



Primjena asistivno-zaštitne tehnologije u šumarstvu

Matija Landekić, Dorian Majetić, Matija Bakarić, Matej Matošević

Nacrtak – Abstract

Brojne studije slučaja potvrđuju da je šumska proizvodnja, osobito pridobivanje drva, jedna od najrizičnijih gospodarskih djelatnosti, ponajprije zbog mnogih opasnosti i izazova prisutnih u radnom okruženju. Promatrajući problem iz perspektive zaštite zdravlja radnika i unapređenja kulture sigurnosti, tehnološki napredak i globalni trendovi industrije 4.0 otvaraju mogućnost za primjenu niza novih inovativnih rješenja u šumskim radovima. U skladu s time za potrebe rada provedeno je sustavno pretraživanje relevantnih domaćih i inozemnih znanstvenih i stručnih izvora, uključujući mrežne stranice znanstvenih institucija, inovacijskih centara i tvrtki koje razvijaju asistivnu tehnologiju te online baze podataka. Pri obradi prikupljenih podataka primijenjene su metode analize, sinteze, deskripcije i komparacije radi detaljnijega razumijevanja principa rada asistivno-zaštitne tehnologije te njezine primjene. U okviru rezultata rada izrađen je pregled asistivno-zaštitne tehnologije s posebnim naglaskom na njezine mehaničke i biomehaničke radne principe. Nadalje, analizirana je opća primjena takve tehnologije u različitim sektorima te dosadašnja razina njihove primjene u šumarstvu, uz pretpostavku da će njihova uloga u budućnosti postati sve važnija u kontekstu zaštite zdravlja radnika s krajnjim ciljem produljenja radne sposobnosti pri obavljanju fizički zahtjevnih ručno-strojnih poslova. U sklopu poglavlja Rasprava i zaključci dodatno su razmotrene sigurnosne mjere povezane s korištenjem asistivno-zaštitne tehnologije te njezine ključne prednosti i ograničenja pri primjeni u šumarstvu.

Ključne riječi: šumarstvo, ručno-strojni rad, egzoskelet, mišićno-koštani poremećaj

1. Uvod – Introduction

Radni proces u šumarstvu obuhvaća sve ljudske aktivnosti potrebne za ostvarivanje planiranih šumarskih zadataka radi ostvarivanja maksimalne koristi od šuma i šumskoga zemljišta. Ljudski kapital, odnosno proizvodni radnici s potrebnim znanjima, vještinama, mogućnostima, sposobnostima i osobinama, uz odgovarajuće alate i resurse, čine ključnu komponentu proizvodnoga procesa u šumarstvu. Taj princip vrijedi jednako u šumarstvu kao i u svim drugim industrijskim i poslovnim sektorima. Ljudski kapital ili ljudski resursi ističu se kao najvažniji činioci uspjeha u poslovanju različitih tvrtki, poduzeća i organizacija (Bahtijarević-Šiber 2014, Aksentijević i dr. 2015, Dessler 2015). Radna okolina u šumarstvu razlikuje se od većine radnih okolina u drugim sektorima gospodarstva. Radni uvjeti na šumskom radilištu ovise o lokaciji, klimi, vremenskim uvjetima, terenu te karakteristikama predmeta

rada, odnosno samih stabala. Svako šumsko radilište ima jedinstvene uvjete i uz njih vezane radne rizike koje treba uzeti u obzir pri planiranju i izvođenju radova (FAO 1993). U pridobivanju drva odabir odgovarajuće tehnologije i sustava pridobivanja ovisi o prirodnim uvjetima, tehničkoj opremljenosti, ekološkim zahtjevima i ekonomskim kriterijima.

Unatoč uvođenju inovativnih tehnologija i modernih strojeva te unapređenju radnih procesa u posljednjih trideset godina, proizvodnja se u šumarstvu i dalje ubraja među najopasnije gospodarske djelatnosti s visokom stopom smrtnosti i brojnim ozljedama na radu. Mnoga istraživanja (Landekić i dr. 2021, Grzywinski i dr. 2020, Gejdoš i dr. 2019, Musić i dr. 2019) potvrđuju da su sječa i izrada drva najrizičnije faze pridobivanja drva jer uključuju kombinaciju ljudskoga rada, strojeva i nepredvidivih prirodnih uvjeta. Opasni radni uvjeti, česte ozljede i profesionalne bolesti, značajke radnoga mjesta

i predmeta rada, nepovoljan položaj tijela pri radu, trajanje i struktura radnoga vremena te izuzetan fizički napor samo su neki od razloga nedostatka radne snage u šumarstvu (Blombäck i dr. 2003). Također postoji problem starenja radne snage zbog ubrzanoga starenja stanovništva te sve veće nezainteresiranosti mladih ljudi za fizički teške poslove, odnosno tzv. 3D »Black Colar« poslove koji razumijevaju fizički zahtjevne, opasne i prljave poslove (engl. *Dirty, Dangerous and Demanding – 3D*) (Landekić i dr. 2017). Kod fizičkoga rada tijelo šumskoga radnika izloženo je statičkim i dinamičkim opterećenjima koja uzrokuju biomehanički stres. Prema tomu značajno preopterećenje tijekom fizičkoga rada zbog nepoštivanja ispravne radne dinamike i tehnike rezultiraju pojavom mišićno-koštanih poremećaja (dalje: MKP) kod šumskih radnika sjekača (Ashby i dr. 2001). MKP može nastati kao posljedica akutne traume (klizanje, nezgoda, pad, udarac itd.) ili kumulativno kao posljedica dugotrajne izloženosti statičkomu i/ili dinamičkomu stresu (Landekić i dr. 2025). Sa zadaćom neutraliziranja i ublažavanja navedenih tegoba provode se različite preventivne mjere kao što su korištenje harvesterata, forvardera i pomoćnih sredstava za manipulaciju izrađenim drvnim sortimentima, adekvatna tehnika podizanja i nošenja tereta, planiranje odmora i rotacija radnih zadataka te vježbe zagrijavanja i istezanja. U suvremenom radnom okruženju sve značajniju ulogu u prevenciji tih poremećaja ima asistivno-zaštitna tehnologija. Ona obuhvaća velik broj pomagala i uređaja osmišljenih radi smanjenja fizičkoga opterećenja radnika, povećanja sigurnosti te očuvanja radne sposobnosti. Primjeri su asistivno-zaštitne tehnologije ovi: ergonomski oblikovana radna mjesta, pomagala za rukovanje teretom, digitalna rješenja u smislu senzora i softvera za praćenje pokreta te osobna zaštitna oprema prilagođena ergonomskim zahtjevima. Egzoskeleti kao asistivno-zaštitna tehnologija ističu se kao najperspektivnije rješenje u fizički zahtjevnim zanimanjima s velikim potencijalom u prevenciji MKP-a (Majetić 2025). Egzoskeleti su nosivi sustavi, mehanički ili robotski, koji pružaju potporu tijelu radnika pri obavljanju fizički zahtjevnih zadataka. Oni djeluju kao vanjski »oklop« koji podržava pokrete i preuzima dio opterećenja koje bi inače snosili mišići, čime se smanjuje rizik od ozljeda i razvoja MKP-a. Ta tehnologija ujedno povećava učinkovitost i preciznost pri radu, pa primjena egzoskeleta može pridonijeti produljenju radnoga vijeka radnika te smanjenju troškova bolovanja i liječenja povezanih s MKP-om (Qiu i dr. 2022).

Prvi koncepti egzoskeleta razvijeni su u Sjedinjenim Američkim Državama 1960-ih godina, u prvom

redu u vojne svrhe. Najpoznatiji prototip toga vremena bio je Hardiman, robotsko odijelo osmišljeno za povećanje snage korisnika, no zbog prevelike mase i nepraktičnosti nije ušlo u širu primjenu u praksi (Qiu i dr. 2022). Od 2010-ih do danas egzoskeleti se sve više koriste u industriji, a kompanije poput Forda, BMW-a i Toyote testiraju ih i koriste kako bi smanjili rizik od razvoja MKP-a kod svojih radnika. Egzoskeleti se definiraju kao nosivi uređaji koji povećavaju snagu i izvedbu radnika pri obavljanju svakodnevnih radnih zadataka na radnom mjestu. Njihova je osnovna funkcija olakšavanje prirodno teških i fizički zahtjevnih aktivnosti, poput podizanja tereta, saginjanja i hodanja s opterećenjem. Postoje dvije glavne vrste egzoskeleta, pasivni i aktivni. Pasivni nemaju vlastiti izvor energije te pružaju potporu snazi i stabilnosti, dok aktivni egzoskeleti koriste pogonske sustave kao što su motori, hidraulični sustavi ili pneumatski sustavi za povećanje ljudske snage ili smanjenje potrošnje energije tijela (Landekić i dr. 2025).

U današnjem svijetu čestih promjena šumarski se sektor stalno suočava s izazovom osiguravanja kvalificirane i održive radne snage kao osnovne pretpostavke uspješne proizvodnje i održivoga gospodarenja šumama. Iz perspektive zaštite zdravlja i unaprjeđenja kulture sigurnosti, tehnološki napredak i globalni trendovi industrije 4.0 otvaraju mogućnosti primjene niza novih rješenja u šumskoj proizvodnji. U skladu s navedenim, osnovna je postavka rada pružanje pregleda opće primjenjivosti asistivno-zaštitne tehnologije, tj. egzoskeleta s posebnim naglaskom na mehaničke i biomehaničke radne principe. Dodatan doprinos rada vidljiv je u prikazu aktualnih inovacijsko-tehnoloških rješenja industrije 4.0 u zaštiti zdravlja radnika u šumskoj proizvodnji.

2. Materijal i metode – *Material and methods*

Nakon upoznavanja teorijske podloge predmeta istraživanja provedeno je pretraživanje relevantnih domaćih i inozemnih znanstvenih i stručnih izvora. Pregledane su mrežne stranice znanstvenih institucija, inovacijskih centara, rehabilitacijskih ustanova i poslovnih subjekata koji se bave istraživanom problematikom te *online* baze podataka (Current Contents, Science Direct, ForestScience.info, Cab Abstracts i dr.). Izvor koji je u značajnijoj mjeri korišten kao podloga za izradu rada, tj. pojašnjavanje mehaničkih i biomehaničkih radnih principa asistivne tehnologije, jest dokument pod naslovom »Kako egzoskeleti pružaju potporu«. Objavila ga je tvrtka za razvoj inovativnih i pristupačnih egzoskeleta Auxivo AG. Za

opći pregled primjene egzoskeleta po djelatnostima korišten je dokument pod naslovom »Egzoskeleti za industriju«, koji je izdala tvrtka Exoskeleton, specijalizirana za razvoj i prodaju industrijskih egzoskeleta. U prikupljanju podataka i izradi znanstvenoga članka primijenjene su metode analize, sinteze, deskripcije i komparacije. Metoda analize, koja prema Žugaju i dr. (2006) razumijeva razlaganje složenih pojava na jednostavnije dijelove, primijenjena je za izdvajanje radova koji se bave primjenom asistivno-zaštitne tehnologije. Sinteza je definirana kao povezivanje jednostavnijih misaonih tvorevina u cjelinu (Čendo-Metzinger i Toth 2020), a primijenjena je pri opisivanju i međusobnom povezivanju različitih izvora. Metoda deskripcije obuhvaća detaljno opisivanje pojava, njihovih odnosa i obilježja radi povećanja objektivnosti i točnosti (Čendo-Metzinger i Toth 2020). Metoda komparacije, kojom se utvrđuju sličnosti i razlike među istim ili srodnim pojavama (Žugaj i dr. 2006), omogućila je naglašavanje zajedničkih i razlikovnih obilježja analiziranih izvora.

3. Rezultati istraživanja – *Research results*

3.1 Mehanički i biomehanički radni principi asistivno-zaštitne tehnologije – *Mechanical and biomechanical operating principles of assistive-protective technology*

Tijekom profesionalnoga ručnoga ili ručno-strojnoga rada radnici su izloženi različitim čimbenicima koji narušavaju sigurnost i učinkovitost rada (Michalski i Grobelny 2007). Ergonomija, kao interdisciplinarna znanstvena disciplina, koristi se spoznajama humanističkih, tehničkih i organizacijskih područja radi prilagodbe radnoga okruženja psihofizičkim sposobnostima čovjeka (Hrvatska tehnička enciklopedija, 2023). U tom kontekstu ergonomске inovacije predstavljaju unapređenje tehnike, tehnologije i organizacije rada čija je svrha povećati sigurnost, kvalitetu te ukupnu učinkovitost radnih procesa. Potrebne su ponajviše u okolnostima u kojima radni uvjeti postaju nepovoljni zbog neadekvatnih alata, strojeva ili tehnoloških postupaka. Njihova primjena rezultira brojnim pozitivnim učincima, među kojima se ističu povećanje produktivnosti, smanjenje učestalosti i težine ozljeda, niži broj profesionalnih bolesti, manji izostanci zbog bolovanja te smanjenje troškova rada i fluktuacije zaposlenika (Kowal 2002). Osim mjerljivih koristi takva rješenja pridonose i napretku nematerijalne prirode, uključujući višu razinu motivacije i dobrobiti radnika te smanjenju međuljudskih napetosti. Ergonomski pristup u užem smislu obuhvaća prilagodbu tehnike anatomskim, fiziološkim i psiho-

loškim značajkama, sposobnostima i potrebama čovjeka te odgovarajuću pripremu radnika za uporabu tehničkih rješenja (Jasiak i Misztal 2004).

Biomehanička osnova fizičkoga rada temelji se na odnosu mišića, zglobova i vanjskoga opterećenja. Mišići preko tetiva stvaraju moment sile na razini zgloba, dok stabilnost pokreta osigurava uravnoteženo međudjelovanje parova mišića (AUXIVO 2023). Ukupno opterećenje tijela ne ovisi samo o masi tereta nego i o njegovoj udaljenosti od zgloba – produženje poluge značajno povećava moment sile, a time i napor mišića i zglobova. Dodatno, gravitacija i vlastita tjelesna masa imaju ključnu ulogu u opterećenju tijela, a veliku ulogu ima i postura tijela. Oko 60 % mase tijela otpada na glavu, ruke i trup, stoga mišići leđa i kukova osobe mase 80 kg koja se naginje prema naprijed moraju podupirati masu od približno 50 kg. Sila opterećenja koju stvara sama masa tijela često je veća od dodatne sile opterećenja nastale podizanjem tereta mase između 10 kg i 15 kg (AUXIVO 2023). Za razliku od mehaničkih sustava mišići troše energiju i pri statičkom držanju položaja, što povećava zamor i rizik od ozljeda. Asistivno-zaštitna tehnologija, osobito egzoskeleti, razvijena je radi smanjenja takvih opterećenja. Moderni egzoskeleti kombiniraju više ovih principa rada (AUXIVO 2023):

- 1) **Zaobilaženje opterećenja** – preusmjeravanje dijela sile s tijela na konstrukciju egzoskeleta, čime se rasterećuju određeni mišićno-koštani segmenti.
- 2) **Preraspodjela opterećenja** – ravnomjernije raspoređivanje sila na veće dijelove tijela umjesto lokalnoga opterećenja jednoga dijela tijela.
- 3) **Potpورا preko umjetnih mišića** – elastični elementi ili aktuatori (pretvarači energije) stvaraju dodatnu vučnu silu paralelno s prirodnim mišićima smanjujući njihovo naprezanje.
- 4) **Stvaranje pomoćnoga momenta u zglobu** – aktivni ili pasivni mehanizmi preuzimaju dio potrebnoga momenta sile, smanjujući zahtjeve za mišićnom aktivacijom.
- 5) **Kompensacija gravitacijskoga opterećenja** – elastični sustavi podupiru tijelo pri sagibanju ili podizanju te smanjuju opterećenje leđa i rame-noga pojasa.
- 6) **Rekuperacija energije** – dio energije pokreta pohranjuje se u opruge te se vraća pri povratnom pokretu smanjujući opterećenje (uglavnom se koristi kod pasivnih egzoskeleta).

Zajedničko djelovanje tih principa rada jest smanjenje statičkih i dinamičkih opterećenja, bolja stabilizacija tijela te smanjenje rizika od razvoja MKP-a.

Dakle egzoskeleti su jedan od najperspektivnijih oblika asistivno-zaštitne tehnologije u zanimanjima koja uključuju visok stupanj fizičkoga rada.

3.2 Opća primjena asistivno-zaštitne tehnologije – *General application of assistive-protective technology*

Kao što je već navedeno, egzoskeleti se ovisno o izvoru napajanja, odnosno ovisno o tome imaju li ga ili nemaju, dijele na pasivne i aktivne.

Pasivni egzoskeleti najčešće se primjenjuju u sektorima u kojima su radnici izloženi dugotrajnom fizičkom opterećenju, ponavljajućim pokretima te neprirodnim statičkim položajima tijela. U građevinskoj industriji služe za rasterećenje ramenoga i leđnoga pojasa pri radu iznad visine ramena ili pri ponavljajućim radnim zadacima (HILTI 2025). U logistici i skladištenju služe za smanjenje opterećenja kralježnice i koljena pri učestalom saginjanju i podizanju tereta (HEROWEAR 2025). U poljoprivredi se primjenjuju pri dugotrajnom radu u savijenom položaju (slika 1), primjerice pri berbi i sortiranju, čime se ublažava statičko opterećenje donjega dijela leđa, tj. oni pružaju podršku leđima i nogama i tako smanjuju umor i rizik od ozljeda (HAPO 2025). U automobilskoj industriji pasivni sustavi pridonose ergonomiji rada pri montaži dijelova, osobito pri radu iznad glave i u niskim položajima (The Wall Street Journal 2019). U zdravstvu se koriste radi rasterećenja lumbalne muskulature medicinskoga osoblja tijekom premještanja i mobilizacije pacijenata (CNRS 2020). U maloprodaji pomažu smanjenju naprezanja pri slaganju proizvoda i dugotrajnom stajanju (Exoskeleton Report 2025).



Slika 1. Primjena pasivnih egzoskeleta u poljoprivredi (HAPO 2025)

Fig. 1 Application of passive exoskeletons in agriculture (HAPO 2025)

Aktivni egzoskeleti pronalaze primjenu u radnim okruženjima u kojima je potrebna povećana snaga, izdržljivost ili preciznost, osobito pri rukovanju težim teretima ili pri rehabilitacijskim postupcima. U medicinskoj praksi koriste se u rehabilitaciji pacijenata nakon neuroloških i ortopedskih oštećenja, omogućuju ponavljanje pravilnih motoričkih obraza i pridonose obnovi pokretljivosti (VIDI Web Portal 2022). U građevinskoj industriji primjenjuju se pri podizanju tereta i rukovanju teškim alatima i tako smanjuju zamor i rizik od ozljeda (Zavarivanje.info 2025). U vojnoj primjeni (slika 2) aktivni sustavi povećavaju fizičku snagu vojnika, poboljšavaju izdržljivost i mobilnost te smanjuju fizičko opterećenje tijekom dugotrajnih misija (SPUTNIK 2021). U brodogradnji su potpora stabilnosti i preciznosti u radu teškim materijalom i alatom (Tportal 2014), dok se u automobilskoj proizvodnji koriste pri rukovanju masivnim komponentama vozila (Zavarivanje.info 2025). U logistici aktivni egzoskeleti olakšavaju ponavljajuće podizanje i prenošenje težih paketa te povećavaju učinkovitost u skladišnim procesima (Exoskeleton Report 2025).



Slika 2. Primjena aktivnih egzoskeleta u vojnoj industriji (Exoskeleton Report 2025)

Fig. 2 Application of active exoskeletons in military industry (Exoskeleton Report 2025)

3.3. Primjena egzoskeleta u šumarstvu – *Application of exoskeletons in forestry*

Šumarstvo se ubraja među fizički najzahtjevnije djelatnosti zbog intenzivnoga mišićno-koštanoga opterećenja, rada u otežanim terenskim uvjetima i visoke izloženosti ozljedama. Stopa ozljeda u šumarstvu značajno je viša od prosjeka ostalih sektora, dok je smrtnost višestruko povećana, pretežito zbog aktivnosti vezanih uz ručno-strojnu sječu i izradu drva pomoću motorne pile (Kim i Chung 2024). Rad šumarskih radnika uključuje ponavljajuće i statički zahtjevne zadatke, nošenje tereta, rukovanje alatom i kretanje po strmom, skliskom i neuređenom terenu, što rezultira visokom prevalencijom MKP-a, ponajprije u području ramena i lumbalne kralježnice. Procjenjuje se da više od 70 % radnika razvija simptome povezanih oštećenja (Kim i Chung 2024). Tradicionalna zaštita u šumarstvu temelji se na osobnoj zaštitnoj opremi koja učinkovito smanjuje neposredne rizike mehaničkoga ozljeđivanja, ali ne djeluje na uzrok biomehaničkoga preopterećenja. U skladu s tim potrebno je u šumsku proizvodnju uključiti nova razvijena rješenja u obliku asistivno-zaštitne tehnologije, posebice egzoskelete, čiji je cilj smanjiti fizičko opterećenje, povećati sigurnost i održati radnu sposobnost radnika, osobito pri ponavljajućim i statički zahtjevnim poslovima.



Slika 3. Egzoskelet AEGIS za sjekače u šumarstvu (Core77 2025)

Fig. 3 Exoskeleton AEGIS for forestry workers (Core77 2025)

Među rješenjima koja su razvijena ili testirana za potrebe šumarstva posebno se ističe aktivni egzoskelet AEGIS (slika 3), koji je osmišljen kao integrirani zaštitni i potporni sustav za sjekače. Koncept uključuje mehaničku potporu pri rukovanju opremom, zaštitu od udaraca i padajućih elemenata te konstrukciju koja kombinira otpornost i pokretljivost. Aktivni pogonski sustav pruža pomoć pri repetitivnim pokretima, a dizajn je prilagođen opterećenjima karakterističnim za rad motornom pilom (Core77 2025). Takvo je rješenje primjer potencijala aktivnih sustava u smanjenju fizičkoga naprezanja i povećanju sigurnosti pri ručno-strojnoj sječi i izradi drva.

U šumarstvu je do sada češći razvojni pravac i primjena pasivnih egzoskeleta. Primjer je takva sustava Husqvarna H-EXO (slika 4), koji je razvijen radi rasterećenja lumbalne kralježnice u radu motornom pilom (Rojgren i Widell 2022). Sustav ima elastične trake koje pohranjuju energiju pri sagibanju i vraćaju je pri uspravljanju, što smanjuje naprezanje leđne muskulature. Njegova jednostavnost, kompatibilnost s postojećom zaštitnom opremom i mogućnost aktivacije i deaktivacije potpore čine ga prikladnim za profesionalne šumske radove (Rojgren i Widell 2022). U uzgojnim radovima, poput sadnje, plijevljenja i orezivanja vegetacije, radnici su izloženi dugotrajnom sagibanju, čučanju te nošenju tereta, što opterećuje leđa, koljena i rameni pojas. Egzoskeleti za potporu trupa, ramena i donjih ekstremiteta u takvim situacijama mogu značajno smanjiti umor, održavati pravilnu posturu i olakšati rukovanje materijalom i alatom. U tom kontekstu razvijen je pasivni egzoskelet u sklopu projekta EXTRAFOR (slika 5),



Slika 4. Pasivni egzoskelet Husqvarna H-EXO (Rojgren i Widell 2022)

Fig. 4 Husqvarna H-EXO passive exoskeleton (Rojgren and Widell 2022)

čiji je cilj smanjiti fizičko opterećenje pri radu motornim čistačima / sjekačima te povećati ergonomsku prihvatljivost uzgojnih radova (FCBA 2021). Projekt se fokusirao na prilagodbu postojećih egzoskeleta specifičnim uvjetima šumskoga radilišta, procjenu tehničke i ekonomske isplativosti te pripremu za industrijsku primjenu i komercijalizaciju.



Slika 5. Primjena pasivnoga egzoskeleta pri radu motornom kosom (FCBA 2021)

Fig. 5 Application of passive exoskeleton when working with string trimmer (FCBA 2021)



Slika 6. Egzoskelet LiftSuit (AUXIVO 2025)

Fig. 6 LiftSuit exoskeleton (AUXIVO 2025)

Uz navedene sustave određeni potencijal za primjenu u šumarstvu pokazuju i univerzalni pasivni egzoskeleti poput egzoskeleta LiftSuit (slika 6) i OmniSuit (slika 7). LiftSuit pruža potporu leđima i kukovima tijekom saginjanja i podizanja sadnica ili grana, smanjujući rizik od ozljeda mišićno-koštanoga sustava, dok OmniSuit obuhvaća veći dio tijela te dodatno podupire ramena i noge olakšavajući rad na neravnom terenu, dugotrajan rad u nagnutom položaju i rad iznad glave. Njihova fleksibilnost, mala masa i kompatibilnost s osobnom zaštitnom opremom čine ih pogodnima za širok raspon uzgojnih radova, uključujući sadnju, njegu sastojina te ručno čišćenje vegetacije (AUXIVO 2025).



Slika 7. Egzoskelet OmniSuit (AUXIVO 2025)

Fig. 7 OmniSuit exoskeleton (AUXIVO 2025)

4. Rasprava i zaključci – Discussion and conclusions

Općenito gledano, asistivno-zaštitna tehnologija važna je sastavnica suvremenih ergonomskih rješenja usmjerenih prema unapređenju sigurnosti na radu i očuvanju radne sposobnosti radnika. Među njima se posebno ističu pasivni i aktivni egzoskeleti, čija primjena u raznim industrijskim sektorima potvrđuje njihov značajan potencijal u smanjenju fizičkoga opterećenja, prevenciji mišićno-koštanih poremećaja i poboljšanju radne učinkovitosti (Arachchige i dr. 2024, Qiu i dr. 2022).

Primjena egzoskeleta u šumarstvu sve se češće spominje kao rješenje za smanjenje fizičkoga opterećenja radnika, povećanje sigurnosti na radu, produljenje radnoga vijeka te samim time i rješenje najvećega problema posljednjih nekoliko godina – nedostatka radne snage. S obzirom na to da su poslovi u šumarstvu izrazito zahtjevni, što uključuje manipulaciju trupcima, rad teškim alatom, rad u

nepovoljnom položaju na nepristupačnim terenima te u nepovoljnim vremenskim uvjetima, raste interes za tehnologijama koje mogu rasteretiti mišićno-koštani sustav.

Istraživanja provedena na profesionalnim šumskim radnicima sjekačima u Sjedinjenim Američkim Državama pokazuju visoku prihvatljivost egzoskeleta te identificiraju ključne čimbenike koji utječu na njihovo usvajanje: masa, udobnost, jednostavnost upotrebe te održavanje (Kim i Chung 2024). Kao radne operacije koje imaju najveći potencijal za primjenu egzoskeleta ističu se ručna sječa i izrada drva, drugi radovi motornom pilom (npr. čišćenje koljika) te aktivnosti koje zahtijevaju dugotrajan rad u sagnutom položaju ili rukama podignutima iznad visine ramena. Podaci dobiveni nosivim senzorima potvrđuju znatno sagibanje trupa i učestalo podizanje gornjih udova tijekom sječe, uz pojavu boli u vratu, ramenima, lumbalnom dijelu kralježnice i donjim ekstremitetima, pri čemu je bol u donjem dijelu leđa najizraženija (Landekić i dr. 2023, Kim i Chung 2024). Prema tomu, egzoskeleti za potporu leđa i ramenoga pojasa smatraju se najprimjerenijim rješenjem za šumarsku industriju.

Ključni je čimbenik za sigurnu primjenu egzoskeleta adekvatna tehnička zaštita. Egzoskelet mora biti ergonomski prilagođen korisniku kako bi se izbjegle sekundarne ozljede uzrokovane opterećenjem ili ograničenom pokretljivošću, što je osobito važno na šumskim radilištima s nepravilnim podlogama i gustom vegetacijom (CCOHS 2022). Gledano sa stajališta zaštite i sigurnosti na radu, aktivni egzoskeleti u uvjetima šumskoga radilišta dodatni su izazov jer je potrebno zaštititi sustave koji pokreću egzoskelet, ponajprije baterije (Kim i Chung 2024). U takvim uvjetima treba redovito održavati opremu te jasno definirati procedure kojih se radnik mora pridržavati u slučaju nezgode.

Jedan od presudnih čimbenika uspješnoga uvođenja egzoskeleta je, također, sustavna edukacija i osposobljavanje radnika jer bez pravilnoga osposobljavanja postoji rizik neadekvatne upotrebe, što može umanjiti funkciju potpore egzoskeleta te tako povećati opasnost od ozljeda (CCOHS 2022). Specijalizirani programi obuke trebali bi obuhvatiti tehnička svojstva egzoskeleta, prilagodbu pojedinomu korisniku te simulaciju rada u realnim terenskim uvjetima (Arachchige i dr. 2024). Prednosti primjene egzoskeleta odnose se ponajprije na smanjenje fizičkoga napora, umora i opterećenja tijela, što vodi do manjega broja ozljeda, povećanja produktivnosti te prema tomu do mogućega produljenja radnoga vijeka radnika (Kim i Chung 2024).

Ipak, uz navedene prednosti javljaju se i određeni izazovi i ograničenja. Najčešće su to visoki troškovi nabave i održavanja, moguća smanjena pokretljivost zbog zahtjevnih terenskih uvjeta, velika masa opreme, rizik od kvarova te potreba za specijaliziranom obukom radnika (Kim i Chung 2024, FCBA 2021). Rezultati studije koju su proveli Kim i Chung (2024) pokazuju da su pasivni egzoskeleti, koji su lakši, jednostavnije strukture te jeftiniji od aktivnih egzoskeleta, bolja opcija za primjenu u šumarstvu.

Zaključno se navode sažete ključne stavke rada:

- ⇒ Šumarska proizvodnja zbog još uvijek prisutne visoke učestalosti ozljeda i značajnih fizičkih opterećenja jasno upućuje na potrebu razvoja i primjenu asistivno-zaštitnih inovacijskih rješenja.
- ⇒ Dodana vrijednost egzoskeleta temelji se na mehaničkim i biomehaničkim principima u službi rasterećenja mišićno-koštanoga sustava, smanjenja fizičkoga umora te povećanja sigurnosti na radu.
- ⇒ Analiza opće primjene asistivno-zaštitne tehnologije pokazala je njezinu široku zastupljenost u sektorima poput industrije, građevine i zdravstva, gdje ostvaruje mjerljive rezultate u smanjenju ozljeda i povećanju radne učinkovitosti.
- ⇒ Aktualna primjena asistivno-zaštitne tehnologije u šumarstvu, u naprednijem obliku aktivne zaštite kao što su egzoskeleti, još uvijek je u fazi ispitivanja i nije u široj operativnoj uporabi, što upućuje na potrebu daljnjega istraživanja i razvoja njihove primjenjivosti pri šumskim radovima.
- ⇒ Sustavna primjena pasivnih egzoskeleta u šumarstvu može značajno smanjiti broj ozljeda, pridonijeti očuvanju dugoročne radne sposobnosti radnika te povećanju produktivnosti. Doprinos uključivanja navedene tehnologije posebno je značajan za radna mjesta koja razumijevaju intenzivan ručno-strojni rad, poput sječe i izrade drva, gdje je fizičko opterećenje izrazito visoko, a rizik od ozljeda svakodnevno.

Dosadašnje spoznaje pokazuju da primjena egzoskeleta u šumarstvu ima značajan potencijal, ali uspješnost ovisi o pametnoj integraciji u radne procese, sigurnosnim standardima, edukaciji i osposobljavanju te izboru ispravnoga tipa egzoskeleta koji najbolje odgovara pojedinomu radnomu zadatku. S obzirom na nedostatak radne snage i sve veće fizičke zahtjeve u šumarstvu, uvođenje asistivno-zaštitne tehnologije, ponajprije egzoskeleta važan je korak prema modernizaciji rada, sigurnijemu i kvalitetnijemu radnomu okruženju te prema tomu do bolje zaštite šumskih radnika i produljenja radnoga vijeka.

ka. Međutim, nužna su daljnja istraživanja i opsežna terenska testiranja kako bi se utvrdila optimalna rješenja, njihove funkcionalne mogućnosti i ograničenja te stvarna primjenjivost u proizvodnoj praksi šumarskoga sektora.

5. Literatura – References

- Aksentijević, S., E. Tijan, B. Marinković, 2015: Strategija upravljanja ljudskim resursima u prometnim poduzećima. Pomorski zbornik, 49–50(1): 281–303.
- Arachchige, S. D., L. Piyathilaka, J.-H. Sul, D. M. G. Preetichandra, 2024: A Review of potential exoskeletons for the prevention of work-related musculoskeletal disorders in agriculture. *Sensors*, 24(21), 7026. <https://doi.org/10.3390/s24217026>
- Ashby, L., T. Bentley, R. Parker, 2001: Musculoskeletal disorders in silviculture and logging 1995–1999. *COHFE Report*, 2(3): 1–8.
- AUXIVO, 2023: How Exoskeletons Provide Support. <https://www.auxivo.com/post/how-exoskeletons-provide-support> (pristupljeno 13. 9. 2025).
- AUXIVO, 2025: Products. <https://www.auxivo.com/products> (pristupljeno 17. 9. 2025).
- Bahtijarević-Šiber, F., 2014: Strateški menadžment ljudskih potencijala – suvremeni trendovi i izazovi. Školska knjiga, Zagreb.
- Blombäck, P., P. Poschen, M. Lövgren, 2003: Employment trends and prospects in the European forest sector. Geneva timber and forest discussion papers, UN/ECE/FAO/ILO, New York – Geneva, 37 str.
- CNRS, 2020: Exoskeletons to relieve healthcare workers. <https://news.cnrs.fr/articles/exoskeletons-to-relieve-healthcare-workers> (pristupljeno 17. 9. 2025).
- Core77, 2025: A Protective Super Suit for Loggers. <https://www.core77.com/projects/65857/A-Protective-Super-Suit-for-Loggers> (pristupljeno: 17. 9. 2025).
- Čendo-Metzinger, T., M. Toth, 2020: Metodologija istraživačkog rada za stručne studije. Veleučilište Velika Gorica, 51 str.
- Dessler, G., 2015: Upravljanje ljudskim potencijalima. MATE d.o.o., Zagreb, 786 str.
- Enez, K., M. Topbaş, H. H. Acar, 2014: An evaluation of occupational accidents among logging workers within the boundaries of Trabzon Forestry Directorate, Turkey. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44(5): 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2014.07.002>
- Exoskeleton Report, 2025: L.R.A.E. <https://exoskeletonreport.com/product/l-r-a-e> (pristupljeno 21. 9. 2025).
- Exoskeleton Report, 2025: Apogee. <https://exoskeletonreport.com/product/apogee> (pristupljeno 21. 9. 2025).
- Exoskeleton, 2025: Exoskeletons for the industry. <https://www.exoskeleton.com/en> (pristupljeno 17. 9. 2025).
- FAO, 1993: Forest worker safety and ergonomics. <https://www.fao.org/4/u8520e/u8520e02> (pristupljeno 13. 9. 2025).
- FCBA, 2021: EXTRAFOR: Exoskeletons for forest works. <https://www.fcba.fr/en/travaux/extrafor-exoskeletons-for-forestry-work> (pristupljeno 13. 9. 2025).
- FORESTRY.com, 2024: Forestry Economic Contributions. <https://forestry.com/forestry-management> (pristupljeno 13. 9. 2025).
- Gejdoš, M., M. Vlčková, Z. Allmanová, Ž. Balážová, 2019: Trends in workplace injuries in Slovak forest enterprises. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(1), 141. <https://doi.org/10.3390/ijerph16010141>
- Grzywiński, W., J. Skonieczna, T. Jelonek, A. Tomczak, 2020: The influence on the privatization process on accident rates in the forestry sector in Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9), 3055. <https://doi.org/10.3390/ijerph17093055>
- HAPO, 2025: Exoskeletons adapted for market gardeners. <https://www.hapo.eu/en/content/39-exoskeleton-for-market-gardener> (pristupljeno 17. 9. 2025).
- HEROWEAR, 2025: The Apex2 Back Assist Exosuit. <https://herowearexo.com/the-apex-2-back-assist-exosuit> (pristupljeno 17. 9. 2025).
- HILTI, 2025: Operating-Instruction-EXO-S-01. <https://www.hilti.com/content/hilti/W1/US/en/op-man.html/2339613/en> (pristupljeno 17. 9. 2025).
- Hrvatska tehnička enciklopedija, 2023: Ergonomija. <https://tehnika.lzmk.hr/ergonomija> (pristupljeno 13. 9. 2025).
- Jasiak, A., A. Misztal, 2004: Makroergonomia i projektowanie makroergonomiczne. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 190 str.
- Kim, J. H., W. Chung, 2024: Forestry professionals perspectives on exoskeletons (wearable assistive technology) to improve worker safety and health. *International Journal of Forest Engineering*, 35(1): 11–20. <https://doi.org/10.1080/14942119.2023.2256104>
- Kowal, E., 2002: Ekonomiczno-społeczne aspekty ergonomii. Wydawnictwo Naukowe PWN, 248 str.
- Landekić, M., I. Martinić, M. Bakarić, R. M. Ricart, M. Šporčić, 2017: Stručno osposobljavanje radnika u sektoru šumarstva – stanje u Hrvatskoj i trendovi u Europi. *Šumarski list*, 141(7–8): 395–407. <https://doi.org/10.31298/sl.141.7-8.6>
- Landekić, M., I. Martinić, D. Mijoč, M. Bakarić, M. Šporčić, 2021: Injury patterns among forestry workers in Croatia. *Forests*, 12(10), 1356. <https://doi.org/10.3390/f12101356>

Landekić, M., M. Šporčić, M. Bačić, Z. Pandur, M. Bakarić, 2023: Workability and Physical Wellbeing Among Chainsaw Operators in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 44(1): 83–94. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2023.2073>

Landekić, M., M. Bačić, J. Nakić, 2025: Kultura sigurnosti u šumarstvu. Fakultet šumarstva i drvne tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, sveučilišni priručnik, 165 str.

Michalski, R., J. Grobelny, 2007: Computer-aided subjective assessment of factors disturbing the occupational human performance. *Occupational Ergonomics*, 7(1): 27–42. <https://doi.org/10.3233/OER-2007-71>

Musić, J., V. Halilović, A. Lojo, M. Šporčić, A. Đonlagić, 2019: Analiza sigurnosti pri radu u šumarstvu Federacije BiH – studij slučaja. *Nova mehanizacija šumarstva*, 40: 31–41. <https://doi.org/10.5552/nms.2019.4>

Potočnik, I., A. Poje, 2017: Forestry ergonomics and occupational safety in high ranking scientific journals from 2005–2016. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 38(2): 291–310.

Robb, W., J. Cocking, 2014: Review of European chainsaw fatalities, accidents and trends. *Arboricultural Journal*, 36(2): 103–126. <https://doi.org/10.1080/03071375.2014.913944>

Rojgren, S., A. Widell, 2022: Development of Exoskeleton for Loggers – User Centred Design of Passive Lower-Back Support for Motor-Manual Tree Felling. In collaboration

with Husqvarna AB. Master's thesis, Chalmers University, 82 str.

SPUTNIK, 2021: Gvozdeni čovek – ruski vojni egzoskelet. <https://lat.sputnikportal.rs/20190128/gvozdeni-covek> (pristupljeno 17. 9. 2025).

The Wall Street Journal, 2019: Industrial Exoskeletons Give Workers a Lift. <https://www.wsj.com/articles/industrial-exoskeletons-give-workers-a-lift> (pristupljeno 21. 11. 2025).

Tportal, 2014: Brodogradilištima sad rade i hodaju »ljudi-roboti«. <https://www.tportal.hr/tehnolo/clanak/brodogradilistima-sad-hodaju-i-rade-ljudi-roboti> (pristupljeno 17. 9. 2025).

VIDI Web Portal, 2022: Egzoskelet omogućuje paraplegičarima prirodno hodanje. <https://www.vidi.hr/Zdravlje/Egzoskelet-omogucuje-paraplegicarima-prirodno-hodanje> (pristupljeno 17. 9. 2025).

ZAVARIVANJE.info, 2025: Egzoskelet CarrySuit. <https://zavarivanje.info/proizvod/egzoskelet-carrysuit> (pristupljeno 17. 9. 2025).

Žugaj, M., K. Dumičić, V. Dušak, 2006: Temelji znanstvenoistraživačkog rada. FOI Varaždin, 418 str.

Qiu, S., Z. Pei, C. Wang, Z. Tang, 2022: Systematic review on wearable lower extremity robotic exoskeletons for assisted locomotion. *Journal of Bionic Engineering*, 20: 436–469. <https://doi.org/10.1007/s42235-022-00289-8>

Abstract

Application of Assistive-Protective Technology in Forestry

Numerous case studies confirm that forest production, particularly timber harvesting operations, is among the most hazardous economic activities, primarily due to the multitude of risks and challenges present in the working environment. When observing the issue from the perspective of worker health protection and the advancement of safety culture, technological progress and global Industry 4.0 trends open up opportunities for the application of various new and innovative solutions in forestry operations. A systematic search of relevant domestic and international scientific and professional sources was conducted for the purposes of the study. This included websites of research institutions, innovation centres, and companies developing assistive technologies, as well as online scientific databases. In processing the collected data, methods of analysis, synthesis, description, and comparison were employed to provide a detailed understanding of the operational principles of assistive-protective technologies and their application in forestry practice. Accordingly, as part of the results of this study, an overview of assistive-protective technologies was developed, with a particular focus on their mechanical and biomechanical operating principles. Furthermore, the general application of such technologies across different sectors was analysed, as well as the current level of their integration in forestry, under the assumption that their role will become increasingly important in the future in the context of safeguarding workers' health and extending work ability during physically demanding manual-mechanised tasks.

Within the Discussion and Conclusions chapters, additional attention is given to safety measures associated with the use of assistive-protective technologies, as well as to their key advantages and limitations regarding their implementation in the forestry sector.

Keywords: forestry, manual-mechanised work, exoskeleton, musculoskeletal disorder

Adrese autorâ – *Authors' addresses:*

Izv. prof. dr. sc. Matija Landekić
e-pošta: mlandekic@sumfak.unizg.hr
Doc. dr. sc. Matija Bakarić
e-pošta: mbakaric@sumfak.unizg.hr
Matej Matošević, mag. ing. silv.*
e-pošta: mmatosevi@sumfak.unizg.hr
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet šumarstva i drvne tehnologije
Svetošimunska cesta 23
10000 Zagreb
HRVATSKA

Dorian Majetić, mag. ing. silv.
e-pošta: majetic.dorian@gmail.com
Ulica Lipovica 25A
35400 Nova Gradiška
HRVATSKA

*Glavni autor – *Corresponding author*

Primljeno (*Received*): 16. 10. 2025.
Prihvaćeno (*Accepted*): 7. 11. 2025.
Stručni rad – *Professional paper*