

Analiza izvedljivosti



EIP Pospešeno okopavanje zelenjave

Robotska okopalna roka Motika

18.05.2025

Vsebina

POVZETEK ANALIZE IZVEDLJIVOSTI	2
OCENA IZVEDLJIVOSTI PRENOSA PREDLAGANIH REŠITEV V PRAKSO	4
2.1 Opis zasnove motike in njenega delovanja	4
2.2 Opis tehničnih specifikacij motike	5
2.3 Preizkus motike v praksi	6
2.3.1 Rezultati	8
PROBLEMI IN POSEBNOSTI PRENOSA PREDLAGANIH REŠITEV V PRAKSO	13
KORISTI PREDLAGANIH REŠITEV ZA KMETIJSKA GOSPODARSTVA	14
VPLIVI PREDLAGANIH REŠITEV NA OKOLJE	15
5.1 Zmanjšanje negativnih vplivov kmetijstva na okolje	15
5.2 Skupni pristopi na področju kmetijstva za varstvo biotske raznovrstnosti	15
5.3 Okoljsko učinkovite kmetijske pridelave na vodovarstvenih in drugih varovanih območjih	16
SKLEPI IN PRIPOROČILA	17
LITERATURA IN VIRI	19

Kazalo slik

Slika 1 Okopalni robot MOTIKA: Vir: Tomaž Levstek	3
Slika 2 Konstrukcija motike: (a) mehanizem delovanja, (b) 3D model; (c) motika med okopavanjem; Vir: UL FS	4
Slika 3 Shema delovanja: (a) odstranjevanje plevela med vrstami in (b) odstranjevanje plevela znotraj vrste; Vir: UL FS	5
Slika 4 Vrtna kreša in rdeča redkvice; Vir: Tomaž Levstek	6
Slika 5 Parcele in simulacija solatnih glav; Vir: Tomaž Levstek	7
Slika 6 Kontrolna parcela; Vir: Tomaž Levstek	7

Kazalo tabel

Tabela 1 Tehnične specifikacije motike; Vir: UL FS	6
Tabela 2 Vrtna kreša – število rastlin po posameznih okopavanjih; Vir: Tomaž Levstek	8
Tabela 3 Vrtna kreša – število in deleži rastlin; Vir: Tomaž Levstek	9
Tabela 4 Rdeča redkvice – število rastlin po posameznih okopavanjih; Vir: Tomaž Levstek	9
Tabela 5 Rdeča redkvice – število in deleži rastlin; Vir: Tomaž Levstek	10
Tabela 6 Število rastlin po posameznih okopavanjih, skupno za obe vrtnini; Vir: Tomaž Levstek	10
Tabela 7 Vrtna kreša – deleži (%) uničenih rastlin glede na kontrolo; Vir: Tomaž Levstek	11
Tabela 8 Rdeča redkvice – deleži (%) uničenih rastlin glede na kontrolo; Vir: Tomaž Levstek	12
Tabela 9 Deleži uničenih rastlin po okopavanjih; Vir: Tomaž Levstek	13

POVZETEK ANALIZE IZVEDLJIVOSTI

V svetu, kjer se število prebivalcev hitro povečuje in naravni viri postajajo vse bolj omejeni, je iskanje učinkovitih in trajnostnih načinov za proizvodnjo hrane ključnega pomena. V tem kontekstu se pametno kmetovanje (smart farming), ki združuje napredne tehnologije, kot so robotika, umetna inteligenca in velike količine podatkov (big data), ponuja kot učinkovita rešitev (Inštitut, 2024). Z uporabo naprednih tehnologij kmetijstvo postaja produktivnejše, učinkovitejše in okolju prijaznejše. Poleg tega pametno kmetijstvo prispeva k večji prehranski varnosti, saj omogoča zanesljivejšo in predvidljivejšo proizvodnjo hrane. To je še posebej pomembno v času, ko se soočamo z izzivi, kot so podnebne spremembe, izguba biotske raznovrstnosti in povečanje svetovnega prebivalstva (MKGP, 2024).

V pridelavi zelenjave imamo v zadnjih dveh ali že skoraj treh desetletjih nenehne izzive s prilagajanji podnebnim spremembam in s pojavi takšnih ali drugačnih vremenskih ekstremov. Obdobja rasti in vegetacije se spreminjajo, pojavljajo se tudi možnosti za zgodnejše začetke in kasnejše zaključke pridelav vseh kmetijskih rastlin, tudi zelenjave in zelišč. Pridelati kakovostno zelenjavo je v spremenljivih pogojih pridelave pogosto zelo resen in velik izziv. Prilagajanja imamo in jih vedno znova vpeljujemo ter preizkušamo nove pristope in izboljšave tehnologij pridelave.

Robotska okopalna roka »motika«, kot odgovor na potrebe iz prakse, se je realizirala v projektu »Pospešeno okopavanje zelenjave«, prijavljenem na javnem razpisu PRP RS (2014-2020), podukrep 16.5 za blaženje in prilagajanje na podnebne spremembe. Evropsko partnerstvo za inovacije (EIP) je koncept evropske politike za spodbujanje inovativnosti in učinkovitejšega povezovanja med raziskavami in inovativnostjo ter ima namen hitrejšega pridobivanja uporabnih rešitev za pridelovalno kmetijsko prakso. Kmetijsko gozdarski zavod Maribor v vlogi vodilnega partnerja je zbral interdisciplinarni konzorcij strokovnjakov in strokovnjakinj, kot so: Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani v vlogi strojnega razvoja »motike«, Biotehniški center Naklo v vlogi prenosa informacij v izobraževalnem sektorju, Kmetijsko gozdarski zavod Celje v vlogi svetovalne službe, Črna d. o. o. in Sedem čez devet d. o. o., ki sodelujeta pri računalniškem razvoju in vstopu »motike« na trg, in štiri kmetije, in sicer Zeliščni vrt Majnika (Katja Temnik), Vladimir Šabeder, Zdravko Kerin in Jaka Kastelic v glavni vlogi testiranja »motike«.

V projektu smo sledili zastavljenemu cilju za trajnostno rabo tal na kmetijskih zemljiščih s hkratnim zagotavljanjem rodovitnosti in preprečevanjem erozije in degradacije tal s pomočjo uporabe robotske okopalne roke. Gre za obetaven pristop v okviru pametnega kmetovanja, kjer inovativna tehnika uporablja avtonomne robote za izvajanje nalog, ki so bile tradicionalno opravljene ročno ali z uporabo težke mehanizirane opreme. Robotsko okopavanje povečuje učinkovitost in zmanjšuje stroške, poleg tega pa pomaga ohranjati biodiverzitetu, saj zmanjšuje potrebo po uporabi fitofarmaceutskih sredstev (herbicidov). Mehanska obdelava tal bo tako prispevala k zmanjšanju kemičnega varstva rastlin in bo posledično manj obremenjevala podtalnice s herbicidi, ki jih bomo nadomestili z uporabo mehanske roke in okopavanjem zelenjave z njo. Okopalna roka »motika« je primer energetsko učinkovitega

okopavanja in je alternativa traktorjem na motorni pogon, deluje namreč na električni oz. akumulatorski pogon. Pogonska energija bo lahko po zmožnosti kmetov pridobljena iz OVE (obnovljivih virov energije). Z »motiko« bodo lahko ekološki pridelovalci zelenjave konkurenčnejši, saj bo njihovo okopavanje plevelov učinkovitejše in opravljeno z manj delovne sile, ki je še posebej v ekološki pridelavi neobhodna in nujno potrebna tudi za okopavanje posevkov zelenjave, ker herbicidov v ekološki pridelavi seveda ni dovoljeno uporabljati. Okopavanje izboljšuje strukturo tal, pomaga pri nadzoru plevelov, škodljivcev in bolezni, povečuje količino organske snovi v tleh, preprečuje erozijo tal in optimizira pH tal. Robotsko okopavanje omogoča natančno in učinkovito izvajanje teh nalog (Walter in drugi, 2017).

Motika je napredna tehnološka naprava, ki je bila zasnovana z namenom avtomatizacije procesa okopavanja. Opremljena je s senzorji in algoritmi, ki ji do določene mere omogočajo samostojno opravljanje naloge okopavanja, kar zmanjšuje potrebo po človeškem delu. Okopavanje se izvaja enovrstno in povsem mehansko na sadikah vrtnin, ki so nižje od 30 centimetrov. Širina kolo teka ustreza širini gredic. Sprednji kolesi sta pogonski in namenjeni krmiljenju okopalnika. Elektromotorja za pogon okopalnih elementov sta brez krtačna BLDC (brushless DC) moči 220 W in z vgrajenim reduktorjem v razmerjih 10 : 1 in 50 : 1. Navor motorja brez menjalnika je 0,6 Nm. Z menjalnikom je navor ustrezno večji. Pogonska motorja okopalnika sta vgrajena v sprednji kolesi in sta moči 350 W. Prav tako sta brez krtačna z oznako BLDC hub, kar pomeni, da sta skupaj z reduktorjem vgrajena v kolesi. Baterija je tipa Li-ion, njena nazivna napetost je 24 V, kapaciteta pa 500 Wh.

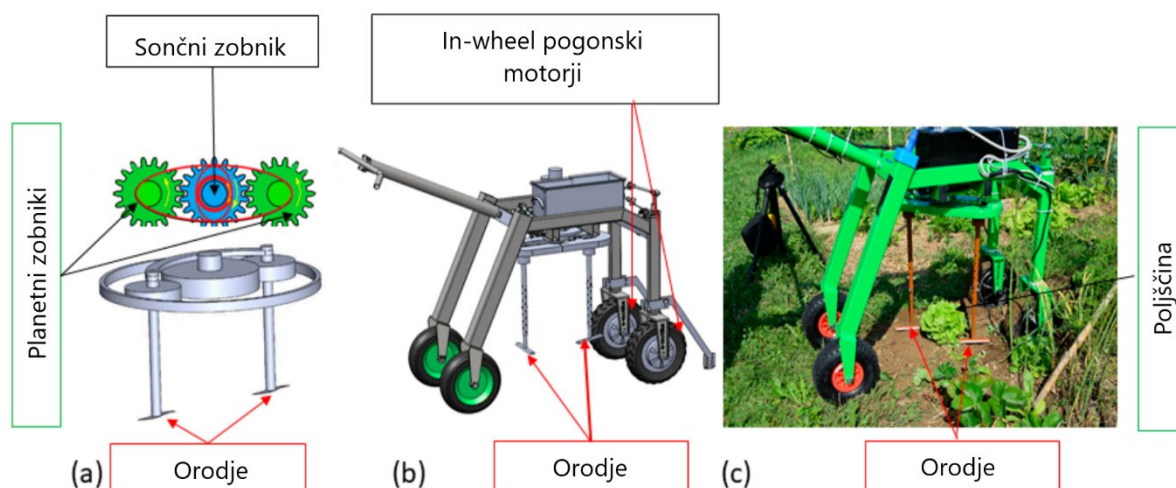


Slika 1 Okopalni robot MOTIKA: Vir: Tomaž Levstek

OCENA IZVEDLJIVOSTI PRENOSA PREDLAGANIH REŠITEV V PRAKSO

2.1 Opis zasnove motike in njenega delovanja

Da bi omogočili odstranjevanje plevla tako med vrstami kot znotraj vrst ter hkrati ohranili preprostost motike, je bila zasnovana robustna platforma s planetnim menjalnikom, ki ima tri stopnje prostosti (3 DOF), in dvema vrtljivima orodjema, kot je prikazano na Sliki 2 a in b. Planetni menjalnik omogoča vrtenje in kroženje orodij (1. in 2. prostostna stopnja). Medtem je premikanje naprej in nazaj nadzorovano s kolesi, kar predstavlja tretjo prostostno stopnjo. Prva prostostna stopnja planetnega reduktorja je centralno nameščen sončni zobnik. Druga prostostna stopnja prostosti je nosilec planetnih zobnikov, ki je prav tako nameščen centralno.



Slika 2 Konstrukcija motike: (a) mehanizem delovanja, (b) 3D model; (c) motika med okopavanjem; Vir: UL FS

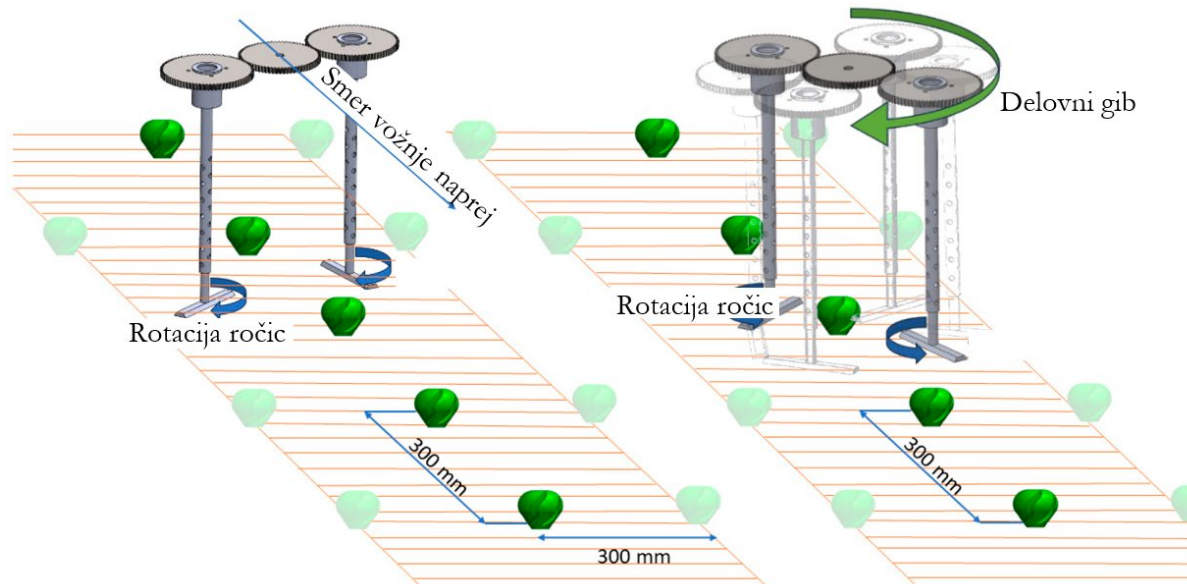
Delovanje motike lahko najboljše razložimo na način, da delovanje razdelimo na:

- odstranjevanje plevla med vrstami in
- odstranjevanje plevla znotraj vrste.

Odstranjevanje plevla med vrstami: Ko je aktivirana 1. prostostna stopnja planetnega menjalnika, medtem ko je 2. prostostna stopnja zadržana v mirovanju, motika izvaja odstranjevanje plevla med vrstami (slika 3a). V tem načinu se orodje vrti okoli svoje osi, ne da bi krožilo okoli rastline. S prilagajanjem kota kroženja (ki določa tudi bočno razdaljo do vrste posevkov) je mogoče nastaviti položaj končnih efektorjev znotraj prostora med vrstami. Med odstranjevanjem plevla med vrstami je hitrost kroženja enaka nič, orodja pa se vrtijo samo okoli svojih osi. Celotna platforma motike se lahko premika naprej ali nazaj (3. prostostna stopnja) s pomočjo pogonskih motorjev koles.

Odstranjevanje plevla znotraj vrste: Pri odstranjevanju plevla znotraj vrste se aktivira nosilec planetnih zobnikov (»sončno« kolo, 2. prostostna stopnja) (slika 3b). Pri tem poteka hkratno kroženje nosilca planetnih zobnikov in vrtenje planetnih zobnikov. Planetni zobniki z orodji se vrtijo okoli svojih osi, hkrati pa krožijo okoli sončnega kolesa, s čimer ustvarjajo

krožno gibanje okoli rastline. Za učinkovito odstranjevanje plevla znotraj vrste mora platforma motike ostati na mestu in se ne sme premikati naprej.



Slika 3 Shema delovanja: (a) odstranjevanje plevla med vrstami in (b) odstranjevanje plevla znotraj vrste; Vir: UL FS

Za prilagajanje postopka odstranjevanja plevla je mogoče 1. prostostno stopnjo (vrtenje) in 2. prostostno stopnjo (kroženje) planetnega menjalnika aktivirati tudi ločeno. Na primer, uporabnik lahko spreminja hitrost kroženja orodij okoli rastline, medtem ko ohranja konstantno hitrost vrtenja orodja okoli njegove osi. Z uravnavanjem hitrosti vrtenja obeh prostostnih stopenj je mogoče izbrati poljubno razmerje med vrtenjem orodja okoli osi in kroženjem okoli rastline.

2.2 Opis tehničnih specifikacij motike

Motiko poganjajo brezkrtačni enosmerni (BLDC) motorji z zobniškim prenosom za vse tri prostostne stopnje. Motorja za 1. in 2. prostostno stopnjo sta 24 V, 220 W BLDC motorja z zobniškim prenosom in redukcijskim razmerjem 50:1 za sončno kolo (1. prostostna stopnja) ter 10:1 za nosilec planetnih zobnikov (2. prostostna stopnja). Vsako pogonsko kolo je opremljeno s 24 V, 350 W BLDC motorjem z zobniškim prenosom v pestu, ki omogoča premikanje celotne platforme naprej ali nazaj. Najpomembnejše specifikacije motike so prikazane v tabeli 1. Med eksperimentalnimi testi (ne pa tudi med predstavitvami in uporabo na kmetijskih gospodarstvih) sta bila izmerjena električna poraba in skupna poraba energije vsakega motorja z uporabo digitalnega analizatorja električne moči, natančneje GPM-8330 Digital Power Analyser podjetja Good Will Instrument Co., Ltd., New Taipei City 236, Tajvan. Hitrost zajema podatkov je bila 10 Hz, pri čemer so bili zabeleženi podatki shranjeni na računalnik, povezan z analizatorjem prek USB kabla za nadaljnjo analizo.

Delovanje in hitrost elektromotorjev je pri vsakokratni uporabi (med eksperimentalnimi testiranjmi, med predstavitvami in uporabo na kmetijskih gospodarstvih) nadzoroval mikrokontroler (Teensy 4.1, 600 MHz Cortex-M7, PJRC, OR 97140, ZDA) prek BLDC gonilnikov.

Tabela 1 Tehnične specifikacije motike; Vir: UL FS

mehansko		električno	
mere	L1,3 × W0,52 × H1,2 m	moč motorja (3rd DOF)	2 × 350 W
teža	92 kg	moč motorja (2nd DOF)	220W
širina kolesa	280 mm	moč motorja (1st DOF)	220W
kolotek	350 mm	kapaciteta baterije	423 Wh
hitrost premikanja naprej	1 – 6 km/h		
največja dovoljena globina okopavanja	10 – 30 mm		
največja dovoljena hitrost (1st DOF)	3,2/s		
največja dovoljena hitrost (2nd DOF)	0,5/s		

2.3 Preizkus motike v praksi

Robot smo preizkusili na različnih terenih in ekoloških kmetijah, na različnih vrtninah in v različnih vremenskih razmerah. Da bi bolje razumeli in lažje ocenili njegovo učinkovitost, smo izvedli še preizkus v kontroliranih razmerah, torej v rastlinjaku. Zasejali smo štiri parcele (50 x 50 cm) z vrtno krešo (*Lepidium sativum*) in rdečo redkvico (*Raphanus sativus*) in ju zaradi hitre kalitve in rasti uporabili kot nadomestek plevela, ki ga je treba odstraniti z okopalnikom (slika 4).



Slika 4 Vrtna kreša in rdeča redkvica; Vir: Tomaž Levstek

Tri parcele (slika 5) so bile namenjene preizkusu učinkovitosti okopavanja, četrta pa je bila kontrolna (slika 6) in je nismo okopavali, zato je bilo število rastlin na njej ves čas enako.



Slika 5 Parcele in simulacija solatnih glav; Vir: Tomaž Levstek



Slika 6 Kontrolna parcela; Vir: Tomaž Levstek

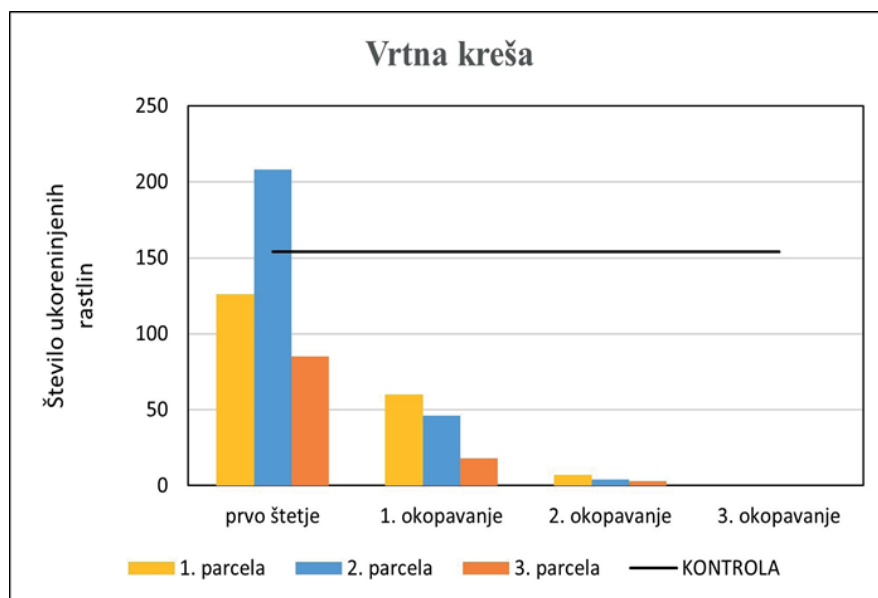
Pri višini rastlin 1–3 cm smo vse rastline na parcelah prešteli, nato pa smo jih v tedenskih časovnih razmikih okopali z robotom in potem ponovno prešteli tiste, ki so ostale nepoškodovane, pozneje pa prišteli rastline, ki so bile zgolj poškodovane in so si po krajšem času opomogle. Seveda so za učinkovitost okopavanja štele samo popolnoma izkopane, torej uničene rastline. V sredino vsake parcele smo pred okopavanjem namestili tiskani model

glave solate. Okopavanje smo izvedli tako, da smo okopalna elementa enkrat zavrteli okoli modela solate.

2.3.1 Rezultati

Pri vrtni kreši izstopa majhno število rastlin pred okopavanji na tretji parceli, kar lahko pripišemo slabši kalitvi semena zaradi mikroklimatskih pogojev na tej parceli (Tabela 2).

Tabela 2 Vrtna kreša – število rastlin po posameznih okopavanjih; Vir: Tomaž Levstek



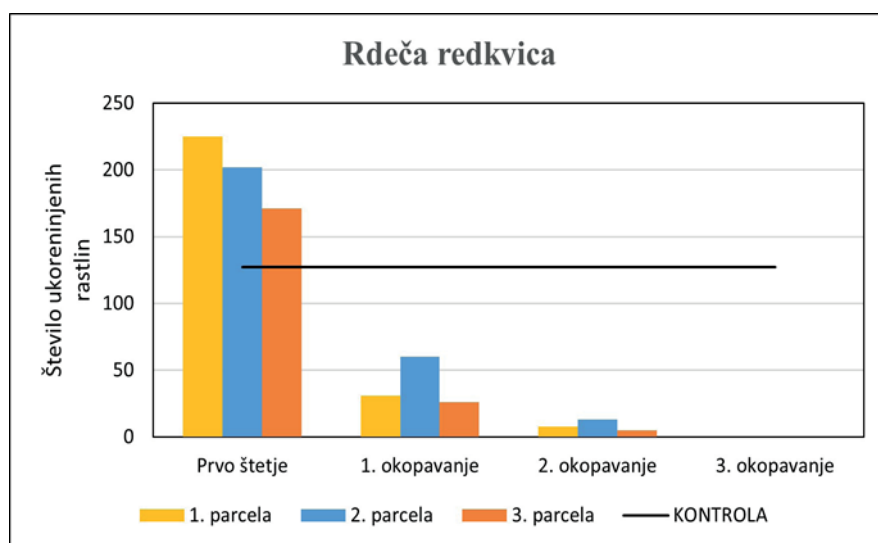
Drugi dve parceli sta dokaj izenačeni čeprav lahko opazimo precejšnje razlike po prvem okopavanju. Naj več rastlin je ostalo na prvi parceli, potem pa število pada s številom parcele. Ker smo parcele vedno okopavali po vrstnem redu od prve do tretje, domnevamo, da smo se pri prvi parceli vedno šele navajali na pravilno izvedbo okopavanja. Ne smemo namreč pozabiti, da je učinkovito okopavanje odvisno tudi od pravilno nameščenega okopalnika in okopalnih elementov ob sadiko solate, kar je seveda odvisno od osebe, ki upravlja okopalnik. Kljub temu smo s tretjim okopavanjem dosegli stodstotno učinkovitost, saj so bile uničene vse rastline v delovnem območju okopalnih nožev (Tabela 3).

Tabela 3 Vrtna kreša – število in deleži rastlin; Vir: Tomaž Levstek

	Prvo štetje	1. okopavanje	2. okopavanje	3. okopavanje
1. parcela	126	48	7	0
% glede na prvo štetje	100	48	6	0
% glede na kontrolo		39	5	0
2. parcela	208	46	4	0
% glede na prvo štetje		22	2	0
% glede na kontrolo		30	3	0
3. parcela	85	18	3	0
% glede na prvo štetje		21	4	0
% glede na kontrolo		12	2	0
KONTROLA	154	154	154	154

Pri rdeči redkvici je število rastlin na parcelah dokaj izenačeno (Tabela 4).

Tabela 4 Rdeča redkvica – število rastlin po posameznih okopavanjih; Vir: Tomaž Levstek



Prvo okopavanje je povzročilo precejšnje razlike v številu rastlin na parcelah, ki pa se z vsakim nadaljnjim okopavanjem vedno bolj zmanjšujejo, in po tretjem okopavanju dosežemo stodstotno uničenje rastlin na vseh parcelah (Tabela 5).

Tabela 5 Rdeča redkvice – število in deleži rastlin; Vir: Tomaž Levstek

	Prvo štetje	1. okopavanje	2. okopavanje	3. okopavanje
1. parcela	225	31	8	0
% glede na prvo štetje		14	4	0
% glede na kontrolo		24	6	0
2. parcela	202	60	13	0
% glede na prvo štetje		30	6	0
% glede na kontrolo		47	10	0
3. parcela	171	26	5	0
% glede na prvo štetje		15	3	0
% glede na kontrolo		20	4	0
KONTROLA	127	127	127	127

Če pogledamo število rastlin in deleže po parcelah ne glede na vrtnino, so podatki veliko bolj izenačeni. Izstopa prvo okopavanje na tretji parceli, saj je število nepoškodovanih rastlin majhno in tudi deleža glede na prvo štetje in kontrolo sta nizka. Ker je tudi število rastlin pred okopavanji glede na drugi dve parceli nižje, lahko sklepamo, da je pri večji gostoti rastlin (1. in 2. parcela) prvo okopavanje nekoliko manj učinkovito (tabela 6).

Tabela 6 Število rastlin po posameznih okopavanjih, skupno za obe vrtnini; Vir: Tomaž Levstek

	Prvo štetje	1. okopavanje	2. okopavanje	3. okopavanje
1. parcela	351	91	15	0
% glede na prvo štetje	100	26	4	0
% glede na kontrolo		32	5	0
2. parcela	410	106	17	0
% glede na prvo štetje	100	26	4	0
% glede na kontrolo		38	6	0
3. parcela	256	44	8	0
% glede na prvo štetje	0	17	3	0
% glede na kontrolo		16	3	0
KONTROLA	281	281	281	281

Stopnjo učinkovitosti smo izračunali kot delež uničenih rastlin po okopavanju in število rastlin v kontrolni skupini. Rezultati so naslednji:

Vrtna kreša

Po 1. okopavanju 1. parcele je stopnja učinkovitosti 61 %, kar pomeni, da je bilo uničenih približno 61 % rastlin v primerjavi s kontrolno parcelo in približno 52 % v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 2. okopavanju 1. parcele je stopnja učinkovitosti 95 %, kar pomeni, da je bilo uničenih približno 95 % rastlin v primerjavi s kontrolno skupino in približno 94 % v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 3. okopavanju 1. parcele je stopnja učinkovitosti 100 %, kar pomeni, da so bile uničene vse rastline.

Po 1. okopavanju 2. parcele je stopnja učinkovitosti 70 % v primerjavi s kontrolno parcelo in 78-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 2. okopavanju 2. parcele je stopnja učinkovitosti 97 % v primerjavi s kontrolno skupino in približno 94-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 3. okopavanju 2. parcele je stopnja učinkovitosti 100 %.

Po 1. okopavanju 3. parcele je stopnja učinkovitosti 88 % v primerjavi s kontrolno parcelo in 85-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 2. okopavanju 3. parcele je stopnja učinkovitosti 96 % v primerjavi s kontrolno skupino in približno 89-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 3. okopavanju 3. parcele je stopnja učinkovitosti 100 % (tabela 7).

Tabela 7 Vrtna kreša – deleži (%) uničenih rastlin glede na kontrolo; Vir: Tomaž Levstek

	1. okopavanje	2. okopavanje	3. okopavanje
1. parcela	61	95	100
2. parcela	70	97	100
3. parcela	88	96	100

Rdeča redkvica

Po 1. okopavanju prve parcele je stopnja učinkovitosti 76 % v primerjavi s kontrolno skupino in 86-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 2. okopavanju prve parcele je stopnja učinkovitosti 94 % v primerjavi s kontrolno skupino in približno 96-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 3. okopavanju prve parcele je stopnja učinkovitosti 100 %.

Po 1. okopavanju druge parcele je stopnja učinkovitosti 53 % v primerjavi s kontrolno skupino in 86-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 2. okopavanju druge parcele je stopnja učinkovitosti 90 % v primerjavi s kontrolno skupino in približno 96-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 3. okopavanju druge parcele je stopnja učinkovitosti 100 %.

Po 1. okopavanju tretje parcele je stopnja učinkovitosti 80 % v primerjavi s kontrolno skupino in 85-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

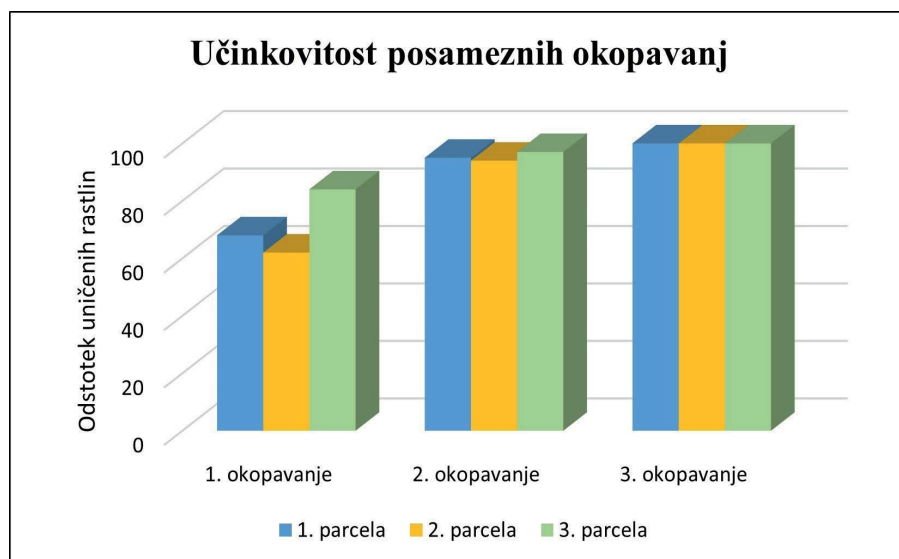
Po 2. okopavanju tretje parcele je stopnja učinkovitosti 96 % v primerjavi s kontrolno skupino in približno 97-% v primerjavi s prvim štetjem pred okopavanjem.

Po 3. okopavanju tretje parcele je stopnja učinkovitosti 100 % (tabela 8).

Tabela 8 Rdeča redkvice – deleži (%) uničenih rastlin glede na kontrolo; Vir: Tomaž Levstek

	1. okopavanje	2. okopavanje	3. okopavanje
1. parcela	76	94	100
2. parcela	53	90	100
3. parcela	80	96	100

Učinkovitost okopalnega robota se je povečala z vsakim okopavanjem, kar je razumljivo. Nasprotno bi veljalo, če bi imeli zelo velik delež polegih rastlin, ki jih okopalnik ne bi izruval in bi si opomogle. Torej je večje število okopavanj povezano z višjo stopnjo učinkovitosti. To je smiselno, saj večkratno okopavanje istega območja odstrani več rastlin. Ta trend se jasno kaže v naših podatkih, saj se stopnja učinkovitosti povečuje (slika 9).

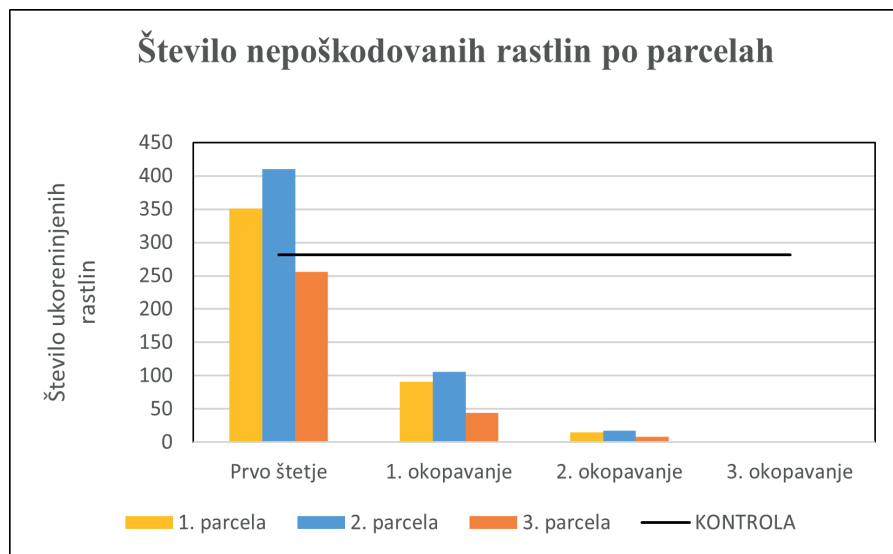


Slika 9: Število rastlin po okopavanja na posamezni parceli

Vir: Tomaž Levstek

Rezultati poskusa so pokazali, da je okopalni robot izjemno učinkovit. Čeprav število rastlin posameznih vrtin na določenih parcelah precej odstopa, kar lahko pripišemo slabši kalitvi, je učinek okopavanj na posameznih parcelah ne glede na vrtnino dokaj homogen in linearno povezan s številom okopavanj (Tabela 9).

Tabela 9 Deleži uničenih rastlin po okopavanjih; Vir: Tomaž Levstek



PROBLEMI IN POSEBNOSTI PRENOSA PREDLAGANIH REŠITEV V PRAKSO

Pri prenosu uporabe motike v prakso smo se soočili s problemi in izzivi, kot so:

Tehnološke omejitve: roboti so še vedno relativno nova tehnologija, zato se na svoji razvojni poti nenehno spreminjajo in izboljšujejo. Nekateri med njimi še niso dovolj napredni, da bi lahko opravili vse naloge, ki jih okopavanje zahteva, ali pa morda ne delujejo tako učinkovito, kot bi si želeli. Poleg tega lahko tehnološke omejitve vključujejo tudi težave z zanesljivostjo in vzdrževanjem robotov ter njihovim transportom (Povše Tašič, 2022).

Omejitve terena: Okopalni roboti so ponavadi zasnovani za delo na ravnih in enakomernih površinah. Na neravnih ali strmih terenih ter na tleh z veliko kamni ali drugimi ovirami, so roboti manj učinkoviti. Poleg tega lahko tudi velikost in oblika obdelovalnih površin zelo vplivata na učinkovitost robotov. Večinoma namreč delujejo avtonomno, kar pomeni električni pogon s pomočjo akumulatorja električne energije, kar lahko predstavlja omejitev zaradi prevelike porabe energije (Viršek, 2021).

Vremenske omejitve: Različni vremenski pojavi (veter, dež) lahko močno vplivajo na delovanje okopalnih robotov, saj večinoma zelo zmanjšajo njihovo učinkovitost.

Visoki začetni stroški: Čeprav okopalni roboti dolgoročno lahko zmanjšajo stroške, so začetni stroški za nakup in namestitev teh sistemov lahko visoki. To lahko predstavlja oviro za manjše kmetije ali kmetije z omejeno možnostjo kmetijske dejavnosti.

Potreba po usposabljanju: Uporaba okopalnih robotov zahteva določeno stopnjo tehničnega znanja in usposabljanja. Kmetje se morajo naučiti, kako upravljati in vzdrževati te sisteme, kar lahko pomeni dodaten čas in stroške.

KORISTI PREDLAGANIH REŠITEV ZA KMETIJSKA GOSPODARSTVA

V času pomanjkanje delavcev na kmetijah bo mehanizacija, tudi za bolj kompleksne operacije, nedvomno potrebna. S prodorom robotske tehnologije v druge industrije, kjer je okolje bolj obvladljivo in ponovljivo, to počasi prihaja tudi v kmetijstvo. Robotske tehnologije že uporablja industrija v mnogo panogah za optimizacijo ter avtomatizacijo delovnih procesov. Prav ta efekt je potrebno izkoristiti tudi v kmetijski panogi. Robotsko okopavanje, avtomatsko zalivanje, računalniški nadzor uspevanja rastlin, strojno obiranje pridelkov, sortiranje in pakiranje, so le nekatere operacije v kmetijstvu, ki jih lahko prepustimo strojem, da jih opravljajo sami. Je pa za to potrebno sodelovanje različnih strok kot so strojništvo, elektrotehnika, robotika, mehatronika, ter kmetijskih uporabnikov, ki bi tehnologijo testirali in predlagali izboljšave.

Kot smo opazili tekom konstruiranja motike, je izbire strojev, ki so popolnoma ali delno avtomatizirani za velike odjemalce z zajetnim kapitalom že veliko. Majhnih strojev za butične proizvajalce in manjše kmetije pa na trgu skoraj ne najdemo. Zato se nam zdi pomembno, da preko projektov kot je ta, skušamo na trg spraviti nove tehnologije, ki bodo omogočale hiter dvig produktivnosti ter hkrati razbremenile kmeta.

Digitalna okopalna roka – motika je bila testirana neposredno na kmetijskih gospodarstvih z namenom ugotavljanja funkcionalnosti in uporabnosti v praksi. Kmetje so v sklopu testiranja podali dragocene povratne informacije, ki so bile ključne za nadaljnji razvoj naprave.

Uporabniške izkušnje in mnenja

Motika se uporablja za mehansko odstranjevanje plevela in rahljanje zemlje med vrstami različnih kultur, kot so zelje, brokoli, zelišča in drugo. Rastline so bile v času okopavanja visoke od 4 do 25 cm, pleveli pa od 1 do 20 cm.

Uporabniki so največkrat odstranjevali ozkolistne (trave), širokolistne in koreninske plevelce. Uspešnost odstranjevanja je bila največja pri manjših ozkolistnih plevelih in delno pri koreninskih plevelih, medtem ko je bila pri večjih ali globljih plevelih učinkovitost slabša pogosto je bilo treba okopavanje večkrat ponoviti.

Upravljanje in ergonomija

Motika je bila ocenjena kot lahka za uporabo, tudi brez predhodnega znanja. Upravljanje pogonov in krmiljenje je bilo ocenjeno kot preprosto, čeprav je bilo na neravnem terenu težje ohranjati smer. Menjava nožev je ocenjena kot srednje zahtevna do preprosta.

Učinkovitost

Razpleveljenje je bilo ocenjeno kot delno do srednje uspešno, zaradi konstrukcijskih omejitev motike na težjih tleh in pri večjih plevelih.

Prednosti za uporabnika

- Znatno zmanjšanje fizičnega napora v primerjavi z ročnim delom.
- Hitrejše delo na večjih površinah (npr. 10 arov naenkrat).
- Prezračevanje tal.
- Dobra manevrirnost zaradi premičnih sprednjih koles.

VPLIVI PREDLAGANIH REŠITEV NA OKOLJE

5.1 Zmanjšanje negativnih vplivov kmetijstva na okolje

Uporaba pametnih tehnologij v kmetijstvu, kamor prištevamo tudi robotsko roko za okopavanje -motika, prinaša prednosti in nove izzive. V kontekstu tehnološkega napredka in učinkovitega izvajanja pomembnih agrotehničnih ukrepov, se znižujejo obremenilni vplivi kmetijstva na okolje. Uporaba okopalne roke pri ekološki pridelavi zelenjave, zmanjšuje količino ročnega dela in povečuje produktivnost. Ugoden učinek na okolje je prenos dobre prakse na kmetije s konvencionalno pridelavo, kjer je velik potencial za zmanjšanje uporabe fitofarmacevtskih sredstev (FFS). Uporaba motike je tudi učinkovita alternativa uporabi herbicidov, saj se s tehnologijo mehanskega zatiranja plevela doseže večji obseg obdelanih kmetijskih površin. Prav tako se zmanjšuje količina vnosa zastirnih folij v okolje in trajne zapleveljenosti. Znano je, da pri uporabi zastirnih folij ostajajo med kulturami neobdelani pasovi, ki negativno vplivajo na ohranjanje semenske banke v tleh. Z okopalno roko je pravočasno in učinkovito obdelana celotna površina zemljišč, s čimer se prepreči osemenjevanje in širjenje plevelnih vrst. Z mehničnim okopavanjem je doseženo povečanje površin v okviru ohranitvenega in trajnostnega kmetijstva, in sicer zaradi uporabe lahkih strojev z zmanjšanim tlačenjem tal, zmanjšanjem ali ukinitvijo uporabe FFS, itd. Površine so manj zapleveljene, tla bolj zračna in s tem je povečan dostop rastlinskih hranil. Motika vsebuje baterijo, ki se napaja z električno energijo, in tako zmanjšuje porabo fosilnih goriv ter podpira rabo alternativnih virov energije. Neposredni učinek se kaže v večji energetski učinkovitosti in prilagajanju podnebnim spremembam. Tehnologije, kot so okopalni roboti, lahko povečajo privlačnost kmetijstva za mlade in tehnološko usmerjene posameznike, kar prispeva k trajnostni prihodnosti kmetijstva.

5.2 Skupni pristopi na področju kmetijstva za varstvo biotske raznovrstnosti

V številnih evropskih državah, tudi v Sloveniji, se opaža upadanje pestrosti opraševalcev. Vzroki so izguba življenjskega prostora zaradi intenzivnega kmetijstva in urbanizacije ter degradacije tal in s tem povezane izgube prehranskih virov in gnezdišč, FFS, bolezni in podnebne spremembe. Uporaba okopalne roke prispeva k ohranjanju biotske pestrosti v tleh in znižanju uporabe FFS v kmetijski pridelavi. Iz dosedanjih raziskav je znano, da prekopavanje in zračenje tal ugodno vpliva na ohranjanje mikroorganizmov v tleh. V povezavi z uporabo dosevkov v zelenjadarstvu in posledičnemu dvigu organske snovi, se tako vpliva na večjo biotska pestrost v tleh. Mehansko okopavanje zmanjšuje uporabo fitofarmacevtskih sredstev, s tem pa se ohranja številčnost čebel in ostalih divjih opraševalcev, ki z opraševanjem skrbijo za ohranjanje pestrosti rastlinskih vrst in biotske pestrosti.

Zaradi lažjega in učinkovitejšega načina okopavanja kmetijskih površin z motiko se ohranjajo kmetijske površine (ekološke in konvencionalne), kar vpliva na izboljšanje stanja biotske raznovrstnosti habitatov in vrst. Gre za ciljno naslavljanje površin z visoko naravovarstveno vrednostjo na območjih Natura 2000, vodovarstvenih območjih, kjer se zaznava upadanje populacij travniških ptic in metuljev ter slabšanja stanja habitatov.



Kmetje so vključili cvetoče mešanice na intenzivnih zelenjadarskih površinah. To je prispevalo k biotski pestrosti kmetijske krajine, ki je ključen habitat za številne vrste organizmov. Pticom se nudi primerno mesto za gnezdenje, kritje pred plenilci, semena in plodovi pa so tudi bogat vir hrane. Na primer za rjavega srakoperja (*L. collurio*), poljskega škrjanca (*Alauda arvensis*) so bile zasajene nove površine porasle z pestrimi mešanicami rastlin, povečan je bil prehranjevalni in gnezditveni habitat, ki pozitivno vpliva na ohranjenost posameznih vrst ptice. Cvetovi novo zasajenih mešanic so skozi sezono ponujali opráševalcem pelod in sladki nektar Kranjski čebeli (*Apis mellifera carnica*), in drugim opráševalcem (divje čebele, čmrlji, muhe trepetavke, metulji...) ter tako prispevali k izboljšanju stanja opráševanja v kmetijski krajini.

Na področju ohranjanja biodiverzitete je izrednega pomena svetovanje in prenos dobrih praks vključenim kmetijah. Teme svetovanj se osredotočajo na ohranjanja in varstva biodiverzitete na poudarku mehanskega okopavanja, ki pri pridelavi zelenjave lahko trajno vpliva na rodovitnost kmetijskih površin in posledično na naše okolje. Temelj je poznavanje raznovrstnosti rastlin in živali in kako ravnati, da jih zaščitimo. Poudarek je na zaščiti živih organizmov v tleh, ki poskrbijo, da so tla živa in rodovita, kot tudi opráševalcev in ptic, uporaba vrstno pestrih mešanic, pestrega kolobarja, dosevk za manj plevela, poznavanju invazivnih vrst in njihovo odstranjevanje. Na poskusne površine je potrebno vključiti nabor biotsko pestrih rastlin (metuljnice, križnice...), katere bodo služile kot življenjski prostor opráševalcem, povečevale delež organske mase v tleh ter skrbele za vezavo dušika v tleh.

5.3 Okoljsko učinkovite kmetijske pridelave na vodovarstvenih in drugih varovanih območjih

Z ekološko in okolju prijazno pridelavo zelenjave se ohranja trajnostno kmetovanje na območjih z omejitvami. Istočasno se prispeva k spodbujanju trajnostnega razvoja kmetijstva, poseljenosti podeželja in učinkovitemu upravljanju naravnih virov, kot so voda, tla in zrak. Razvita okopalna roka omogoča okopavanje večjih površin, ob manjši uporabi FFS in manjša uporaba mineralnih gnojil (možna je vdelava peletiranih gnojil v tla ob okopavanju) zmanjšuje onesnaženje podzemnih vod z ostanki FFS in odvečnim dušikom. Mehansko zatiranje plevelnih vrst vpliva tudi na količino in ceno pridelka ter celotno ekonomiko pridelave.

Ekološka pridelava se kaže kot edina dolgoročna in alternativna rešitev za trajnostno upravljanje z naravnimi viri, blaženje podnebnih sprememb ter prilagajanju nanje. Uporaba motike razbremeni fizični napor kmetov in optimira proizvodni proces, s tem pa prispeva k večji privlačnosti ekološke pridelave in tako k napredku in trajnostnemu upravljanju z naravnimi viri.

SKLEPI IN PRIPOROČILA

V prihodnosti lahko pričakujemo, da se bo tehnologija okopalnih robotov še naprej razvijala in izboljševala. Z napredkom v umetni inteligenci in strojnem učenju bodo ti roboti postali še natančnejši in učinkovitejši. Prav tako bodo verjetno postali dostopnejši za manjše kmetije in vrtničarje, kar bo pripomoglo k širši uporabi te tehnologije.

Raziskave na tem področju se bodo verjetno osredotočile na izboljšanje učinkovitosti okopalnih robotov, zmanjšanje njihovih omejitev in prilagajanje različnim vrstam tal in rastlin. Prav tako bodo raziskovalci iskali načine za integracijo teh robotov v celovite sisteme za upravljanje kmetij, ki vključujejo tudi druge tehnologije, kot so avtonomni traktorji, brezpilotna letala za spremljanje rastlin in napredni sistemi za namakanje.

V kontekstu ekološkega kmetovanja in zagotavljanja dovolj hrane za vse ljudi ob strmi rasti števila prebivalcev na planetu ima tehnologija okopalnih robotov velik potencial. Z zmanjšanjem potrebe po ročnem delu in izboljšanjem učinkovitosti okopavanja lahko ti roboti ekološkim kmetijam pomagajo povečati njihovo produktivnost, hkrati pa ohraniti zdravje in rodovitnost tal. To je ključnega pomena za zagotavljanje trajnostne preskrbe s hrano v prihodnosti.

Uporaba okopalnih robotov in drugih avtomatiziranih tehnologij v kmetijstvu lahko tudi pomembno prispeva k ohranjanju biodiverzitete. Z zmanjšanjem uporabe fitofarmaceutskih sredstev takšni roboti lahko pomagajo ohranjati široko paleto organizmov, ki so prisotni na kmetijskih zemljiščih. To vključuje vse, od mikroorganizmov v tleh, ki so ključni za rodovitnost tal, do žuželk, ptic in drugih divjih živali, ki so pomembne za ekosistemske storitve, kot so oprasovanje in nadzor škodljivcev. Poleg tega lahko zmanjšanje uporabe fitofarmaceutskih sredstev pomaga preprečiti onesnaževanje vodnih virov in zmanjšati izpostavljenost kmetov in potrošnikov škodljivim kemikalijam. To je še posebej pomembno v ekološkem kmetijstvu, kjer je uporaba sintetičnih pesticidov omejena ali celo prepovedana.

Vendar pa je treba upoštevati tudi izzive, ki jih prinaša uporaba te tehnologije. Med njimi so visoki začetni stroški, potreba po usposabljanju, tehnološke omejitve in vpliv na delovna mesta v kmetijstvu. Reševanje teh izzivov bo ključno za uspešno vključitev okopalnih robotov v prihodnost kmetijstva. Prototip je namenjen predvsem preizkušanju konceptov in različnih metod obdelave zemlje.

Zavedamo se, da bodo tudi potrebne prilagoditve, v kolikor želimo motiko spraviti v reden proizvodni proces. Hkrati je še veliko možnosti za avtomatizacijo posameznih operacij. Trenutno temu ne moremo reči robotski okopalnik, je le preprost stroj z računalniško podporo malega računalnika, ki bo za dostopno ceno malemu kmetu omogočal strojno, zato hitrejše in predvsem manj utrujajoče okopavanje. Če zaenkrat ne vidimo možnost za popolnoma avtomatsko vožnjo po njivi (tak stroj bi bil veliko dražji) je pa možno nadgraditi motiko z dokaj poceni računalniškim vidom, ki bo prepoznaval ali sadike ali plevel in tako omogočil bolj sproščeno delo z motiko.



Evropski kmetijski sklad za razvoj podeželja: Evropa investira v podeželje

Vsa pridobljena znanja in izkušnje smo partnerji združili in z namenom širitve v pridelovalno prakso večkrat prikazano vsem zainteresiranim deležnikom. Vsi smo ob tem veliko naučili in pridobili.

LITERATURA IN VIRI

- [1] Akhter, M.J.; Sønderskov, M.; Loddo, D.; Ulber, L.; Hull, R.; Kudsk, P. Opportunities and challenges for harvest weed seed control in European cropping systems. *Eur. J. Agron.* 2023, 142, 126639.
- [2] Esposito, M.; Crimaldi, M.; Cirillo, V.; Sarghini, F.; Maggio, A. Drone and sensor technology for sustainable weed management: A review. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2021, 8, 18.
- [3] Melander, B.; Lattanzi, B.; Pannacci, E. Intelligent versus non-intelligent mechanical intra-row weed control in transplanted onion and cabbage. *Crop Prot.* 2015, 72, 1–8.
- [4] Chandel, N.S.; Chandel, A.K.; Roul, A.K.; Solanki, K.R.; Mehta, C.R. An integrated inter- and intra-row weeding system for row crops. *Crop Prot.* 2021, 145, 105642.
- [5] Slaughter, D.C.; Giles, D.K.; Downey, D. Autonomous robotic weed control systems: A review. *Comput. Electron. Agric.* 2008, 61, 63–78.
- [6] Visentin, F.; Cremasco, S.; Sozzi, M.; Signorini, L.; Signorini, M.; Marinello, F.; Muradore, R. A mixed-autonomous robotic platform for intra-row and inter-row weed removal for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 2023, 214, 108270.
- [7] Dedousis, P.A. An Investigation into the Design of PrecisionWeeding Mechanisms for Inter or Intra-Row Weed Control. Ph.D. Thesis, Cranfield University, Bedford, UK, 2007.
- [8] Tillett, N.D.; Hague, T.; Grundy, A.C.; Dedousis, A.P. Mechanical within-row weed control for transplanted crops using computer vision. *Biosyst. Eng.* 2008, 99, 171–178.
- [9] Alba, O.S.; Syrový, L.D.; Duddu, H.S.N.; Shirliffe, S.J. Increased seeding rate and multiple methods of mechanical weed control reduce weed biomass in a poorly competitive organic crop. *Field Crops Res.* 2020, 245, 107648.
- [10] Rao, A.N.; Singh, R.G.; Mahajan, G.; Wani, S.P. Weed research issues, challenges, and opportunities in India. *Crop Prot.* 2020, 134, 104451.
- [11] Van Der Weide, R.Y.; Bleeker, P.O.; Achten, M.; Lotz, L.A.P.; Fogelbergà, F.; Melander, B. Innovation in mechanical weed control in crop rows. *Weed Res.* 2008, 48, 215–224.
- [12] Pannacci, E.; Tei, F.; Guiducci, M. Mechanical weed control in organic winter wheat. *Ital. J. Agron.* 2017, 12, 900.
- [13] Gobor, Z.; Schulze Lammers, P.; Martinov, M. Development of a mechatronic intra-row weeding system with rotational hoeing tools: Theoretical approach and simulation. *Comput. Electron. Agric.* 2013, 98, 166–174.
- [14] Kumar, S.P.; Tewari, V.K.; Chandel, A.K.; Mehta, C.R.; Nare, B.; Chethan, C.R.; Mundhada, K.; Shrivastava, P.; Gupta, C.; Hota, S. A fuzzy logic algorithm derived mechatronic concept prototype for crop damage avoidance during eco-friendly eradication of intra-row weeds. *Artif. Intell. Agric.* 2020, 4, 116–126.
- [15] Strateški načrti SKP 2023-2027 <https://skp.si/skupna-kmetijska-politika-2023-2027>
- [16] Podnebne spremembe in obvladovanje tveganj v kmetijstvu <https://www.gov.si/podrocja/kmetijstvo-gozdarstvo-in-prehrana/kmetijstvo-in-razvoj-podezelja/podnebne-spremembe-in-obvladovanje-tveganj-v-kmetijstvu/>
- [17] Hribernik M., Klemenčič Kosi, S. Roboti v pomoč kmetov. Delo. Xx 2024.
- [18] Levstek T. Okopalni robot – ključ do učinkovitejšega ekološkega kmetovanja. *Moje podeželje*, št. 24, letnik XIII, december 2024.
- [19] Škerbot I. Pospešeno okopavanje zelenjave. *Viharnik* 15, april 2025.