

Primjenjivost tržišno dostupnih egzoskeleta kod radova u šumarstvu

Applicability of Commercially Available Exoskeletons in Forestry Works

Matija Landekić, Matej Matošević*, Mario Šporčić, Zdravko Pandur, Marin Bačić, Matija Bakarić

Sveučilište u Zagrebu Fakultet šumarstva i drvne tehnologije, Zagreb, Hrvatska

* Dopisni autor: Matej Matošević, e-mail: mmatoševic@sumfak.unizg.hr

SAŽETAK

Deficit radno sposobnog ljudskog kapitala i sve veća učestalost mišićno-koštanih oboljenja, uz inherentno visok radni rizik kod izvođenja šumarskih operacija, ključni su čimbenici koji potiču znanstveni interes za integracijom tehnoloških rješenja Industrije 4.0 u šumarski sektor. Danas se egzoskeleti sve više nude kao učinkovito ergonomsko rješenje za smanjenje fizičkih faktora rizika u različitim industrijskim granama gdje dominira ručni ili ručno-strojni rad. Shodno navedenom, u radu se daje pregled osamnaest egzoskeleta proizvedenih u razdoblju od 2017. do 2025. godine s ciljem ocjene opće primjenjivosti uzorkovanih sustava u šumarstvu te uže dimenzionirane primjenjivosti kod specifičnih šumskih radova. Metoda bodovanja, temeljem definiranih varijabli, korištena je kod ocjene opće primjenjivosti egzoskeleta u šumarstvu. Matrica tehničke evaluacije (temeljena na 7 odabranih varijabli) i metoda ponderiranja (definirana postupkom usporedbe u parovima) korištene su u ocjeni primjenjivosti selektiranih sustava kod specifičnih šumskih radova. Metodom bodovanja opće primjenjivosti uzorkovanih egzoskeleta u šumarstvu, 22,22 % analiziranih sustava svrstano je u kategoriju vrlo visoke, dok je 55,55 % klasificirano u kategoriju visoke primjenjivosti. Znanstveno utemeljen ergonomske doprinos naznačen je kod 11 sustava, dok je ispitivanje primjenjivosti kod šumskih radova dokumentirano samo kod 5 modela. Analiza troškova ukazuje na to da je investicija u jedan aktivni sustav niske primjenjivosti ekvivalent nabavi šest pasivnih modela koji su ostvarili visoku ocjenu primjenjivosti. Analiza primjenjivosti s obzirom na tehnološki proces ukazuje na to da meki sustavi s elastičnim elementima predstavljaju najoptimalnije rješenje za uzgojne radove u šumarstvu, medijalno rješenje kod radnih operacija sječe i izrade drva, a vrlo limitirano rješenje kod radnih operacija privlačenja i izvoženja drva te kod radova u arboristici.

Ključne riječi:

šumarstvo, asistivno-zaštitne tehnologije, metoda ponderiranja, sigurnost pri radu

DOI:

<https://doi.org/10.31298/sl.150.9-10.2>

Kako citirati / How to Cite:

Landekić, M. i dr., 2026: Primjenjivost tržišno dostupnih egzoskeleta kod radova u šumarstvu. Šumarski list 150 (9–10): 413–421. <https://doi.org/10.31298/sl.150.9-10.2>



This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

UVOD

INTRODUCTION

Brojna istraživanja i numerički pokazatelji ukazuju na to da je stopa ozljeda na radu u šumarstvu znatno veća nego u drugim sektorima, što ovu profesiju klasificira kao sektor visokog rizika (Dimou i dr. 2020, Garland i dr. 2020, Choi i dr. 2026, Landekić i dr. 2026). Radovi u šumarstvu kao visokorizična, tjelesno intenzivna i stručno vrlo zahtjevna djelatnost podrazumijeva zdrave, fizički spremne i spretne, stručno osposobljene, odgovorne, savjesne i motivirane radnike (Šporčić i dr. 2023). Brojni radovi u šumskoj proizvodnji, kao, na primjer, radovi njege, čišćenja, sječe i izrade, arborikulture, i dr., svakodnevno se izvode ručno i ručno-strojno, što uključuje određeni rizik za zdravlje, tj. radni i životni standard proizvodnih radnika. Dosadašnja istraživanja najviše su isticala oštećenje sluha zbog prekomjerne izloženosti buci te vibracijsku bolest zbog prekomjerne izloženosti vibracijama kao dva najistraživija faktora koji utječu na zdravlje i radnu sposobnost radnika u šumskoj proizvodnji.

Aktualna istraživanja u šumarstvu (Dimou i dr. 2022, Grzywiński i dr. 2022, Landekić i dr. 2023), sa znanstvenim i stručnim temeljima, sve više ističu mišićno-koštane poremećaje (MKP) kao značajan zdravstveni problem na radu, koji predstavlja jedan od najvažnijih uzroka kronične invalidnosti, izostanka s posla u obliku bolovanja, smanjene radne produktivnosti i kvalitete života općenito. Istraživanja pokazuju da čak 50 % radno aktivne populacije Europske Unije osjeća izraženu bol ili nelagodu u barem jednom dijelu tijela, što navedenu skupinu poremećaja čini najčešćom skupinom poremećaja/bolesti povezanih s uvjetima rada (EU-OSHA 2019). MKP povezani s radnim procesom su poremećaji vezani uz poslovne zadatke, većinom kod fizički zahtjevnih radnih mjesta, tzv. crnih „3D“ poslova (engl. *Dirty, Dangerous and Demeaning*) budući da se isti općenito aktiviraju zbog izloženosti radnika biomehničkom prenaprezanju i ergonomskoj nelagodi. Svakodnevne ručne i ručno-strojne aktivnosti u šumskoj proizvodnji izlažu radnike širokom spektru rizičnih čimbenika, kao što su podizanje i nošenje teških tereta, ponavljajući pokreti, rad u nefiziološkom položaju (npr. fleksija trupa), npr. mjerena radna dinamika, itd. Navedeno može, osim čestih ozljeda na radu, uzrokovati razvoj profesionalnih bolesti kao što su mišićno-koštani poremećaji. U šumarskoj proizvodnji prisutni su svi negativni čimbenici koji kroz međusobnu interakciju šumskog radnika izlažu oboljenju od mišićno-koštanih poremećaja (Dimou i dr. 2022, Grzywiński i dr. 2022, Landekić i dr. 2023). Dodatne teškoće koje su se javljale posljednjih godina su nedostatak proizvodnih radnika (UNECE/FAO 2020, Professional Logging Contractors of Maine (PLCM) 2019, He i dr. 2021, Šporčić i dr. 2024), manjak zainteresiranih za rad u šumarstvu, visoka starosna dob, otežani uvjeti rada i dr.

Tehnološki ishod industrije 4.0 u vidu asistivno-zaštitnih sustava međunarodna znanstvena zajednica ističe kao potencijalno rješenje problema preopterećenja radnika u šumarskom sektoru (Landekić i dr. 2023; FAO, ILO i UN 2023; Kim i Chung 2024), prvenstveno kroz ergonomsko olakšanje te prevenciju ozljeda i bolesti mišićno-koštanog sustava (MKS), a neizravno kao doprinos poboljšanju

radnog i društvenog standarda. Asistivno-zaštitne tehnologije, u okviru radnog kapitala, podrazumijevaju razne uređaje i sustave dizajnirane za održavanje ili unapređenje funkcionalno-radne sposobnosti i sigurnosti te zaštite zdravlja radno sposobne populacije unutar čitavog niza djelatnosti gdje dominira ručni i/ili ručno-strojni rad. Navedeno podrazumijeva široki spektar od niskotehnoloških, neelektroničkih pomagala do naprednih visokotehnoloških rješenja (Anon. 2026). Na tržištu rada kod crnih „3D“ poslova razvojni trendovi i nove tehnologije apostrofiraju egzoskelete kao rješenje za unapređenje ili održavanje radne sposobnosti, zaštite zdravlja i opće kvalitete života kroz asistenciju i lakše izvršavanje svakodnevnih radnih aktivnosti. Današnji egzoskeleti podrazumijevaju nosivi robotski ili mehanički sustav dizajniran za povećanje ljudske snage, pokretljivost i izdržljivost, a istovremeno štite tijelo od naprezanja i ozljeda. Takvi uređaji, dizajnirani za medicinsku rehabilitaciju i industrijsku/profesionalnu primjenu, mogu povećati izdržljivost radnika, smanjiti fizički stres na radnike i prevenirati mišićno-koštane poremećaje, pomoći u rehabilitaciji te vratiti pokretljivost osobama s invaliditetom (Ekso Bionics 2026). Prema tipu sučelja, mehanizmu potpore i bazičnoj namjeni postoje: (a) aktivni egzoskeleti, tj. motorizirani sustavi koji pomažu pri kretanju udova, a često se koriste za rehabilitaciju nakon ozljeda leđne moždine ili za olakšavanje hodanja; (b) pasivni egzoskeleti, tj. sustavi koji koriste opruge, protutege ili amortizere za pohranu i oslobađanje energije, pružajući potporu za držanje ili teško dizanje bez vanjskih izvora energije; te (c) meka egzoodijela, tj. lagana, fleksibilna odjeća koja koristi materijale na bazi tekstila za potporu mišićima i zglobovima (Fisahn i dr. 2016). Navedeni sustavi primjenjuju određene biomehničke principe kao što su: (a) preusmjerenje i preraspodjela opterećenja po strukturi egzoskeleta, tj. preusmjerenje mehaničkog naprezanja i sila s osjetljivih dijelova tijela (zglobova, kralježnice...); (b) biomehnička potpora na mjestima gdje elastični elementi ili aktuatori stvaraju pomoćni moment zglobova, paralelno s prirodnim mišićima, pritom smanjujući njihovo naprezanje; te (c) kinematička učinkovitost, pri čemu sustav podupire tijelo protiv gravitacije tijekom naganjanja prema naprijed (fleksije trupa) i pohranjuje kinetičku energiju u oprugama kako bi pomogao radniku tijekom povratnog pokreta prema gore, tj. pri ekstenziji trupa (Landekić i dr. 2025).

Trenutno dostupan širok raspon različitih aktivnih i pasivnih egzoskeleta iz drugih industrija nije dizajniran za specifične biomehničke i ergonomske zahtjeve radnika u visoko opterećenim prirodnim i terenskim uvjetima šumskog radilišta, osobito kod ručno-strojne sječe i izrade drva, gdje su radnje izrazito asimetrične, na neravnom terenu i često nestabilne. Shodno navedenom, u radu se daje prikaz uzorkovanih idejnih i tržišno dostupnih rješenja egzoskeleta proizvedenih u razdoblju od 2017. od 2025. godine. Temeljem dostupnih specifikacija izrađena je ocjena opće primjenjivosti uzorkovanih egzoskeleta u šumarstvu te uže dimenzionirana specifična primjenjivost unutar uzgojnih radova, radova pridobivanja drva i radova arboristike. Temeljna svrha rada je pružiti osnovne informacije o dostupnim asistivno-zaštitnim sustavima te kada primjena istih može doprinijeti unapređenju radne sposobnosti i održivosti radnog kapitala u šumskoj proizvodnji.

MATERIJALI I METODE

MATERIAL AND METHODS

U svrhu identifikacije konceptualnih rješenja i tržišno dostupnih asistivno-zaštitnih sustava s potencijalom primjenjivosti za šumske radove, pretražene su baze podataka Current Contents, Science Direct, ForestScience.info, Cab Abstracts i dr. te popisi referenci ključnih članaka u razdoblju od 2017. do 2025. godine. U prvom koraku, ulazni podaci korišteni za formiranje baze strukturirani su na temelju (a) relevantnih znanstvenih radova i (b) službenih tehničkih specifikacija (korisničkih priručnika i industrijskih brošura) dostupnih na mrežnim stranicama uzorkovanih proizvođača komercijalnih egzoskeleta (N = 18) temeljem sustavnog istraživanja tržišta. Sekundarni podaci uneseni su i sistematizirani u programskom paketu Microsoft Excel, a sadrže opće informacije (Tablica 1) kao što su ime proizvođača,

država proizvodnje, model egzoskeleta i godina proizvodnje. Određeni dio prikupljenih informacija (Tablica 1) odnosio se na izvor energije, mehanizam potpore i maksimalnu potporu, tip sučelja, anatomske regije podupiranja, antropometrijsku prilagodljivost i težinu sustava, slobodu pokreta, ergonomske mjerljive doprinose, održavanje i otpornost na okoliš, znanstveno utemeljen doprinos te validaciju kod operativnih šumskih radova.

U drugom koraku korištena je metoda bodovanja (Tablica 1) radi pretvaranja tj. ujednačavanja kvalitativnih podataka u kvantitativne. Ulaznim podacima koji su dobiveni iz tehničkih specifikacija dodijeljene su numeričke vrijednosti (Tablica 1) radi objektivnijeg rangiranja uzorkovanih egzoskeleta te donošenja ocjene opće primjenjivosti u šumarstvu (≤ 15 = vrlo niska primjenjivost; $16 - 19$ = niska; $20 - 23$ = prosječna; $24 - 27$ = visoka; ≥ 28 = vrlo visoka primjenjivost).

Tablica 1. Opće i specifične varijable korištene u metodi bodovanja egzoskeleta.
Table 1 General and specific variables used in the exoskeleton rating method.

Opća varijabla General variable	O1: Ime proizvođača / <i>Manufacturer name</i>		Validacijska varijabla Validation variable	V1: Opći znanstveno utemeljen doprinos / <i>General scientific-based contribution</i>	Ne / <i>No</i> = 0; Da / <i>Yes</i> = 2
	O2: Država proizvodnje / <i>Country of origin</i>			V2: Validirano kod šumskih radova / <i>Validated in forest operations</i>	Ne / <i>No</i> = 0; Da / <i>Yes</i> = 2
	O3: Model egzoskeleta / <i>Model name</i>			V3: Maksimalna potpora / <i>Maximum support</i>	< 10 kg = 1; 10 – 20 kg za leđa ili < 4kg po ruci / <i>10–20 kg for back or < 4 kg for arm</i> = 2; > 20 kg za leđa ili > 4 kg po ruci / <i>> 20 kg for back or > 4 kg for arm</i> = 3
	O4: Godina proizvodnje / <i>Year of production</i>			V4: Ergonomsko rasterećenje / <i>Ergonomic load reduction</i>	Opisan ergonomske doprinos bez jasnog rezultata / <i>Description without quantitative results</i> = 1; Rezultat RULA metode / <i>RULA method results</i> = 2; EMG ušteda / <i>EMG savings</i> = 3
Tehnička varijabla Technical variable	T1: Izvor energije / <i>Power source</i>	Aktivan / <i>Active</i> = 1; Pasivan / <i>Passive</i> = 2	Šumsko-okolišna varijabla Forest-environmental variable	S1: Anatomska regija podupiranja / <i>Supported body region</i>	Gornji ekstremiteti / <i>Upper limbs</i> = 1; Lumbalno područje / <i>Lumbar region</i> = 2; Lumbalno područje + noge / <i>Lumbar + Legs</i> = 3; Kombinirano / <i>Combined</i> = 4
	T2: Masa sustava / <i>System weight</i>	< 0,99 kg = 4; 1 – 2,9 kg = 3; 3 – 4,9 kg = 2; > 5 kg = 1		S2: Antropometrijska prilagodljivost / <i>Anthropometric adjustability</i>	Fiksne veličine / <i>Fixed sizes</i> = 1; Modularan / <i>Modular size</i> = 2; Univerzalna veličina / <i>Universal size</i> = 3
	T3: Tip sučelja / <i>Interface type</i>	Krut / <i>Rigid</i> = 1; Kombiniran / <i>Hybrid</i> = 2; Mekan / <i>Soft</i> = 3		S3: Sloboda pokreta / <i>Range of motion</i>	Ograničena / <i>Restricted agility</i> = 1; Srednja / <i>Medium agility</i> = 2; Potpuna / <i>Full agility</i> = 3
	T4: Mehanizam potpore / <i>Support mechanism</i>	Elektromotori / <i>Electromotors</i> = 1; Mehaničke opruge / <i>Mechanical springs</i> = 2;Elastični elementi <i>Elastic elements</i> = 3		S4: Održavanje / <i>Maintenance</i>	Djelomično perivo / <i>Partially washable</i> = 1; Potpuno perivo / <i>Fully washable</i> = 2
				S5: Otpornost na okoliš / <i>Environmental resistance</i>	Niska / <i>Low</i> = 1; Srednja / <i>Medium</i> = 2; Visoka / <i>High</i> = 3

Modeli uzorkovanih egzoskeleta koji su u drugom koraku ocjenjivanja svrstani u kategoriju visoke ili vrlo visoke opće primjenjivosti u šumarstvu, u trećem su koraku analizirani pomoću matrice tehničke evaluacije i metode ponderiranja sa svrhom utvrđivanja razine primjenjivosti unutar specifičnih šumskih radova gdje dominira ručni ili ručno-strojni rad. Matrica tehničke evaluacije (Tacto 2026) korištena je u izradi strukturirane usporedbe različitih modela egzoskeleta na temelju tehničkih varijabli, a spram odabranih vrsta šumskih radova.

Od 13 početnih varijabli korištenih u drugom koraku za ocjenu opće primjenjivosti (Tablica 1) za potrebe ocjene primjenjivosti selektiranih egzoskeleta kod specifičnih radnih procesa u šumarstvu u trećem koraku odabrano je 7 ključnih varijabli (T1, T2, V4, S1, S3, S4 i S5; Tablica 1 i 2). Odabir je temeljen na kriteriju izravnog tehničko-ergonomskog utjecaja varijabli na izvođenje specifičnih radnih procesa u šumarstvu. Varijable V1 i V2 izostavljene su jer ne predstavljaju tehničke karakteristike koje se mijenjaju ovisno o specifičnosti radnog procesa, već su opći pokazatelji razine

istraženosti i dokumentiranosti. Maksimalna potpora (V3) izostavljena je kako bi se izbjeglo preklapanje, s obzirom na to da je stupanj potpore već kvantitativno vrednovan kroz varijablu V4 (ergonomsko rasterećenje). Varijable T3 (tip sučelja) i T4 (mekanizam potpore) nisu uključene u analizu zbog multikolinearnosti, odnosno konstrukcijske povezanosti s varijablama T1 (izvor energije) i S1 (anatomska regija podupiranja). Vrijednosti korištenih pondera za odabranih 7 varijabli (Tablica 2) određene su primjenom metode usporedbe u parovima (Radanović i Mladinić 2025). Svako varijabli pridružena je relativna važnost u rasponu od 0,10 do 0,20, pri čemu zbroj svih pondera iznosi 1,00, odnosno 100% (Tablica 2). Time je osigurano da značajniji faktori imaju veći utjecaj na konačni rezultat, za razliku od običnog prosjeka gdje su svi faktori jednako važni (Hrvatska enciklopedija 2026). Odabrane varijable (Tablica 1 i 2) analiziranih egzoskeleta, ovisno o specifičnosti šumskih radova, ocjenjene su prema sljedećoj skali: 1 – neprimjenjivo, 2 – niska primjenjivost, 3 – srednja primjenjivost, 4 – visoka primjenjivost, 5 – vrlo visoka primjenjivost.

Tablica 2. Korišteni ponderi i varijable kod matrice tehničke evaluacije egzoskeleta.
Table 2 Weights and variables used in the exoskeleton technical evaluation matrix.

	T1	T2	V4	S1	S3	S4	S5
Varijable	Izvor energije	Masa sustava	Ergonomsko rasterećenje	Anatomska regija podupiranja	Sloboda pokreta	Održavanje	Otpornost na okoliš
Variable	Power source	System weight	Ergonomic load reduction	Supported body region	Range of motion	Maintenance	Environmental resistance
Ponder Weight	0,15	0,20	0,15	0,15	0,15	0,10	0,10

REZULTATI

RESULTS

Analiza prema izvoru energije pokazuje da 83,33 % uzorkovanih egzoskeleta koristi pasivni pogon, dok preostalih 16,67 % otpada na aktivne sustave (Tablica 3). Promatrano kroz geografsku distribuciju 72,22 % uzorkovanih egzoskeleta proizvedeno je unutar europskog gospodarskog prostora, dok je 55,56 % uzorkovanih egzoskeleta proizvedeno od strane zemalja članica Europske unije (Tablica 3) gdje se ističe Njemačka kao inovacijski predvodnik. Dva modela u uzorku čine konceptualno rješenje koje do danas nije ušlo u sljedeću fazu razvoja, ispitivanja i stavljanja na tržište novog prototipa. Analiza kroz varijablu godine proizvodnje pokazuje da je 55,60 % uzorkovanih egzoskeleta na tržište plasirano unutar trajanja pandemije bolesti COVID-2019, svi pasivnog tipa (Tablica 3). Prema prodajnoj cijeni sustava 38,90 % egzoskeleta nalazi se u cjenovnom razredu višem od 2500,00 €, dok se svega 4 uzorkovana sustava nalaze u cjenovnom razredu nižem od 1500,00 € (Tablica 3), u slučajevima kada države proizvođači nisu zemlje članice Europske Unije. Analiza uzorkovanih sustava prema ukupnom ostvarenom broju bodova (Tablica 3), a vezano uz opću ocjenu primjenjivosti u šumarstvu, svrstala je 4 egzoskeleta u grupu vrlo visoke opće primjenjivosti, a 10 egzoskeleta u grupu visoke opće primjenjivosti kod šumskih radova. Svi uzorkovani aktivni egzoskeleti (varijabla T1) bodovno su svrstani u grupu prosječne ili niske opće primjenjivosti u šumarstvu (Tablica 3).¹³

Varijable T2 (masa sustava) značajno je doprinijela ukupnoj ocjeni opće primjenjivosti egzoskeleta u šumarstvu. Unutar razreda visoke i vrlo visoke primjenjivosti (N = 14) identificirano je 12 modela od kojih su 3 egzoskeleta mase ispod 1 kg te 9 modela s masom od 1,00 do 2,99 kg. Analizirano prema varijabli T3 (tip sučelja), unutar razreda visoke i vrlo visoke primjenjivosti egzoskeleta u šumarstvu identificirano je 6 mekih tj. fleksibilnih sučelja, 4 hibridna sustava i 4 kruta sučelja. S druge strane, kod mehanizma potpore (varijabla T4) 7 egzoskeleta svrstano je u grupu elastičnih struktura, 6 sustava u grupu mehaničkih ili kompozitnih opruga, a 1 sustav u grupu krutih struktura.

Opći znanstveno utemeljen doprinos (varijabla V1) ima naznačeno 11 od 14 sustava, dok je ispitivanje primjenjivosti kod šumskih radova (varijabla V2) dokumentirano samo kod 5 od 14 analiziranih egzoskeleta. Analizom maksimalno ustupljene potpore (varijabla V3) istaknuto je da 8 od 14 sustava pruža potporu za leđa od 10 do 20 kg ili po ruci do 4 kg. Dodatnih pet uzorkovanih sustava pruža potporu za leđa ≥ 20 kg ili po ruci ≥ 4 kg. S druge strane, varijabla V4 (ergonomsko rasterećenje) kod 10 od 14 sustava ističe smanjenje zamora za određenu anatomska regiju dobiveno elektromiografskim (EMG) istraživanjima, dok 3 sustava imaju istaknuti doprinos u vidu RULA (engl. *Rapid Upper Limb Assessment*) rezultata istraživanja.

Analiza sustava (N = 14) prema anatomskoj regiji podupiranja (varijabla S1) pokazala je da samo jedan egzoskelet pruža potporu za 3 ili više anatomske regije, 3 sustava su namijenjena za lumbalnu regiju i noge, a 7 sustava samo

Tablica 3. Deskriptivni podaci uzorkovanih egzoskeleta i ocjena opće primjenjivosti u šumarstvu.

Table 3 Descriptive data of sampled exoskeletons and the rating of general applicability in forestry.

Model egzo-skeleta <i>Exoskeleton model</i>	Proizvođač <i>Producer</i>	Država <i>State</i>	Godina proizvodnje <i>Production year</i>	Cijena, € <i>Price, €</i>	Ocjene opće primjenjivosti u šumarstvu <i>Rating of general applicability in forestry</i>	Mrežna stranica <i>Website</i>
² Muscle Suit Soft-Power	Innophys	Japan <i>Japan</i>	2023	700 – 800	Visoka / <i>High</i> (27 bodova / <i>points</i>)	https://innophys.net/musclesuit/soft_power/
² Muscle Suit Soft-Light	Innophys	Japan <i>Japan</i>	2023	500	Vrlo visoka / <i>Very high</i> (29 bodova / <i>points</i>)	https://musclesuit.co.jp/soft_light_2/
² Muscle Suit Every	Innophys	Japan <i>Japan</i>	2019	1900 – 2000	Visoka / <i>High</i> (24 bodova / <i>points</i>)	https://innophys.net/musclesuit/
² Apex 2	HeroWear	SAD <i>USA</i>	2023	1500 – 2000	Visoka / <i>High</i> (26 bodova / <i>points</i>)	https://herowarexo.com/the-apex-2-back-assist-exosuit
² FLEX	Laevo	Nizozemska <i>Netherlands</i>	2021	5500	Visoka / <i>High</i> (27 bodova / <i>points</i>)	https://www.laevo-exoskeletons.com/laevo-flex
² IX BACK AIR	SuitX by Ottobock	Njemačka <i>Germany</i>	2023	1900	Visoka / <i>High</i> (27 bodova / <i>points</i>)	https://www.suitx.com/en/products/ix-back-air-exoskeleton
² LiftSuit 2.0	Auxivo	Švicarska <i>Switzerland</i>	2021	1000 – 1200	Vrlo visoka / <i>Very high</i> (29 bodova / <i>points</i>)	https://www.auxivo.com/liftsuit
² HAPO Back	ErgoSanté	Francuska <i>France</i>	2020	1900 – 2000	Visoka / <i>High</i> (26 bodova / <i>points</i>)	https://www.theexoskeletonstore.com/products/hapo-back
² BionicBack	Htrius	Njemačka <i>Germany</i>	2021	2800	Visoka / <i>High</i> (27 bodova / <i>points</i>)	https://www.htrius.com/en/bionicback
² OmniSuit	Auxivo	Švicarska <i>Switzerland</i>	2023	3000 – 3300	Vrlo visoka / <i>Very high</i> (28 bodova / <i>points</i>)	https://www.auxivo.com/omnisuit
² IX SHOULDER AIR	SuitX by Ottobock	Njemačka <i>Germany</i>	2023	1900	Visoka / <i>High</i> (26 bodova / <i>points</i>)	https://www.suitx.com/en/products/ix-shoulder-air-exoskeleton
² EXO-S	Hilti	Lihtenštajn <i>Liechtenstein</i>	2023	1300 – 1500	Prosječna / <i>Medium</i> (22 bodova / <i>points</i>)	https://www.hilti.co.uk/c/
² HAPO Front	ErgoSanté	Francuska <i>France</i>	2021	2500 – 3000	Visoka / <i>High</i> (27 bodova / <i>points</i>)	https://www.hapo.eu/fr/exosquelette-hapo/26-exosquelette-hapo-front.html
^{*2} H-EXO	Husqvarna	Švedska <i>Sweden</i>	2022	---	Vrlo visoka / <i>Very high</i> (30 bodova / <i>points</i>)	https://www.stefanrojongrendesigner.com/husqvarna
^{*1} AEGIS	Jason Lee	SAD <i>USA</i>	2017	---	Vrlo niska / <i>Very low</i> (10 bodova / <i>points</i>)	https://www.core77.com/projects/65857/A-Protective-Super-Suit-for-Loggers
² MATE-XT	Comau	Italija <i>Italy</i>	2020	4000 – 4500	Visoka / <i>High</i> (24 bodova / <i>points</i>)	https://www.comau.com/en/
¹ Exia	German Bionic	Njemačka <i>Germany</i>	2025	8000 – 10000	Prosječna / <i>Medium</i> (21 bodova / <i>points</i>)	https://www.germanbionic.com/
¹ ExoActive	Festool	Njemačka <i>Germany</i>	2023	3000 – 3400	Niska / <i>Low</i> (16 bodova / <i>points</i>)	https://www.festool.com/campaigns/microsites/exoactive

Konceptualno rješenje / *Conceptual solution*; ¹Aktivan / *Active*; ²Pasivan / *Passive*

za lumbalnu regiju. Kod varijable S3 (sloboda pokreta) 12 od 14 sustava istaknulo je dobru do visoku razinu, dok su svega dva uzorkovana sustava istaknula nisku tj. ograničenu slobodu pokreta. Analiza aspekta održavanja (S4) uzorkovanih sustava ukazuje na jasnu podjelu unutar uzorka od 14 egzoskeleta. Kod 6 modela utvrđena je visoka praktičnost u obliku potpune perivosti u perilici rublja. Preostalih 8 sustava zahtijeva hibridni pristup, koji obuhvaća strojno pranje tekstilnih navlaka i manualno čišćenje krutih segmenata sučelja. Visoka otpornost na vanjske utjecaje (varijabla S5) istaknuta je kod 7 egzoskeleta, što pojedini zatvoreni sustavi potvrđuju posjedovanjem IP54 certifikata prema međunarodnom standardu IEC 60529 kojim je označen

stupanj mehaničke zaštite kućišta i elektroničkih komponenti. Prva znamenka (5) jamči visoku razinu zaštite od štetnog taloženja prašine i sitnih drvnih čestica, dok druga znamenka (4) osigurava otpornost na prskanje vode iz svih smjerova. Srednju otpornost na okoliš istaknuta je kod 5 egzoskeleta koji većinom spadaju u meke sustave koji dobro funkcioniraju u vlažnim i prašnjavim uvjetima.

Primjenjivost egzoskeleta unutar šumskih radnih procesa

Applicability of exoskeletons within forestry work processes

Tablica 4 prikazuje analizu primjenjivosti selektiranih modela egzoskeleta (N = 14) unutar sedam specifičnih šumarskih radnih operacija, podijeljenih u tri glavne tehnološke

kategorije: uzgojne radove, radove pridobivanja drva i arborističke radove. Sustavi su ocijenjeni kroz tri razine primjenjivosti: nisko primjenjiv (*) u rasponu do 2,99 ostvarene prosječne ocjene, srednje primjenjiv (**) u rasponu od 3 do 3,99 ostvarene prosječne ocjene i visoko primjenjiv s ostvarenom prosječnom ocjenom višom od 4 (***).

Uzgojni radovi, odnosno radne operacije njege šuma i čišćenja šume pokazali su se iznimno pogodnima za primjenu egzoskeleta. Čak osam modela ostvarilo je ocjenu visoko primjenjiv (***). Kod njege šuma posebno su se istaknuli meki modeli s elastičnim elementima koji pružaju potporu lumbalnoj regiji te olakšavaju rad u dubokom pretklonu. S druge strane, kod radnih operacija čišćenja šuma višu ocjenu primjenjivosti ostvarili su sustavi koji podupiru ruke i ramena, poput HAPO Front i IX SHOULDER AIR modela (Tablica 4). U okviru tehnološkog procesa pridobivanja drva, kod radnih operacija ručno-strojne sječe i izrade 50 % analiziranih modela ostvarilo je ocjenu visoke razine primjenjivosti (***). Shodno korištenim varijablama značajno su se

istaknuli meki egzoskeleti poput modela Apex 2, BionicBack i H-EXO koji pružaju potporu leđima pri saginjanju i radu u dubokom pretklonu pomoću elastičnih elemenata (Tablica 4). Prethodno navedeni modeli ostvarili su skoro identičnu prosječnu ocjenu primjenjivosti i kod radnih operacija kopčanja trupaca. Kod radnih operacija privlačenja ili izvoženja drva 42,86 % sustava ostvarilo je nisku ocjenu primjenjivosti (*), dok su preostali modeli ostvarili srednju ocjenu primjenjivosti (**). Četiri usko specijalizirana modela egzoskeleta za potporu gornjih ekstremiteta, pokazala su se visoko primjenjivima pri arborističkim radovima kod korištenja mobilne platforme (Tablica 4), dok su ostali modeli ocijenjeni srednjom (N = 7) i niskom (N = 3) ocjenom primjenjivosti. Analizom primjenjivosti asistivno-zaštitnih sustava kod radnih operacija pomoću užeta i penjačkog pojasa u arborikulturi ostvarena je srednja ocjena primjenjivosti kod 78,57 % modela, dok su tri modela s krutim i izbočenim elementima dobila nisku ocjenu primjenjivosti (Tablica 4).

Tablica 4. Ocjena primjenjivosti selektiranih egzoskeleta kod specifičnih radnih procesa u šumarstvu.

Table 4 Evaluation of the applicability of selected exoskeletons in specific work processes in forestry.

Model egzoskeleta <i>Exoskeleton model</i>	Uzgojni radovi <i>Silvicultural operations</i>		Pridobivanje drva <i>Harvesting operations</i>			Arboristički radovi <i>Arborist operations</i>	
	Njega šuma <i>Forest tending</i>	Čišćenje šuma <i>Forest cleaning</i>	Sječa i izrada <i>Felling and processing</i>	Kopčanje trupaca <i>Choking of logs</i>	Privlačenje – izvoženje <i>Skidding – forwarding</i>	Mobilna platforma <i>Mobile platform</i>	Uže i penjački pojas <i>Rope and climbing harness</i>
Muscle Suit Soft-Power	(4,65) ***	(4,35) ***	(4,35) ***	(4,05) ***	(3,7) **	(3,55) **	(3,45) **
Muscle Suit Soft-Light	(4,65) ***	(3,9) **	(4,35) ***	(4,2) ***	(3,85) **	(3,55) **	(3,45) **
Muscle Suit Every	(3,2) **	(2,9) *	(3,5) **	(3,2) **	(2,15) *	(2,55) *	(2,15) *
Apex 2	(4,65) ***	(4,2) ***	(4,5) ***	(4,5) ***	(3,9) **	(3,7) **	(3,6) **
FLEX	(3,75) **	(3,45) **	(3,6) **	(3,6) **	(2,85) *	(2,7) *	(2,4) *
IX BACK AIR	(4,1) ***	(3,65) **	(3,95) **	(3,8) **	(2,9) *	(2,9) *	(2,6) *
LiftSuit 2.0	(4,8) ***	(4,2) ***	(4,5) ***	(4,5) ***	(3,75) **	(3,6) **	(3,6) **
HAPO Back	(4,5) ***	(4,05) ***	(4,35) ***	(4,35) ***	(3,45) **	(3,45) **	(3,45) **
BionicBack	(4,65) ***	(4,35) ***	(4,65) ***	(4,65) ***	(3,6) **	(3,45) **	(3,45) **
OmniSuit	(3,4) **	(3,85) **	(3,55) **	(3,55) **	(2,65) *	(4) ***	(3,1) **
IX SHOULDER AIR	(3,4) **	(4) ***	(3,55) **	(3,55) **	(2,8) *	(4,6) ***	(3,4) **
HAPO Front	(3,6) **	(4,2) ***	(3,75) **	(3,75) **	(3) **	(4,5) ***	(3,45) **
H-EXO	(4,8) ***	(4,5) ***	(4,8) ***	(4,8) ***	(3,9) **	(3,75) **	(3,75) **
MATE-XT	(3,3) **	(3,9) **	(3,75) **	(3,6) **	(2,7) *	(4,5) ***	(3,3) **

* Nisko primjenjiv / Low applicability; ** Srednje primjenjiv / Medium applicability; *** Visoko primjenjiv / High applicability

RASPRAVA I ZAKLJUČCI

DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Temeljni cilj istraživanja bio je pružiti osnovne informacije o dostupnim asistivno-zaštitnim sustavima te ocijeniti primjenjivost rješenja Industrije 4.0 u šumskoj proizvodnji temeljem dostupnih specifikacija i metodološkog okvira ocjenjivanja, a sa svrhom unapređenja radne sposobnosti i održivosti radnog kapitala.

Kod ručno-strojnih radova u šumarstvu, osobito radnih operacija sječe i izrade drva, biomehanička analiza pokazuje značajnu fleksiju torza (čak do 45,4°) i podizanje ruku do 61,8° (Kim i Chung 2024). Rezultati istraživanja pokazuju da fleksija torza od 20° ili više značajno povećava rizik od nastanka ozljede u donjem dijelu leđa (Punnett i dr. 1991), a šumski radnici sjekači provode više od 30 % efektivnog vremena rada s fleksijom torza većom od 30° (Kim i Chung 2024). Temeljem prethodno navedenog, primjena egzoskeleta u radnim procesima, posebice u fizički zahtjevnim sektorima poput šumarstva (Kim i Chung 2024, Choi i dr. 2026, Röhrich i dr. 2026), industrije i građevine, donosi značajne ergonomske prednosti, ali i specifične tehničke i ljudske izazove.

Rezultati istraživanja opće primjenjivosti uzorkovanih egzoskeleta u šumarstvu (N = 18) pokazali su da je 22,22 % analiziranih sustava svrstano u kategoriju vrlo visoke, dok je 55,55% klasificirano u kategoriju visoke primjenjivosti. Znanstveno utemeljen ergonomski doprinos naznačen je kod 11 sustava, dok je ispitivanje primjenjivosti kod šumskih radova dokumentirano samo kod 5 modela. Budući značajniji potencijal opće primjenjivosti u šumarskom sektoru imaju pasivni sustavi koji su laganiji te jednostavniji za korištenje i održavanje u izuzetno zahtjevnom šumskom okolišu, što je u skladu s indikacijom istraživanja Kima i Chunga (2024). Analiza primjenjivosti selektiranih sustava (N = 14) unutar specifičnih radnih procesa pokazala je najvišu primjenjivost kod uzgojnih radova. Pregledom literature utvrđeno je da se značajan broj preliminarnih istraživanja o ergonomskom doprinosu i terenskoj primjenjivosti pasivnih sustava u šumarstvu odnosi na uzgojne radove (Kim i Chung 2023, 2024; Röhrich i dr. 2026). Unutar tehnološkog procesa pridobivanja drva, 50 % analiziranih modela kod radne operacije sječe i izrade ostvarilo je ocjenu visoke razine primjenjivosti, dok su radne operacije privlačenja ili izvoženja drva ostvarile najlošiju ocjenu. Rad u kabini stroja pri privlačenju ili izvoženju drva drastično smanjuje primjenjivost egzoskeleta zbog svoje krute strukture i izbočenih elemenata koji onemogućavaju pravilno sjedenje u već ergonomski dizajniranom sjedištu stroja. Iako meki sustavi s elastičnim elementima ne ometaju operatera pri sjedenju, a neki modeli imaju i deaktivacijski mehanizam za elastične elemente, razlog niske ili srednje ocjene temelji se u samoj biomehanici potpore. Naime, elastični elementi se aktiviraju samo pri nagnjanju i pretklonu, što u kabini stroja nisu česti pokreti. Arboristički radovi, posebice operacije koje zahtijevaju primjenu užadi i penjačkog pojasa, identificirani su kao najmanje pogodni za implementaciju asistivno-zaštitnih tehnologija. Glavna ograničenja obuhvaćaju rizik od zaplitanja opreme s granama i ostalim elementima penjačke opreme.

Temeljem provedene analize i dobivenih rezultata istraživanja, proizlaze sljedeći zaključci:

Opća analiza primjenjivosti ukazuje na to da najbolje ocijenjeni egzoskeleti imaju masu ispod 3 kg i koriste meka ili hibridna sučelja, čime se osigurava potrebna sloboda pokreta i izbjegava dodatni zamor radnika.

Komparativna analiza troškova ukazuje na to da je investicija u jedan aktivni sustav niske ocjene primjenjivosti ekvivalentna nabavi šest pasivnih modela koji su kroz analizu ostvarili visoku ocjenu primjenjivosti.

Analiza primjenjivosti s obzirom na tehnološki proces ukazuje na to da meki sustavi s elastičnim elementima predstavljaju najoptimalnije rješenje za uzgojne radove u šumarstvu, a medijalno rješenje kod radnih operacija sječe i izrade drva.

Primjena egzoskeleta u radnim operacijama privlačenja i izvoženja drva limitirana je prostornim i posturalnim specifičnostima kabine stroja.

Kod arboristike, modeli koji pružaju potporu gornjim ekstremitetima visoko su primjenjivi pri radu u mobilnoj platformi, dok niti jedan od analiziranih sustava nije u potpunosti prilagođen radu na visini pomoću užeta i penjačkog pojasa.

Pasivni sustavi generalno predstavljaju perspektivno rješenje za primjenu u šumarstvu zbog svoje niske operativne mase, tehničke jednostavnosti i visoke pouzdanosti unutar ekstremnih šumskih ekosustava.

Operativna primjena navedenih tehnoloških rješenja u šumskoj proizvodnji ima svoje pozitivne i negativne strane. Doprinos navedenih sustava očituje se kroz dokazano smanjenje biomehaničkog opterećenja radnika čime se također smanjuje rizik od nastanka mišićno-koštanih poremećaja (Kim i Chung 2024). Rasterećenjem mišića radnici se sporije umaraju, što se potencijalno odražava na veću produktivnost i veću razinu sigurnosti u vidu boljeg kognitivnog fokusa. Nedostatak analiziranih sustava najviše se očituje u slobodi kretanja, što osobito može biti problematično na neravnom i neprohodnom terenu poput šumskog tla ili kod rada u krošnji stabla tijekom izvođenja radova u arborikulturi. U ljetnim mjesecima, s obzirom na sve izraženiju pojavu toplinskih valova, dodatna masa i toplinska nelagodnost može uzrokovati pojačano znojenje i iritaciju kože kod šumskih radnika. Učinkovita integracija egzoskeleta u šumske radne procese dodatno je ograničena fenomenom redistribucije mehaničkog naprezanja (pri čemu se, na primjer, rasterećenje kralježnice kompenzira nesvjesnim prijenosom sile na koljena) i utvrđenom psihološkom barijerom, odnosno neprihvatanjem sustava od strane krajnjih korisnika (Kim i Chung 2023, 2024).

Prilikom interpretacije rezultata primjenjivosti analiziranih egzoskeleta u šumarstvu, nužno je uvažiti određena metodološka ograničenja. Prvo i temeljno ograničenje proizlazi iz relativno malog uzorka ocijenjenih sustava (N = 18), pri čemu se dva modela još uvijek nalaze u fazi konceptualnog rješenja. Drugo ograničenje odnosi se na subjektivnost ocjenjivača tijekom formiranja matrice tehničke evaluacije, kao i prilikom provedbe metode ponderiranja selektiranih sustava.

S ciljem osiguranja metodološkog kontinuiteta i daljnje razrade prikazanih rezultata, budući istraživački smjer u području primjene komercijalno dostupnih egzoskeleta u

šumarstvu obuhvatit će sveobuhvatniju analizu tržišta kroz povećanje broja uzorkovanih modela. Dodatno, radi minimiziranja subjektivnosti te standardizacije procesa tehničke evaluacije i ponderiranja potrebna je provedba objektivnih terenskih mjerenja (EMG i kinematička mjerenja) te uključivanje šireg kruga dionika – prvenstveno znanstvene zajednice, sektorskih tehnologa i samih proizvodnih radnika u šumarstvu.

ZAHVALA

ACKNOWLEDGEMENTS

Istraživanje je financiralo Ministarstvo regionalnoga razvoja i fondova Europske unije Republike Hrvatske u sklopu projekta „Analiza i unaprjeđenje radnih uvjeta operatera šumskih strojeva – ErgoForMeh“.

LITERATURA

REFERENCES

- Anon., 2026: Assistive technology. https://en.wikipedia.org/wiki/Assistive_technology
- Choi, S., K. Kia, A. Chan, M. Salehi, W. Chung, J.H. Kim, 2026: Effects of back-support passive exoskeletons on biomechanical loads and postural stability during simulated manual timber felling. *Applied Ergonomics* 134: 104734. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2026.104734>
- Dimou, V., C. Malesios, S. Pispas, 2020: Monitoring self-reported musculoskeletal symptoms in forestry operations. *International Journal of Forest Engineering* 31 (2): 106–113. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1745530>
- Dimou, V., B. Molis, K. Kitikidou, 2022: Evaluation of musculoskeletal disorders risks in forestry. *Work* 72: 1–11. <https://doi.org/10.3233/WOR-213640>
- Ekso Bionics, 2026: Why do we need human exoskeletons? <https://eksobionics.com/why-do-we-need-human-exoskeletons>
- EU-OSHA, 2019: European Agency for Safety and Health at Work. Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU. <https://osha.europa.eu/fr/publications/summary-msds-facts-and-figures-overview-prevalence-costs-and-demographics-msds-europe>
- Fisahn, C., M. Aach, O. Jansen, M. Moisi, A. Mayadev, K.T. Pagarigan, J.R. Dettori, T.A. Schildhauer, 2016: The effectiveness and safety of exoskeletons as assistive and rehabilitation devices in the treatment of neurologic gait disorders in patients with spinal cord injury: A systematic review. *Global Spine Journal* 6 (8): 822–841. <https://doi.org/10.1055/s-0036-1593805>
- Garland, J., J. Cedergren, L. Eliasson, H. van Hensbergen, A. McEwan, D. Wästerlund, 2020: Occupational Safety and Health in Forest Harvesting and Silviculture—A Compendium for Practitioners and Instructors. Forestry Working Paper No. 14, FAO: Rome, Italy.
- Grzywiński, W., R. Turowski, T. Jelonek, A. Tomczak, 2022: Physiological workload of workers employed during motor-manual timber harvesting in young alder stands in different seasons. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* 35 (4): 437–447. <https://doi.org/10.13075/ijom.1896.01862>
- He, M., M. Smidt, W. Li, Y. Zhang, 2021: Logging industry in the United States: employment and profitability. *Forests* 12 (12): 1720. <https://doi.org/10.3390/f12121720>
- Hrvatska enciklopedija, 2026: Ponderiranje definicija. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/ponderiranje>
- Kim, J.H., W. Chung: 2023: Forestry Stakeholders' Perspectives on Exoskeletons. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Volume 67, Issue 1, September 2023*, 1755–1756 pp. <https://doi.org/10.1177/21695067231192908>
- 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>
- Landekić, M., Z. Tomašić, Z. Pandur, M. Bačić, M. Matošević, M. Šporčić, 2026: Correspondence analysis on occupational accidents of forestry workforce in Croatia. *Croatian Journal of Forest Engineering* 47 (2): 321–331. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2026.4401>
- Landekić, M., M. Bačić, Z. Pandur, M. Bakarić, M. Šporčić, J. Nakić, 2023: Kinematic analysis of the forestry workers' upper body during chainsaw starting activity. *Forests* 14 (2): 2427, 13. <https://doi.org/10.3390/f14122427>
- Landekić, M., D. Majetić, M. Bakarić, M. Matošević, 2025: Application of assistive-protective technology in forestry. *Nova mehanizacija šumarstva* 46: 63–72. <https://doi.org/10.5552/nms.2025.7>
- Professional Logging Contractors of Maine (PLCM), 2019: Maine logger and log trucker employment availability and wage analysis report – Data appendix. Maine Center for Business and Economic Research, University of Southern Maine, 33 p.
- Radanović N., P. Mladinić, 2025: Matematičar – Matematika i odlučivanje u izborima. *Matka* 34 (2025./2026.) br. 134. <https://hrcak.srce.hr/file/500697>
- Röhrich, M., E.A. Pavliková, J. Meňházová, A. Traka, P.A. Tsioras, 2026: Ergonomic feasibility assessment of passive exoskeleton use in simulated forestry tasks. *Forests* 17 (3): 332. <https://doi.org/10.3390/f17030332>
- Šporčić, M., D. Mijoč, M. Bakarić, Z. Pandur, M. Bačić, M. Landekić, 2023: The challenge of recruiting forestry workforce in Europe and worldwide. *Šumarski list* 147 (5–6): 239–250. <https://doi.org/10.31298/sl.147.5-6.4>
- Šporčić, M., M. Landekić, M. Šušnjar, Z. Pandur, M. Bačić, D. Mijoč, 2024: Shortage of labour force in forestry of Bosnia and Herzegovina – Forestry experts' opinions on recruiting and retaining forestry workers. *Croatian Journal of Forest Engineering* 45 (1): 183–198. <https://doi.org/10.5552/crojfe.2024.2345>
- Tacto, 2026: Evaluation Matrix: Systematic Evaluation of Offers in Procurement. <https://www.tacto.ai/en/procurement-glossary/evaluation-matrix>
- UNECE/FAO, 2020: Forest sector workforce in the UNECE region – Overview of the social and economic trends with impact on the forest sector. Geneva timber and forest discussion paper 76. United Nations, Geneva, Switzerland, 77 p.

SUMMARY

Global structural changes, such as rural depopulation, demographic aging, migration, sustainability issues etc., affect the available working capital in the forestry sector. Forestry operations are characterized by intensive physical labor and high occupational risks, with daily exposures to biomechanical overload, heavy lifting and awkward postures for workers. Musculoskeletal disorders (MSDs) are highlighted by scientific research as a significant health problem causing work disability, reduced productivity and a lower quality of life. In this context, the goal of the study was to evaluate the general and process-specific applicability of 18 exoskeletons manufactured between 2017 and 2025. A systematic review of major scientific databases was performed to gather data from relevant papers and technical specifications of commercial manufacturers. The evaluation was structured into a multi-step framework. First, qualitative technical data were converted into quantitative scores using 13 variables (Table 1) covering technical, validation and environmental aspects. Models were classified based on total scores, ranging from very low (≤ 15) to very high (≥ 28) general applicability in forestry. The 14 models that achieved high or very high general scores were analyzed using a technical evaluation matrix. To ensure critical variables had a realistic impact, proportional importance weights (Table 2) were assigned to seven specifically selected variables using the pairwise comparison method. The models were graded on a 1 to 5 scale across seven forestry-specific tasks within silvicultural, harvesting and arborist operations. The initial general applicability assessment showed that 83.33% of sampled systems utilize passive mechanisms and 72.22% were produced within the European Economic Area, led by Germany, as compiled in Table 3. Based on variables for general applicability, four models were placed in the very high general applicability category, while ten models were rated as high (Table 3). Active motorized systems received lower scores due to higher mass, lower environmental resistance and economic barriers; a cost comparison revealed that one active system of low applicability is equivalent in price to six highly applicable passive models. Distinct operational trends were identified during the process-specific analysis presented in Table 4. High compatibility for silvicultural operations was identified, where eight models achieved top scores (Table 4). Lightweight soft systems are ideal for forest tending due to back support during deep forward trunk flexion, while upper-limb and shoulder support models performed best for forest cleaning. In harvesting operations, 50% of the models achieved high applicability for motor-manual felling, processing and almost the same scores for log chocking. These were soft models with elastic elements, which significantly minimized back (spinal) loads while bending (Table 4). Low scores were recorded for skidding and forwarding because rigid or protruding elements interfere with machine cabins and ergonomic seats where trunk flexion is rarely required (Table 4). For arborist operations, upper-limb support models are highly applicable on mobile platforms, but the danger of entanglement with tree branches and other equipment limits their applicability in tasks requiring climbing ropes and harnesses (Table 4). Based on these findings, passive systems under 3 kg have been identified as the most promising option for forestry due to mechanical simplicity, soft or hybrid interfaces and reliability in extreme working conditions. Methodologically, this study is limited by a relatively small sample size and potential subjectivity during scoring and weighting phases. For coherent follow-up and further development of these findings, future research will expand market analysis, implement objective field tests (EMG and kinematic measurements) to standardize the evaluation process and incorporate multi-stakeholder feedback from the scientific community, field technologists and forestry production workers to ensure successful field integration.

Keywords: forestry, assistive and protective technologies, weighting method, occupational safety