102 kg/ha (Ulloa i sur., 2010.). Upravo zato se plamen preporučuje primjenjivati na korove u fazi kotiledona do četiri razvijena lista (BBCH 10-14), kada su njihova tkiva najosjetljivija, a sadržaj vode u samoj je biljci niži. Istraživanja pokazuju da se u tim fazama može postići 90 % redukcije nadzemne mase širokolisnih korova uz doze propana između 30 i 60 kg/ha, dok je za iste rezultate kod uskolisnih vrsta često potrebna znatno viša doza (Ulloa i sur., 2010.; Datta i Knezevic, 2013.). Slabija učinkovitost u suzbijanju uskolisnih vrsta povezana je sa skrivenim vegetacijskim vrhom te sposobnošću regeneracije iz čvora busanja. Navedena svojstva omogućuju travama (porodica Poaceae) veću otpornost na plamen, pa zbog toga usjevi koji pripadaju istoj porodici, poput kukuruza, mogu bolje podnijeti plamen, što se može iskoristiti za selektivno suzbijanje korova između redova. Višegodišnje korove nije moguće uspješno suzbiti jednokratnom primjenom plamena jer se oni lako regeneriraju iz podzemnih dijelova poput rizoma ili korijenskih pupova. Zbog toga se za višegodišnje vrste preporučuje ponovljeno tretiranje u ranim fazama i kombinacija s drugim metodama.

SOLARIZACIJA

Solarizacija je fizikalna mjera pri kojoj dolazi do zagrijavanja površine tla prekrivanjem tla plastičnom folijom. Metoda solarizacije koristi se za suzbijanje uzročnika bolesti, nematoda i sjemenaka korova (Horowitz i sur., 1983.). Metoda solarizacije s ciljem suzbijanja korova razvijena je u Izraelu 1970-ih, a uključuje prekrivanje vlažnog tla tankom plastičnom folijom koja omogućava prolaz sunčevih zraka i stvaranje efekta staklenika, čime se površinski sloj tla (do dubine od 5 do 10 cm) zagrijava na temperature koje su letalne za sjeme korova i mnoge patogene mikroorganizme. Metoda je proučavana i primjenjivana u različitim agroekološkim uvjetima diljem svijeta. Rezultati istraživanja ukazuju na varijabilnu učinkovitost solarizacije, ovisno o klimatskim uvjetima, tipu tla, vrsti korova i duljini trajanja tretmana.

Učinkovitost solarizacije u velikoj mjeri ovisi o klimatskim uvjetima (Tamietti i Valentino, 2000.; Chopra i Chopra, 2004.; Elmore, 1991.). Potrebna je visoka razina sunčeve radijacije, visoke dnevne temperature te dovoljno dugo razdoblje izlaganja. Optimalno trajanje solarizacije iznosi od četiri do šest tjedana tijekom ljeta, a u nekim slučajevima i do osam tjedana. Maksimalne temperature koje se postižu u sloju tla od pet centimetara dubine kreću se od 45 do 60 °C, što je 10 do 20 °C više nego na neprekrivenu tlu (Horowitz i sur., 1983.; Marengo i Lustosa, 2000.).

S obzirom na vrijeme nicanja, istraživanjima je utvrđeno da su jednogodišnji ozimi korovi osjetljiviji na solarizaciju od jednogodišnjih ljetnih korova jer njihovo sjeme klije na nižim temperaturama i osjetljivije je na visoke temperature (Elmore, 1991.). Nadalje, i metoda solarizacije učinkovitija je u suzbijanju jednogodišnjih korova u usporedbi s višegodišnjim korovima. Horowitz i sur. (1983.) navode da solarizacija tijekom dva do četiri tjedna u izraelskim uvjetima potpuno sprječava nicanje ljetnih i zimskih jednogodišnjih korova kao što su *Amaranthus* spp., *Portulaca oleracea* L. i *Lamium amplexicaule* (L.). Slično tome, Marengo i Lustosa (2000.) zabilježili su značajno smanjenje nadzemne mase i gustoće korova kod 50 % prisutnih vrsta, među kojima su *Cyperus* spp., *Mitracarpus* sp. i *Mollugo verticillata* (L.). U suzbijanju višegodišnjih korova solarizacija je često manje učinkovita jer njihovi podzemni organi preživljavaju na dubinama većima od onih na kojima solarizacija djeluje.

Solarizacija kao metoda dobro je prihvaćena u praksi, kako u svijetu, tako i u Hrvatskoj, sa širom upotrebom u povrtlarskoj proizvodnji. U pokusima s mrkvom u Brazilu, zabilježen je veći prinos na parcelama na kojima je provedena solarizacija u usporedbi s kontrolom, posebice nakon devet tjedana primjene solarizacije (Marengo i Lustosa, 2000.). Slično tome, Candido i sur. (2011.) bilježe povećanje prinosa salate pri primjeni solarizacije s biorazgradljivim i konvencionalnim plastičnim folijama u uvjetima Italije.

Za uspješnost solarizacije iznimno je važna pravilna priprema tla. Tlo mora biti usitnjeno, izravnano i vlažno. Vлага u tlu izričito je važna jer značajno pridonosi prijenosu topline i povećava osjetljivost sjemena i patogena na povišene temperature (Wada i sur., 2024.; Kanellou i sur., 2023.). Nakon navodnjavanja, folija se pažljivo postavlja i rubovi se zakopavaju u tlo kako bi se spriječio gubitak topline i vlage. Prozirna (transparentna) folija preporučuje se u toplijim područjima jer omogućava višu temperaturu tla (Kanellou i sur., 2023.), dok se crna folija ponekad koristi u hladnijim uvjetima, osobito kada temperature nisu dovoljno visoke za rast korova.

Debljina folije također utječe na učinkovitost. Tanje folije (25 μm) omogućuju bolje zagrijavanje tla zbog veće propusnosti sunčeva zračenja, no istodobno su osjetljivije na mehanička oštećenja, poput pucanja i trganja. Nešto deblje folije, u rasponu od 38 do 50 μm , pružaju bolji kompromis između učinkovitosti zagrijavanja i otpornosti, pa su prikladnije za područja izložena vjetru. Za manje površine mogu se koristiti i znatno deblje folije (više od 100 μm). U toplijim regijama tanja folija može biti dovoljna, dok se u vjetrovitim ili hladnijim područjima preporučuju deblje varijante (Stapleton i sur., 2019.).

Dobra priprema tla i pravilan odabir plastične folije ključni su za postizanje porasta temperature ispod folije, što omogućuje učinkovito suzbijanje sjemenaka korova u tlu. Time solarizacija izravno pridonosi smanjenju banke sjemena u tlu. Istraživanja provedena u različitim agroekološkim uvjetima pokazuju da solarizacija može učinkovito smanjiti brojnost sjemenaka korova u tlu, no osjetljivost pojedinih vrsta značajno varira. Primjerice, u istraživanjima provedenima u Turskoj solarizacija je bila učinkovita na *Portulaca oleracea* i *Amaranthus* spp., ali nije utjecala na *Conyza canadensis* L. (Benlioglu i sur., 2005.). U Indiji je solarizacija smanjila populaciju *Cyperus rotundus* L. za 63–65 %, dok su vrste *Eleusine indica* (L.) Gaertn. i *Cenchrus ciliaris* L. bile smanjene i do 80 % (Chopra i Chopra, 2004.). Wada i sur. (2024.) utvrdili su da su za postizanje 90 % smrtnosti sjemenaka vrste *Poa annua* L. potrebne kumulativne izloženosti od najmanje 140 sati na temperaturi od 45 °C, dok su otpornije vrste, poput *Portulaca oleracea*, zahtijevale i preko 3000 sati izloženosti na istoj temperaturi. U laboratorijskom istraživanju Šoštarčić i sur. (2024.) utvrđena je značajna razlika u termalnoj osjetljivosti između vrsta *Amaranthus retroflexus* i *Setaria pumila*. Primjenom konstantnih temperatura u trajanju od 30 do 90 minuta utvrđeno je da je *A. retroflexus* pokazao veću osjetljivost, s procijenjenom letalnom temperaturom za 90 % smrtnost (LT_{90}) od 65,7 °C pri 90 minuta izloženosti, dok je za *S. pumila* LT_{90} iznosila čak 90,3 °C u istim uvjetima. Vidljivo je da se termalna osjetljivost sjemena razlikuje za različite korovne vrste, što će svakako utjecati na uspješnost provedbe solarizacija na nekom području.

Solarizacija je osobito pogodna za male proizvodne površine, rasadnike i kulture kao što su povrće i bobičasto voće (Horowitz i sur., 1983.; Al-Masoon i

sur., 1993.). Također se koristi na arheološkim nalazištima i urbanim površinama gdje je primjena herbicida zabranjena (Kanellou i sur., 2023.).

VRUĆA VODA, PJENA I PARA

Primjena vruće vode, vruće pjene i vruće pare novije su metode u suzbijanju korova. Sve tri metode djeluju prije svega na nadzemne dijelove biljaka, a kod višegodišnjih korova s regenerativnim organima u tlu (rizomi, korijen s pupovima) učinak je privremen te su potrebne ponovljene primjene (Latsch i sur., 2016.). Vruća voda i para osobito su korisne na nepoljoprivrednim površinama (npr. urbane površine) na kojima je mehaničko uklanjanje otežano (Kristoffersen i sur., 2008.).

Primjena vruće vode u suzbijanju korova temelji se na tretiranju biljaka vodom temperature od oko 95 do 100 °C. Visoka temperatura uzrokuje brzo uništavanje stanica biljke, osobito u ranim, osjetljivim fazama razvoja. U istraživanju Hansson i Ascard (2002.) utvrđeno je da je za 90 % redukcije nadzemne mase bijele gorušice (*Sinapis alba* L.) u fazi BBCH 12 bila potrebna energija od 340 kJ/m², dok je u fazi BBCH 16 bila potrebna gotovo trostruka doza. To pokazuje koliko je pravodobno tretiranje važno za učinkovitost metode. Vruća voda ima prednost u odnosu na plamen zbog manjeg rizika od požara i mogućnosti rada u blizini osjetljivih objekata (Astatkie i sur., 2007.), međutim njezina primjena zahtjeva veće količine vode i potrošnju energije.

Vruća pjena naprednija je verzija tretmana vrućom vodom. Osnovu čini mješavina vruće vode i biorazgradljivih surfaktanata (npr. biljna ulja, šećeri) koji formiraju pjenu. Pjena duže zadržava toplinu na lisnoj površini, produžujući kontakt s toplinom i time povećavajući učinkovitost. Martelloni i sur. (2019.) testirali su različite doze pjene (1,67–8,33 L/m²) na poljima zakorovljenim vrstama kao što su *Festuca arundinacea* (Schreb.) Darbysh, *Taraxacum officinale* Weber ex F.H.Wigg. i *Plantago lanceolata* (L.). Već kod doze od 3,33 L/m² postignuto je potpuno suzbijanje vrste *F. arundinacea*, dok su za višegodišnje širokolisne vrste *T. officinale* i *P. lanceolata* bile potrebne veće doze (6,67–8,33 L/m²). Pjena je usporila ponovni rast korova za više od 30 dana u usporedbi s kontrolom. U istraživanju Martelloni i sur. (2020.) uspoređena je učinkovitost vruće pjene s herbicidima glifosatom (1080 g a.i. ha⁻¹) i pelargonskom kiselinom (11 kg a.i. ha⁻¹). Vruća pjena pokazala je bolju učinkovitost u suzbijanju nadzemne mase i značajno je odgodila regeneraciju biljaka, osobito višegodišnjih vrsta kao što su *Cyperus esculentus* L. i *Convolvulus arvensis*.

Vruća para ili zasićena para (121 °C, tlak 6200 kPa) još je jedna od metoda koja koristi vodu kao primarni izvor. Ova metoda istražuje se u svrhu metoda predstjetvene sterilizacije tla ili direktnog suzbijanja korova. Para djeluje tako da prodire nekoliko centimetara u tlo i uništava sjemenke korova, rizome i

površinske dijelove biljaka. Moretti i Pedroso (2023.) testirali su učinak pare u organskom uzgoju borovnica. Primjena doze od 7,4 m³/ha na samu bazu biljke rezultirala je s 80 do 90 % smanjenom nadzemnom masom *C. arvensis*. Para se pokazala sigurnom za biljke borovnice, iako je zahtijevala velike količine vode i energije. Raffaelli i sur. (2016.) razvili su protočni stroj za primjenu pare u tracima (eng. *band steaming*), koji kombinira paru s kalcijevim oksidom (CaO) radi dodatnog porasta temperature. Na poljima mrkve doza pare od 2,3 kg/m² rezultirala je značajnim smanjenjem nadzemna korova i skraćenjem vremena ručnog plijevljenja, uz povećanje prinosa.

MIRKOVALNO ZRAČENJE

Mikrovalno zračenje kao tehnologija za suzbijanje korova prvi je put istraživano sredinom 20. stoljeća, no veći interes za njegovu primjenu razvio se tek od početka 21. stoljeća. Mikrovalno zračenje temelji se na principu električnog zagrijavanja, pri čemu elektromagnetski valovi frekvencije 2,45 GHz uzrokuju oscilaciju molekula vode unutar biljnog tkiva. Posljedično dolazi do brzog zagrijavanja stanica, denaturacije proteina i pucanja membrana, što rezultira uvenućem i smrću biljke (Rana i Derr, 2018.).

Jedna od osnovnih prednosti mikrovalne metode svakako je sposobnost penetracije energije i na podzemne dijelove biljaka i u gornje slojeve tla, čime se ne omogućuje samo uništavanje nadzemne mase već i oštećivanje podzemnih organa i sjemena u klijanju (Brodie i sur., 2012.). Ova svojstva čine mikrovalnu metodu potencijalno prikladnom za predstjetvenu pripremu tla, posebice u sustavima sa smanjenom obradom tla ili no-till sustavima.

Istraživanja su pokazala da učinkovitost mikrovalnog zračenja ovisi o vrsti korova, njihovu razvojnom stadiju, morfologiji i sadržaju vode. U pokusima koje su proveli Rana i Derr (2018.) testirano je deset korovnih vrsta, uključujući *Digitaria ciliaris* (Retz.) Koeler, *Paspalum dilatatum* Poir., *Cyperus esculentus*, *Ambrosia artemisiifolia* L., *Trifolium repens* L., *Ipomoea lacunosa* L., *Lamium amplexicaule* L. i *Convolvulus arvensis*. Utvrđeno je da su biljke tretirane u ranoj razvojnoj fazi (4 – 6 tjedana) značajno osjetljivije od onih starijih (8 – 10 tjedana).

Ipak, mikrovalno zračenje nosi i određene nedostatke. Najveći je izazov visoka potrošnja energije potrebne za postizanje učinkovitih doza, osobito kod većih i višegodišnjih biljaka. U pokusima na vrstama *Abutilon theophrasti*, *Panicum miliaceum* L., *Brassica napus* L. i *Medicago sativa* L. utvrđeno je da su potrebne doze za 90 % smanjenja biomase iznosile između 1015 i 3433 kJ/m² (Sartorato i sur., 2006.). Iako su autori usporedbu temeljili na podacima iz literature, procijenjeno je da je energetska trošak mikrovalnog suzbijanja korova približno deset puta veći od onoga pri uporabi plamena, odnosno do četrdeset puta veći kada se uzme u obzir primarna potrošnja goriva. To ukazuje da je ta metoda

zasad znatno energetske zahtjevnija od drugih razvijenijih fizikalnih metoda poput plamena ili vruće vode. Nadalje, zbog visoke cijene opreme i kompleksnosti tehničke izvedbe, trenutačno se ne koristi komercijalno u širokoj primjeni (Bauer i sur., 2020.). U odnosu na druge fizikalne metode, mikrovalno zračenje ima nekoliko prednosti. U usporedbi s plamenom, mikrovalna metoda ne izaziva opasnost od požara i može se koristiti u uvjetima vjetra ili neposredno uz usjeve. Za razliku od metode vruće vode ili pare, ne zahtijeva velike količine vode ni dugotrajne pripreme.

Iako je tehnologija trenutačno još uvijek u eksperimentalnoj i prototipskoj fazi, sve više istraživačkih institucija i inženjerskih tvrtki u Kanadi, Njemačkoj, Nizozemskoj i Japanu pokazuje zanimanje za njezin daljnji razvoj. U tim zemljama mikrovalni sustavi razmatraju se dijelom integriranih strategija suzbijanja korova, osobito u visokoreguliranim sektorima (npr. blizu vodotokova, urbanih sredina i u ekološkoj proizvodnji). Usporedno s razvojem tehnologije, sve je više projekata koji nastoje komercijalizirati tu metodu. Međutim, prepreke su još uvijek tehničke i ekonomske prirode, ponajviše visoka cijena opreme i zahtjevi za visokom potrošnjom električne energije.

ELEKTRIČNA STRUJA

Prvi patenti za električno suzbijanje korova zabilježeni su još potkraj 19. stoljeća (Sahin i sur., 2017.), no tek je u posljednjih desetak godina ova tehnologija doživjela komercijalni i znanstveni uzlet. Tehnologija se temelji na provođenju visokog električnog napona kroz biljku, gdje se energija pretvara u toplinu unutar provodnog sustava biljke, uzrokujući pucanje staničnih stijenki, dehidraciju i odumiranje biljke (Koch i sur., 2020.; Lati i sur., 2021.). Struja također djeluje sistemski i može doseći korijenov sustav, čineći ovu metodu učinkovitom čak i na višegodišnjim korovima.

Električna metoda se u suvremenom obliku koristi u raznim agroekološkim uvjetima, uključujući vinograde u Australiji i Europi (Borger i Slaven, 2025.), voćnjake i plantaže borovnica u SAD-u (Lehnhoff i sur., 2022.), organske sustave poput imanja kralja Charlesa u Engleskoj te na prometnicama i urbanim površinama u Njemačkoj i Švedskoj. Tehnologija je posebno korisna u sustavima u kojima su herbicidi zabranjeni, ili gdje postoji potreba za ciljanom primjenom na invazivne vrste.

Komercijalni sustavi uključuju uređaje kao što su Weed Zapper™ (SAD), XPower™ (Zasso™, Zug, Švicarska) i Electroherb™ (Njemačka). Weed Zapper™ koristi iskrenje između biljke i elektrode, dok Electroherb™ i XPower™ koriste kontinuirani kontakt između elektrode i biljke. Kod potonjih sustava električni tok ulazi u biljku preko kontakta s metalnom elektrodom, prolazi kroz biljni provodni sustav, zatim kroz tlo te se vraća u uređaj preko uzemljene ploče. Sustavi rade na naponu između 5 i 15 kV i snazi od 24 do 72 kW, a tipične radne brzine iznose 2 do 4 km/h (Slaven i sur., 2023.; Koch i sur., 2020.).

Učinkovitost struje u suzbijanju korova ovisi o vrsti korova, njegovoj starosti, vlazi u biljci i tlu, te strukturi korijenova sustava. U pokusima provedenima na šećernoj repi, Electroherb™ je postigao značajno smanjenje gustoće korova nakon tretmana, osobito u kombinaciji s reduciranom dozom herbicida (Koch i sur., 2020.). U vinogradima Australije električno suzbijanje korova rezultiralo je smanjenjem nadzemne mase korova za 84 do 87 %, što je bilo gotovo jednako učinkovitosti herbicida (88 %), ali znatno učinkovitije od košnje (65 %) (Borger i Slaven, 2025.). Učinkovitost suzbijanja uvelike ovisi i o vrsti uređaja koji se koristi. Primjerice, Lati i sur. (2021.) razvili su niskoenergetski sustav za električno suzbijanje i utvrdili da su kao i kod drugih fizikalnih metoda rane razvojne faze korova najosjetljivije, uz potpuno suzbijanje vrste *Trifolium pratense* kada je tretman obavljen dva tjedna nakon nicanja. S druge strane, Schreier i sur. (2022.) proveli su pokuse u soji s ciljem procjene učinkovitosti visokoenergetskog uređaja Weed Zapper™ u suzbijanju rezistentnih korova, *Amaranthus tuberculatus* (Moq.) J.D.Sauer, *Ambrosia trifida* L. i *Ambrosia artemisiifolia*, *Xanthium strumarium* L. i drugih. Istraživanjem je utvrđeno da je učinkovitost primjene električne struje bila najveća kada su tretmani primijenjeni u kasnijim razvojnim fazama korova, osobito tijekom cvatnje i formiranja sjemena, kada su biljke bile veće i sadržavale su više vlage. Osim izravnog suzbijanja nadzemne mase (do 97 % kod *A. tuberculatus*) zabilježen je i značajan učinak na smanjenje klijavosti sjemena, koji je ovisno o vrsti korova iznosio između 54 % i 80 %, što ukazuje na dodatan doprinos ove metode u smanjenju banke sjemena u tlu.

Unatoč brojnim prednostima, ta metoda ima i nekoliko ograničenja. Zabilježena je mogućnost izbijanja vatre u prisutnosti suhog biljnog materijala, osobito u suhim klimatskim uvjetima (Borger i Slaven, 2025.). Učinkovitost može biti smanjena kod vrsta koje razvijaju više stabljika (ili vlati) iz korijena, poput trava i onih s visokim sadržajem lignina, jer elektrode ne mogu zahvatiti sve dijelove biljke (Koch i sur., 2020.). Osim toga, spora brzina primjene i visoki troškovi opreme čine ovu metodu trenutačno pogodnom uglavnom u vinogradima, voćnjacima i na urbanim površinama.

LASER

Laser kao sredstvo za suzbijanje korova suvremena je i sve aktualnija metoda fizikalnog suzbijanja korova u poljoprivredi. Iako je primjena lasera u industriji i medicini već dugo poznata, tek je od kraja 20. stoljeća ova tehnologija počela dobivati ozbiljniju pozornost i u poljoprivredi. U osnovi, lasersko suzbijanje korova koristi toplinu, ali na vrlo precizan način. Laser emitira uskovokusiranu zraku visoke energije koja se prenosi kroz optički sustav do ciljanog mjesta na biljci. Kada ta zraka pogodi biljno tkivo, dolazi do lokaliziranog zagrijavanja koje uzrokuje denaturaciju proteina, pucanje staničnih stijenki i isparavanje vode iz stanica. Time se struktura biljke narušava do mjere u kojoj ona više nije

.....

spособna za normalan rast (Heisel i sur., 2001.; Andreasen i sur., 2024a.). Za razliku od električne struje, koja djeluje duboko i može utjecati na podzemne organe biljaka, laserska tehnologija prije svega djeluje na nadzemne dijelove. Njezina je učinkovitost najveća kod mladih, jednogodišnjih korova, dok su višegodišnje vrste, s razvijenim rizomima i dubokim korijenjem, otpornije i zahtijevaju višestruke tretmane (Andreasen i sur., 2024.).

Danas se laser sve više integrira u sustave precizne poljoprivrede, gdje se kombinira s računalnim vidom, dubokim učenjem i autonomnim vozilima. Tako su Rahkamatulin i Andreasen (2020.) razvili kompaktan i relativno pristupačan sustav koji koristi RGB kamere i algoritme za prepoznavanje korova poput *Elymus repens* među redovima rajčice, primjenjujući laserske zrake različitih snaga (0,3–5 W). Utvrđeno je da slabije snage odgovaraju manjim biljkama, dok jače zrake postižu veću efikasnost, ali s povećanim rizikom od oštećenja usjeva (Rahkamatulin i Andreasen, 2020.). Detaljnija istraživanja laserske učinkovitosti proveli su Andreasen i sur. (2024b.) na jednu monokotiledonu vrstu (*Alopecurus myosuroides* Huds.) i 11 dikotiledonih vrsta, uključujući šećernu repu kao primjer usjeva. Biljke su bile suzbijane u tri razvojne faze: kotiledoni, dva lista i četiri lista. Utvrđeno je da su ključni čimbenici za uspješnu destrukciju korova ciljano mjesto primjene lasera (npr. apikalni meristem), trajanje i intenzitet izloženosti, valna duljina (2 μm) te promjer laserske točke (2 mm). Najveća učinkovitost postignuta je kada su biljke bile u fazi kotiledona do dva lista, dok su biljke u fazi četiri lista često pokazivale sposobnost regeneracije. Osjetljivost na lasersko zračenje razlikovala se među vrstama; npr. *Sonchus oleraceus* L., *Veronica persica* Poir. i *Stellaria media* (L.) Vill. pokazale su se vrlo osjetljivima, a vrste poput *Plantago major* L. i *Rumex crispus* L. bile su znatno otpornije.

Prednosti laserskog suzbijanja mnogobrojne su: visoka preciznost, mogućnost automatizacije, nedostatak kemijskih ostataka, očuvanje strukture tla i manji rizik od požara u usporedbi s otvorenim plamenom. Laseri omogućuju tretiranje pojedinačnih biljaka bez kontakta s tlom, što je posebno korisno u ekološkoj i visokovrijednoj proizvodnji. Međutim, postoje i ograničenja poput visokih početnih troškova, značajna potrošnja energije, manja učinkovitost na višegodišnjim korovima te potreba za naprednim softverom za prepoznavanje biljaka u stvarnom vremenu (Zhang i sur., 2024.).

Iako su komercijalno dostupni uređaji još uvijek ograničeni, očekuje se da će njihova dostupnost rasti, a cijena padati kako se tehnologija bude standardizirala, a tržište razvijalo. Brz razvoj računalnog vida, umjetne inteligencije i automatskih navigacijskih sustava otvara mogućnosti široke primjene laserskog suzbijanja korova, osobito u sustavima gdje je potrebna visoka preciznost i gdje je upotreba herbicida ograničena ili zabranjena (Zhang i sur., 2024.).

Najveći potencijal za lasersko suzbijanje korova nalazi se u širokorednim usjevima – u povrćarstvu (salata, kupus, mrkva), ratarskoj proizvodnji (kukuruz, soja, šećerna repa). U voćarstvu i vinogradarstvu primjena je tehnički izazovnija, budući da su biljke razmaknutije, a tlo često pokriveno biljnim pokrovom. Laserski tretmani tu zahtijevaju visoku preciznost, jer bi pogrešno navođenje moglo oštetiti uzgajanje vrstu. U takvim situacijama laser bi se mogao koristiti samo kao dopuna drugim metodama, poput mehaničke obrade, malčiranja ili plitkog oranja.

ZAKLJUČAK

Toplinske metode fizikalnog suzbijanja korova održiva je i ekološki prihvatljiva alternativa kemijskim mjerama, osobito u kontekstu sve strožih regulativa koje se odnose na primjenu herbicida te rastuće potrebe za očuvanjem okoliša i zdravlja ljudi. U Hrvatskoj je, među različitim fizikalnim metodama, solarizacija najpoznatija i najviše implementirana, osobito u povrtlarskoj proizvodnji. Metoda je dobro prihvaćena zahvaljujući svojoj relativnoj jednostavnosti, niskim troškovima i djelotvornosti u našim agroekološkim uvjetima. Ostale metode toplinskog suzbijanja, poput plamena, vruće vode, pare i pjene, zasad nisu u nas značajnije implementirane. Ograničena primjena proizlazi iz više čimbenika: nedostatka tehničke infrastrukture, visoke početne investicije u opremu, niske razine informiranosti proizvođača. Ipak, njihove su prednosti višestruke jer ne ostavljaju kemijske rezidue, ne uzrokuju pojavu rezistentnosti kod korova, ne zagađuju okoliš i mogu se koristiti u blizini vodotokova, škola i drugih osjetljivih područja. Fizikalne metode imaju velik potencijal za širu primjenu u Hrvatskoj, osobito u ekološkoj proizvodnji, ali i u komunalnom sektoru. U tom kontekstu potrebne su ciljane edukacije, tehnički i savjetodavni programi, kao i financijski poticaji koji bi omogućili nabavu i korištenje specijaliziranih strojeva. Uz to, razvoj i primjena novih tehnologija, poput preciznih sustava upravljanja, robota, lasera i automatskog prepoznavanja korova, otvaraju dodatne mogućnosti za njihovu integraciju u održive proizvodne sustave. S obzirom na pozitivna iskustva iz drugih zemalja te aktualne agroekološke i regulatorne izazove, toplinske metode fizikalnog suzbijanja korova nezaobilazan su segment budućeg razvoja održivog suzbijanja korova.

THERMAL METHODS OF PHYSICAL WEED CONTROL

SUMMARY

Physical weed control methods are based on the use of various forms of energy such as heat, light and radiation as an alternative to chemical agents or as part of an integrated weed control management. With the increasing

awareness of the negative environmental impact of synthetic chemicals, but also with the decreasing number of active substances available on the market, physical control methods are increasingly being used in countries around the world. One of the first known applications of heat (flame) for weed control was recorded as early as 1852 in sugar cane cultivation in the USA and in the 1940s in cotton cultivation. In addition to the use of flames, the solarisation method developed in the 1970s is considered one of the oldest physical measures for weed control. In the 1990s, methods such as the use of hot water, hot steam and foam were developed. In the late 1990s and today, the possibilities of weed control using electricity, microwave radiation and lasers are increasingly being investigated. The advantages of physical control are comparable to chemical measures such as herbicides, which are not selective but leave no residues, do not cause drift and do not favour the development of resistance. Physical methods of weed control can be used in three application periods: pre-sowing, pre-emergence or post-emergence. The timing of application depends on the method chosen and the aim may be to control the above-ground mass of weeds or to reduce the weed seed bank in the soil. Each of these measures has a specific application method and reaches different temperatures on the target area. The aim of this paper is to present the types of physical methods of weed control, explain their mechanisms of action and list the advantages, limitations and possible applications in modern agriculture.

Keywords: physical weed control, flame, hot water, solarization

LITERATURA

Al-Masoon, A.A., Abu-Irmaileh, B.E., Nishanov, N.N., Humeid, B.M., El-Khatib, A.A. (1993.). Soil Solarization for Weed Management in UAE. *Weed Technology*, 5(3), 575–581.

Andreasen, C, Vlasi, E., Salehan, N. (2024b.). Laser weeding of common weed species. *Front. Plant Sci.* 15:1375164

Andreasen C., Vlasi E., Salehan N., Johannsen K.S., Jensen S.M. (2024a.). Laser weed seed control: challenges and opportunities. *Front. Agron.* 6:1342372.

Ascard, J. (1995.). Thermal weed control by flaming: biological and technical aspects. Ph.D Dissertation. Alnarp, Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Agricultural Engineering. 165 p

Astatkie, T., Rifai, M. N., Havard, P., Adsett, J., Lacko-Bartosova, M., Otepka, P. (2007.). Effectiveness of Hot Water, Infrared and Open Flame Thermal Units for Controlling Weeds. *Biological Agriculture & Horticulture*, 25(1), 1–12.

Bauer, M.V., Marx, C., Bauer, F.V., Flury, D.M., Ripken, T., Streit, B. (2020.). Thermal Weed Control Technologies for Conservation Agriculture—A Review. *Weed Research*, 60(4), 241–250.

Benlioglu, S., Boz, O., Yildiz, A., Boz, B., Benlioglu, K. (2005.). Effects of soil solarization and organic amendment treatments for tomato production in western Anatolia. *Phytoparasitica*, 33(4), 343–350.

Benlioglu S., Boz O., Yldz A., Kaskavalc G. and Benlioglu K. (2005.). Alternative soil solarization treatments for the control of soil-borne diseases and weeds of strawberry in the Western Anatolia of Turkey. *J. Phytopathol.* 153, 423–430.

Borger, C.P.D., Slaven, M.J. (2025.). Electric weed control—how does it compare to conventional weed control methods? *Weed Sci.* 73(e46), 1–10.

Brodie, G., Ryan, C., Lancaster, C. (2011.). Microwave Technologies as Part of an Integrated Weed Management Strategy: A Review. *International Journal of Agronomy*, 2012, 636905, 14.

Candido, V., D’Addabbo, T., Miccolis, V., Castronuovo, D. (2011.). Weed control and yield response of soil solarization with different plastic film in lettuce. *Scientia Horticulturae*, 130(3), 491–497.

Chegade, L.A., Fontanelli, M., Martelloni, L., Frasconi, C., Raffaelli, M., Peruzzi, A. (2018.). Effects of Flame Weeding on Organic Garlic Production. *HortTechnology*, 28(4), 502–509.

Chopra, N., Chopra, N.K. (2004.). Effect of soil solarization on weeds and nurseries of brinjal and chilli. *Indian J. Weed Sci.* 36, 150–152.

Cisneros, J.J., Zandstra, B.H. (2008.). Flame Weeding Effects on Several Weed Species. *Weed Technology*, 22(2), 290–295.

Datta, A., Knežević, S.Z. (2013.). Flaming as an alternative weed control method for conventional and organic agronomic crop production systems: A review. *Advances in Agronomy*, 118, 399–428.

Elmore, C.L. (1991.). Use of solarization for weed control. In: *Soil Solarization. Plant Production and Protection Paper* (ed. by DeVay J.E., Stapleton J.J. and Elmore C.L.). Vol. 109. FAO, Rome, 129–138.

Hansson, D., Ascard, J. (2002.). Influence of Developmental Stage and Time of Assessment on Hot Water Weed Control. *Weed Research*, 42, 307–316.

Heisel, T., Schou, J., Christensen, S., Andreasen, C. (2001.). Cutting weeds with a CO₂ laser. *Weed Research*, 41: 19–29.

Horowitz, M., Regev, Y., Herzlinger, G. (1983.). Solarization for weed control. *Weed Science*, 31(2), 170–179.

Kanellou, E., Papafotiou, M., Economou, G., Ntoulas, N. (2023). Soil Solarization as an Alternative Weed Control Method for Archaeological Sites in the Mediterranean Region. *Sustainability*, 15(14), 11324.

Koch, M., Hermann, A., Ergas, B., Risser, P. (2020a.). Electrical weed control in sugar beet - A comparison of pre-emergence methods. *Julius-Kühn-Archiv*, 464, 438–440.

Koch, M., Tholen, T., Drießen, P., Ergas, B. (2020b.). The Electroherb™

Technology - A new technique supporting modern weed management. Julius-Kühn-Archiv, 464.

Kristoffersen, P., Rask, A.M., Grundy, A.C. (2008.). Non-chemical weed control on traffic islands: A comparison of the efficacy of five weed control techniques. *Weed Research*, 48(2), 124–130.

Lati, R.N., Rosenfeld, L., David, I.B., Bechar, A. (2021.). Power on! Low-energy electrophysical treatment is an effective new weed control approach. *Pest Manag Sci*, 77: 4138–4147.

Latsch, R., Anken, T., Herzog, C., Sauter, J., Moonen, A. C. (2017.). Controlling *Rumex obtusifolius* by means of hot water. *Weed Research*, 57, 16–24.

Lehnhoff, E.A., Neher, P., Indacochea, A., Beck, L. (2022.). Electricity as an effective weed control tool in non-crop areas. *Weed Res.* 62: 149–159.

Marenco, R.A., Lustosa, S.B.C. (2000.). Soil solarization for weed control in carrot. *Scientia Agricola*, 57(4), 677–680.

Martelloni, L., Frascioni, C., Sportelli, M., Fontanelli, M., Raffaelli, M., Peruzzi, A. (2019.). The Use of Different Hot Foam Doses for Weed Control. *Agronomy*, 9(9), 490.

Martelloni, L., Frascioni, C., Sportelli, M., Fontanelli, M., Raffaelli, M., Peruzzi, A. (2020.). Flaming, Glyphosate, Hot Foam and Nonanoic Acid for Weed Control: A Comparison. *Agronomy*, 10(1), 129.

Moretti, M.L., Pedroso, R.M. (2023.). Weed control with saturated steam in organic highbush blueberry. *Front. Agron.* 5:1297979.

Raffaelli, M., Martelloni, L., Frascioni, C., Fontanelli, M., Carlesi, S., Peruzzi, A. (2016.). A prototype band-steaming machine: Design and field application. *Biosystems Engineering*, 144, 61–71.

Rahkonen, J., Jokela, H. (2003.). Infrared radiometry for measuring plant leaf temperature during thermal weed control treatment. *Biosyst. Eng.* 86:257–266.

Rakhmatulin, I., Andreassen, C. (2020.). A Concept of a Compact and Inexpensive Device for Controlling Weeds with Laser Beams. *Agronomy*, 10(10), 1616.

Rana, A., Derr, J. F. (2018.). Responses of ten weed species to microwave radiation exposure as affected by plant size. *J. Environ. Hort.* 36(1):14–20.

Sahin, H., Yalınkılıç, M. (2017.). Using electric current as a weed control method. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2:6, 59–64.

Sartorato, I., Zanin, G., Baldoin, C., De Zanche, C. (2006.). Observations on the potential of microwaves for weed control. *Weed Research*, 46: 1–9.

Schreier, H., Bish, M., Bradley, K.W. (2022.). The impact of electrocution treatments on weed control and weed seed viability in soybean. *Weed Technol.* 36: 481–489.

.....

Šoštarčić, V., Pišonić, M., Pismarović, L., Šćepanović, M. (2024.). The effect of temperature and exposure time on redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and yellow foxtail (*Setaria pumila*) seed mortality in the natural soil seedbank. *Weed Science*, 72:4, 368–374.

Stapleton, J.J., Wilen, C.A., Molinar, R.H. (2019.). Soil Solarization for Gardens and Landscapes. In UC IPM Pest Notes 2019; UC ANR Publication 74145; ANR Publication: Oakland, CA, USA.

Tamietti, G., Valentino, D. (2000.). Effectiveness of soil solarization against soil-borne plant pathogens and weeds in Piedmont (northern Italy). *Acta Hort.* 532, 151–156.

Ulloa, S.M., Datta, A., Knezevic, S.Z. (2010.). Tolerance of selected weed species to broadcast flaming at different growth stages. *Crop Prot.* 29, 1381–1388.

Wada, N., Berry, P.A., Hill, B., Mallory-Smith, C., Parke, J.L. (2024.). Soil solarization as a non-chemical weed control method in tree nursery production systems of the Pacific Northwest, USA. *Front. Agron.* 5:1321372.

Zhang, H., Cao, D., Zhou, W., Currie, K. (2024.). Laser and optical radiation weed control: a critical review. *Precision Agric* 25, 2033–2057.

pregledni članak