

M. Gombar*

ALGORITAMSKA ANALIZA MODELA MOTAR ZA PROCJENU BIOMEHANIČKIH RIZIKA I OPTIMIZACIJU SIGURNOSTI VOJNIKA

UDK 004.42, 004.78
PRIMLJENO: 6.2.2025.
PRIHVAĆENO: 15.3.2026.

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License



SAŽETAK: Sigurnost i radna učinkovitost vojnika u operativnim uvjetima ovise o ergonomskim faktorima koji utječu na fizičko opterećenje, zamor i rizik od ozljeda. Tradicionalne metode procjene, poput RULA, REBA i SMART, nisu prilagođene dinamičnim vojnim uvjetima i ne omogućuju prediktivnu analizu biomehaničkih rizika u realnom vremenu. Ovaj rad razvija algoritamski model MOTAR (Model opterećenja tijela algoritmom raspodjele), koji integrira nosive senzore i IoT tehnologije kako bi unaprijedio sustave zaštite na radu i povećao sigurnost vojnika kroz personaliziranu analizu fizičkog opterećenja. Model MOTAR originalno je razvijen za potrebe ovog istraživanja i nije prethodno opisan u literaturi. Temelji se na analizi pokreta i mišićne aktivnosti pomoću strojnog učenja (Random Forest, SVM, k-NN). Ovaj pristup omogućuje ranu detekciju biomehaničkih rizika i predikciju umora, čime pridonosi prevenciji ozljeda i optimizaciji vojnih zadataka. Očekuje se da bi algoritamska obrada podataka mogla poboljšati preciznost detekcije rizičnih obrazaca pokreta, smanjiti vremensku zahtjevnost analize i omogućiti dinamičku prilagodbu vojnih treninga prema individualnim karakteristikama vojnika. Iako je model metodološki definiran i utemeljen na postojećim istraživanjima, daljnja empirijska testiranja nužna su za potvrdu njegove primjenjivosti u operativnim uvjetima. MOTAR nudi personalizirani pristup sigurnosti na radu kroz inteligentnu optimizaciju fizičkog opterećenja, čime pridonosi povećanju operativne spremnosti i dugoročnoj zaštiti zdravlja vojnog osoblja. Osim vojne primjene, model se može prilagoditi i drugim sigurnosnim sektorima, poput policije i vatrogastva, čime otvara mogućnosti za širu primjenu u zaštiti na radu i ergonomskom dizajnu radnog opterećenja.

Cljučne riječi: algoritamska analiza, ergonomija, sigurnost na radu, prediktivna analiza rizika, vojna poduka

UVOD

Ergonomska analiza u vojnom sektoru ključna je za optimizaciju radnih uvjeta, smanjenje fizičkog opterećenja i prevenciju ozljeda među vojnicima (Anderson, 2015., Edwards & Harrison, 2018.). Vojne operacije često zahtijevaju iznimnu fizičku i mentalnu izdržljivost, pri čemu se vojnici suočavaju s visokim biomehaničkim opterećenji-

ma, uključujući nošenje teške opreme, rukovanje oružjem, dugotrajne statičke položaje i izlaganje ekstremnim vremenskim uvjetima (Jackson & Rosen, 2013., Kim & Park, 2012.). Dosadašnja istraživanja ukazuju na to da loše ergonomske uvjeti mogu smanjiti operativnu učinkovitost i povećati rizik od mišićno-koštanih ozljeda, koje su jedan od vodećih uzroka smanjenja borbene spremnosti (Smith & Knapik, 1999., Waters & Putz-Anderson, 1993.). Sustavi Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Rapid Entire Body Assessment (REBA) i Scoring Method for Assessment of Repetitive Tasks (SMART) koriste se u procjeni biomehaničkih

*Marija Gombar, doktorandica, (gombar.ma@gmail.com, magombar@unin.hr), Centar za obrambene i strateške studije „Janko Bobetko“, Hrvatsko vojno učilište „Dr. Franjo Tuđman“, 10000 Zagreb, Hrvatska.

rizika i analizi radnih opterećenja u industriji, ali njihova primjena u vojnom sektoru još nije sustavno istražena (*Huang & Chen, 2014., Park & Kim, 2010.*). Razvojem nosivih senzora i IoT tehnologija, otvara se mogućnost preciznijeg i kontinuiranog praćenja ergonomskih parametara u realnom vremenu (*Sahu et al., 2022.*). Primjena strojne obrade podataka i algoritamskih modela može omogućiti prediktivnu analizu umora i ozljeda, čime bi se vojni trening i radni uvjeti mogli individualno prilagoditi svakom vojniku (*Lee & Lee, 2021a., Zhu & Shin, 2011.*). Studije pokazuju da analiza kretanja i opterećenja u vojsci može značajno unaprijediti planiranje treninga i smanjiti broj ozljeda uzrokovanih nepravilnim držanjem tijela ili ponavljajućim naporima (*Davis & Kotowski, 2007., Nussbaum & Le, 2015.*). Ergonomska optimizacija vojne opreme, poput kaciga, ruksaka i zaštitnih prsluka, također može smanjiti nepotrebno fizičko opterećenje i povećati operativnu izdržljivost (*Kim & Park, 2012., Wang & Li, 2010.*).

Potreba za modernizacijom vojne poduke kroz virtualnu stvarnost (VR) i simulacijske modele omogućava vojnicima da sigurno treniraju u uvjetima koji realno simuliraju borbene situacije, dok istovremeno smanjuju fizički stres i mogućnost ozljeda (*Zhou & Sun, 2010., Yamamoto & Matsuoka, 2007.*). Uz to, studije iz industrijskog sektora pokazuju da bolji ergonomski dizajn radnog mjesta može značajno smanjiti mentalni i fizički stres, a slične strategije mogu se primijeniti i u vojnom kontekstu (*Robertson & Amick, 2003., Wilson & Corlett, 1995.*). S obzirom na sve navedeno, cilj ovog rada je razviti algoritamski model koji integrira postojeće metode ergonomske procjene s podacima prikupljenim putem nosivih senzora te omogućiti individualiziranu prilagodbu vojnih treninga i opreme na temelju objektivne analize opterećenja (*Baker & Smith, 2017., Zhang & Helander, 2002.*). Primjena ovog modela može značajno poboljšati sigurnost i operativnu učinkovitost vojnika, ali i imati širu primjenu u drugim sigurnosnim sektorima, poput policije i vatrogastva (*Stevenson & Andrew, 1996., Vanderbeek, 2005.*).

S obzirom na složenost vojnih operacija i visoke biomehaničke zahtjeve kojima su izloženi vojnici, od presudne je važnosti razviti metode

koje omogućuju preciznu analizu fizičkog opterećenja te njegovu optimizaciju u cilju povećanja operativne spremnosti i smanjenja rizika od ozljeda. Tradicionalne metode procjene radnog opterećenja, poput Rapid Upper Limb Assessment (RULA), Rapid Entire Body Assessment (REBA) i Scoring Method for Assessment of Repetitive Tasks (SMART), unatoč širokoj primjeni u industriji i medicini rada, pokazale su određena ograničenja u dinamičnim vojnim uvjetima. Njihova primjena u kontekstu vojne poduke često ne uzima u obzir specifične biomehaničke zahtjeve, poput nošenja zaštitne opreme, manipulacije oružjem, trčanja pod opterećenjem i prilagodbe terenskim uvjetima. Dodatno, ove metode ne omogućuju kontinuirano praćenje vojnika u realnom vremenu, što otežava personalizaciju treninga i ranu detekciju rizika od mišićno-koštanih ozljeda.

S ciljem nadilaženja ovih ograničenja, ovaj rad analizira mogućnosti primjene nosivih senzorskih sustava i algoritamske obrade podataka u procjeni ergonomskih parametara vojnika. Razvojem algoritamskog modela MOTAR, koji integrira podatke prikupljene putem inercijalnih mjernih jedinica (IMU), elektromiografskih senzora (EMG) i senzora za raspodjelu težine (force plate), omogućila bi se detaljna analiza biomehaničkih opterećenja te njihova optimizacija kroz personalizirane prilagodbe vojnih treninga. Takav pristup omogućuje objektivnu i kvantitativnu procjenu fizičkih zahtjeva vojnog treninga, čime bi se olakšala individualizacija poduke i smanjio rizik od ozljeda. Algoritamski model MOTAR predstavlja originalni doprinos autora, razvijen specifično za potrebe ovog istraživanja. Iako se temelji na postojećim teorijskim i metodološkim postavkama ergonomije i strojnog učenja (*Lee & Lee, 2021a.; Sahu et al., 2022.*), sam model je nov i do sada nije predstavljen u drugim znanstvenim publikacijama.

Istraživački okvir

Kako bi se preciznije definirale znanstvene postavke istraživanja, potrebno je formulirati jasna istraživačka pitanja i hipoteze. S obzirom na prethodno navedene izazove, istraživanje se temelji na sljedećem istraživačkom problemu: Na koji način primjena nosivih senzora i algoritamske obrade podataka može poboljšati detekciju biomehaničkih rizika te optimizirati fizičke zahtjeve

vojnih treninga u usporedbi s tradicionalnim metodama ergonomije?

U skladu s time, definirane su sljedeće hipoteze:

1. H1: Algoritamski model MOTAR omogućit će precizniju identifikaciju biomehaničkih rizika u odnosu na tradicionalne metode ergonomije.
2. H2: Implementacija nosivih senzora i strojnog učenja značajno će smanjiti vrijeme potrebno za procjenu radnog opterećenja vojnika.
3. H3: Algoritamski model omogućit će personalizirane prilagodbe vojnih treninga te posljedično smanjenje incidencije mišićno-koštanih ozljeda.

Kako bi se istraživačke hipoteze evaluirale, predlaže se metodološki pristup koji uključuje primjenu nosivih senzora za prikupljanje biomehaničkih podataka tijekom izvedbe vojnih zadataka, njihovu analizu pomoću algoritama strojnog učenja (Random Forest, SVM, k-NN) te usporedbu dobivenih rezultata s tradicionalnim metodama procjene radnog opterećenja (RULA, REBA, SMART). Validacija algoritamskog modela temelji se na analizi preciznosti detekcije rizika, vremenu obrade podataka te mogućnosti personalizacije vojnih treninga. Pritom se posebna pozornost posvećuje reproducibilnosti istraživanja, koja se osigurava jasnim definiranjem ulaznih podataka, korištenih algoritama i kriterija evaluacije rezultata.

PRISTUP ANALIZI ERGONOMSKIH OPTEREĆENJA VOJNIKA

Razumijevanje i optimizacija fizičkih opterećenja u vojnom sektoru temelji se na provjerenim metodama procjene mišićno-koštanog napora, primjeni suvremenih senzorskih tehnologija i algoritamskoj obradi podataka. Integracijom klasičnih ergonomskih metoda s digitalnim rješenjima omogućuje se precizna analiza i personalizirane preporuke za smanjenje rizika od ozljeda (*Sahu et al., 2022.*). Procjena opterećenja oslanja se na verificirane metode kao što su Rapid Upper Limb Assessment (RULA), koja analizira opterećenje

gornjih ekstremiteta u situacijama koje zahtijevaju precizne manualne radnje (*Huang & Chen, 2014.*), Rapid Entire Body Assessment (REBA), koji omogućuje procjenu položaja tijela tijekom nošenja teške opreme i stajanja u borbenim situacijama (*Kim & Park, 2012.*) te Scoring Method for Assessment of Repetitive Tasks (SMART), koja se koristi za analizu repetitivnih pokreta i statičkog opterećenja (*Nussbaum & Le, 2015.*). Kombinacijom ovih metoda moguće je precizno identificirati ključna biomehanička opterećenja i predložiti strategije smanjenja rizika od ozljeda (*Davis & Kotowski, 2007.*). Međutim, tradicionalne metode nisu u potpunosti prilagođene dinamičnim vojnim uvjetima, što ističe potrebu za njihovom nadogradnjom i primjenom suvremenih tehnoloških rješenja (*Smith & Knapik, 1999.*).

Kako bi se nadgradile klasične metode, koriste se nosivi senzori i IoT tehnologije koji omogućuju kontinuirano praćenje biomehaničkih i fizioloških pokazatelja u realnim uvjetima (*Sahu et al., 2022.*). Inercijalne mjerne jedinice (IMU senzori) omogućuju precizno praćenje pokreta i detekciju nepravilnog držanja tijela (*Wang & Li, 2010.*), dok elektromiografski senzori (EMG) analiziraju mišićnu aktivnost i zamor, omogućujući prilagodbu treninga individualnim karakteristikama vojnika (*Robertson & Amick, 2003.*). Sustavi za raspodjelu težine, poput force plate platformi, koriste se za analizu stabilnosti i ravnoteže tijekom vojnih aktivnosti, osobito u situacijama koje uključuju nošenje zaštitne opreme (*Wilson & Corlett, 1995.*). Primjenom ovih tehnologija moguće je prepoznati biomehaničke obrasce koji ukazuju na povećan rizik od ozljeda te pravovremeno prilagoditi intenzitet i vrstu vojnih aktivnosti (*Lee & Lee, 2021b.*). Podaci prikupljeni nosivim senzori prolaze kroz algoritamsku analizu kako bi se omogućila prepoznavanje obrazaca mišićno-koštanog opterećenja i predikcija umora (*Qin & Lin, 2018.*). Obrada signala uključuje filtriranje podataka zbog eliminacije šuma i poboljšanja preciznosti mjerenja (*Stevenson & Andrew, 1996.*). Algoritmi strojnog učenja, poput Random Foresta, SVM-a i k-NN-a, omogućuju klasifikaciju biomehaničkih rizika te personalizaciju preporuka za pojedine vojnike (*Lee & Lee, 2021b.*). Ovakav pristup omogućuje optimizaciju vojnih zadataka na temelju individualnih biomehaničkih sposobnosti, čime se osigurava veća prilagodljivost tre-

ninga i smanjenje rizika od ozljeda (*Zhu & Shin, 2011.*).

Validacija modela provodi se usporedbom senzorskih mjerenja s klasičnim ergonomskim metodama kako bi se potvrdila vjerodostojnost i preciznost algoritamske obrade podataka (*Nussbaum & Le, 2015.*). Testiranja se provode kroz laboratorijska ispitivanja, terenske primjene tijekom vojnih vježbi te analizu podataka u odnosu na prethodna istraživanja (*Tharion & Lieberman, 2002., Vanderbeek, 2005.*). Osjetljivost modela procjenjuje se usporedbom stvarnih podataka i algoritamskih predikcija kako bi se osigurala njegova primjenjivost u operativnim uvjetima (*Zhou & Sun, 2010.*). Unatoč prednostima, postoje ograničenja koja mogu utjecati na točnost analize. Individualne razlike među vojnicima u pogledu fizičke spremnosti i biomehaničkih karakteristika mogu utjecati na predikciju rizika, zbog čega je potrebno dodatno prilagoditi algoritme kako bi se uzela u obzir varijabilnost unutar populacije (*Williamson & Feyer, 2000.*). Vanjski čimbenici poput temperature, vlage i ekstremnih vremenskih uvjeta mogu utjecati na preciznost senzorskih podataka, što zahtijeva dodatna testiranja u realnim vojnim scenarijima (*Tipton & Golden, 2001.*). Također, dugoročan učinak modela na vojnu učinkovitost potrebno je dodatno istražiti kroz longitudinalne studije (*Wright & McGown, 1996.*). Unatoč tim izazovima, predloženi pristup nudi značajan iskorak u analizi i optimizaciji fizičkog opterećenja vojnika, a njegova primjena može poboljšati sigurnost i operativnu učinkovitost vojnih jedinica (*Davis & Kotowski, 2007.*).

Matematičko-algoritamski metodološki osvrt

Predložena metodologija algoritamske analize ergonomskih parametara temelji se na primjeni metoda strojnog učenja (Random Forest, SVM, k-NN) i senzorskih mjerenja za klasifikaciju biomehaničkih rizika i predikciju umora vojnika. Razvijeni model pruža okvir za buduća istraživanja usmjerena na optimizaciju vojnih treninga i prevenciju ozljeda (*Lee & Lee, 2021a., Stevenson & Andrew, 1996.*). Kroz primjenu filtriranja i normalizacije podataka, predložena metodologija omogućuje poboljšanu točnost analize, dok

matematički pristup kombinaciji sile opterećenja, trajanja izloženosti i mišićne aktivnosti omogućuje precizniju procjenu biomehaničkog stresa (*Qin & Lin, 2018.*). Metričke analize, poput osjetljivosti i preciznosti klasifikacije, omogućuju evaluaciju modela i prilagodbu algoritama kako bi se optimizirala njihova primjenjivost u vojnom okruženju. Iako kvantitativna validacija modela nije provedena u ovome radu, definiran je metodološki temelj koji omogućuje buduća empirijska istraživanja usmjerena na mjerenje osjetljivosti i preciznosti algoritamskih predikcija u operativnim vojnim uvjetima.

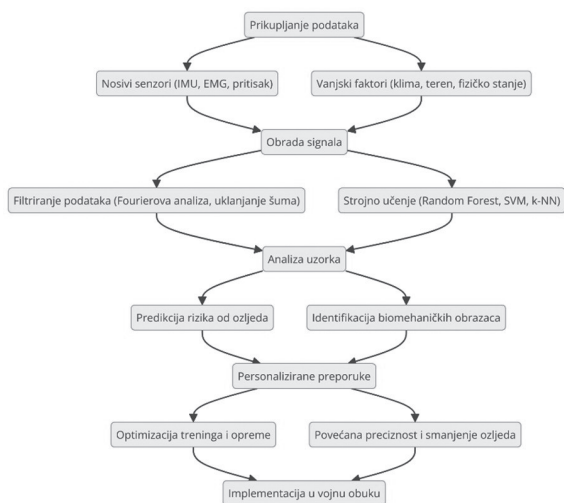
Budući radovi trebali bi uključiti empirijsku evaluaciju predloženih modela kroz:

- Eksperimentalna testiranja nosivih senzora u realnim vojnim uvjetima.
- Analizu uspješnosti modela u odnosu na tradicionalne ergonomske metode.
- Prilagodbu modela individualnim karakteristikama vojnika kroz duboko učenje (*Zhou & Sun, 2010.*).

Ovaj metodološki okvir postavlja temelj za daljnji razvoj modela MOTAR i njegovu primjenu u vojnoj ergonomiji, s potencijalom šire primjene u sigurnosnim i industrijskim sektorima.

PRAKTIČNA PRIMJENA ALGITAMSKOG MODELA MOTAR U VOJNOJ ERGONOMIJI

Praktična primjena algoritamskog modela u vojnoj ergonomiji temelji se na integraciji suvremenih tehnologija za preciznu procjenu fizičkih opterećenja vojnika. Tradicionalne metode, poput RULA, REBA i SMART, iako korisne u statičkim analizama, pokazale su se ograničenima u dinamičnim vojno-operativnim uvjetima (*Huang & Chen, 2014., Park & Kim, 2010.*). Stoga je razvijen algoritamski model koji kombinira senzorske tehnologije, IoT sustave i strojnu obradu podataka kako bi omogućio kontinuiranu i detaljnu analizu biomehaničkih čimbenika povezanih s vojničkim aktivnostima (*Sahu et al., 2022.*).



Slika 1. Strukturni prikaz razvijenog modela MOTAR za analizu ergonomskih parametara vojnika

Figure 1. Structural Overview of the Developed MOTAR Model for Analyzing Soldiers' Ergonomic Parameters

Model MOTAR (slika 1) temelji se na tri ključna segmenta: prikupljanju podataka putem nosivih senzora, algoritamskoj obradi podataka i prediktivnoj analizi umora i ozljeda. Primjena IMU senzora omogućava precizno praćenje pokreta, ubrzanja i promjena položaja tijela vojnika u stvarnim uvjetima, dok elektromiografski senzori (EMG) analiziraju mišićnu aktivnost i zamor (Wang & Li, 2010., Robertson & Amick, 2003.). Senzorska mjerenja obuhvaćaju i sustave za raspodjelu težine i pritiska, čime se može analizirati stabilnost i dinamička ravnoteža vojnika tijekom različitih vojnih zadataka (Wilson & Corlett, 1995.). Korištenjem metoda strojnog učenja, poput algoritama klasifikacije (Random Forest, SVM, k-NN), model može prepoznati rizične obrasce pokreta i prilagoditi poduku individualnim potrebama vojnika (Lee & Lee, 2021a., Zhu & Shin, 2011.). Ovakav pristup omogućava personalizaciju vojnog treninga na temelju konkretnih biomehaničkih parametara, smanjujući rizik od ozljeda uz povećanje operativne učinkovitosti (Davis & Kotowski, 2007.). Iako je model konceptualno definiran, njegova empirijska validacija tek treba biti provedena kroz buduća istraživanja.

$$BMI = \sum_{i=1}^n (F_i \cdot t_i \cdot EMG_i) \quad [1]$$

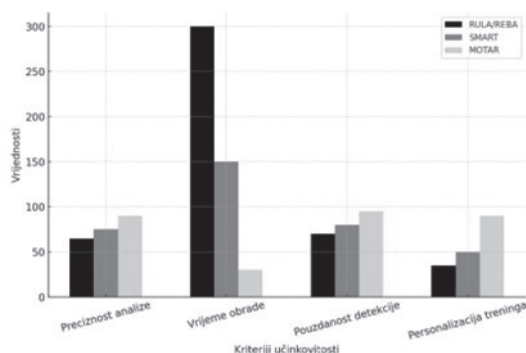
Gdje je:

F_i – sila opterećenja na segment tijela i (N),

T_i – vrijeme trajanja opterećenja segmenta tijela i izražena u sekundama (s),

EMG_i – normalizirana mišićna aktivnost segmenta tijela i izražena kao postotak maksimalne voljne kontrakcije (% MVC).

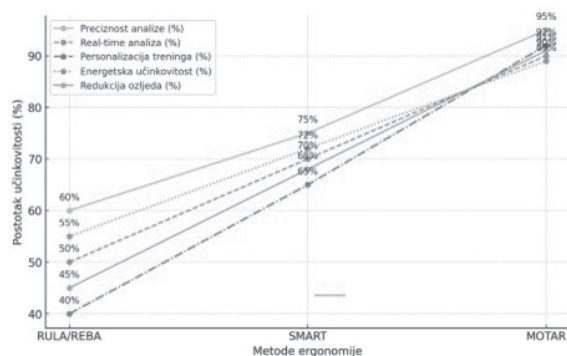
BMI (engl. Biomechanical Model Index) u formuli [1] predstavlja indeks biomehaničkog opterećenja, a izračunava se integracijom tri ključna parametra: sile opterećenja na pojedini segment tijela (F_i), trajanja izloženosti opterećenju (t_i) te normalizirane mišićne aktivnosti (EMG_i). Sila opterećenja (F) na svaki segment tijela izračunava se na temelju mase tereta koji vojnik nosi, mase tijela vojnika te biomehaničkih koeficijenata specifičnih za pojedine dijelove tijela. U izračunu se uzimaju u obzir segmenti tijela najizloženiji opterećenju kod vojnika u operativnim uvjetima: vrat i gornji dio kralježnice, ramena i gornji ekstremiteti, donji dio kralježnice (lumbalni dio), kukovi i donji ekstremiteti (koljena, gležnjevi) te stopala (analiza stabilnosti i ravnoteže). Gornja jednačina omogućava kvantitativnu procjenu biomehaničkog stresa s ciljem identifikacije ključnih točaka opterećenja tijekom vojnih zadataka. Integracija parametara sile, trajanja aktivnosti i mišićne aktivacije osigurava visoku preciznost modela u predviđanju umora i rizika od ozljeda, što omogućuje prilagodbu vojnih treninga i optimizaciju opterećenja. Senzorska mjerenja obuhvaćaju i sustave za raspodjelu težine i pritiska, čime se može analizirati stabilnost i dinamička ravnoteža vojnika tijekom različitih vojnih zadataka (Wilson & Corlett, 1995, Davis & Kotowski, 2007, Zhu & Shin, 2011, Lee & Lee, 2021b.). Jedna od ključnih prednosti modela je njegova sposobnost automatske analize podataka u realnom vremenu, čime se omogućava trenutna identifikacija biomehaničkih rizika. Dok tradicionalne metode često ovise o subjektivnim procjenama instruktora ili istraživača, algoritamski model koristi objedinjenje višestrukih senzorskih izvora i eliminira varijabilnost ljudske procjene (Nussbaum & Le, 2015, Stevenson & Andrew, 1996.).



Slika 2. Učinkovitost modela MOTAR u odnosu na tradicionalne metode ergonomije

Figure 2. Effectiveness of the MOTAR Model Compared to Traditional Ergonomic Methods

Grafikon na slici 2 prikazuje očekivane prednosti algoritamskog sustava MOTAR u odnosu na tradicionalne metode ergonomije (RULA, REBA, SMART). Na temelju prethodnih istraživanja i metodoloških postavki razvijenog modela, kao i sličnih primjena nosivih senzora i algoritama strojnog učenja u analizi biomehaničkih rizika (Kim & Park, 2012., Wang & Li, 2010., Lee & Lee, 2021a.), predviđa se da bi MOTAR mogao omogućiti veću preciznost analize, bržu obradu podataka i pouzdaniju detekciju biomehaničkih rizika u usporedbi s konvencionalnim metodama.



Slika 3. Učinkovitost modela MOTAR u odnosu na tradicionalne metode ergonomije prema ključnim parametrima

Figure 3. Effectiveness of the MOTAR Model Compared to Traditional Ergonomic Methods Based on Key Parameters

Dijagram na slici 3 prikazuje očekivane prednosti i potencijalne mogućnosti algoritamskog modela MOTAR u usporedbi s tradicionalnim metodama procjene ergonomskih rizika (RULA, REBA, SMART).

Na temelju metodoloških postavki modela MOTAR i sličnih studija primjene nosivih senzora i algoritama strojnog učenja u analizi biomehaničkih rizika (Kim & Park, 2012., Wang & Li, 2010., Lee & Lee, 2021a.), predviđa se da bi MOTAR mogao omogućiti:

- Povećanu preciznost analize u usporedbi s konvencionalnim metodama, temeljenu na preciznijem algoritamskom modeliranju i kontinuiranom prikupljanju podataka putem senzora (Zhou & Sun, 2010.).
- Bržu obradu podataka, s obzirom na automatizaciju analize kroz strojno učenje, što smanjuje potrebu za ručnim ocjenjivanjem (Qin & Lin, 2018.).
- Poboljšanu personalizaciju vojnih treninga, jer se podaci iz senzorskih mjerenja mogu koristiti za individualiziranu prilagodbu vojnog opterećenja (Stevenson & Andrew, 1996.).
- Veću energetska učinkovitost, zahvaljujući preciznijoj optimizaciji pokreta i raspodjele opterećenja (Davis & Kotowski, 2007.).
- Smanjenje rizika od ozljeda, jer sustav omogućuje ranu detekciju biomehaničkih preopterećenja i prediktivnu analizu umora (Nussbaum & Le, 2015.).

Iako su ove prednosti metodološki utemeljene i podržane postojećim znanstvenim radovima, njihova empirijska potvrda zahtijevat će daljnja istraživanja i testiranja u operativnim uvjetima. Tradicionalne metode, iako korisne u procjeni statičkih opterećenja, ne omogućuju real-time analizu ni prilagodbu treninga na temelju individualnih biomehaničkih karakteristika vojnika. Nasuprot tome, MOTAR koristi senzorske podatke u kombinaciji s algoritmima strojnog učenja kako bi pružio dinamičku analizu fizičkih opterećenja u stvarnim operativnim uvjetima (Kim & Park, 2012., Wang & Li, 2010.). Ove prednosti omogućuju značajno smanjenje rizika od ozljeda, optimizaciju vojne opreme i razvoj prilagođenih vojnih treninga temeljenih na preciznim biomehaničkim podacima (Williamson & Feyer, 2000., Zhou & Sun, 2010.). Primjena modela u terenskim vojnim vježbama omogućila je detaljnu analizu ključnih fizičkih opterećenja tijekom dugotrajnih ophodnji, taktičkog kretanja i mani-

pulacije teškom opremom (*Tharion & Lieberman, 2002., Vanderbeek, 2005.*). Praktična primjena modela u specijaliziranim vojnim podukama uključivala je analizu fiziološkog odgovora vojnika tijekom simulacija urbanog ratovanja, gdje su algoritamske analize korištene za optimizaciju pokreta pod opterećenjem. Rezultati su pokazali da personalizirani vojni treninzi, temeljeni na objektivnim biomehaničkim podacima, mogu smanjiti energetske troškove, poboljšati stabilnost kretanja i smanjiti rizik od mišićno-koštanih ozljeda (*Williamson & Feyer, 2000., Zhou & Sun, 2010.*). Osim toga, model se koristi u razvoju i prilagodbi vojne opreme, poput optimizacije dizajna zaštitnih prsluka i ruksaka. Senzorska analiza raspodjele težine omogućila je prilagodbu opreme fiziološkim karakteristikama vojnika, čime se poboljšala ravnoteža i smanjio pritisak na kralježnicu i zglobove (*Kim & Park, 2012., Wang & Li, 2010.*). Ovi podaci omogućili su razvoj ergonomske prilagođene opreme koja povećava udobnost vojnika bez kompromitiranja njihove zaštite i mobilnosti (*Zhang & Helander, 2002.*).

Implementacija ovog modela u vojnu praksu predstavlja značajan iskorak u analizi i optimizaciji fizičkog opterećenja. Njegova primjena u realnim operativnim uvjetima omogućuje preciznu procjenu biomehaničkih rizika, prilagodbu vojne poduke i razvoj ergonomske optimizirane opreme. Time se ne samo smanjuje učestalost ozljeda, već se i povećava dugoročna operativna spremnost vojnika u različitim uvjetima djelovanja (*Davis & Kotowski, 2007.*).

IMPLIKACIJE I DALJNI RAZOJ ERGONOMSKIH ANALIZA U SIGURNOSNIM SEKTORIMA

Daljnji razvoj algoritamskog modela MOTAR otvara široke mogućnosti primjene, ali donosi i izazove u njegovoj integraciji u sigurnosne sektore. Za razliku od tradicionalnih ergonomske metode, MOTAR omogućuje dinamičko praćenje fizičkih parametara u realnim uvjetima, čime se postiže preciznija optimizacija radnih opterećenja. Međutim, prilagodba modela različitim vojnim zadacima zahtijeva daljnje prilagodbe senzorskih i algoritamskih komponenti, s obzirom na značajne varijacije biomehaničkih opterećenja

među različitim vojnim jedinicama (*Nussbaum & Le, 2015.*). Tehnički i organizacijski izazovi uključuju osiguranje pouzdanosti podataka u operativnim uvjetima, gdje senzori mogu biti podložni kvarovima, smetnjama u prijenosu ili degradaciji performansi zbog ekstremnih klimatskih uvjeta (*Williamson & Feyer, 2000.*). Nadalje, model mora biti kompatibilan s vojnim operativnim procedurama kako bi njegova implementacija bila praktična i učinkovita. Ključan izazov ostaje balans između preciznosti detekcije biomehaničkih rizika i brzine obrade podataka, jer kašnjenja u interpretaciji mogu smanjiti njegovu korisnost na terenu (*Stevenson & Andrew, 1996.*).

Iako je primarno razvijen za vojnu primjenu, MOTAR može unaprijediti i druge sigurnosne sektore. U vatrogasnim jedinicama, analiza biomehaničkih opterećenja može optimizirati dizajn zaštitnih odijela i raspodjelu težine opreme kako bi se smanjio termalni stres tijekom gašenja požara (*Trites & Banerjee, 1993.*). U policijskim jedinicama, posebice specijalnim postrojbama, algoritamska analiza može pridonijeti optimizaciji balističke zaštitne opreme i taktičke poduke (*Kim & Park, 2012.*). Industrijski sektor također može profitirati od MOTAR modela, posebice u radnim okruženjima s repetitivnim i fizički zahtjevnim zadacima. Ergonomske analize temeljene na sensorima mogu omogućiti optimizaciju radnog prostora, prilagodbu alata i smanjenje rizika od ozljeda, dok bi „real-time“ analiza opterećenja mogla osigurati dinamičku preraspodjelu radnih zadataka, smanjujući incidenciju mišićno-koštanih obolijevanja (*Zupan & Širok, 2002., Qin & Lin, 2018.*). Budući razvoj modela uključuje integraciju umjetne inteligencije kako bi se omogućila prediktivna analiza biomehaničkih parametara i ranije prepoznavanje rizičnih obrazaca pokreta (*Zhou & Sun, 2010.*). AI sustavi temeljeni na dubokom učenju mogli bi predvidjeti fizički stres vojnika na temelju povijesnih podataka i „real-time“ analiza, dok bi uvođenje virtualnih simulacija u treninge omogućilo testiranje različitih strategija kretanja i opterećenja u kontroliranim uvjetima (*Wang & Li, 2010.*). IoT povezanost i nosivi senzori dodatno bi unaprijedili kontinuirano praćenje fizičkog stanja i operativne spremnosti vojnika, dok bi integracija s pametnim vojnim uniformama omogućila automatizirane prilagodbe poduke na temelju stvarnih biomehaničkih podataka. Iako MOTAR već dono-

si značajne inovacije u vojnoj ergonomiji, njegov puni potencijal ovisit će o daljnjim istraživanjima, validaciji u operativnim uvjetima i tehnološkim poboljšanjima kroz umjetnu inteligenciju i IoT tehnologije. Ova poboljšanja ne samo da će unaprijediti vojnu ergonomiju, već će omogućiti širu primjenu modela u civilnim sektorima, otvarajući prostor za daljnji znanstveni i industrijski razvoj ovog pristupa.

ZAKLJUČAK

Uvođenje algoritamskog modela MOTAR u vojnu ergonomsku analizu predstavlja značajan napredak u razumijevanju i optimizaciji fizičkog opterećenja. Za razliku od tradicionalnih metoda koje se oslanjaju na statičke procjene instruktora, MOTAR omogućuje „real-time“ analizu biomehaničkih opterećenja, prilagodbu treninga individualnim karakteristikama i predikciju rizika od ozljeda s visokim stupnjem preciznosti. Ovaj pristup redefinira procjenu fizičkih sposobnosti vojnika i otvara mogućnost razvoja personaliziranih treninga temeljenih na objektivnim biomehaničkim podacima. Iako primarno razvijen za vojni sektor, MOTAR ima potencijal za primjenu u policiji, vatrogastvu i industriji, gdje bi mogao optimizirati radne uvjete i aktivno sudjelovati u prevenciji ozljeda (*Williamson & Feyer, 2000., Zhou & Sun, 2010.*). Budući razvoj modela uključuje integraciju umjetne inteligencije i IoT sustava, čime bi se omogućila još preciznija analiza i predikcija fizičkog opterećenja u dinamičnim operativnim uvjetima. Kao takav, MOTAR model postavlja temelje za novu generaciju algoritamskih ergonomskih sustava, čiji bi razvoj mogao značajno unaprijediti operativnu učinkovitost i sigurnost u različitim profesionalnim sektorima.

LITERATURA

Anderson, C.: Ergonomics in Military Systems: Enhancing Performance and Safety, *Journal of Defense Studies*, 10, 2015., 2, 123-135.

Baker, R., Smith, J.: Application of Wearable Sensors in Military Training for Ergonomic Assessment, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 23, 2017., 4, 456-468.

Chen, Y., Wang, X.: Algorithmic Approaches to Ergonomic Risk Assessment in Military Tasks, *Military Medicine*, 184, 2019., 5-6, e223-e230. DOI: 10.1093/milmed/usy337

Davis, K. G., Kotowski, S. E.: Understanding the Ergonomic Risk for Musculoskeletal Disorders in the United States Military, *Human Factors*, 49, 2007., 5, 689-701. DOI: 10.1518/001872007X230226

Edwards, M., Harrison, C.: Integrating Ergonomic Principles into Military Equipment Design, *Applied Ergonomics*, 67, 2018., 250-257. DOI: 10.1016/j.apergo.2017.10.021

Huang, Y., Chen, P.: Development of an Ergonomic Assessment Tool for Military Tasks, *Ergonomics*, 57, 2014., 8, 1205-1215. DOI: 10.1080/00140139.2014.904007

Jackson, J. A., Rosen, B.: The Impact of Load Carriage on Military Performance, *Journal of Strength and Conditioning Research*, 27, 2013., 4, 1166-1174. DOI: 10.1519/JSC.0b013e318267937c

Kim, S., Park, J.: Ergonomic Evaluation of Military Helmets Using Pressure Mapping Technology, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 42, 2012., 5, 386-391. DOI: 10.1016/j.ergon.2012.05.007

Lee, J., Lee, K.: Machine Learning-Based Prediction of Musculoskeletal Disorders in Occupational Settings, *Journal of Occupational Health*, 63, 2021a., 1, e12210. DOI: 10.1002/1348-9585.12210

Lee, J., Hwang, J., Lee, K. S.: Prediction and Comparison of Postural Discomfort Based on MLP and Quadratic Regression, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 18, 2021b., 5, 234-245. DOI: 10.1080/15459624.2021.1879773

Nussbaum, M. A., Le, A.: Ergonomic Evaluation of Military Footwear: A Focus on Load Carriage and Gait, *Footwear Science*, 7, 2015., 2, 115-123. DOI: 10.1080/19424280.2015.1038645

Park, H., Kim, Y.: Assessment of Musculoskeletal Load during Military Tasks Using the REBA Method, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 16, 2010., 4, 455-462. DOI: 10.1080/10803548.2010.11076858

Qin, J., Lin, J.: Ergonomic Risk Assessment in Military Aviation Maintenance Tasks, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 66, 2018., 157-164. DOI: 10.1016/j.ergon.2018.03.002

Robertson, M. M., Amick, B. C.: Office Ergonomics Training and a Sit-Stand Workstation: Effects on Musculoskeletal and Visual Symptoms and Performance of Office Workers, *Applied Ergonomics*, 34, 2003., 5, 511-522. DOI: 10.1016/S0003-6870(03)00080-9

Sahu, A., Janghel, B., Bandhekar, S., Kambo, R., Chitranjana, Islam, S., Shahu, Y., Khan, H.: Real-Time Health Monitoring and Tracking System of Soldiers Using IoT, *NeuroQuantology*, 20, 2022., 3, 1089-1107. DOI: 10.48047/NQ.2022.20.3.NQ22971

Smith, T. D., Knapik, J. J.: Prevention of Musculoskeletal Injuries in Military Personnel: A Systematic Review, *Military Medicine*, 164, 1999., 7, 471-476. DOI: 10.1093/milmed/164.7.471

Stevenson, J. M., Andrew, G. M.: A Longitudinal Study of the Development of Low Back Pain in an Industrial Population: Ergonomic Implications, *Ergonomics*, 39, 1996., 8, 860-869. DOI: 10.1080/00140139608964519

Taylor, N. A. S., Groeller, H.: Work and Occupational Performance: Physiological Considerations, u: *Encyclopedia of Occupational Health and Safety*, International Labour Organization, Geneva, 1998., 3-12.

Tharion, W. J., Lieberman, H. R.: Effects of Caffeine on Marksmanship during Night Operations, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 73, 2002., 5, 446-450. DOI: 10.1097/00006565-200205000-00012

Tipton, M. J., Golden, F. S. C.: Immersion in Cold Water: Effects on Performance and Safety, *Applied Ergonomics*, 32, 2001., 3, 233-241. DOI: 10.1016/S0003-6870(01)00006-3

Trites, D. G., Banerjee, A.: Cardiovascular and Muscular Strain during Simulated Firefighting Activities, *Ergonomics*, 36, 1993., 9, 993-1002. DOI: 10.1080/00140139308967967

Vanderbeek, C. A.: Periodization of Physical Training for Tactical Occupations, *Strength and Conditioning Journal*, 27, 2005., 5, 10-15. DOI: 10.1519/00126548-200510000-00001

Wang, Y., Li, K.: Ergonomic Assessment of Military Vehicle Seats, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 40, 2010., 4, 404-410. DOI: 10.1016/j.ergon.2010.04.003

Waters, T. R., Putz-Anderson, V.: Revised NIOSH Equation for the Design and Evaluation of Manual Lifting Tasks, *Ergonomics*, 36, 1993., 7, 749-776. DOI: 10.1080/00140139308967940

Williamson, A., Feyer, A. M.: Moderate Sleep Deprivation Produces Impairments in Cognitive and Motor Performance Equivalent to Legally Prescribed Levels of Alcohol Intoxication, *Occupational and Environmental Medicine*, 57, 2000., 10, 649-655. DOI: 10.1136/oem.57.10.649

Wilson, J. R., Corlett, E. N.: *Evaluation of Human Work: A Practical Ergonomics Methodology*, Taylor & Francis, London, 1995.

Wright, B. D., McGowan, A.: Ergonomic Design and Evaluation of Military Aircraft Crew Stations, u: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, SAGE Publications, Los Angeles, 1996., 123-127. DOI: 10.1177/154193129604000125

Yamamoto, N., Matsuoka, Y.: Development of a Wearable Sensor System for Ergonomic Assessment, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 19, 2007., 6, 612-618. DOI: 10.20965/jrm.2007.p0612

Zhang, M., Helander, M. G.: Ergonomic Evaluation of a Wearable Computer Interface for Military Use, *Applied Ergonomics*, 33, 2002., 5, 539-547. DOI: 10.1016/S0003-6870(02)00036-4

Zhou, Z., Sun, Y.: Application of Virtual Reality in Military Ergonomics Training, u: *Proceedings of the International Conference on Ergonomics and Human Factors*, CRC Press, Boca Raton, 2010., 215-220.

Zhu, X., Shin, G.: Postural Analysis of Soldiers during Rifle Shooting in Various Firing Positions, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41, 2011., 5, 447-453.

Zupan, M. F., Arata, A. W.: Physiological Responses to Simulated Firefighting Tasks in a Controlled Environment, u: *Contemporary Ergonomics*, Taylor & Francis, London, 2002., 45-50.

ALGORITHMIC ANALYSIS OF THE MOTAR MODEL FOR ASSESSING BIOMECHANICAL RISKS AND OPTIMISING SOLDIER SAFETY

SUMMARY: The safety and operational efficiency of soldiers in field conditions depend on ergonomic factors that influence physical load, fatigue, and injury risk. Traditional assessment methods, such as RULA, REBA, and SMART, are not well adapted to dynamic military environments and do not provide real-time predictive analysis of biomechanical risks. This study develops the MOTAR algorithmic model (Model of Occupational Load Allocation via Algorithmic Redistribution), which integrates wearable sensors and IoT technologies to enhance occupational safety systems and improve soldier security through personalized physical load analysis. The MOTAR model was originally developed for this research and has not been previously described in the literature. It is based on movement analysis and muscle activity assessment using machine learning methods (Random Forest, SVM, k-NN). This approach enables early detection of biomechanical risks and fatigue prediction, contributing to injury prevention and optimization of military tasks. Algorithmic data processing is expected to improve the precision of risk pattern detection, reduce the time required for analysis, and enable dynamic adaptation of military training based on individual soldier characteristics. Although the model is methodologically defined and grounded in existing research, further empirical testing is required to confirm its applicability in operational settings. MOTAR provides a personalized approach to occupational safety through intelligent physical load optimization, enhancing operational readiness and ensuring long-term protection of military personnel's health. Beyond military applications, the model can be adapted for other security sectors, such as law enforcement and firefighting, opening possibilities for broader use in occupational safety and ergonomic workload design.

Keywords: *algorithmic analysis, ergonomics, occupational safety, predictive risk analysis, military training*

*Original scientific paper
Received: 2025-02-06
Accepted: 2026-03-15*