

# Mogućnosti primjene ergonomskih metoda u konceptu Industrije 5.0

---

**Salopek, Krešimir**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:006765>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-04**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

**Krešimir Salopek**

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk

Student:

Krešimir Salopek

Zagreb, 2024.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Tihomiru Opetuku, na povjerenju, susretljivosti i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Hvala mojim prijateljima na svim lijepim trenucima te mojoj obitelji na svojoj podršci i ljubavi tijekom studiranja.

Krešimir Salopek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,  
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Krešimir Salopek** JMBAG: 0035216673

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mogućnosti primjene ergonomskih metoda u konceptu Industrije 5.0**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Possibilities of applying ergonomic methods in the Industry 5.0 concept**

Opis zadatka:

Ergonomija kao znanstvena disciplina, koja stavlja čovjeka u središte predstavlja važan element kod uvođenja Industrije 5.0 u poduzeća. S druge strane, Industrija 5.0 predstavlja koncept poslovanja proizvodnih kompanija usmjeren na humanocentričnost, otpornost i održivost. Da bi se ergonomija provela na optimalan način primjenjuju se ergonomske metode. Cilj ergonomskih metoda je omogućiti povoljno i sigurno radno okruženje čovjeku prilikom obavljanja radnih zadataka koji iziskuju interakciju sa strojevima ili okolinom.

U radu je potrebno:

- Dati pregled područja Ergonomije i Industrije 5.0.
- Dati pregled i opisati način korištenja ergonomskih metoda koje se koriste unutar koncepta Industrije 5.0.
- Za odabrane studije slučaja prikazati primjenu ergonomskih metoda unutar koncepta Industrije 5.0. Odabrane studije slučaja moraju sadržavati analizu opterećenja čovjeka prilikom interakcije sa strojevima i robotima.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

26. rujna 2024.

Zadatak zadao:

Izv. prof. dr. sc. Tihomir Opetuk

Datum predaje rada:

28. studeni 2024.

Predvideni datumi obrane:

5., 6. i 9. prosinca 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY .....	VIII
1. UVOD.....	1
2. ERGONOMIJA .....	2
2.1. Definicija ergonomije .....	2
2.2. Povijesni razvoj ergonomije.....	2
2.3. Važnost ergonomije u suvremenom društvu.....	3
2.4. Podjela ergonomije .....	4
2.5. Vrste ergonomije.....	5
2.6. Ergonomski principi i teorije .....	6
2.6.1. Antropometrija.....	6
2.6.2. Biomehanika .....	7
2.6.3. Fiziološki aspekti ergonomije .....	7
2.7. Ergonomske metode.....	7
2.7.1. Metode procjene radnog mjesta .....	8
2.7.2. Metode procjene opterećenja .....	8
2.7.3. Kognitivne metode.....	13
2.8. Primjena ergonomskih metoda.....	14
2.8.1. Primjeri iz industrije .....	14
2.8.2. Primjeri iz zdravstvenog sektora.....	14
2.8.3. Primjeri iz uredskog okruženja .....	15
2.9. Prednosti i izazovi ergonomije.....	15
3. INDUSTRIJA 5.0 .....	16
3.1. Razvoj od Industrije 4.0 prema industriji 5.0.....	16
3.2. Ključne značajke industrije 5.0.....	17
3.3. Tehnološke inovacije i njihov utjecaj na radne uvjete.....	18
4. ERGONOMSKE METODE U INDUSTRIJI 5.0 .....	19
4.1. Pregled ergonomskih metoda primjenjivih u Industriji 5.0 .....	19
4.2. Primjena ergonomije u kontekstu Industrije 5.0 .....	19
4.3. Uloga tehnologije u primjeni ergonomskih metoda.....	20

5. STUDIJA SLUČAJA: TRANSFORMACIJA RADNE STANICE UZ PRIMJENU KOLABORATIVNIH ROBOTA I ERGONOMSKIH METODA.....	22
5.1. Uvod u studiju slučaja.....	22
5.2. Materijali i metode.....	22
5.2.1. Analiza trenutnog stanja u pogledu fizičke ergonomije.....	23
5.2.2. Evaluacija potencijala za primjenu kolaborativne robotike.....	24
5.2.3. Redizajn radne stanice za unapređenje fizičke ergonomije i učinkovitosti proizvodnje.....	27
5.3. Opis studije slučaja.....	28
5.4. Rezultati.....	30
5.4.1. Analiza trenutačne situacije u smislu fizičke ergonomije.....	30
5.4.2. Rezultati OCRA analize.....	31
5.4.3. Rezultati RULA analize.....	32
5.4.4. Procjena potencijala za kolaborativnu robotiku.....	34
5.4.5. Redizajn radne stanice za poboljšanje fizičke ergonomije i proizvodne učinkovitosti.....	34
5.4.5.1. Mogućnosti ergonomskih poboljšanja.....	35
5.4.6. Procjena kolaborativne radne stanice.....	37
5.4.6.1. Poboljšanja u rukovanju.....	37
5.4.6.2. Poboljšanja u radnim položajima.....	39
5.4.6.3. Poboljšanja u proizvodnoj učinkovitosti.....	42
5.5. Zaključak studije.....	42
5.5.1. Ključni rezultati.....	43
5.5.2. Mogućnosti za poboljšanja i buduća istraživanja.....	43
6. STUDIJA SLUČAJA: FIZIČKO ERGONOMSKO POBOLJŠANJE I SIGURAN DIZAJN RADNE STANICE ZA MONTAŽU KROZ KOLABORATIVNU ROBOTIKU	44
6.1. Uvod u studiju slučaja.....	44
6.2. Materijali i metode.....	44
6.2.1. Karakterizacija početnog stanja.....	46
6.2.2. Procjena rizika.....	46
6.2.3. Definicija zahtjeva.....	47
6.2.4. Razvoj koncepta za hibridnu radnu stanicu.....	47
6.3. Rezultati.....	49
6.3.1. Karakterizacija prvotnog stanja i procjene rizika.....	49
6.3.2. Ergonomski zahtjevi.....	50
6.3.3. Razvoj koncepta hibridne radne stanice.....	56
6.4. Zaključak studije.....	57

---

7. STUDIJA SLUČAJA: INTERAKCIJA ČOVJEKA I ROBOTA ZA POBOLJŠANJE ZADATAKA MONTAŽE TRUPA ZRAKOPLOVA .....	58
7.1. Uvod u studiju slučaja.....	58
7.2. Interakcija čovjek-robot i regulatorni okviri .....	58
7.2.1. Metodologija .....	60
7.3. Opis studije slučaja .....	61
7.3.1. Operacije montaže: Prije i poslije implementacije HRC .....	61
7.3.2. Specifičnosti uvođenja robota .....	63
7.3.3. Redosljed operacija i ograničenja .....	63
7.3.4. Modeliranje radnog okruženja za simulaciju .....	64
7.4. Rezultati .....	66
7.4.1. Analiza vremena rada čovjeka i robota u HRC konfiguraciji.....	66
7.4.2. Ergonomska procjena.....	69
7.5. Zaključak studije .....	71
8. ZAKLJUČAK.....	72
LITERATURA.....	73



## POPIS SLIKA

Slika 1.	Ergonomija radnog mjesta [2].....	2
Slika 2.	Therbligsi [1].....	3
Slika 3.	Primjena ergonomskih načela u suvremenom radnom okruženju [1].....	4
Slika 4.	Podjela ergonomije [1].....	4
Slika 5.	Položaj antropometrijskih izmjera pojedinih dijelova tijela za sjedeći položaj [1]	6
Slika 6.	Prikaz radnih položaja prema RULA metodi [1].....	10
Slika 7.	Prikaz radnih položaja tijela (trup, vrat, noge) prema REBA metodi [1].....	11
Slika 8.	Ocjena položaja udova prema OWAS metodi [1].....	12
Slika 9.	Prikaz anketnog upitnika prema NIOSH metodi [1].....	13
Slika 10.	Pravilno podešeno radno mjesto [5].....	15
Slika 11.	Industrijske revolucije kroz povijest [8].....	16
Slika 12.	Ključne značajke Industrije 5.0 [10].....	17
Slika 13.	Interakcija čovjeka i kolaborativnog robota [11].....	18
Slika 14.	Pregled ergonomskih metoda korištenih u Industriji 5.0 [12].....	19
Slika 15.	Korištenje AI u procjeni opterećenja [13].....	21
Slika 16.	Identifikacija neergonomskih zadataka koji bi se mogli poboljšati [14].....	24
Slika 17.	Klasifikacija mogućih rasporeda za kolaborativnu radnu stanicu [14].....	27
Slika 18.	Radna stanica za montažu kabela i svežnjeva u ELVEZ d.o.o. [14].....	28
Slika 19.	Raspored montažnih šablona i položaj kablova [14].....	29
Slika 20.	Prototip nove kolaborativne radne stanice: sprijeda (a), straga (b) [14].....	37
Slika 21.	Fotografije eksperimenata s novim ciklusom sklapanja [14].....	42
Slika 22.	Faze za siguran dizajn i razvoj [15].....	45
Slika 23.	Radni položaji za vrijeme radnog ciklusa montaže [15].....	46
Slika 24.	Vizualna analogna skala (VAS) [15].....	48
Slika 25.	Sudionik s pričvršćenih 11 inercijskih senzora [15].....	48
Slika 26.	Antropometrijski podaci ženske portugalske populacije [15].....	51
Slika 27.	Simulacija i RULA procjena [15].....	52
Slika 28.	Prototip hibridne radne stanice [15].....	53
Slika 29.	Sudionik simulira zadatke; odgovarajući XSens izlaz [15].....	54
Slika 30.	Koncept hibridne radne stanice [15].....	56
Slika 31.	Metodološka procedura za procjenu HRC [16].....	60
Slika 32.	(a) Detekcija ljudske ruke robotskim sensorima (b) trend brzine robota [16].....	63
Slika 33.	Dijagram toka za operacije iz Tablice 13 [16].....	64
Slika 34.	Oplata zrakoplova razmatrana u studiji slučaja [16].....	65
Slika 35.	Shematski prikaz radne stanice [16].....	65

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Popis najčešće korištenih ergonomskih metoda [1] .....	9
Tablica 2. Brza procjena ručne montaže kablenskog svežnja [14] .....	25
Tablica 3. Redosljed ručne montaže svežnjeva i prosječno vrijeme izvođenja zadataka [14] .....	29
Tablica 4. Identifikacija neprikladnih uvjeta rada koji se odnose na fizičku ergonomiju [14] .....	30
Tablica 5. Sažetak multiplikatora i konačna procjena rizika radne stanice (ručna radna stanica) [14] .....	31
Tablica 6. Konačne ocjene po RULA metodi za svaki zadatak [14] .....	32
Tablica 7. Ocjene kritičnih čimbenika procesa i potencijalne vrijednosti za sve četiri skupine zadataka [14] .....	34
Tablica 8. Rješenja za poboljšanje fizičkih uvjeta rada [14].....	35
Tablica 9. Sažetak multiplikatora i konačna procjena rizika za novu radnu stanicu [14].....	38
Tablica 10. RULA analiza za novu radnu stanicu [14] .....	39
Tablica 11. RULA vrijednosti za svaki analizirani dio tijela [14] .....	41
Tablica 12. Sažetak procjene prema metodi Williama Finea [15] .....	49
Tablica 13. Sažetak vremenske studije i RSI procjene (podebljano označava glavni konačni rezultat indeksa naprezanja) [15] .....	50
Tablica 14. Položaj ruke i zapešća u ispitanim položajima [15] .....	53
Tablica 15. Bodovi povezani s nelagodom koju su radnici osjetili u četiri položaja [15] .....	55
Tablica 16. Konačne RULA ocjene za obje radnice [15].....	55
Tablica 17. Prednosti i nedostaci interakcije čovjek-robot [16].....	59
Tablica 18. Opće operacije montaže oplata zrakoplova prije i nakon HRC [16].....	62
Tablica 19. Dio radnog ciklusa u HRC konfiguraciji [16] .....	67
Tablica 20. Rezultati simulacije [16] .....	68
Tablica 21. OWAS indeks rizika [16] .....	70
Tablica 22. Rezultati simulacije - OWAS koeficijenti [16] .....	70

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$a$	-	frekvencija promatranja za klasu rizika 1,
$b$	-	frekvencija promatranja za klasu rizika 2,
$c$	-	frekvencija promatranja za klasu rizika 3,
$d$	-	frekvencija promatranja za klasu rizika 4,
$F_C$	-	posljedice nesreće,
$F_E$	-	stupanj izloženosti riziku,
$F_P$	-	vjerojatnost nastanka nesreće,
$I$	-	OWAS indeks,
$k$	-	frekvencija promatranja za svaku klasu rizika (a,b,c,d),
$N$	-	ukupan broj promatranja,
$N_k$	-	broj promatranja za određenu klasu rizika,
$n_t$	-	broj zadataka unutar analiziranog montažnog ciklusa,
$P_{valj}$	-	vrijednost potencijala primjene robota, izračunata ponderiranjem ocjena kritičnih čimbenika,
$R_S$	-	stupanj rizika,
$RT$	h	stvarna vrijednost radnog vremena,
$S_{ij}$	-	ocjena kritičnog čimbenika procesa za određeni zadatak,
$SF$	-	faktor skaliranja,
$T$	h	vrijednost radnog vremena (skalirana),
$W_i$	-	težinski faktor za kritični čimbenik procesa (PCI).

## **SAŽETAK**

U ovom radu istražuje se primjena ergonomskih metoda u Industriji 5.0, s naglaskom na suradnju čovjeka i robota (HRC) u hibridnim radnim sustavima. Obrađeni su ključni pojmovi Industrije 5.0 i ergonomije, dok empirijski dio uključuje tri studije slučaja koje analiziraju utjecaj kolaborativnih robota na smanjenje fizičkog opterećenja radnika, ergonomski redizajn radnih stanica i interakciju čovjeka i robota pri montaži avionskih trupova. Rezultati pokazuju da ergonomija unutar Industrije 5.0 doprinosi sigurnijim, učinkovitijim i održivijim radnim okruženjima, pri čemu kolaborativni roboti igraju ključnu ulogu u smanjenju fizičkog i kognitivnog stresa radnika te povećanju produktivnosti.

Ključne riječi: Industrija 5.0, ergonomija, kolaborativni roboti, suradnja čovjeka i robota, sigurnost, produktivnost

## **SUMMARY**

This thesis explores the application of ergonomic methods within Industry 5.0, focusing on human-robot collaboration (HRC) in hybrid work systems. Key concepts of Industry 5.0 and ergonomics are discussed, while the empirical part includes three case studies analyzing the impact of collaborative robots on reducing workers' physical strain, ergonomic redesign of workstations, and human-robot interaction during aircraft fuselage assembly. The results demonstrate that ergonomics within Industry 5.0 contributes to safer, more efficient, and sustainable workplaces, with collaborative robots playing a key role in reducing physical and cognitive stress on workers and enhancing productivity.

Key words: Industry 5.0, ergonomics, collaborative robots, human-robot collaboration, safety, productivity

## **1. UVOD**

Ergonomija je interdisciplinarna znanstvena disciplina koja se bavi prilagodbom radnog okruženja potrebama, sposobnostima i ograničenjima čovjeka. Kroz integraciju znanja iz anatomije, psihologije, inženjerstva i drugih disciplina, ergonomija pomaže u stvaranju sigurnih i učinkovitih radnih uvjeta. U suvremenim industrijskim uvjetima, prilagodba rada čovjeku postaje sve važnija zbog rastućih zahtjeva na radnim mjestima i visokih standarda produktivnosti i sigurnosti.

Industrija 5.0 predstavlja novu fazu industrijskog razvoja, koja naglasak stavlja na humanocentričnost, otpornost i održivost. Nadovezujući se na temelje Industrije 4.0, koja se fokusirala na digitalizaciju i automatizaciju, Industrija 5.0 prepoznaje važnost uloge čovjeka u tehnološki naprednim radnim procesima. Ovaj koncept, koji uključuje suradnju ljudi i kolaborativnih robota, omogućuje prilagodbu proizvodnih procesa potrebama radnika te pridonosi stvaranju sigurnijeg i zdravijeg radnog okruženja.

Povezivanje ergonomije i Industrije 5.0 ključno je za postizanje boljih uvjeta rada i optimizacije radnih procesa. Primjena ergonomskih principa unutar koncepta Industrije 5.0 omogućava prilagodbu radnog mjesta radnicima te smanjenje fizičkog i mentalnog stresa koji se može pojaviti u tehnološki naprednim okruženjima. Tako se podržava ključna ideja Industrije 5.0 – usmjerenost na ljude – kroz korištenje tehnologije koja radi u skladu s potrebama radnika.

Cilj ovog rada je istražiti kako se ergonomske metode mogu primijeniti u kontekstu Industrije 5.0, s posebnim naglaskom na suradnju između čovjeka i tehnologije. Drugo poglavlje dublje obrađuje teorijske temelje ergonomije, uključujući povijest, važnost i ergonomske metode, dok se treće poglavlje fokusira na Industriju 5.0, njezine ključne značajke i utjecaj na radne uvjete. Nakon teorijskog pregleda, rad prikazuje tri studije slučaja koje analiziraju konkretne primjene ergonomskih metoda u kontekstu Industrije 5.0.

## 2. ERGONOMIJA

### 2.1. Definicija ergonomije

Ergonomija, kao znanstveno područje, bavi se proučavanjem međudjelovanja između čovjeka i elemenata sustava u kojem radi, s ciljem optimizacije ljudskog dobrostanja i ukupne učinkovitosti sustava. Pojam "ergonomija" dolazi od grčkih riječi "ergon" (rad) i "nomos" (zakon), što u prijevodu znači "zakon rada". U najširem smislu, ergonomija primjenjuje teoriju, principe, podatke i metode dizajna kako bi se stvorilo okruženje koje je prilagođeno ljudskim potrebama, sposobnostima i ograničenjima. Ergonomisti doprinose oblikovanju i vrednovanju zadataka, poslova, proizvoda, okoliša i sustava kako bi oni postali kompatibilni s potrebama, sposobnostima i ograničenjima čovjeka. [1]



Slika 1. Ergonomija radnog mjesta [2]

### 2.2. Povijesni razvoj ergonomije

Razvoj ergonomije seže daleko u prošlost. Prvi zapisi o primjeni ergonomskih principa datiraju još iz vremena Hipokrata (460-370 p.n.e.), koji je davao preporuke za oblikovanje radnog prostora kirurga. Hipokrat je preporučio rad u sjedećem ili stojećem položaju, optimalno osvjetljenje, pravilnu organizaciju instrumenata i ergonomične alate kako bi se olakšalo kirurško djelovanje.



















Bernardino Ramazzini (1633.-1714.) bio je liječnik koji je proučavao bolesti uzrokovane radom i njihove veze s profesijama. Njegovo djelo "De Morbis Artificum Diatriba" ("O bolestima radnika") iz 1700. godine smatra se prvim sveobuhvatnim radom o bolestima vezanim uz radna

mjesta. U ovom djelu, Ramazzini je detaljno opisao kako različite vrste posla mogu utjecati na zdravlje radnika i pružio preporuke za poboljšanje radnih uvjeta.

Wojciech Bogumił Jastrzębowski (1799.-1882.) koristio je ime "ergonomija" u svom članku iz 1857. godine, "Rys ergonomji czyli nauki o pracy, opartej na prawdach poczerpnietych z Nauki Przyrody". On je istraživao interaktivni odnos čovjeka i radnog okruženja, te je na taj način postavio temelje za modernu ergonomiju.

Frederick Winslow Taylor (1856.-1915.) je utemeljitelj teorije znanstvenog menadžmenta, koja se bavi proučavanjem učinkovitosti na osnovu specijalizacije i podjele rada. Taylor je koristio studij pokreta kako bi optimizirao radne zadatke, s naglaskom na materijale, alate i opremu u vezi s poboljšanjem metoda.

Frank Bunker Gilbreth (1868.-1924.) i Lilian Gilbreth (1878.-1972.) poznati su po svom radu u području studija vremena i pokreta. Oni su podijelili osnovne pokrete u 18 podvrsta ili događaja, nazvavši ih Therblig (anagram Gilbreth), što predstavlja prvi sustav opisivanja i načina izvođenja rada. [1]

Proizvodni			Ometajući			Neproizvodni		
Naziv	Simbol	Boja	Naziv	Simbol	Boja	Naziv	Simbol	Boja
posezanje		maslinasto-zelena	traženje		crna	držanje		zlatno žuta
prenošenje		zelena	nalaženje		siva	odmaranje		narandžasta
hvatanje		crvena	odabiranje		svjetlo siva	neplanirani zastoje		svijetli oker
ispuštanje		jarko crvena	kontroliranje		tamni oker	planirani zastoje		žuta
postavljanje		plava	pripremanje		svjetlo plava			
upotrebljavanje		purpurna	Planiranje		smeđa			
sastavljanje		ljubičasta						
rastavljanje		svjetlo ljubičasta						

Slika 2. Therbligsi [1]

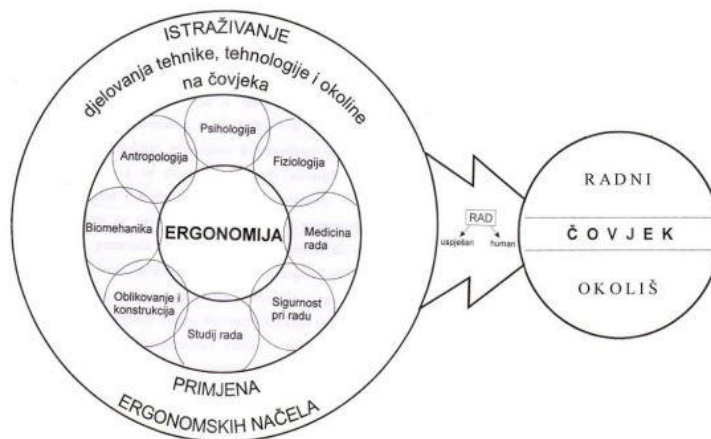
### 2.3. Važnost ergonomije u suvremenom društvu

Ubrzani način života i sve veći zahtjevi modernih radnih mjesta često prisiljavaju radnike na izlaganje velikim fizičkim i psihičkim naporima, što može dovesti do ozljeda i zdravstvenih problema. Ergonomija se stoga usmjerava na smanjenje i sprječavanje ovih rizika, poboljšanje radnih uvjeta te promicanje zdravih stavova prema radu i radnom okruženju. Primjena



ergonomskih načela može povećati produktivnost, smanjiti broj ozljeda na radu i poboljšati ukupnu kvalitetu života radnika. Ergonomija također može pomoći u smanjenju troškova povezanih s bolovanjima i povećanju zadovoljstva radnika, što sve zajedno doprinosi većoj učinkovitosti i profitabilnosti organizacija. [1]

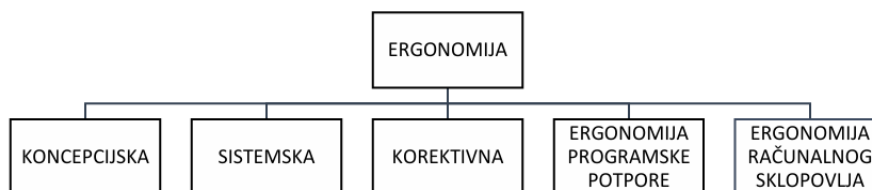
Jedan od glavnih ciljeva ergonomije je humanizacija rada, što podrazumijeva prilagođavanje rada čovjeku umjesto obrnuto. Ova prilagodba uključuje smanjenje fizičkog i mentalnog stresa, povećanje udobnosti i sigurnosti na radu te poboljšanje ukupne učinkovitosti radnog sustava. Ergonomija se bavi prilagođavanjem strojeva i alata anatomskim, fiziološkim i psihofiziološkim karakteristikama čovjeka, prilagođavanjem metoda rada radniku, uključujući radne položaje, pokrete, podjelu rada i organizaciju, te prilagođavanjem uvjeta radne okoline kao što su rasvjeta, buka, vibracije, temperatura i ergonomija radnog mjesta. [1,3]



Slika 3. Primjena ergonomskih načela u suvremenom radnom okruženju [1]

## 2.4. Podjela ergonomije

Ergonomija se može podijeliti na nekoliko glavnih grana, svaka sa specifičnim područjem djelovanja koje doprinosi poboljšanju radnih uvjeta i prilagodbi rada čovjeku. [1]



Slika 4. Podjela ergonomije [1]

**Koncepcijska ergonomija** usmjerena je na oblikovanje ergonomskih mjera prilikom projektiranja radnih sustava, s naglaskom na humanitet i ekonomičnost. Ova grana ergonomije obuhvaća aspekte kao što su smanjenje opterećenja radnika, osiguravanje ugodnog radnog okruženja, te poboljšanje uvjeta rada kako bi se povećala sigurnost, učinkovitost i motivacija zaposlenika.

**Sistemska ergonomija** fokusira se na usklađivanje funkcija unutar proizvodnog sustava "čovjek-stroj-okolina". Unutar ove grane posebna pažnja posvećuje se organizaciji radnih zadataka i tijeka rada, dizajnu radnih mjesta i uvjeta rada, te obuci radnika. Cilj sistemske ergonomije je stvoriti sigurno, efikasno i prilagođeno radno okruženje koje podržava produktivnost i dobrobit radnika.

**Korektivna ergonomija** primjenjuje se prilikom uvođenja promjena u radnom okruženju kako bi se otklonili nedostaci ili poboljšali postojeći uvjeti rada. Ova grana ergonomije uključuje analizu i ispravljanje ergonomskih problema koji se javljaju tijekom rada, a koje je potrebno prilagoditi kako bi se postigao optimalan radni učinak i smanjio rizik od ozljeda.

**Ergonomija programske potpore** bavi se razvojem kriterija i metoda za procjenu kvalitete i učinkovitosti softverskih proizvoda. Njen glavni cilj je povećati prihvaćanje novih tehnologija, smanjiti stres i opterećenje radnika prilikom uvođenja softverskih rješenja, te osigurati da programska oprema zadovoljava potrebe i mogućnosti korisnika.

**Ergonomija računalnog sklopovlja** posvećena je tehničko-fizikalnim aspektima radnog mjesta za računalom. Njeno djelovanje obuhvaća prilagodbu položaja radnika u odnosu na računalnu opremu, kao što su stol, stolica, tipkovnica i monitor, kako bi se smanjio rizik od ozljeda i povećala udobnost pri dugotrajnom radu. [1]

## 2.5. Vrste ergonomije

**Fizikalna ergonomija** bavi se anatomskim, antropometrijskim, fiziološkim i biomehaničkim karakteristikama ljudi. Fokusira se na tjelesne odgovore na fizičke i biomehaničke zahtjeve radnog mjesta. Primjeri primjene fizikalne ergonomije uključuju dizajn radnih stolova i stolica, alata i strojeva koji smanjuju fizičko opterećenje i rizik od ozljeda. Fizikalna ergonomija također obuhvaća analizu radnih pokreta i položaja tijela kako bi se identificirale i uklonile potencijalne opasnosti.

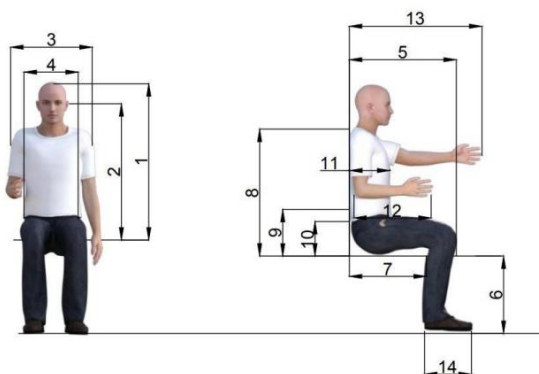
**Kognitivna ergonomija** proučava mentalne procese kao što su percepcija, pamćenje, mišljenje i motoričke reakcije, te kako oni utječu na interakciju između ljudi i drugih elemenata sustava. Cilj je optimizirati radne uvjete kako bi se smanjilo mentalno opterećenje i poboljšala učinkovitost. Kognitivna ergonomija je ključna u dizajnu korisničkih sučelja, informacijskih sustava i kontrolnih ploča strojeva, gdje je važno osigurati da informacije budu lako razumljive i dostupne.

**Organizacijska ergonomija** bavi se optimizacijom socio tehničkih sustava, uključujući njihove organizacijske strukture, pravila i procese. Proučava komunikaciju, timski rad, upravljanje i organizaciju rada kako bi se postigla veća učinkovitost i zadovoljstvo zaposlenika. Primjeri primjene organizacijske ergonomije uključuju dizajn radnih smjena, organizaciju timova i razvoj sustava za upravljanje radnim zadacima. [1]

## 2.6. Ergonomski principi i teorije

### 2.6.1. Antropometrija

Antropometrija je znanstvena disciplina koja proučava tjelesne dimenzije i proporcije ljudi. U ergonomiji, antropometrijski podaci koriste se za dizajniranje radnih mjesta, alata, opreme i proizvoda koji odgovaraju fizičkim karakteristikama korisnika. Cilj je osigurati udobnost, sigurnost i učinkovitost pri obavljanju različitih zadataka. Ergonomski dizajn temelji se na statističkim podacima koji prikazuju razlike u tjelesnim dimenzijama među populacijom. Na primjer, prilikom dizajniranja stolice ili radnog stola, uzimaju se u obzir visina, dužina nogu, širina ramena i drugi relevantni parametri. To omogućuje prilagođavanje radnog okruženja širokom spektru korisnika, smanjujući rizik od ozljeda i povećavajući produktivnost. [1]



Slika 5. Položaj antropometrijskih izmjera pojedinih dijelova tijela za sjedeći položaj [1]

### **2.6.2. *Biomehanika***

Biomehanika je grana znanosti koja proučava mehaničke aspekte živih organizama, s posebnim naglaskom na ljudsko tijelo. U ergonomiji, biomehanika se koristi za analizu pokreta, opterećenja i sila koje djeluju na tijelo tijekom obavljanja različitih zadataka. Cilj je optimizirati radne uvjete kako bi se smanjio rizik od ozljeda i povećala učinkovitost. Biomehaničke analize pomažu u razumijevanju kako različiti položaji tijela, pokreti i opterećenja utječu na mišiće, zglobove i kosti. Na primjer, pravilno dizajnirana radna stolica može smanjiti opterećenje kralježnice i spriječiti bolove u leđima. Biomehanika također igra ključnu ulogu u razvoju zaštitne opreme i alata koji smanjuju rizik od ozljeda pri obavljanju fizički zahtjevnih zadataka. [1]

### **2.6.3. *Fiziološki aspekti ergonomije***

Fiziološki aspekti ergonomije proučavaju kako različiti radni uvjeti utječu na fiziološke procese u tijelu. Cilj je osigurati optimalne uvjete rada koji podržavaju zdravlje i dobrobit radnika. Ovi aspekti uključuju proučavanje utjecaja temperature, vlage, rasvjete, buke i vibracija na tijelo. Na primjer, rad u neadekvatno klimatiziranim prostorima može dovesti do pregrijavanja ili pothlađivanja, što negativno utječe na radnu učinkovitost i zdravlje. Ergonomija također proučava kako radne smjene, pauze i fizička aktivnost utječu na fiziološke procese i kako optimizirati ove faktore za bolje zdravlje i produktivnost radnika. [1]

## **2.7. Ergonomske metode**

Ergonomske metode su sustavne tehnike i postupci koji se koriste za analizu i poboljšanje radnih uvjeta, dizajna radnih mjesta i opreme, te za optimizaciju interakcije između ljudi i njihovog radnog okruženja. Cilj ergonomskih metoda je smanjenje rizika od ozljeda, povećanje produktivnosti, poboljšanje kvalitete rada i povećanje zadovoljstva radnika. Postoji širok raspon ergonomskih metoda koje se koriste u različitim kontekstima, ovisno o specifičnim zahtjevima i izazovima radnog mjesta. U ovom poglavlju, razmotrit ćemo neke od najčešće korištenih ergonomskih metoda, uključujući metode procjene radnog mjesta, metode procjene opterećenja i kognitivne metode. Svaka od ovih metoda ima svoje specifične primjene i prednosti, a njihova kombinacija može pružiti sveobuhvatan pristup poboljšanju ergonomije radnog okruženja. [1]

### **2.7.1. Metode procjene radnog mjesta**

**Eng. Checklists (liste za procjenu)** su jednostavan, ali učinkovit alat za procjenu radnog mjesta. Koriste se za sistematsku identifikaciju i ocjenu potencijalnih opasnosti i problema u radnom okruženju. Obuhvaćaju različite aspekte rada, uključujući dizajn radnog mjesta, upotrebu alata, ergonomiju tijela i radne uvjete. Primjer check liste može uključivati pitanja poput: "Je li radna površina prilagodljiva visini korisnika?", "Jesu li alati unutar dosega bez potrebe za istezanjem?" i "Postoji li dovoljno osvjetljenja na radnom mjestu?".

**Analiza zadataka** uključuje detaljno proučavanje radnih aktivnosti kako bi se identificirale sve potrebne radnje, oprema i uvjeti rada. Cilj je razumjeti kako se zadaci obavljaju, koji su zahtjevi i rizici povezani s njima te kako se mogu poboljšati radni procesi. Ova metoda koristi različite tehnike, uključujući promatranje, intervju i snimanje rada.

**Snimanje rada i vremenska studija** su metode koje se koriste za analizu učinkovitosti radnih zadataka. Snimanje rada uključuje vizualno ili video snimanje radnih aktivnosti, što omogućuje detaljnu analizu pokreta, vremena i metoda korištenih za obavljanje zadataka. Vremenska studija se fokusira na mjerenje vremena potrebnog za izvršavanje pojedinačnih radnih koraka, s ciljem optimizacije radnih procesa i smanjenja nepotrebnih pokreta. [1]

### **2.7.2. Metode procjene opterećenja**

U proizvodnim procesima često dolazi do oboljenja mišićno-koštanog sustava uslijed rada u nepovoljnom radnom položaju i uz ponavljanje radnog zadatka. Stoga su razvijene metode za analizu radnog opterećenja s ciljem otkrivanja nepovoljnih radnih položaja tijela te gornjih i donjih udova. U Tablici 1 dan je pregled najčešće korištenih metoda za analizu položaja tijela prilikom izvođenja radnih zadataka. [1]







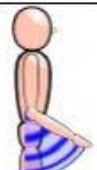


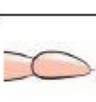
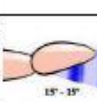
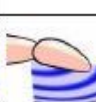
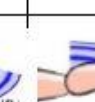


**Tablica 1. Popis najčešće korištenih ergonomskih metoda [1]**

R.b.	Metoda	Fokus	Način primjene	Brzina provođenja	Troškovi	Složenost	Napomena
1.	OWAS	cijelo tijelo	preglednica	dugotrajno	obrazovanje	brzo učenje	preventivno, subjektivno
2.	MODAPTS	cijelo tijelo	ocjenjivanje	brzo	jeftino	jednostavno	subjektivna procjena
3.	PLIBEL	mišićno-koštano opterećenje; cijelo tijelo	dijagrami tjelesnih segmenata; lista za provjeru	prilično brzo	jeftino	jednostavno	preventivno
4.	NIOSH	određivanje uočene nelagode, cijelo tijelo	intervju, dijagram tjelesnih segmenata, lista za provjeru	prilično brzo	jeftino	jednostavno	subjektivna procjena
5.	DMQ	utvrđivanje faktora rizika; cijelo tijelo	upitnik (DA/NE)	relativno brzo	relativno jeftino	jednostavno	preventivno ili korektivno
6.	REBA	cijelo tijelo	promatranje; bodovanje	prilično brzo	jeftino	složeno	preventivno; subjektivno
7.	PDA	cijelo tijelo	lista za provjeru	prilično brzo	ručno računalo	jednostavno	koristi se za ocjenu rada s računalom
8.	QEC	gornji udovi	borgova skala, tablice	dugotrajno	obuka	relativno jednostavno	korektivno
9.	RULA	cijelo tijelo; sjedeći zadaci	dijagram tjelesnih segmenata	prilično brzo	jeftino	jednostavno	preventivno ili korektivno
10.	SI	gornji udovi, bez ramena i torza	mjerenje; softver	dugotrajno	obuka	složeno	smanjuje ljudski faktor
11.	OCRA	gornji udovi	računanje vjerojatnosti; tablice	dugotrajno	obuka	složeno	preventivno
12.	LMM	uloga trupa u ozljedama kralježnice	softver	dugotrajno	obučavanje LMM prsluk	složeno	preventivno
13.	KIM	cijelo tijelo	promatranje, bodovanje	relativno brzo	jeftino	jednostavno	preventivno
14.	SMART	ruke	promatranje, bodovanje	relativno brzo	jeftino	jednostavno	preventivno

**RULA (eng. Rapid Upper Limb Assessment - Brza procjena gornjih ekstremiteta, u daljnjem tekstu RULA)** je metoda koja se koristi za procjenu opterećenja gornjih ekstremiteta tijekom obavljanja radnih zadataka. Analizira položaj vrata, trupa, gornjih ruku, podlaktica i zapešća te ocjenjuje razinu opterećenja na mišiće i zglobove. RULA metoda koristi bodovni sustav kako bi identificirala visoko rizične radne položaje koji zahtijevaju intervencije.

Korištenje RULA metode:

- Procjena započinje promatranjem radnika tijekom obavljanja zadatka.
- Položaj svakog segmenta tijela (vrat, trup, gornji i donji dio ruke, zapešće) ocjenjuje se bodovima na temelju kutova savijanja i rotacije.
- Ukupni rezultat kombinira sve bodove i klasificira rizik od ozljeda u nekoliko kategorija, od niskog do visokog rizika. [1]

Ruka - nadlaktica						- ramena podignuta [+1] - nadlaktica ispružena [+1] - ruka naslonjena [-1]
	+1	+2	+2	+3	+4	dodatni položaji
Ruka - podlaktica						
	+1	+2	+2	+1		
Ruka- šaka						
	+1	+2	+3	+3	+1/ dodatni položaj	
Rotacija šake			Opterećenje ruke: - nema opterećenja (opterećenje manje od 20 N [0]) - malo opterećenje (20 N-100 N) [+1] - staničko opterećenje (20-100 N)/ponavljajući intervali (20-100 N) /isprekidano opterećenje (>100 N) [+2] - staničko opterećenje (1001 N)/ ponavljajući intervali (100 N) // - veliko opterećenje (> 100 N [+3])			
	+1	+2				
Rad mišića ruke: -položaj ruke je većinom statičan (trajanje duže od 1 min) [+1] -rad ruku je ponavljajući [+1]						

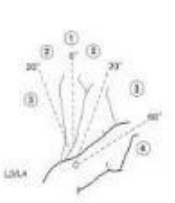
Slika 6. Prikaz radnih položaja prema RULA metodi [1]

**REBA** (eng. **R**apid **E**ntire **B**ody **A**ssessment – **B**rza provjera cijelog tijela, u daljnjem tekstu **REBA**) je metoda koja procjenjuje opterećenje cijelog tijela, uključujući vrat, trup, noge, gornje i donje dijelove ruku, podlaktice i zapešća. Ova metoda je dizajnirana za procjenu širokog spektra radnih zadataka i radnih položaja, te je korisna za procjenu rizika od mišićno-koštanih poremećaja cijelog tijela.

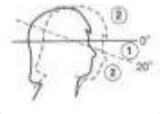
Korištenje REBA metode:

- Promatranje radnika dok obavlja zadatak i bilježenje položaja tijela.
- Analiziranje položaja svakog segmenta tijela (vrat, trup, noge, gornji i donji dio ruke, zapešće) i dodjeljivanje bodova temeljenih na kutovima savijanja, rotacije i opterećenja.

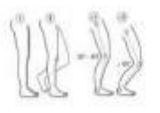
- Razmatranje dodatnih faktora kao što su sile i ponavljanje pokreta.
- Kombiniranje dobivenih bodova kako bi se dobio ukupni rezultat za svaki segment tijela.
- Klasifikacija ukupnog rezultata prema razinama rizika.
- Preporuka korektivnih mjera za smanjenje identificiranih rizika. [1]

TRUP			
	Pokreti	Ocjena	Dodatak: +1 ako se trup rotira ili izvija u stranu
	uspravno držanje	1	
	0° - 20° savijanje ili istezanje	2	
	20° - 60° savijanje >20° istezanje	3	
>60° istezanje	4		

VRAT			
	Pokreti	Ocjena	Dodatak: +1 ako se vrat rotira ili izvija u stranu
	0° - 20° savijanje	1	
>20° savijanje ili istezanje	2		

NOGE			
	Pokreti	Ocjena	Dodatak: +1 ako su koljena savijena između 30° i 60° +2 ako su koljena savijena preko 60°
	obostrano opterećenje	1	
jednostrano opterećenje	2		

Slika 7. Prikaz radnih položaja tijela (trup, vrat, noge) prema REBA metodi [1]

**OWAS (eng. Ovako Working Posture Analysing System - Ovako sustav za analizu radnog položaja, u daljnjem tekstu OWAS)** je metoda koja se koristi za procjenu radnih položaja i opterećenja na tijelo tijekom obavljanja zadataka. Analizira položaj tijela, uključujući leđa, ruke i noge, te ocjenjuje razinu opterećenja i rizika od ozljeda. OWAS metoda koristi klasifikacijski sustav kako bi identificirala neodgovarajuće radne položaje i predložila korektivne mjere.

Analiza radnih položaja OWAS metodom omogućava sagledavanje:

- Položaja leđa: uključujući savijanje, rotaciju i bočno nagnjanje.
- Položaja ruku: uključujući položaje gornjih i donjih dijelova ruku.
- Položaja nogu: uključujući stajanje, hodanje, sjedenje, klečanje i čučanje.
- Vrste i težine tereta: uključujući podizanje, nošenje, guranje i povlačenje.
- Vrijeme zadržavanja položaja: procjena koliko dugo radnik zadržava određeni položaj.



- Učestalost ponavljanja pokreta: koliko često se ponavljaju specifični pokreti ili položaji. [1]

Segment	KRALJEZNICA				GORNJI UDVOVI				ŠAKE			DONJI UDVOVI							GLAVA					SILE				
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1	2.2	2.3	2.4	3.1	3.2	3.3	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	6.1	6.2	6.3
OWAS																												
%																												
10	□	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
20	□	□	□	●	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
30	□	□	●	▲	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
40	□	●	▲	▲	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
50	□	●	▲	▲	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
60	□	●	▲	▲	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
70	□	●	▲	▲	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
80	□	▲	▲	▲	□	▲	▲	▲	★	★	★	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
90	□	▲	▲	▲	□	▲	▲	▲	★	★	★	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□
100	□	▲	▲	▲	□	▲	▲	▲	★	★	★	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□	□

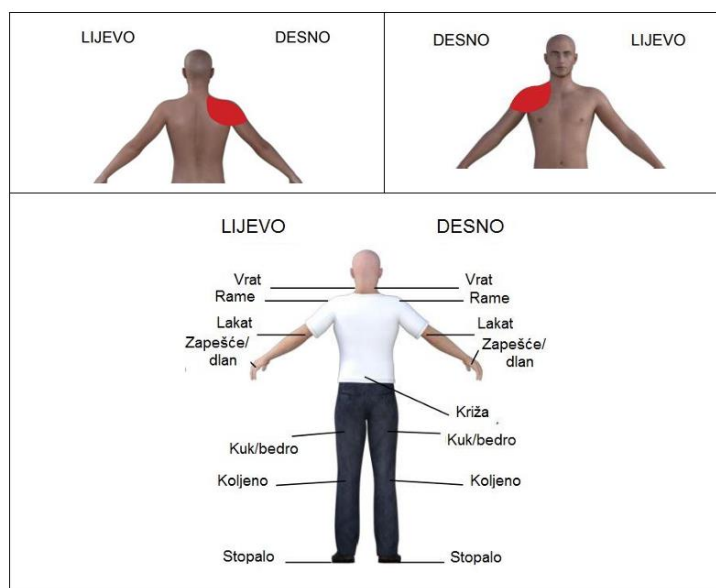
- Legenda: □ preoblikovanje radnog mjesta nije potrebno
- preoblikovanje radnog mjesta potrebno je u dogledno vrijeme
  - ▲ preoblikovanje radnog mjesta potrebno je uskoro
  - \* preoblikovanje radnog mjesta potrebno je odmah

Slika 8. Ocjena položaja udova prema OWAS metodi [1]

**NIOSH metoda (eng. National Institute for Occupational Safety and Health - Nacionalni institut za sigurnost i zdravlje na radu, u daljnjem tekstu NIOSH)** koristi se za procjenu rizika pri ručnom podizanju tereta. Razvijena od strane Američkog nacionalnog instituta za sigurnost i zdravlje na radu, ova metoda omogućuje procjenu fizičkog opterećenja i identificira sigurne granice za podizanje tereta kako bi se spriječili mišićno-koštani poremećaji.

Korištenje NIOSH metode:

- Identifikacija ključnih faktora podizanja, uključujući težinu tereta, visinu podizanja, udaljenost od tijela i frekvenciju podizanja.
- Korištenje NIOSH jednadžbe za izračunavanje preporučene granične težine koja se može sigurno podići.
- Usporedba stvarne težine tereta s preporučenom graničnom težinom kako bi se identificirao rizik od ozljeda.
- Preporuka korektivnih mjera, kao što su promjena težine tereta, prilagodba visine podizanja ili uvođenje pomagala za podizanje, kako bi se smanjio rizik od ozljeda radnika. [1]



Slika 9. Prikaz anketnog upitnika prema NIOSH metodi [1]

### 2.7.3. Kognitivne metode

**Eng. task analysis (analiza zadataka)** je metoda koja se koristi za detaljno proučavanje radnih zadataka s ciljem razumijevanja svih potrebnih radnji, opreme i uvjeta rada. Ova metoda uključuje razbijanje zadataka na manje korake i analiziranje svakog koraka kako bi se identificirale mogućnosti za poboljšanje učinkovitosti i smanjenje opterećenja.

**Heuristička evaluacija** je metoda koja se koristi za procjenu korisničkog sučelja na temelju unaprijed definiranih heuristika ili pravila dizajna. Cilj je identificirati probleme u dizajnu koji mogu utjecati na korisničko iskustvo i predložiti poboljšanja kako bi se povećala učinkovitost, zadovoljstvo i sigurnost korisnika.

**Eng. usability testing (testiranje upotrebljivosti)** je metoda koja se koristi za procjenu upotrebljivosti proizvoda ili sustava kroz testiranje s krajnjim korisnicima. Uključuje promatranje korisnika dok obavljaju zadatke, prikupljanje povratnih informacija i analizu podataka kako bi se identificirali problemi i predložila poboljšanja dizajna. [1]

## **2.8. Primjena ergonomskih metoda**

### **2.8.1. Primjeri iz industrije**

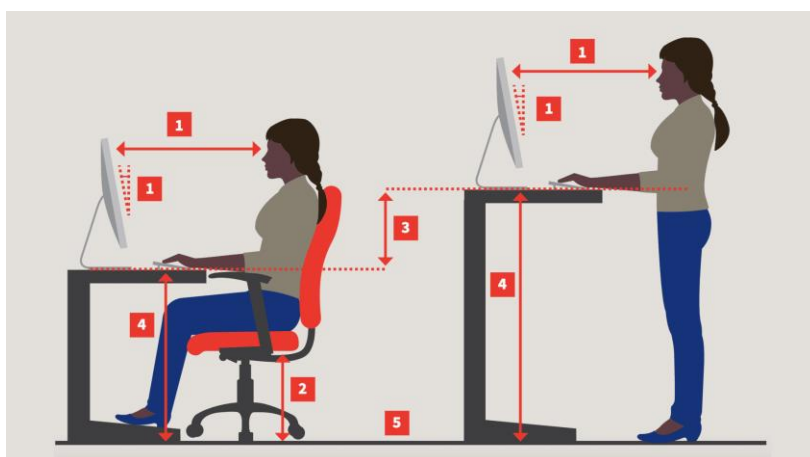
Ergonomija igra ključnu ulogu u industrijskom sektoru gdje se radnici često suočavaju s teškim fizičkim naporima, ponavljajućim zadacima i opasnim radnim uvjetima. Primjena ergonomskih metoda može značajno poboljšati učinkovitost, smanjiti broj ozljeda i povećati zadovoljstvo radnika. U automobilskoj industriji, radnici često obavljaju zadatke koji zahtijevaju podizanje teških dijelova, rad u neprirodnim položajima i izvođenje ponavljajućih pokreta. Primjena RULA i REBA metoda omogućuje identifikaciju rizičnih radnih položaja i prijedlog mjera za njihovo poboljšanje. Na primjer, uvođenjem mehaničkih pomagala za podizanje teških dijelova i prilagodljivih radnih stolova, smanjuje se fizičko opterećenje radnika i povećava produktivnost. U proizvodnji elektronike, radnici često rade u sjedećem položaju i obavljaju precizne zadatke koji zahtijevaju finu motoriku. Analiza radnih mjesta pomoću metoda snimanja rada i vremenske studije omogućuje optimizaciju radnih procesa i rasporeda alata kako bi se smanjilo opterećenje na oči i ruke. Korištenje ergonomskih stolica, pravilno postavljenih monitora i adekvatnog osvjetljenja može značajno smanjiti umor i povećati učinkovitost radnika. [4]

### **2.8.2. Primjeri iz zdravstvenog sektora**

Zdravstveni sektor suočava se s posebnim ergonomskim izazovima zbog prirode posla koja često uključuje fizičke napore, rad s pacijentima i duge radne smjene. Ergonomija može značajno poboljšati radne uvjete i smanjiti rizik od ozljeda zdravstvenih radnika. Zdravstveni radnici često podižu i prenose pacijente, što može uzrokovati ozljede leđa i mišićno-koštanog sustava. Primjena OWAS metode za analizu radnih položaja može pomoći u identifikaciji rizičnih aktivnosti i razvoju boljih tehnika podizanja i prijenosa. Korištenje mehaničkih podizača i drugih pomagala može smanjiti fizičko opterećenje i povećati sigurnost za radnike i pacijente. U ordinacijama i laboratorijima, radnici često rade u sjedećem položaju i obavljaju precizne zadatke koji zahtijevaju visoku koncentraciju. Korištenje analiza zadataka i snimanja rada može pomoći u optimizaciji radnih mjesta i rasporeda opreme kako bi se smanjilo opterećenje na oči i ruke. Pravilno postavljene stolice, stolovi i mikroskopi mogu smanjiti umor i povećati učinkovitost. [4]

### 2.8.3. Primjeri iz uredskog okruženja

Uredski rad često uključuje dugotrajno sjedenje i rad za računalom, što može dovesti do različitih zdravstvenih problema, uključujući bolove u leđima, vratu i zapešćima. Ergonomija u uredskom okruženju može značajno poboljšati udobnost i zdravlje radnika. Primjena ergonomskih principa u dizajnu uredskih stolova i stolica može smanjiti rizik od bolova u leđima i vratu. Korištenje podesivih stolova koji omogućuju rad u sjedećem i stojećem položaju, kao i ergonomskih stolica s podrškom za lumbalni dio, može značajno poboljšati udobnost i zdravlje radnika. Korištenje analiza zadataka za optimizaciju rasporeda opreme i radnih materijala može smanjiti nepotrebne pokrete i povećati učinkovitost. Pravilno postavljeni monitori, tipkovnice i miševi mogu smanjiti naprezanje očiju i ruku, dok adekvatno osvjetljenje može smanjiti umor očiju. [4]



Slika 10. Pravilno podešeno radno mjesto [5]

## 2.9. Prednosti i izazovi ergonomije

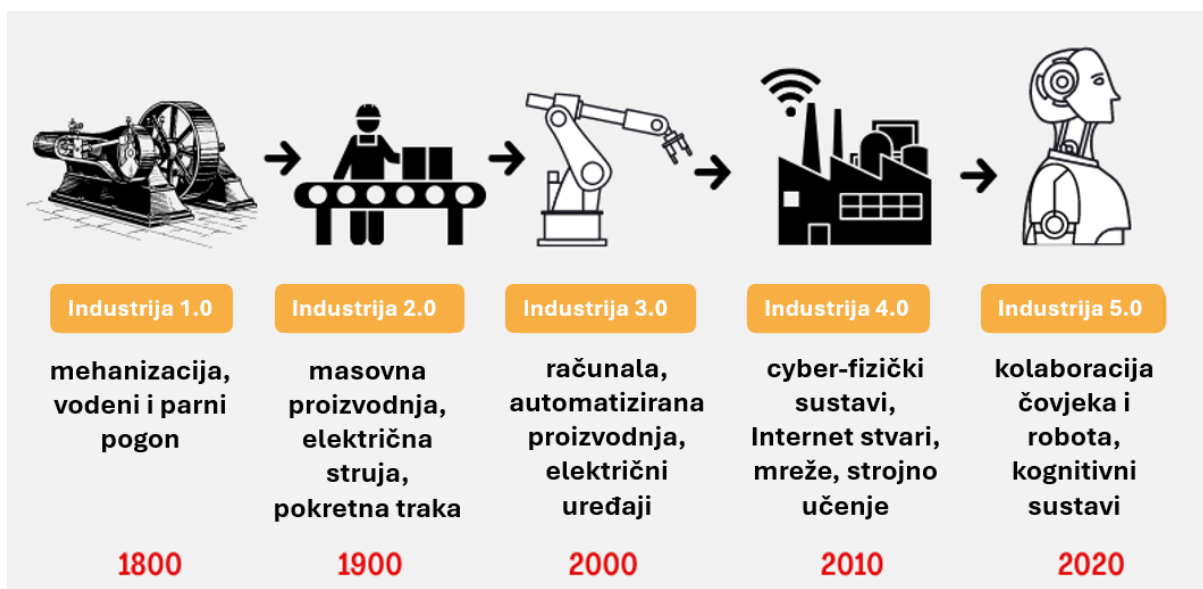
Ergonomski principi donose brojne prednosti u radnom okruženju, uključujući smanjenje rizika od ozljeda, povećanje produktivnosti, zadovoljstva radnika i smanjenje troškova povezanih s bolovanjima. Prilagodba radnih uvjeta fiziološkim karakteristikama radnika smanjuje naprezanje i neugodne položaje, čime se prevenira razvoj mišićno-koštanih poremećaja. Ergonomski optimizirana radna mjesta omogućuju učinkovitiji rad, eliminirajući nepotrebne pokrete i povećavajući fokus radnika, dok ugodno i sigurno okruženje doprinosi motivaciji i smanjenju stresa. Iako dugoročne koristi često nadmašuju troškove, implementacija ergonomskih metoda može biti izazovna zbog početnih financijskih ulaganja u opremu, obuku i prilagodbe. [1,3]

### 3. INDUSTRIJA 5.0

Industrija 5.0 predstavlja napredak od prethodne faze Industrije 4.0, koja je bila usmjerena na digitalizaciju i automatizaciju kroz upotrebu tehnologija poput Interneta stvari (IoT), umjetne inteligencije (AI) i strojnog učenja. Dok se Industrija 4.0 fokusirala na optimizaciju i automatizaciju proizvodnih procesa, Industrija 5.0 stavlja naglasak na čovjeka kao središnju figuru u radnim procesima. Cilj Industrije 5.0 je stvoriti radne uvjete koji su prilagođeni ljudskim potrebama, sposobnostima i ograničenjima, čime se osigurava humanocentričan pristup u kojem tehnologija podržava radnika, a ne obrnuto [6,7].

#### 3.1. Razvoj od Industrije 4.0 prema industriji 5.0

Industrija 4.0 omogućila je primjenu pametnih sustava i povezanih uređaja kako bi se proizvodni procesi učinili što učinkovitijima i preciznijima. Međutim, automatizacija koja eliminira ulogu radnika naišla je na izazove vezane uz otpornost i prilagodljivost, posebno u kontekstu nepredviđenih događaja kao što su pandemije i brze promjene na tržištu rada. Kao odgovor na te izazove, Industrija 5.0 vraća fokus na humanocentričnost, omogućujući tehnologiji da prilagodi radne uvjete ljudima i povećava interakciju između čovjeka i robota, često u obliku kolaborativnih robota (kobotova) koji djeluju kao pomoć radnicima u obavljanju složenih zadataka [6].



Slika 11. Industrijske revolucije kroz povijest [8]

### 3.2. Ključne značajke industrije 5.0

Industrija 5.0 temelji se na tri ključne značajke: humanocentričnosti, otpornosti i održivosti, koje zajedno osiguravaju inovativan i prilagođeniji pristup radnom okruženju.

**Humanocentričnost** označava pomak prema dizajnu radnih sustava u kojima su ljudi u središtu, a tehnologija prilagođena njihovim potrebama. U ovoj novoj paradigmi kolaborativni roboti (kobotovi) surađuju s radnicima, preuzimajući teže ili repetitivne zadatke i smanjujući fizičko opterećenje. Ova vrsta interakcije između čovjeka i robota omogućuje radnicima fokus na zadatke koji zahtijevaju kreativnost, prilagodljivost i kritičko razmišljanje, dok tehnologija podržava radnike u njihovim ulogama.

**Otpornost** u Industriji 5.0 podrazumijeva stvaranje sustava koji su prilagodljivi i fleksibilni, osobito u situacijama koje zahtijevaju brz odgovor na promjene ili poremećaje u proizvodnim procesima. Otpornost se postiže upotrebom pametnih tehnologija koje kontinuirano prate i prilagođavaju radne uvjete. Automatizirani sustavi mogu identificirati potencijalne rizike i optimizirati procese u stvarnom vremenu, čime se omogućuje brza reakcija na izazove te se povećava stabilnost rada.

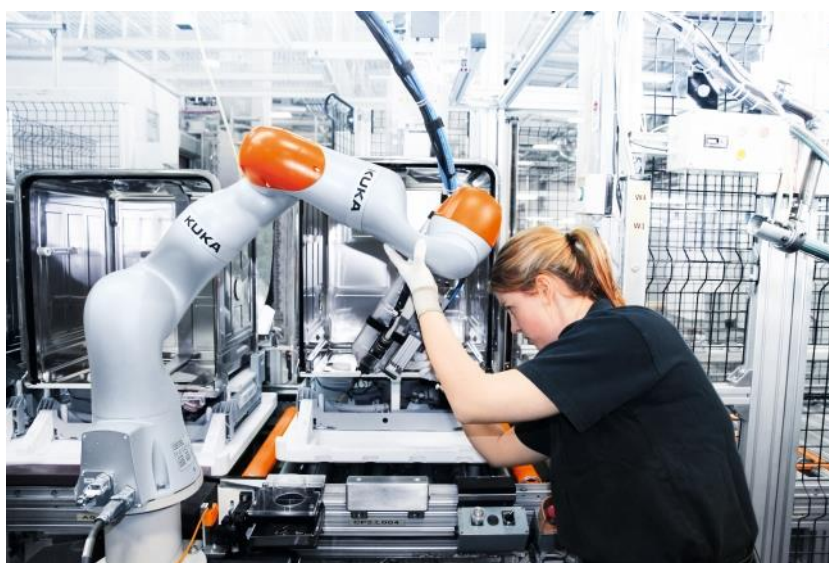
**Održivi razvoj** u Industriji 5.0 obuhvaća smanjenje negativnog utjecaja industrijskih aktivnosti na okoliš te poboljšanje energetske učinkovitosti i smanjenje otpada. Cilj je smanjiti utjecaj na okoliš kroz optimizaciju korištenja resursa i implementaciju ekološki prihvatljivih tehnologija. Industrija 5.0 također promiče kružno gospodarstvo, u kojem se materijali ponovno koriste i recikliraju, smanjujući potrebu za novim resursima i minimizirajući otpad [6,7,9].



Slika 12. Ključne značajke Industrije 5.0 [10]

### 3.3. Tehnološke inovacije i njihov utjecaj na radne uvjete

Industrija 5.0 donosi niz tehnoloških inovacija koje unapređuju radne uvjete, povećavajući sigurnost, produktivnost i zadovoljstvo radnika. Primjena kolaborativnih robota (kobotova), umjetne inteligencije (AI) i strojnog učenja omogućuje fleksibilniju industrijsku proizvodnju prilagođenu potrebama radnika. Kobotovi, ključni elementi Industrije 5.0, dizajnirani su za suradnju s radnicima, preuzimajući repetitivne i fizički zahtjevne zadatke, čime smanjuju fizičko opterećenje i rizik od ozljeda. Oni omogućuju radnicima fokus na nadzorne i kreativnije zadatke, stvarajući sinergiju ljudskih vještina i robotske preciznosti. [9]



Slika 13. Interakcija čovjeka i kolaborativnog robota [11]

Umjetna inteligencija (AI) i strojno učenje omogućuju industrijskim sustavima prikupljanje i analizu podataka u stvarnom vremenu, prilagođavajući proizvodne procese individualnim potrebama radnika. Na primjer, AI može prilagoditi brzinu i intenzitet rada prema parametrima koji smanjuju radnikov umor, dok IoT mreže prate uvjete poput temperature i osvjetljenja, povećavajući udobnost i sigurnost radnog okruženja.

Ove tehnologije omogućuju stvaranje radnih uvjeta koji su sigurniji i prilagođeni potrebama radnika, uz istovremeno povećanje fleksibilnosti i otpornosti proizvodnih procesa. Industrija 5.0, kroz primjenu napredne tehnologije i humanocentričnog pristupa, nastoji ostvariti radno okruženje koje je u skladu s ergonomskim načelima i potrebama suvremenih radnika. [7,9]

## 4. ERGONOMSKE METODE U INDUSTRIJI 5.0

Industrija 5.0 omogućava novu dimenziju ergonomskih prilagodbi, kombinirajući tradicionalne ergonomske metode s naprednim tehnologijama kao što su AI, IoT i koboti. Ova integracija podržava personaliziranu prilagodbu radnog okruženja koja doprinosi sigurnosti, otpornosti i zadovoljstvu radnika. [6]

### 4.1. Pregled ergonomskih metoda primjenjivih u Industriji 5.0

U Industriji 5.0, ergonomske metode postaju dinamične i prilagodljive. Tradicionalne metode, poput RULA i REBA procjene fizičkog opterećenja, sada uključuju senzorske sustave koji automatski prate položaje tijela i pružaju povratne informacije radnicima putem pametnih uređaja. Antropometrijski podaci, uz pomoć AI tehnologije, omogućuju automatiziranu prilagodbu radne opreme prema individualnim fizičkim karakteristikama radnika, čime se povećava sigurnost i udobnost radnog okruženja. Kognitivne metode dodatno podržavaju prilagodbu korisničkih sučelja i smanjenje kognitivnog opterećenja. [6,9]



Slika 14. Pregled ergonomskih metoda korištenih u Industriji 5.0 [12]

### 4.2. Primjena ergonomije u kontekstu Industrije 5.0

Integracija ergonomskih metoda u Industriji 5.0 donosi značajnu prilagodljivost radnih uvjeta individualnim potrebama radnika. Fizičke metode, poput RULA i REBA koriste senzore za



praćenje položaja tijela i identifikaciju nepravilnih položaja, čime se omogućuje stalna procjena fizičkog opterećenja. U suvremenom proizvodnom okruženju, ove metode uključuju automatske povratne informacije putem pametnih uređaja ili vizualnih signala, što radnicima omogućuje brzu korekciju položaja i izbjegavanje potencijalnih ozljeda. Na taj način, radnici dobivaju prilagođene smjernice koje ih potiču na sigurno izvođenje zadataka.

Antropometrijski podaci, prikupljeni u stvarnom vremenu, omogućuju radnim stanicama da se automatski prilagode fizičkim dimenzijama radnika. Na primjer, stolci i radni stolovi s pametnim senzorima prepoznaju korisnika te podešavaju visinu i položaj prema njegovim potrebama. Takva tehnologija ne samo da pruža udobnost, već i smanjuje rizik od kumulativnih trauma povezanih s neprikladnim položajem tijela.

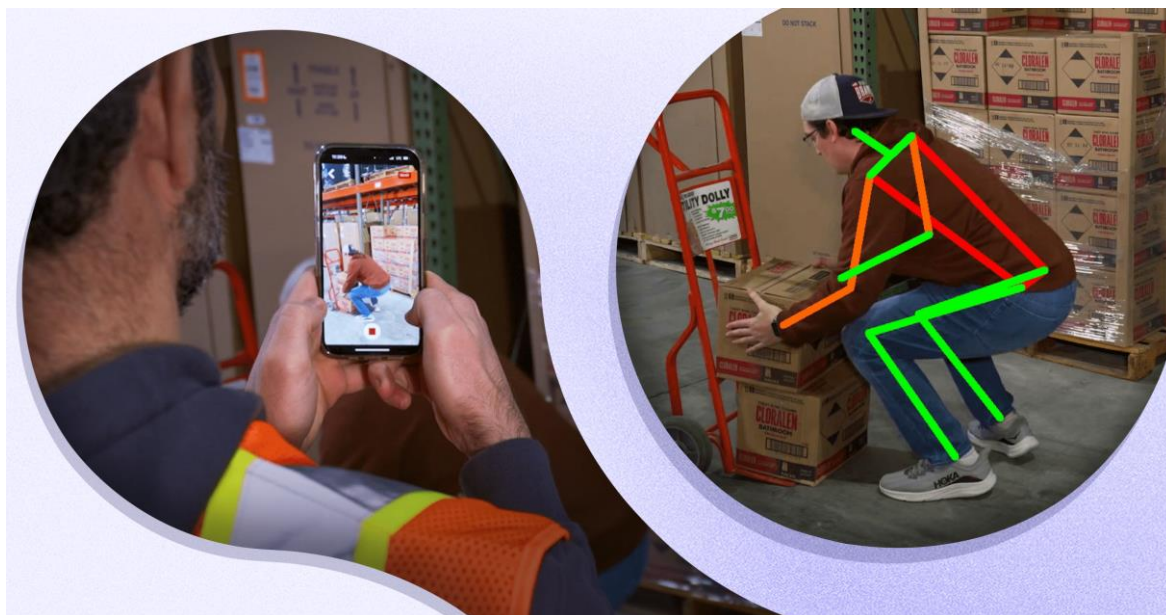
S druge strane, kognitivne ergonomske metode podupiru optimizaciju mentalnog opterećenja kroz prilagodbu korisničkih sučelja i informacijskih sustava. Napredni AI sustavi prate parametre kao što su reakcijsko vrijeme i brzina obrade informacija te prilagođavaju složenost zadataka radnikovom mentalnom stanju. U slučajevima povećanog umora, sustav može automatski smanjiti broj informacija ili predložiti kratki odmor, čime podržava radnikovu koncentraciju i sprječava kognitivno preopterećenje. Ova integracija AI-a i ergonomske metode poboljšava radno iskustvo, omogućujući radnicima optimalne uvjete za obavljanje složenih zadataka. [6,9]

#### **4.3. Uloga tehnologije u primjeni ergonomske metoda**

Industrija 5.0 omogućuje primjenu napredne tehnologije kao što su umjetna inteligencija (AI), Internet stvari (IoT) i kolaborativni roboti za prilagodbu radnog okruženja radnicima. AI sustavi analiziraju podatke u stvarnom vremenu i identificiraju obrasce koji ukazuju na promjene u radnikovom stanju, poput umora ili nepravilnog položaja. Na taj način AI može automatski prilagoditi intenzitet zadataka, poput smanjenja brzine rada strojeva u slučaju preopterećenja radnika, čime se smanjuje rizik od ozljeda.

IoT senzori raspoređeni unutar radnog prostora omogućuju kontinuirano praćenje okolišnih uvjeta kao što su temperatura, razina buke i osvjetljenje. IoT sustavi mogu u stvarnom vremenu prilagoditi ove parametre optimalnim vrijednostima prema radnikovim preferencijama ili sigurnosnim standardima, čime povećavaju udobnost i smanjuju stres. Ovaj dinamičan sustav

održava optimalne uvjete za rad, omogućujući prilagodbu radnog prostora bez dodatnog angažmana radnika. [7]



**Slika 15. Korištenje AI u procjeni opterećenja [13]**

Kolaborativni roboti dodatno smanjuju fizičko opterećenje radnika jer preuzimaju zadatke koji su repetitivni ili fizički zahtjevni. Kobotovi, opremljeni naprednim sensorima, mogu prepoznati položaj tijela radnika i automatski prilagoditi svoje pokrete kako bi izbjegli kolizije i osigurali siguran rad u neposrednoj blizini ljudi. Ova suradnja omogućuje radnicima fokus na zadatke koji zahtijevaju kreativnost i prilagodljivost, dok se fizički zahtjevni zadaci obavljaju automatski, čime se povećava učinkovitost i smanjuje fizički napor. Osim toga, virtualna stvarnost (VR) koristi se za obuku radnika, omogućujući simulaciju radnih uvjeta u sigurnom okruženju, što radnicima olakšava prilagodbu na složene zadatke bez rizika od ozljeda. [6,9]

## **5. STUDIJA SLUČAJA: TRANSFORMACIJA RADNE STANICE UZ PRIMJENU KOLABORATIVNIH ROBOTA I ERGONOMSKIH METODA**

### **5.1. Uvod u studiju slučaja**

Današnji proizvodni sustavi sve više naginju masovnoj prilagodbi, gdje suvremena poduzeća trebaju veću fleksibilnost, efikasnost i održivost kako bi ostala konkurentna. Ovi uvjeti zahtijevaju prilagodljive, rekonfigurabilne i agilne proizvodne sustave koji se mogu brzo prilagoditi različitim veličinama serija i vremenu izlaska proizvoda na tržište.

U okviru Industrije 5.0, važnost se stavlja na humanocentričnost i poboljšanje radnih uvjeta za radnike, s naglaskom na socijalnu održivost. Socijalna održivost naglašava važnost zdravlja i sigurnosti radnika, dobiti te zadovoljstva na radnom mjestu. U tom kontekstu, ergonomija ima značajnu ulogu, posebice fizička ergonomija koja obuhvaća ljudske anatomske, antropometrijske, fiziološke i biomehaničke karakteristike u vezi s fizičkom aktivnošću.

Kolaborativna robotika predstavlja konkretno rješenje za poboljšanje fizičke ergonomije bez ugrožavanja proizvodne efikasnosti. Različiti istraživački projekti razvili su alate i metodologije za dizajn kolaborativnih radnih stanica, no malo ih se bavi pretvaranjem postojećih ručnih radnih stanica u kolaborativne. U ovoj studiji prikazana je pretvorba industrijske ručne radne stanice za sklapanje kablovskih svježnjeva u kolaborativnu, s ciljem poboljšanja fizičke ergonomije radnika i povećanja produktivnosti.

Ciljevi studije uključuju smanjenje biomehaničkog opterećenja radnika i smanjenje ciklusnog vremena. Prije konverzije radne stanice provedena su dva preliminarna koraka: prvi algoritam procjenjuje uvjete fizičke ergonomije, a drugi analizira izvedivost primjene kolaborativne robotike, s naglaskom na sigurnost, kvalitetu procesa i ekonomsku održivost. [14]

### **5.2. Materijali i metode**

Za dizajniranje nove kolaborativne radne stanice koja poboljšava fizičku ergonomiju i efikasnost proizvodnje, primijenjeni su sljedeći koraci:

1. Analiza trenutnog stanja u pogledu fizičke ergonomije: Ovaj korak podrazumijeva procjenu ergonomskih uvjeta trenutne radne stanice kako bi se identificirali zadaci s nepovoljnim biomehaničkim opterećenjima. Procjena se temelji na tehničkom izvješću ISO TR 12295, koje definira okvir za evaluaciju tipičnih ručnih zadataka sastavljanja.

Analiza obuhvaća biomehanička opterećenja vrata, trupa i gornjih udova tijekom ručnih zadataka, koristeći tri ključna pitanja o fizičkom opterećenju, repetitivnim pokretima i neprirodnim radnim položajima.

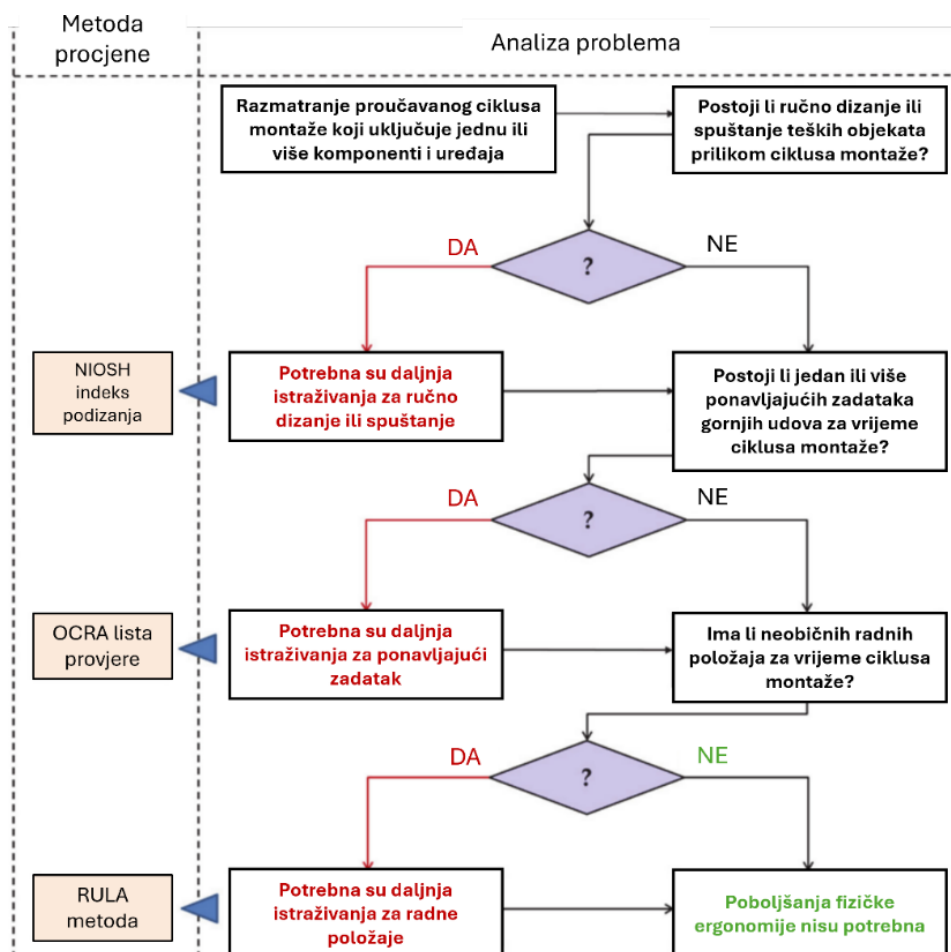
2. Evaluacija potencijala za primjenu kolaborativnih robota: Ako analiza trenutnog stanja pokaže zadatke s visokim opterećenjem, procjenjuje se mogućnost integracije kolaborativnih robota kako bi se olakšali zadaci i smanjilo fizičko opterećenje radnika.
3. Redizajn radne stanice za poboljšanje ergonomije i učinkovitosti proizvodnje: Na temelju dobivenih rezultata iz prve dvije faze, radna stanica se redizajnira kako bi se optimizirali uvjeti rada i produktivnost. [14]

### **5.2.1. Analiza trenutnog stanja u pogledu fizičke ergonomije**

Prvi korak u redizajnu radne stanice obuhvaća detaljnu procjenu fizičkih ergonomskih uvjeta. Cilj je utvrditi zadatke koji su biomehanički nepovoljni te ih unaprijediti uz pomoć kolaborativnih robota kao sustava za fizičku podršku. Ova procjena koristi sljedeće metode:

- OCRA (eng. Occupational Repetitive Action – Ponavljajuća radnja, u daljnjem tekstu OCRA) metoda u obliku check liste za procjenu repetitivnih zadataka.
- RULA za procjenu radnih položaja gornjih udova.

Ukoliko je odgovor na jedno od ključnih pitanja na Slici 16 pozitivan, provodi se dodatna analiza fizičke ergonomije kako bi se utvrdilo postoje li potrebe za redizajnom radne stanice s ciljem integracije kolaborativnog robota. [14]



Slika 16. Identifikacija neergonomskih zadataka koji bi se mogli poboljšati [14]

### 5.2.2. Evaluacija potencijala za primjenu kolaborativne robotike

Kako bi se brzo identificiralo ima li trenutni ciklus montaže potencijal za kolaborativnu primjenu robota, razvijen je algoritam za brzu procjenu. Ovaj algoritam je osmišljen kao jednostavna metodologija koja se može primijeniti i u malim i srednjim poduzećima, jer omogućuje brzu procjenu bez potrebe za naprednim tehničkim znanjima. Algoritam pomaže identificirati nedostatke u trenutnom procesu montaže i postaviti prioritete za poboljšanje.

Algoritam se oslanja na procjenu pet kritičnih čimbenika procesa (PCI, eng. Process Critical Issues – Kritični čimbenici procesa, u daljnjem tekstu PCI) koji uključuju sigurnost i ergonomiju, kvalitetu proizvoda i procesa, te ekonomiju. Svaki od tih čimbenika dobiva ocjenu od 0 do 3, pri čemu 0 označava da poboljšanja nisu potrebna, a 3 da su iznimno preporučljiva. U Tablici 2 prikazani su PCI s pripadajućim težinskim faktorima. [14]

Tablica 2. Brza procjena ručne montaže kablenskog svežnja [14]

Kategorija	Kritični čimbenik procesa (PCI)	Težinski faktor ( $W_i$ )	Ocjena ( $S_{ij}$ )
Sigurnost i ergonomija	PCI 1: Postoje li fizički ergonomski problemi koji se odnose na: dizanje/spuštanje ili nošenje predmeta ILI ponavljajuće zadatke gornjih udova u ponovljenim ciklusima rada ILI statične ili neudobne radne položaje?	3	0-3
	PCI 2: Postoje li profesionalni rizici za sigurnost operatera kojima se ne upravlja na odgovarajući način ILI profesionalni rizik za zdravlje operatera kojim se ne upravlja na odgovarajući način?	3	0-3
	PCI 3: Postoji li visoka monotonost rada ILI vrlo niski zahtjevi u smislu kvalifikacije zadatka ručnog rada?	3	0-3
Kvaliteta proizvoda i procesa	PCI 4: Postoji li nekonstantna/zadovoljavajuća kvaliteta proizvoda ILI neprikladne razine kvalitete procesa prema nominalnim vrijednostima?	2	0-3

Kategorija	Kritični čimbenik procesa (PCI)	Težinski faktor ( $W_i$ )	Ocjena ( $S_{ij}$ )
Ekonomija	<p>PCI 5: Postoji li neučinkovito korištenje vremena i/ili resursa bez stvarnog napretka proizvodnje, odnosno zadaci koji ne mogu stvoriti vrijednost za kupce</p> <p>ILI</p> <p>niska/nezadovoljavajuća produktivnost procesa i/ili učinkovitost proizvodnje?</p>	1	0-3
<p>0 - Poboljšanja nisu potrebna za tu aktivnost / problem ne postoji</p> <p>1 - Ostvariva poboljšanja mogu biti umjerena za tu aktivnost</p> <p>2 - Ostvariva poboljšanja mogu biti dobra za tu aktivnost</p> <p>3 - Poboljšanja bi mogla biti vrlo značajna za tu aktivnost</p>			

Nakon što se dodijele ocjene za svaki PCI, izračunava se potencijal za primjenu kolaborativnog robota. Vrijednost potencijala ( $P_{val}$ ) dobiva se ponderiranjem ocjena svakog čimbenika, prema formuli:

$$P_{val_j} = \sum_{i=1}^5 S_{ij} \cdot W_i; \quad j = 1, \dots, n_t \quad (1)$$

Gdje:

$S_{ij}$  predstavlja ocjenu kritičnog čimbenika,

$W_i$  težinski faktor za PCI.

$P_{val_j}$  vrijednost može biti u rasponu od 0 do 36, a interpretira se prema sljedećim klasama potencijala za primjenu robota:

Bez potencijala:  $P_{val_j} = 0$ ;

Umjereni potencijal:  $9 \geq P_{val_j} > 18$ ;

Dobar potencijal:  $18 \geq P_{val_j} > 27$ ;

Visok potencijal:  $27 \geq P_{val_j} > 36$ ; [14]

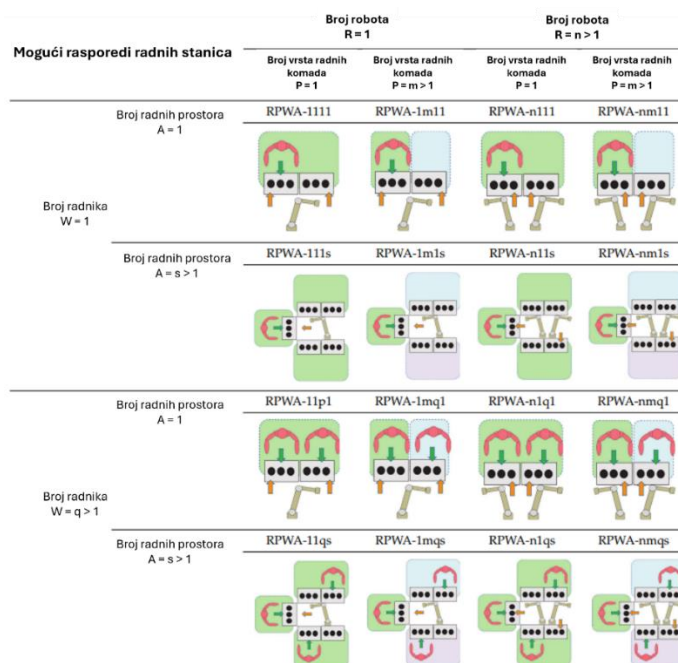
### 5.2.3. Redizajn radne stanice za unapređenje fizičke ergonomije i učinkovitosti proizvodnje

Ako procjena fizičke ergonomije istakne neprikladne radne uvjete, potrebno je poboljšati proces i radnu stanicu. Na temelju pozitivnih rezultata brze procjene, predlaže se integracija kolaborativnog robota za smanjenje biomehaničkog opterećenja radnika. Uz uvođenje kolaborativnog robota, važan aspekt redizajna je i razvoj ergonomskog rasporeda radnog prostora. Predloženi redizajn slijedi smjernice standarda EN ISO 14738, koji utvrđuje principe za dizajniranje radnih stanica temeljene na antropometrijskim mjerenjima.

Poboljšanje produktivnosti nove radne stanice, uključujući vrijeme ciklusa, temelji se na odgovarajućem postavljanju novog rasporeda, koji ovisi o sljedećim proizvodnim varijablama:

- Broj robota (R);
- Broj vrsta radnih komada (P);
- Broj radnika (W);
- Broj radnih područja (A).

Kombiniranjem ovih varijabli može se identificirati 16 različitih rasporeda za kolaborativnu radnu stanicu, prikazanih na Slici 17. Prikladan raspored ovisi o specifičnim vrijednostima ovih varijabli za analizirani proces montaže. [14]



Slika 17. Klasifikacija mogućih rasporeda za kolaborativnu radnu stanicu [14]



### 5.3. Opis studije slučaja

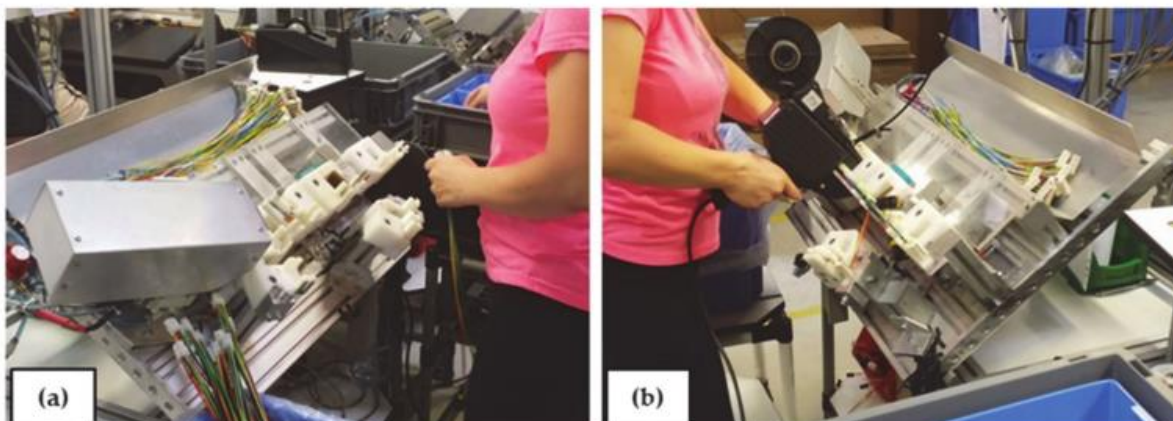
Predmet istraživanja je studija slučaja tvrtke ELVEZ d.o.o., proizvođača kablskih svježnjeva i plastičnih komponenti, smještenog u Višnjoj Gori u Sloveniji. Tvrtka je izrazila potrebu za kolaborativnim robotskim sustavom za montažu kablskih svježnjeva u automobilskoj industriji, koji bi omogućio sigurnu, ergonomsku i učinkovitu interakciju između robota i radnika.

Trenutno se montaža kablskih snopova u ELVEZ-u obavlja ručno na liniji koja radi šest dana u tjednu s tri smjene (8 sati po smjeni). Ukupna godišnja proizvodnja iznosi 900.000 komada, uz procijenjeno trajanje ciklusa od 40 sekundi po jedinici na svakoj stanici. Proces montaže uključuje povezivanje triju skupina kablova pomoću izolacijskih traka, koje se pričvršćuju na sedam različitih točaka. Radnik postupno umeće kablove u posebno montažne postolje, a zatim ih spaja izolacijskom trakom. Montaža se sastoji od 19 osnovnih zadataka, koji su podijeljeni u dvije grupe: radnje vezane uz umetanje kablova i radnje vezane uz lijepljenje.

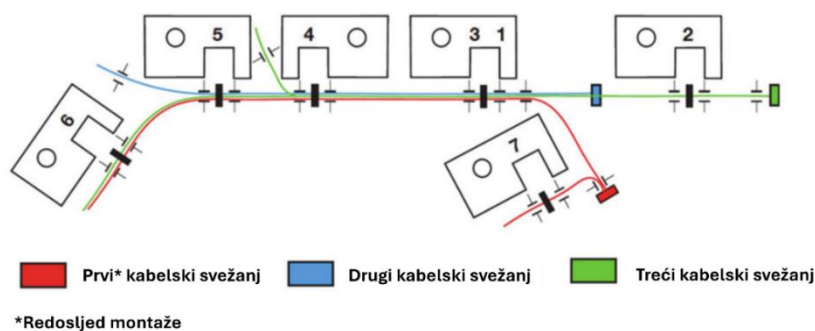
Tvrtka želi unaprijediti radnu stanicu u kolaborativnu kako bi poboljšala:

- Fizičku ergonomiju: proces bi trebao osigurati bolje radne uvjete.
- Produktivnost: trajanje ciklusa trebalo bi biti jednako ili kraće od postojećeg ručnog procesa.

U nastavku se opisuje svaki ključni zadatak zajedno s prosječnim vremenom potrebnim za njegovu izvedbu, čime se dodatno potvrđuje važnost prilagodbe postojećih radnih stanica u skladu s potrebama za sigurnijim, ergonomskim i produktivnijim radnim okruženjem. [14]



Slika 18. Radna stanica za montažu kablskih svežnjeva u ELVEZ d.o.o. [14]



Slika 19. Raspored montažnih šablona i položaj kablova [14]

Tablica 3. Redosljed ručne montaže svežnjeva i prosječno vrijeme izvođenja zadatka [14]

Broj	Zadatak	Prosječno vrijeme izvođenja [s]
1	Uzimanje 1. kabelskog svežnja	2
2	Pozicioniranje 1. kabelskog svežnja	1
3	Uzimanje 2. kabelskog svežnja	3
4	Pozicioniranje 2. kabelskog svežnja	3
5	Podešavanje 1. i 2. kabelskog svežnja	2
6	Uzimanje pištolja za lijepljenje	2
7	Izvođenje 1. lijepljenja	1
8	Odlaganje pištolja za lijepljenje	1
9	Uzimanje 3. kabelskog svežnja	3
10	Pozicioniranje 3. kabelskog svežnja	5
11	Uzimanje pištolja za lijepljenje	2
12	Izvođenje 2. lijepljenja	10
13	Izvođenje 3. lijepljenja	
14	Izvođenje 4. lijepljenja	
15	Izvođenje 5. lijepljenja	
16	Izvođenje 6. lijepljenja	
17	Izvođenje 7. lijepljenja	
18	Odlaganje pištolja za lijepljenje	1
19	Pohranjivanje kabelskih svežnjeva	4
<b>Ukupno vrijeme montaže</b>		<b>40</b>

## 5.4. Rezultati

### 5.4.1. Analiza trenutačne situacije u smislu fizičke ergonomije

Procjena učinaka visokofrekventnog rukovanja lakim teretima temelji se na OCRA check listi, čime se identificira srednja razina rizika za obje strane tijela zbog visokofrekventnih radnji i neprikladnih položaja. Detaljan popis multiplikatora i konačne procjene rizika nalaze se u Tablici 4. [14]

**Tablica 4. Identifikacija neprikladnih uvjeta rada koji se odnose na fizičku ergonomiju [14]**

Ručno rukovanje teškim objektima	Postoji li ručno podizanje ili spuštanje teških objekata tijekom montažnog ciklusa?	NE	Kablovi su vrlo lagani (težina $\ll 3$ kg). Težina pištolja za lijepljenje je manja od 3 kg i ima potporu. (Napomena: teški objekt može se smatrati težinom $\geq 3$ kg.
Repetitivni i zadaci gornjih ekstremiteta	Postoji li jedan ili više repetitivnih zadataka gornjih ekstremiteta tijekom montažnog ciklusa?	DA	Operater cijeli dan obavlja istu montažu. Prosječno trajanje montažnog ciklusa je 40 s. U tom vremenu, operater izvrši 19 zadataka. To znači da operater obavi oko 10.945 ručnih zadataka po smjeni (pretpostavljena smjena traje 8 sati, a učinkovito radno vrijeme je 80%). (Napomena: može se smatrati "repetitivnim zadatkom" aktivnost ukupnog trajanja jednog sata ili više po smjeni koja uključuje ponavljajuće radne cikluse ili zadatke pri kojima se iste radnje ponavljaju više od 50% vremena ciklusa.
Neprikladni radni položaji	Postoje li neprikladni radni položaji tijekom montažnog ciklusa?	DA	Prema prvom vizualnom pregledu, različiti dijelovi tijela radnika nisu u prikladnim položajima tijekom rada. Operater cijeli dan obavlja istu montažu. (Napomena: neprikladni radni položaji odnose se na vrat, trup i/ili gornje ekstremitete i ponavljaju se tijekom značajnog dijela radnog vremena

### 5.4.2. Rezultati OCRA analize

OCRA check lista korištena je za procjenu biomehaničkog opterećenja zbog učestalih pokreta s lakim teretima. Tablica 5 prikazuje glavne varijable korištene u OCRA analizi i njihove procijenjene vrijednosti.

Prema konačnoj procjeni rizika, OCRA vrijednosti su 15,8 za desnu i 15,8 za lijevu stranu, što pokazuje srednju razinu rizika. Smanjenje opterećenja moguće je postići optimizacijom frekvencije pokreta i položaja ramena i lakta. [14]

**Tablica 5. Sažetak multiplikatora i konačna procjena rizika radne stanice (ručna radna stanica) [14]**

Multiplikator	Vrijednost		Obrazloženje
	desne strane	lijeve strane	
Multiplikator oporavka	1,33		Smjena (8h) uključuje pauzu (1h). Kao rezultat, radnik radi 4 sata bez perioda oporavka.
Konstanta frekvencije (dinamičke radnje)	4	4	Pokreti ruku su brzi (~40 radnji/min), prekidi su rijetki i neujednačeni.
Konstanta frekvencije (statičke radnje)	4,5	4,5	Radnik drži pištolj za lijepljenje i kablovetijekom cijelog ciklusa montaže (prisutan je stisak duži od 80% vremena za obje ruke).
Multiplikator sile	0	0	Prema intervjuima s radnikom, zadaci montaže ne zahtijevaju korištenje sile (Borgova ljestvica niža od 3).
Multiplikator položaja i pokreta	Rame	6	Pokreti i odgovarajući položaji proučavani su prema smjernicama check liste.
	Lakat	2	
	Zapešće	0	
	Šaka	8	

<b>Multiplikator</b>	<b>Vrijednost desne strane</b>	<b>Vrijednost lijeve strane</b>	<b>Obrazloženje</b>
Stereotip	0	0	Nema stereotipa.
Dodatni čimbenici	0	0	Nema dodatnih čimbenika.
Multiplikator za neto trajanje	0,95		Ukupno neto trajanje ponavljajućih zadataka procijenjeno je na 361–420 min/smjeni, što uzima u obzir neplanirane prekide.
<b>Konačne vrijednosti check liste</b>	<b>15,8</b>	<b>15,8</b>	<b>srednje crvena</b>
<b>Konačna procjena rizika</b>	<b>srednje</b>	<b>srednje</b>	

#### 5.4.3. Rezultati RULA analize

RULA analiza korištena je za procjenu radnih položaja u svakom zadatku ciklusa montaže. Analiza je usredotočena na ključne dijelove tijela, uključujući gornje ekstremitete, vrat, i trup. Tablica 6 prikazuje RULA ocjene za svaki zadatak. [14]

**Tablica 6. Konačne ocjene po RULA metodi za svaki zadatak [14]**

<b>Broj</b>	<b>Zadatak</b>	<b>Ocjene za lijevu stranu tijela</b>	<b>Ocjene za desnu stranu tijela</b>
1	Uzimanje 1. kablenskog svežnja	5	4
2	Pozicioniranje 1. kablenskog svežnja	3	3
3	Uzimanje 2. kablenskog svežnja	5	6
4	Pozicioniranje 2. kablenskog svežnja	6	7
5	Podšavanje 1. i 2. kablenskog svežnja	6	7
6	Uzimanje pištolja za lijepljenje	5	5

Broj	Zadatak	Ocjene za lijevu stranu tijela	Ocjene za desnu stranu tijela
7	Izvođenje 1. lijepljenja	6	7
8	Odlaganje pištolja za lijepljenje	6	5
9	Uzimanje 3. kablenskog svežnja	4	4
10	Pozicioniranje 3. kablenskog svežnja	6	7
11	Uzimanje pištolja za lijepljenje	5	5
12	Izvođenje 2. lijepljenja	6	7
13	Izvođenje 3. lijepljenja	6	7
14	Izvođenje 4. lijepljenja	6	7
15	Izvođenje 5. lijepljenja	6	7
16	Izvođenje 6. lijepljenja	6	7
17	Izvođenje 7. lijepljenja	5	7
18	Odlaganje pištolja za lijepljenje	3	3
19	Pohranjivanje kablenskih snopova	6	7
<b>Maksimalne vrijednosti</b>		<b>6</b>	<b>7</b>

- Zelena zona (vrijednost RULA između 1 i 2): Ako su rezultati analize određene aktivnosti u ovoj zoni, tada je rad prihvatljiv i nisu potrebne akcije za poboljšanje.
- Svijetložuta zona (vrijednost RULA između 3 i 4): Ako su rezultati analize određene aktivnosti u ovoj zoni, potrebno je provesti daljnja istraživanja, a promjene mogu biti potrebne.
- Tamnožuta zona (vrijednost RULA između 5 i 7): Ako su rezultati analize određene aktivnosti u ovoj zoni, potrebno je daljnje istraživanje, a promjene su potrebne što prije.
- Crvena zona (vrijednost RULA jednaka ili veća od 7): Ako su rezultati analize određene aktivnosti u ovoj zoni, potrebne su hitne promjene kako bi se smanjili rizici.

RULA ocjene za većinu zadataka pokazuju potrebu za ergonomskim poboljšanjima. Konačne ocjene za radnu stanicu su 6 za lijevu stranu i 7 za desnu, što upućuje na visok rizik koji zahtijeva promjene u radnim položajima kako bi se smanjilo opterećenje. [14]

#### 5.4.4. Procjena potencijala za kolaborativnu robotiku

Za procjenu potencijala uvođenja kolaborativnih rješenja korišten je algoritam brze procjene (eng. Quick Assessment). S obzirom na ponavljanje sličnih radnji tijekom montaže, zadaci su grupirani u četiri skupine prema vrsti zadatka. Rezultati, prikazani u Tablici 7, pokazali su da postoji dobar potencijal za uvođenje kolaborativnih rješenja u sve skupine zadataka, posebno za grupu koja uključuje lijepljenje, gdje je potencijal najviši ( $P_{val}=20$ ). Tehnička složenost rukovanja fleksibilnim komponentama, poput kablova, sugerira da bi robot najbolje funkcionirao pri obavljanju repetitivnih zadataka, dok bi radnici upravljali kompleksnijim radnjama. [14]

**Tablica 7. Ocjene kritičnih čimbenika procesa i potencijalne vrijednosti za sve četiri skupine zadataka [14]**

Kritični problem procesa	Rezultat (Sij)			
	Zadatak 1-4, 9-10	Zadatak 5	Zadatak 6-8, 11-18	Zadatak 19
PCI 1	3	2	3	2
PCI 2	0	0	0	0
PCI 3	2	2	2	2
PCI 4	0	0	2	0
PCI 5	3	0	1	3
Potencijalna vrijednost (Pvalj)	18	12	20	15
<b>Klasa potencijala</b>	<b>dobra</b>	<b>dobra</b>	<b>dobra</b>	<b>dobra</b>

#### 5.4.5. Redizajn radne stanice za poboljšanje fizičke ergonomije i proizvodne učinkovitosti

Rezultati u poglavlju 5.4.1. ukazali su na potrebu za poboljšanjem fizičke ergonomije ručne radne stanice, dok su rezultati u poglavlju 5.4.4. pokazali da postoji dobar potencijal za primjenu kolaborativne robotike. Najveći potencijal za primjenu kolaborativnih robota identificiran je u zadacima lijepljenja, koji najviše doprinose biomehaničkom opterećenju

operatera. Kako bi se poboljšala produktivnost bez primjene potpuno automatiziranih rješenja, predloženo je zajedničko obavljanje zadataka između čovjeka i robota te optimalan redizajn radnog prostora.

Odabran je raspored RPWA-1112 (jedan robot, jedan tip proizvoda, jedan operater, dvije radne zone). Taj raspored odabran je zbog sljedećih razloga:

- Radna stanica treba montirati samo jedan tip proizvoda.
- Potrebno je povećati produktivnost bez dodatnih troškova.
- Mala veličina montažne ploče može ometati sigurno dijeljenje radne površine.
- Većina zadataka je sekvencijalna, što onemogućava paralelno izvođenje operacija.

Koristeći raspored s dvije radne zone, operater radi na jednoj ploči dok robot obavlja lijepljenje na drugoj, što omogućava paralelan rad. [14]

#### 5.4.5.1. *Mogućnosti ergonomske poboljšanja*

Prema procjeni fizičke ergonomije, trenutni proces montaže dovodi radnika u nepravilne radne položaje i ponavljajuće pokrete. Tablica 8 daje pregled problema i rješenja za poboljšanje fizičkih uvjeta rada. [14]

**Tablica 8. Rješenja za poboljšanje fizičkih uvjeta rada [14]**

<b>Uključeni dio tijela, položaj i pokreti</b>	<b>Uključeni zadatak</b>	<b>Moguća rješenja</b>
položaj i pokreti gornjeg dijela ruke	lijepljenje	Korištenje kolaborativnog robota kao podrške za lijepljenje
položaj i uvrtnje ručnog zgloba	svi zadaci	Redizajn radnih područja prema glavnim antropometrijskim zahtjevima
položaj vrata	svi zadaci	Redizajn radnih područja prema glavnim antropometrijskim zahtjevima
položaj trupa	svi zadaci	-



Uključena radna značajka	Uključeni zadatak	Moguća rješenja
ritam aktivnosti	svi zadaci	Korištenje kolaborativnog robota za smanjenje učestalosti ručnih radnji
balans opterećenja	svi zadaci	Korištenje kolaborativnog robota za ravnomjerno raspoređivanje opterećenja između lijeve i desne strane tijela

- Gornji dio ruke i pokreti lijepljenja: Koristi se kolaborativni robot kao podrška lijepljenju.
- Položaj i pokreti ručnog zgloba: Redizajn radnih područja prema antropometrijskim zahtjevima.
- Položaj vrata i trupa: Redizajn radne stanice za optimalan radni položaj.

Radna stanica je dizajnirana prema smjernicama norme EN ISO 14738, s radnom površinom nagnutom pod kutom od 30° radi smanjenja uvijanja ručnog zgloba te oplatama postavljenim pod kutom od 120° kako bi se smanjilo uvijanje trupa operatera. Visina radne stanice i položaji oplata su podesivi, što omogućuje prilagodbu antropometrijskim mjerama operatera.

Preliminarna simulacija ergonomskih poboljšanja provedena je pomoću softvera Siemens Tecnomatix Process Simulate, koji omogućava analizu radnih položaja (RULA indeks). Rezultati su pokazali smanjenje maksimalnih RULA ocjena s 6 za lijevu ruku i 7 za desnu ruku na 3 za obje ruke, što predstavlja značajno poboljšanje radnog položaja operatera.

Kolaborativni robot postavljen je na stražnju stranu radne stanice, dok operater radi s prednje strane. Robot se pomiče prema ploči iz donjeg dijela radne stanice, čime se minimizira mogućnost sudara s operaterovom glavom. Kako bi se izbjegao sudar s nogama operatera dok robot radi u donjem dijelu radne stanice, operater koristi visoku stolicu ili stojeći položaj.

Predloženi redizajn ručne radne stanice za montažu kablskih svežnjeva implementiran je u laboratorijskom prototipu prikazanom na Slici 20. [14]



Tablica 9. Sažetak multiplikatora i konačna procjena rizika za novu radnu stanicu [14]

Multiplikator		Vrijednost desne strane	Vrijednost lijeve strane	Obrazloženje
Multiplikator oporavka		1,33		Pretpostavljeno je da smjena (8h) uključuje pauzu (1h). Kao rezultat, broj sati bez perioda oporavka je 4
Konstanta frekvencije (dinamičke radnje)		3 (-25%)	3 (-25%)	Pokreti ruku su brzi (~40 radnji/min). Postoji mogućnost kratkih prekida
Konstanta frekvencije (statičke radnje)		2,5 (-44%)	2,5 (-44%)	Radnik drži pištolj za lijepljenje i kabele više od polovice montažnog ciklusa (prisutan je stisak oko 70% vremena za obje ruke)
Multiplikator sile		0	0	Prema intervjuima s radnikom, zadaci montaže ne zahtijevaju korištenje sile (Borgova ljestvica niža od 3).
Multiplikator položaja i pokreta	Rame	1 (-83%)	0 (-100%)	Pokreti i odgovarajući položaji proučavani su prema smjernicama check liste.
	Lakat	8 (+300%)	6	
	Zapešće	0	0	
	Šaka	0 (-25%)	0 (-25%)	
Stereotip		0	0	Nema stereotipa.
Dodatni čimbenici		0	0	Nema dodatnih čimbenika.

<b>Multiplikator</b>	<b>Vrijednost desne strane</b>	<b>Vrijednost lijeve strane</b>	<b>Obrazloženje</b>
Multiplikator za neto trajanje	0,95		Pretpostavljeno je da ponekad dolazi do prekida u radu. Kao rezultat, ukupno neto trajanje ponavljajućih zadataka procijenjeno je na 361–420 min/smjeni
	<b>Vrijednost desne strane</b>	<b>Vrijednost lijeve strane</b>	<b>Obrazloženje</b>
<b>Konačne vrijednosti check liste</b>	13,9	11,4	žuta
<b>Konačna procjena rizika</b>	blago	blago	
<b>Postotak smanjenja</b>	-12%	-28%	

#### 5.4.6.2. Poboljšanja u radnim položajima

Rezultati RULA analize prikazani su u Tablici 10 i pokazuju smanjenje vrijednosti RULA ocjena s maksimalnih 6 na lijevoj i 7 na desnoj strani na 3 za obje strane. Korištenje robota i novi raspored značajno su smanjili utjecaj nepravilnih radnih položaja na operatera. [14]

**Tablica 10. RULA analiza za novu radnu stanicu [14]**

<b>Broj</b>	<b>Zadatak</b>	<b>Ocjene za lijevu stranu tijela</b>	<b>Ocjene za desnu stranu tijela</b>
1	Uzimanje 1. kablenskog svežnja iz kutije	2	2
2	Postavljanje 1. kablenskog svežnja u okvir	3	3
3	Uzimanje 2. kablenskog svežnja iz kutije	2	2
4	Postavljanje 2. kablenskog svežnja u okvir	2	2

<b>Broj</b>	<b>Zadatak</b>	<b>Ocjene za lijevu stranu tijela</b>	<b>Ocjene za desnu stranu tijela</b>
5	Prilagodba prve skupine kabela na drugu skupinu	2	2
6	Pritisak na gumb (poziv robota)	3	3
7	Prebacivanje s ploče 1 na ploču 2	2	2
8	Uzimanje prethodne završne montaže iz okvira	3	3
9	Pohranjivanje prethodne završne montaže u kutiju	3	3
10	Prebacivanje s ploče 2 na ploču 1	2	2
11	Uzimanje 3. kablenskog svežnja iz kutije	2	3
12	Postavljanje 3. kablenskog svežnja u okvir	3	3
13	Pritisak na gumb (poziv robota)	3	3
14	Prebacivanje s ploče 1 na ploču 2	2	2
	Obavljanje istih zadataka (od 1 do 6) na ploči 2, zatim povratak na ploču 1		
15	Uzimanje završne montaže iz okvira	3	3
16	Pohranjivanje završne montaže u kutiju	3	3
<b>Maksimalne vrijednosti</b>		<b>3</b>	<b>3</b>

Budući da je raspored ploče 2 preslikan od ploče 1 i da je redoslijed montaže isti, nisu potrebni dodatni ili različiti zadaci za montažu kablenskog svežnja na ploči 2. Iz tog razloga, dodatna RULA analiza zadataka montaže vezanih uz ploču 2 nije bila potrebna.

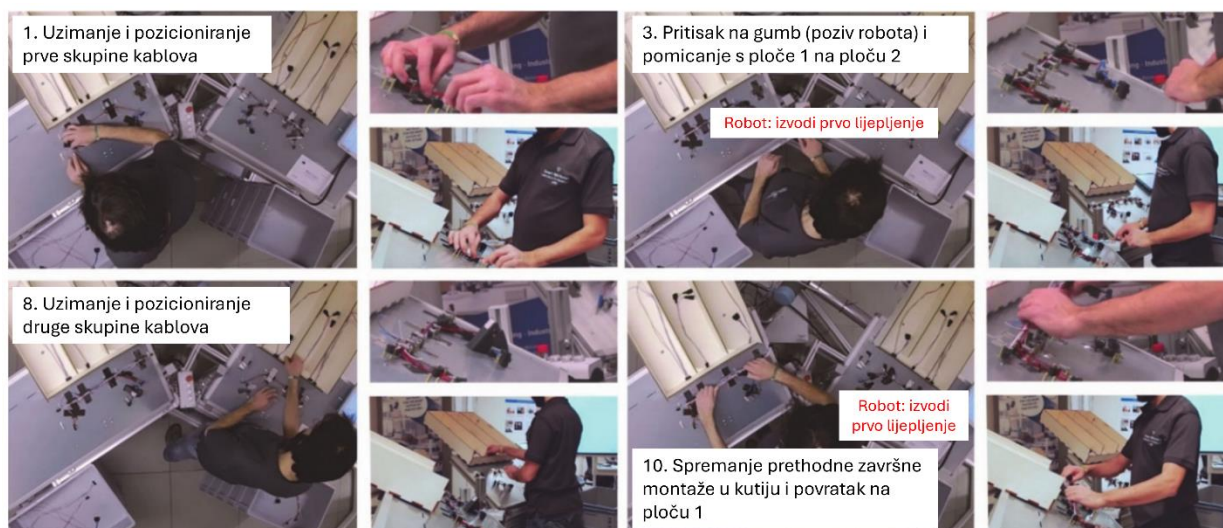
U Tablici 11 nalaze se ocjene za svaki analizirani dio tijela RULA metodom.

Tablica 11. RULA vrijednosti za svaki analizirani dio tijela [14]

		<b>Rezultati RULA analize (maksimalne vrijednosti za svaki položaj)</b>						
		Stvarna radna stanica		Kolaborativna radna stanica		Varijacija indeksa		
		Lijeva strana	Desna strana	Lijeva strana	Desna strana	Lijeva strana	Desna strana	
Analiza ruku i zapešća	Položaj gornje ruke	4	6	2	2	-2	-4	
	Položaj donje ruke	3	3	2	2	-1	-1	
	Položaj zapešća	3	4	2	2	-1	-2	
		Stvarna radna stanica		Kolaborativna radna stanica		Varijacija indeksa		
		Lijeva strana	Desna strana	Lijeva strana	Desna strana	Lijeva strana	Desna strana	
		Uvijanje zapešća	2	2	2	2	0	0
		Korištenje mišića	0	0	0	0	0	0
	Opterećenje/sila	0	0	0	0	0	0	
Analiza vrata, trupa i nogu	Položaj vrata	4		3		-1		
	Položaj trupa	4		2		-2		
	Položaj nogu	1		1		0		
	Korištenje mišića	0		0		0		
	Opterećenje/sila	0		0		0		
<b>Maksimalna vrijednost</b>		<b>6</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>-3</b>	<b>-4</b>	
<b>Poboljšanja (smanjenje % ukupnih vrijednosti radne stanice)</b>						<b>50%</b>	<b>57%</b>	

### 5.4.6.3. Poboljšanja u proizvodnoj učinkovitosti

Vrijeme ciklusa na novoj stanici iznosi oko 35 s po dijelu, što je smanjenje za 12.3% u odnosu na originalno vrijeme od 40 s po dijelu. Smanjenje vremena ciklusa znači uštedu od oko 1460 sati godišnje u "ručnom radu", čime se povećava ukupna produktivnost i smanjuju troškovi rada. [14]



Slika 21. Fotografije eksperimenata s novim ciklusom sklapanja [14]

## 5.5. Zaključak studije

U ovoj studiji prikazana je transformacija ručne radne stanice za sklapanje kabljskih svežnjeva u kolaborativnu radnu stanicu. Rezultat ove transformacije temelji se na konceptu koegzistencije, gdje robot podržava radnika bez izravne fizičke interakcije. Ovaj rezultat postignut je primjenom kolaborativnog robota, promjenom radnog rasporeda i optimizacijom montažnog ciklusa. Glavni cilj transformacije bio je poboljšanje fizičke ergonomije radnika. Za postizanje ovog cilja korišten je okvir za procjenu trenutnog stanja ergonomije prema suvremenim standardima i metodama procjene.

Metoda "Quick Assessment" korištena je za preliminarnu procjenu koristi uvođenja kolaborativnog robota, posebice s aspekta ergonomije, sigurnosti, kvalitete i ekonomskih aspekata. Na temelju te analize dizajniran je novi raspored radne stanice, naglašavajući poboljšanja fizičke ergonomije i učinkovitosti proizvodnje. [14]

### **5.5.1. Ključni rezultati**

Postignuti rezultati pokazuju značajna poboljšanja u ergonomiji i proizvodnoj učinkovitosti. Smanjenje biomehaničkog opterećenja za desnu stranu iznosilo je 12%, dok je smanjenje za lijevu stranu iznosilo 28%. Smanjene vrijednosti RULA ocjena dodatno su smanjile opterećenje, s rezultatima koji pokazuju smanjenje od 50% za lijevu stranu i 57% za desnu stranu. Vrijeme ciklusa je također smanjeno za 12.3%, što je značilo godišnju uštedu od 1460 sati rada. [14]

### **5.5.2. Mogućnosti za poboljšanja i buduća istraživanja**

Unatoč pozitivnim rezultatima, postoji nekoliko područja za daljnje usavršavanje:

- Procjena fizičke ergonomije: Moguće je unaprijediti korištenu metodologiju za procjenu radnih položaja zamjenom RULA metode sa standardiziranim ISO 11226 smjernicama, što bi omogućilo precizniju procjenu.
- Ergonomija: Iako su postignuti zadovoljavajući rezultati, dodatna organizacijska rješenja mogla bi dodatno smanjiti opterećenje, potencijalno omogućujući radniku rad u "zelenoj" zoni.
- Vrijeme ciklusa: Optimizacija putanja robota ili razvoj posebne pištolja za lijepljenje za robote mogli bi dodatno skratiti vrijeme ciklusa.
- Prilagodba radne stanice: Buduće istraživanje moglo bi se usredotočiti na dinamičku prilagodbu elemenata radne stanice uvjetima rada radnika pomoću senzora i nosivih uređaja. [14]



## **6. STUDIJA SLUČAJA: FIZIČKO ERGONOMSKO POBOLJŠANJE I SIGURAN DIZAJN RADNE STANICE ZA MONTAŽU KROZ KOLABORATIVNU ROBOTIKU**

### **6.1. Uvod u studiju slučaja**

U industrijskim okruženjima radnici su izloženi brojnim rizicima, među kojima radom uzrokovani mišićno-koštani poremećaji (eng. Work-related Musculoskeletal Disorders, u daljnjem tekstu WMSD) predstavljaju glavni problem. Kolaborativna proizvodnja s fizičkom suradnjom između ljudi i robota (eng. Human-robot Collaboration, u daljnjem tekstu HRC) nudi potencijal za smanjenje fizičkog opterećenja radnika te poboljšanje sigurnosti i produktivnosti. Kolaborativne radne stanice, poznate kao hibridne radne ćelije, omogućuju zajednički rad ljudi i robota u istom prostoru, što donosi fleksibilnost, ali i izazove vezane uz sigurnost.

Različiti scenariji HRC-a obuhvaćaju neovisni, istovremeni, sekvencijalni i potporni rad. Standard ISO/TS 15066:2016 pruža smjernice za sigurnu implementaciju HRC-a, dok dodatni standardi definiraju procjenu rizika i ergonomske zahtjeve.

Unatoč rastućem broju studija, empirijski dokazi o implementaciji HRC-a u industriji i dalje su rijetki. Ova studija istražuje praktičnu primjenu HRC-a kroz suradnju istraživačkog laboratorija i tvrtke za proizvodnju namještaja, s ciljem stvaranja radne stanice koja poboljšava sigurnost i ergonomiju te omogućuje radnicima s mišićno-koštanim problemima obavljanje svojih zadataka. [15]

### **6.2. Materijali i metode**

Multidisciplinarni tim stručnjaka za ergonomiju, ljudske faktore i robotiku odabrao je radnu stanicu za montažu kao studiju slučaja na temelju pritužbi radnika i zabilježenih mišićno-koštanih poremećaja. Za dizajn i razvoj nove kolaborativne robotske radne stanice definirana su četiri glavna stupnja:

1. Karakterizacija početnog stanja – radna stanica s repetitivnim operacijama ručnog rukovanja (eng. Manual Handling Operations, u daljnjem tekstu MHO).
2. Procjena rizika prilagođena specifičnostima studije slučaja.
3. Definicija zahtjeva temeljenih na sigurnosnim i ergonomske načelima.
4. Razvoj koncepta hibridne radne stanice. [15]

Tijekom svih faza konzultirani su radnici, pravni zahtjevi i relevantni europski standardi kako bi se osigurala sveobuhvatna analiza i dizajn. Kreiran je okvir za siguran dizajn HRC radne stanice, koji sintetizira preporuke iz standarda i prethodnih studija te integrira E&HF (eng. Ergonomics and Human Factors – ergonomija i ljudski faktori) kriterije i sigurnosne zahtjeve. Slika 22 prikazuje kostur dizajna koji uključuje procjenu rizika i redefiniranje zahtjeva sukladno napretku tehnologije i specifičnostima kolaborativnih rješenja. [15]



**Slika 22. Faze za siguran dizajn i razvoj [15]**

U tvrtki za proizvodnju namještaja, studirana radna stanica ima osam zaposlenih radnika s dijagnosticiranim problemima WMSD-a. Svi radnici su žene prosječne dobi od 49,9 godina ( $\pm 7,7$ ) s prosječno 10,9 godina ( $\pm 0,4$ ) radnog iskustva u odjelu montaže. Svi radnici prijavili su jedan ili više mišićno-koštanih problema, poput sindroma karpalnog tunela, hernije diska ili tendinitisa. Aktivnosti na radnoj stanici sastoje se od ručne montaže okvira od MDF-a (eng. Medium Density Fibreboard – vlaknasta ploča srednje gustoće, u daljnjem tekstu MDF), gdje se različite komponente MDF-a lijepe. Ljepilo se nanosi pištoljem na vruće ljepilo, aktiviranim okidačem za prste. Zadaci uključuju:

- i. Zadatak 1 (T1): dohvata traka s palete i njihovo postavljanje na montažni stol.
- ii. Zadatak 2 (T2): uzimanje blokova (malih MDF dijelova) iz kutije.
- iii. Zadatak 3 (T3): dohvata pištolja s ljepilom i nanošenje ljepila na blokove.
- iv. Zadatak 4 (T4): lijepljenje blokova na trake.
- v. Zadatak 5 (T5): uklanjanje traka.
- vi. Zadatak 6 (T6): prijenos poluproizvoda na paletu.

Radnici izvode nekoliko repetitivnih zadataka s gornjim ekstremitetima uz promjenjive zahtjeve za silom i različite položaje (prikazane na Slici 23). [15]



Slika 23. Radni položaji za vrijeme radnog ciklusa montaže [15]

### 6.2.1. Karakterizacija početnog stanja

Kako bi se prikupile informacije o organizaciji rada, radnim uvjetima i mišićno-koštanim poremećajima radnika, provedene su posjete radnoj stanici. Snimljeni su fotografije i videozapisi tijekom obavljanja zadataka, uz suglasnost radnika. Radni ciklus je raščlanjen, a vremenska studija provedena na uzorku od dva radnika kroz 25 ciklusa, s razinom pouzdanosti od najmanje 90% i gornjom granicom pogreške od  $\pm 5\%$ . [15]

### 6.2.2. Procjena rizika

Procjena rizika temeljila se na William Fine metodi, koja se oslanja na jednadžbe koje izražavaju kontrolu rizika i opravdanje za odluke o preventivnim mjerama. Metoda dodjeljuje stupanj rizika koji se izračunava na temelju tri faktora: (i) vjerojatnost nastanka nesreće ( $F_p$ ); (ii) stupanj izloženosti riziku ( $F_E$ ); (iii) posljedice nesreće ( $F_C$ ). Stupanj rizika ( $R_S$ ) određuje se pomoću jednadžbe:

$$R_S = F_p \cdot F_E \cdot F_C \quad (2)$$

Stupanj rizika ( $R_s$ ) omogućuje uspostavu prioriteta za provedbu radnji. Prema William Fine metodi, razina rizika kategorizira se u četiri razine:

- i. Razina rizika I (s konačnim rezultatom jednakim ili većim od 250 bodova): Potrebna je trenutna korekcija, aktivnost se mora zaustaviti dok se opasnost ne smanji.
- ii. Razina rizika II (rezultati između 90 i 250 bodova): Intervencija je hitna i zahtijeva pažnju što je prije moguće.
- iii. Razina rizika III (rezultati između 18 i 90 bodova): Opasnost treba ukloniti bez odgađanja, ali situacija nije hitna.
- iv. Razina rizika IV (rezultati jednaki ili manji od 18 bodova): Opasnost treba riješiti kada se za to pruži vrijeme.

Rezultati William Fine metode istaknuli su najkritičnije rizike, dok je za procjenu mišićno-koštanih rizika korišten RSI (eng. Revised Strain Index – revidirani indeks naprezanja, u daljnjem tekstu RSI), prikladan za distalni gornji ud i višestruke ručne operacije. RSI se izračunava kao umnožak faktora rizika poput intenziteta napora, učestalosti, trajanja napora, položaja zapešća i trajanja zadatka. Promatrano je 40 položaja tijekom različitih radnih ciklusa, a za svaki zadatak određena je razina rizika prema prosječnom RSI. [15]

### **6.2.3. Definicija zahtjeva**

Na temelju prethodne procjene rizika, identificirani su glavni čimbenici rizika i najkritičniji zadaci za mišićno-koštani sustav. Dizajn radnih sustava proveden je prema smjernicama standarda ISO 9241:2010, koji uključuje analizu konteksta, definiranje zahtjeva korisnika, osmišljavanje i evaluaciju rješenja. Koristila se validirana baza antropometrijskih mjera portugalske populacije, a relevantne dimenzije (npr. visina radnog stola) prilagođene su kako bi pokrile 95% ženske populacije, uključujući korekciju od 25 mm za obuću. Identificirani čimbenici rizika usmjerili su razvoj najprikladnijih intervencija i rješenja za kolaborativni sustav, pri čemu se zahtjevi prilagođavaju odabranim konceptima radne stanice. [15]

### **6.2.4. Razvoj koncepta za hibridnu radnu stanicu**

U razvoju hibridne radne stanice primijenjene su tri ključne intervencije:

1. Raspodjela zadataka – Na temelju procjene rizika, najzahtjevniji zadaci dodijeljeni su robotima prema standardima EN ISO 10218-2 i ISO/TS 15066, uz definiranje mjera zaštite.

2. Tehnološka oprema – Odabrana je sigurna i certificirana oprema poput kolaborativnih završnih efektora, uz metode smanjenja rizika za nesigurne tehnologije.
3. Prilagodba radne stanice – Softver Jack – Siemens korišten je za simulaciju ergonomskih zahtjeva i procjenu posturalnih opterećenja metodom RULA, uz testiranje prototipa radnog stola s radnicima.

Kako bi se testirali ergonomski zahtjevi, izrađen je laboratorijski prototip radnog stola. Radnici su reproducirali svoje radne cikluse s različitim pozicijama radnih komada, a njihova percepcija prikupljena je pomoću vizualne analogne skale (VAS) (Slika 24). [15]



**Slika 24. Vizualna analogna skala (VAS) [15]**

XSens tehnologija s 11 inercijalnih senzora korištena je za praćenje pokreta tijela radnika tijekom rada. Algoritam RULA analizirao je prikupljene podatke za procjenu rizika od mišićno-koštanih poremećaja kroz cijeli radni ciklus. [15]



**Slika 25. Sudionik s pričvršćenih 11 inercijskih senzora [15]**

### 6.3. Rezultati

#### 6.3.1. Karakterizacija prvotnog stanja i procjene rizika

Rizici, procijenjeni prema metodi Williama Finea, sažeti su u Tablici 12. Procjena rizika identificirala je pet glavnih rizika na trenutnoj radnoj stanici za montažu. Među manjim rizicima je mogućnost sudara s objektima u radnom prostoru (npr. sirovinama, transportnim trakama). Preventivne mjere uključuju zaštitu oštih rubova i uglova, označavanje glavnih prepreka, uvođenje rotirajućeg stola za palete i obveznu upotrebu osobne zaštitne opreme, poput rukavica i obuće za mehaničku zaštitu. [15]

**Tablica 12. Sažetak procjene prema metodi Williama Finea [15]**

<b>Rizik</b>	<b>Posljedica</b>	<b>Razina rizika</b>
Kontakt s tekućinama na visokim temperaturama	Opekline, ozljede oka	I – Potrebna je trenutna korekcija; aktivnost treba obustaviti dok se opasnost ne smanji
Nepoštivanje ergonomskih principa	MSD	I – Potrebna je trenutna korekcija; aktivnost treba obustaviti dok se opasnost ne smanji
Izloženost buci	Stres, umor	I – Potrebna je trenutna korekcija; aktivnost treba obustaviti dok se opasnost ne smanji
Psihosocijalni rizik (preopterećenje poslom)	Stres, umor	I – Potrebna je trenutna korekcija; aktivnost treba obustaviti dok se opasnost ne smanji
Sudar s preprekama ili objektima	Hematomi, traume, posjekotine	II – Hitno! Zahtijeva pažnju što je prije moguće

Radnici koriste zaštitne slušalice za smanjenje rizika od gubitka sluha, no izloženost buci može povećati napetost mišića, stres i otežati komunikaciju. Preporučuju se kraće i češće pauze kako bi se smanjili psihosocijalni rizici repetitivnog rada. HRC može smanjiti fizičko opterećenje i povezane ergonomske rizike. Prema ISO 6385:2016, ergonomska procjena je ključna za pravilnu raspodjelu funkcija između radnika i robota. Budući da su radnici često imali sindrom

karpalnog tunela, u procjenu su uključene specifične metode za sustav ručnog zgloba, poput RSI. [15]

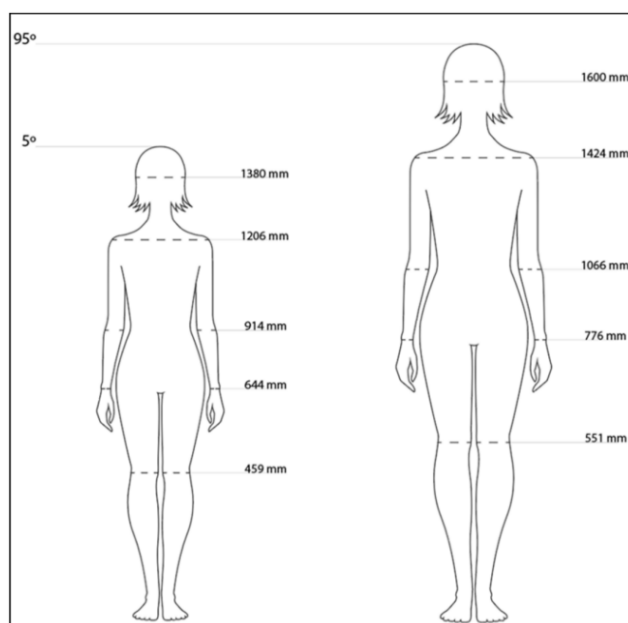
**Tablica 13. Sažetak vremenske studije i RSI procjene (podebljano označava glavni konačni rezultat indeksa naprezanja) [15]**

Zadatak	Prosječno vrijeme [s]	RSI prosječna ocjena	Obrazloženje
T1	3,87 (0,13)	1,9 (0,1)	Sigurno
T2	6,23 (0,35)	6,6 (1,1)	Sigurno
T3	4,24 (0,76)	<b>12,3 (3,3)</b>	<b>Nesigurno</b>
T4	7,54 (0,15)	2,3 (0,0)	Sigurno
T5	3,04 (0,58)	1,0 (0,0)	Sigurno
T6	2,44 (0,01)	1,0 (0,0)	Sigurno

RSI procjena ukazuje na veći rizik od WMSD povezan s zadatkom T3 (nanošenje ljepljivih blokova), prvenstveno zbog intenziteta zadatka.

### 6.3.2. Ergonomski zahtjevi

S ergonomske strane, visina radnog stola za ručne poslove trebala bi biti približno u visini neutralnog položaja laktova. Radnik se nalazi u neutralnom položaju kada su njegovi zglobovi poravnati i blizu sredine raspona pokreta. U ovim neutralnim položajima zglobovi imaju veći kapacitet za podnošenje sile te omogućuju bolju kontrolu pokreta, smanjujući opterećenje na mišićno-koštani sustav. Nasuprot tome, u neprikladnom položaju, zglobovi se približavaju svojim mehaničkim granicama, što dovodi do veće kontrakcije ili istežanja mišića i tetiva. Kod neprikladnog položaja, radnik troši više mišićne energije za generiranje dodatne napetosti kako bi postigao istu silu kao iz neutralnog položaja. To rezultira bržim umaranjem, a s vremenom povećava rizik od mišićno-koštanih problema. Stoga su radne stanice redizajnirane kako bi visina radnog stola odgovarala visini radnikovih laktova, unutar raspona visina od 914 do 1066 mm, prema prikupljenim antropometrijskim podacima. [15]



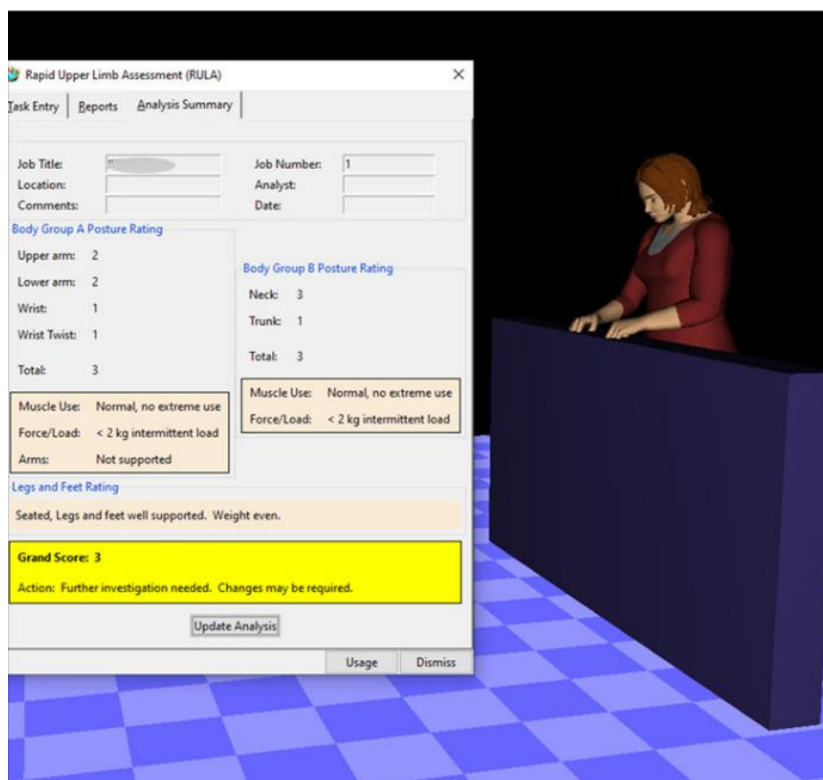
**Slika 26. Antropometrijski podaci ženske portugalske populacije [15]**

Dobiveni rezultati ukazali su na skup zahtjeva za raspodjelu zadataka i konceptualni dizajn radne stanice s kolaborativnim robotima. Ključni ergonomske zahtjevi su:

- Uklanjanje zadatka nanošenja ljepila, koji je kritičan zbog fizičkog napora i repetitivnosti. Osim toga, opekline od vrućeg ljepila najčešće su nesreće.
- Prilagodba dimenzija radne stanice antropometrijskim varijacijama radnika.
- Raznolikost sadržaja posla uvođenjem različitih zadataka ili pauza, budući da je montažni rad monoton i repetitivan.
- Provedba korektivnih mjera za smanjenje izloženosti buci koja ometa komunikaciju i povećava mišićnu napetost.

Za testiranje primjenjivosti ergonomske zahtjeva, kreiran je virtualni prototip montažne radne stanice koristeći Jack – Siemens softver. Softver je korišten za testiranje različitih visina radnog stola unutar intervala od 914 mm do 1066 mm, koristeći RULA metriku za procjenu položaja u odnosu na visinu stola. Najpovoljniji uvjeti postignuti su za radni stol visine 940 mm od poda. [15]





Slika 27. Simulacija i RULA procjena [15]

Nakon toga je kreiran prototip radnog stola (Slika 28). Kako bi se ispunio ergonomski zahtjev za eliminacijom ručnog nanošenja ljepila, robotska radna stanica preuzela je zadatke prenošenja i nanošenja ljepila na blokove, koje će zatim dostaviti radnicima. Položaji zapešća i ruku predstavljaju važan čimbenik rizika, uzimajući u obzir kliničku povijest radnika s karpalnim kanalom i repetitivnost montažnog zadatka.

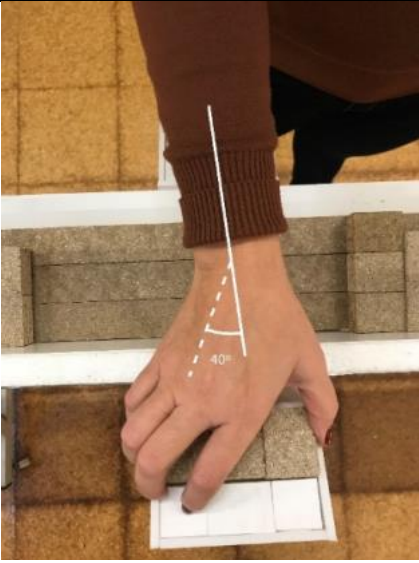
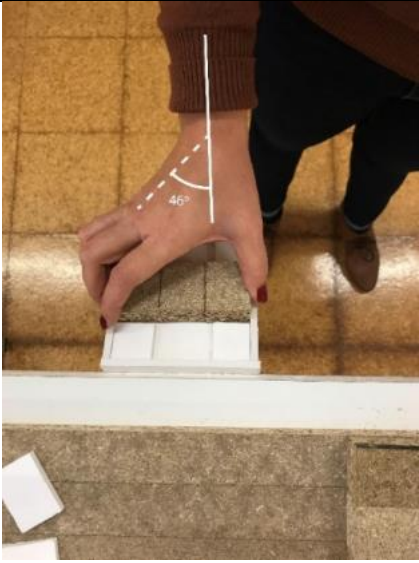
Kako bi se smanjio taj rizik, testirani su različiti položaji za dispencer blokova (Tablica 14):

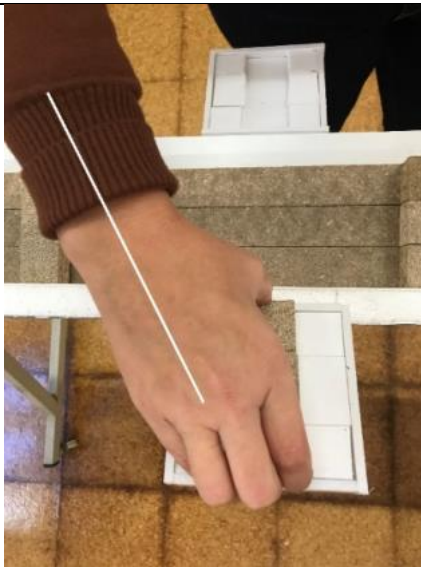
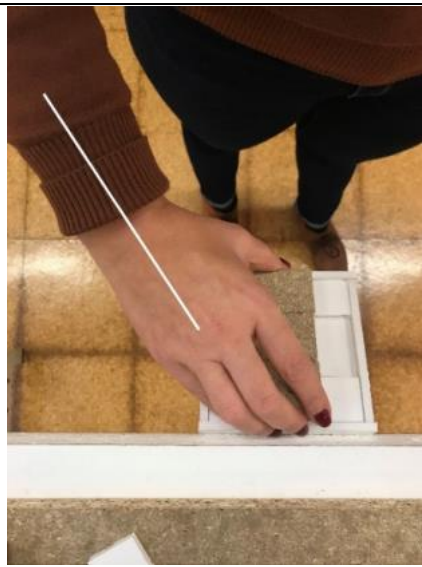
1. Iznad radnog stola, isporučujući blokove paralelno s radnim stolom (položaj 1).
2. Iznad radnog stola, isporučujući blokove okomito na radni stol (položaj 2).
3. Ispod radnog stola, isporučujući blokove paralelno s radnim stolom (položaj 3).
4. Ispod radnog stola, isporučujući blokove okomito na radni stol (položaj 4). [15]



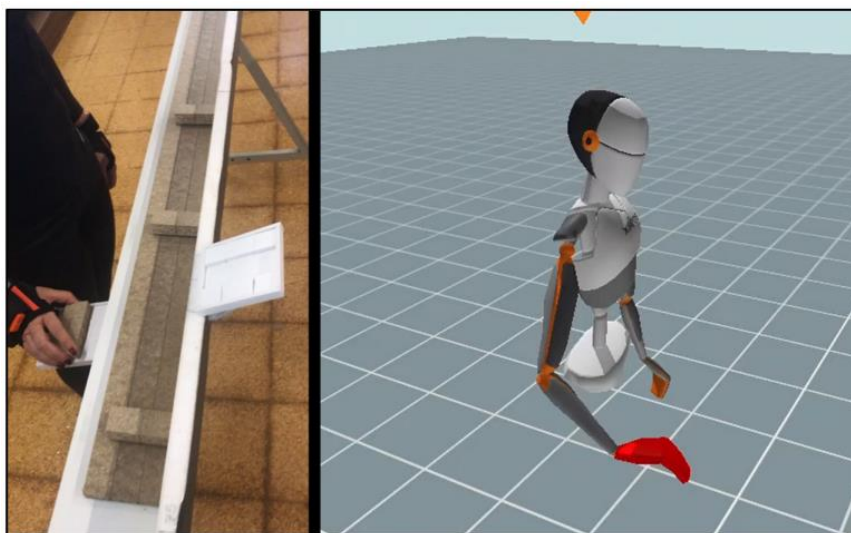
Slika 28. Prototip hibridne radne stanice [15]

Tablica 14. Položaj ruke i zapešća u ispitanim položajima [15]

Ispitani položaj	Zapešće-ruka	Ispitani položaj	Zapešće-ruka
1.		3.	

Ispitani položaj	Zapešće-ruka	Ispitani položaj	Zapešće-ruka
2.		4.	

Prema evaluaciji lateralnog odstupanja zapešća, položaji 1 i 3 povećali su odstupanje, dok su položaji 2 i 4 smanjili ovo odstupanje. Kako bi se procijenio cijeli radni ciklus – doseg i lijepljenje tri seta blokova na trake – primijenjena je tehnologija XSens (Slika 29). [15]



Slika 29. Sudionik simulira zadatke; odgovarajući XSens izlaz [15]

Dvije sudionice studije bile su iskusne radnice u montažnom odjelu, prosječne dobi od  $34 \pm 2,8$  godina i visine  $165 \pm 7,1$  cm. Tablica 15 prikazuje percepciju radnica o ispitanim položajima, pri čemu je položaj 2 ocijenjen najpovoljnijim. Kada je dozator bio postavljen iznad radnog

stola, radnice su imale nesmetan pristup blokovima te su ih mogle hvatati objema rukama. Omogućavanjem dvostrukog hvatanja, radnice su mogle mijenjati položaj kako bi spriječile preopterećenje mišićno-koštanog sustava. [15]

**Tablica 15. Bodovi povezani s nelagodom koju su radnici osjetili u četiri položaja [15]**

Ispitani položaji	Radnica 1 (W1)	Radnica 2 (W2)
1.	2	4
2.	0	0
3.	4	5
4.	6	8

Prikupljeni podaci o kinematici i RULA analiza ukazuju na nizak rizik od razvoja mišićno-koštanih poremećaja kod simuliranih zadataka, što sugerira da je redizajn radne stanice adekvatan s ergonomskog aspekta. Za procjenu različitih položaja dozatora analiziran je izvještaj XSens-RULA za odabrane kinematičke okvire tijekom cijelog ciklusa. Tablica 16 prikazuje konačne RULA ocjene za četiri položaja, s naglaskom na položaj zapešća i gornjeg dijela ruke. [15]

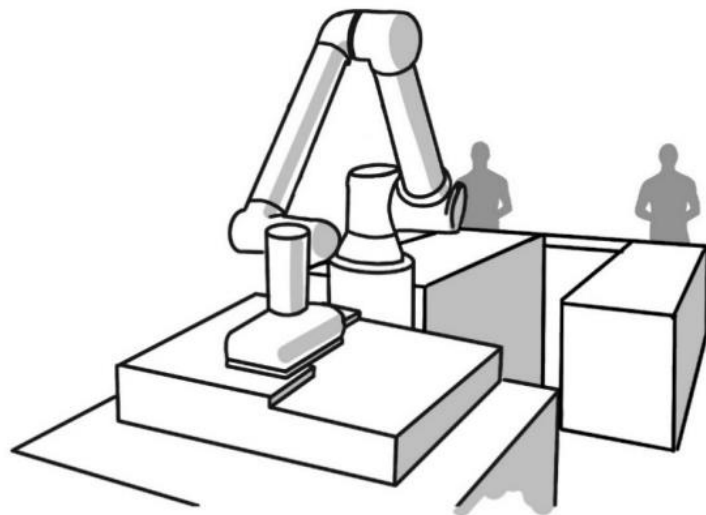
**Tablica 16. Konačne RULA ocjene za obje radnice [15]**

Ispitani položaji	Ocjena položaja zapešća		Ocjena gornjeg dijela ruke		Konačna RULA ocjena	
	W1	W2	W1	W2	W1	W2
1.	3	3	4	4	3	4
2.	2	2	4	3	4	3
3.	4	3	4	4	3	4
4.	3	3	4	4	4	4

Dobiveni rezultati potvrđuju raniju pretpostavku o dozatoru – najniže ocjene (najbolje) za položaj zapešća zabilježene su u položaju 2. Niže RULA ocjene označavaju niži rizik od WMSD povezan s ocjenjivanim položajem, što sugerira da je najoptimalniji položaj dozatora iznad radnog stola s blokovima orijentiranim okomito na stol. [15]

### 6.3.3. Razvoj koncepta hibridne radne stanice

Integracija kolaborativnog robota u montažnu radnu stanicu obuhvatila je ergonomske zahtjeve definirane u prethodnom dijelu. Buduća robotska stanica preuzima zadatke poput dohvaćanja i nanošenja ljepila, čime se smanjuje rizik prisutan u originalnoj postavi radne stanice. Kako bi se zadovoljili proizvodni zahtjevi, zadaci dodavanja ljepila i slaganja blokova zahtijevaju podršku automatizacije, čime se osigurava da blokovi s ljepilom stižu prema zahtjevu radnika. Za ovu specifičnu zadaću, interakcija između čovjeka i robota odvija se sekvencijalno. Radna stanica se sastoji od odvojenih područja rada za operatore i robota, s time da operateri povremeno moraju pristupiti prostoru robota zbog ponovnog punjenja materijala ili promjene radnog referenta, pri čemu nije predviđena fizička zaštita između njih (prikazano na Slici 30). [15]



**Slika 30. Koncept hibridne radne stanice [15]**

Sustav je dizajniran u skladu sa zakonskim smjernicama i standardima za smanjenje rizika, uzimajući u obzir sljedeće:

- Izbor robota: Odabran je kolaborativni robot UR10e (Universal Robots A/S), dizajniran prema ISO 10218-1 sa zaobljenim rubovima, posebnom strukturom koja smanjuje rizik od ozljeda, ugrađenim senzorom momenta i sigurnosnim funkcijama. Robot također ima doomet veći od 1100 mm i šest stupnjeva slobode, što mu omogućuje izvođenje zadataka koji zahtijevaju precizno pozicioniranje i orijentaciju.

- Izbor hvataljke: Pri izboru hvataljke, koja se smatra dijelom uređaja kao stroja čim se poveže na robotsku ruku, odabrana je vakuumska hvataljka Unigripper Co/light koja podržava siguran rad s kolaborativnim robotima, omogućujući rukovanje različitim drvenim blokovima bez stvaranja opasnih uvjeta.
- Jedinica za nanošenje ljepila: S obzirom na visoke temperature potrebne za nanošenje ljepila, postavljen je fizički štiti prema specifikacijama ISO 13857 kako bi se eliminirao rizik od opekline tijekom rada s vrućim ljepilom. [15]

#### **6.4. Zaključak studije**

Integracija ergonomskih principa u dizajn kolaborativne radne stanice predstavlja izazov, ali donosi značajne prednosti. Ova studija analizirala je montažnu radnu stanicu s poznatim fizičkim ergonomskim rizicima te razvila novu kolaborativnu stanicu s robotom. Procjena rizika istaknula je nanošenje ljepila kao najkritičniji zadatak, dok je primijenjeni okvir omogućio transformaciju radne stanice uz oslanjanje na standarde, smjernice i ergonomske metode.

Rezultati su podržali primjenu koncepta kolaborativnih robota, čime je otvoren put za industrijsku primjenu HRC-a usmjerenog na čovjeka. Buduća implementacija uključivat će procjene ergonomije, validaciju radne stanice u skladu s fizičkim poboljšanjima te uzimanje u obzir percepcije radnika u pogledu kognitivne ergonomije. Također će se procijeniti utjecaj na radnike i organizacijsku učinkovitost montažne sekcije. [15]

## **7. STUDIJA SLUČAJA: INTERAKCIJA ČOVJEKA I ROBOTA ZA POBOLJŠANJE ZADATAKA MONTAŽE TRUPA ZRAKOPLOVA**

### **7.1. Uvod u studiju slučaja**

Ergonomija ima ključnu ulogu u unapređenju sigurnosti na radu i produktivnosti, osobito u sektorima poput zrakoplovne industrije, gdje složeni procesi i zahtjevni radni uvjeti povećavaju biomehaničko opterećenje radnika. Zrakoplovna proizvodnja, iako manje sistematizirana od automobilske, suočava se s ergonomskim izazovima zbog repetitivnih radnji, podizanja teških komponenti i neudobnih položaja, što doprinosi riziku od ozljeda i mišićnog umora.

Alati poput simulacija i digitalnih blizanaca omogućuju testiranje i optimizaciju ergonomskih aspekata prije implementacije u stvarnu proizvodnju, što je ključan element paradigme Industrije 5.0, usmjerene na čovjeka. Osim toga, uvođenje kolaborativnih robota nudi potencijal za smanjenje profesionalnih rizika i povećanje proizvodne učinkovitosti, iako je implementacija robotike u zrakoplovstvu još uvijek u povojima zbog složenosti procesa i tehničkih ograničenja.

Cilj ove studije je predstaviti metodologiju za procjenu prednosti uvođenja kolaborativne robotike (HRC) u ručnoj radnoj ćeliji prije njezine fizičke implementacije. Kroz stvarni primjer reorganizacije radnih aktivnosti u montaži oplata trupa, prikazuje se kako robot i radnik dijele radni prostor uz poštivanje svih sigurnosnih zahtjeva. [16]

### **7.2. Interakcija čovjek-robot i regulatorni okviri**

Industrija sve više uvodi sigurne robote u proizvodne linije kako bi dijelili radni prostor s ljudima i unaprijedili proizvodne procese. Cilj je omogućiti ljudima i robotima zajedničko izvršavanje zadataka uz poštivanje sigurnosnih standarda. Interakcija čovjeka i robota, posebno u kontekstu HRC-a, postala je ključna tema istraživanja u robotici. Prema Schmidtleru (2015.), interakcija se dijeli na tri razine: koegzistencija (dijeljenje prostora), kooperacija (dijeljenje cilja) i kolaboracija (fizički kontakt). Shi (2012.) dodaje razine interakcije ovisno o udaljenosti i sigurnosnim mjerama. Primjena robota u montaži donosi brojne prednosti, uključujući veću kvalitetu i ponovljivost, kraće radno vrijeme i smanjenje ergonomskog rizika. U nastavku su navedene prednosti i nedostaci različitih načina rada (samo čovjek, samo robot, čovjek i robot zajedno). [16]

Tablica 17. Prednosti i nedostaci interakcije čovjek-robot [16]

	<b>Prednosti</b>	<b>Nedostaci</b>
<b>Čovjek</b>	Percepcija operacija Odlučivanje Kontrola radnog procesa	Radno vrijeme Ergonomski problemi Ponovljivost zadatka nije osigurana Kvaliteta operacija Umor Radno opterećenje Opasnost od ozljeda Visoki puni trošak
<b>Robot</b>	Smanjenje radnog vremena Kvaliteta operacija Ponovljivost zadatka Nisu ergonomski problemi Kontinuirani rad Ekonomija razmjera	Nema percepcije operacija Slaba kontrola radnog procesa
<b>Interakcija čovjek-robot</b>	Smanjenje radnog vremena Kvaliteta operacija Ponovljivost zadatka Smanjenje ergonomskih problema Kontinuirani rad Odlučivanje Percepcija operacija Kontrola procesa rada	Stalna kontrola sigurnosti

Poboljšanje kvalitete života i sigurnosti ključno je za uvođenje fleksibilne automatizacije. Robotski sustavi unapređuju preciznost rada, smanjuju troškove i omogućuju transformaciju tvornica u održive i ergonomske prostore. Tvornice budućnosti temeljit će se na suradnji između ljudi i strojeva, gdje će roboti prilagoditi tempo i način rada ljudima, povećavajući fleksibilnost i globalnu konkurentnost.

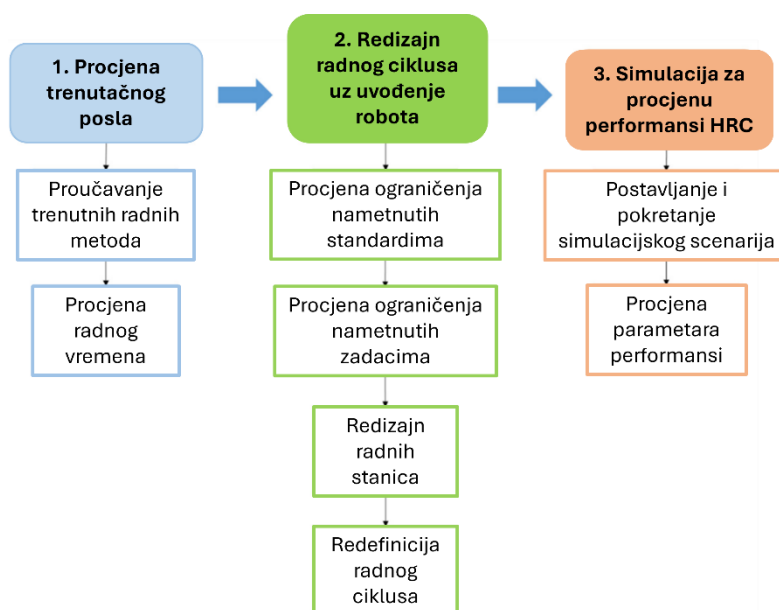


Zahvaljujući napretku u sigurnosnim istraživanjima, roboti će uskoro preuzimati monotone i opasne zadatke bez potrebe za zaštitnim ogradama, čime će se povećati učinkovitost i sigurnost radnika. Kolaborativni roboti zahtijevaju pažljivo razmatranje sigurnosnih i ergonomskih smjernica, pri čemu ISO/TS 15066 pruža ključne tehničke specifikacije za sigurno korištenje robota u HRC operacijama.

ISO/TS 15066 definira četiri metode za sigurnu interakciju: sigurnosni zaustavni nadzor, ručno vođenje, nadzor brzine i udaljenosti te ograničavanje snage i sile. U ovoj studiji korištena je analiza brzine i udaljenosti, gdje su ključni faktori vrijeme reakcije robota, brzina zaustavljanja i kretanje radnika prema robotu. Ove smjernice omogućuju učinkovitu i sigurnu integraciju HRC-a u industrijsko okruženje. [16]

### 7.2.1. Metodologija

Ovo poglavlje prikazuje metodologiju korištenu za procjenu prednosti uvođenja robota u radne stanice gdje se rad obavlja potpuno ručno. Postupak se sastoji od tri glavna koraka, prikazana na Slici 31. [16]



Slika 31. Metodološka procedura za procjenu HRC [16]

Prvi korak (plavi okvir) uključuje procjenu trenutnog rada, gdje se analiziraju ručni zadaci i radna vremena kako bi se identificirali dijelovi ciklusa koje roboti mogu preuzeti, s naglaskom na zadatke visoke preciznosti.

Drugi korak (zeleni okvir) fokusira se na redizajn radne stanice i redefiniranje ciklusa s uključenim robotima. Cilj je poboljšati učinkovitost, smanjiti radno vrijeme i povećati kvalitetu, uz prilagodbu standardima HRC-a.

Treći korak (narančasti okvir) uključuje procjenu performansi nove radne stanice putem simulacije, pri čemu se stvarno radno okruženje reproducira u virtualnom scenariju. To uključuje:

- CAD modele stvarne radne stanice (alati, linije, površine).
- Digitalne modele ljudi (eng. Digital Human Models, u daljnjem tekstu DHM) za reprodukciju antropometrijskih karakteristika.
- Digitalne modele robota, uključujući kinematiku.

Simulacija omogućuje procjenu parametara poput radnog vremena i ergonomije te identificira potencijalne probleme. [16]

### **7.3. Opis studije slučaja**

Ova studija slučaja istražuje primjenu interakcije čovjeka i robota (HRC) radi poboljšanja učinkovitosti rada i ergonomije u procesu montaže kompozitnog trupa zrakoplova. Istraživanje je dio europskog projekta Clean Sky Horizon 2020 pod nazivom "Lean robotized Assembly and Control of Composite Aerostructures (LABOR)". Glavni cilj je redizajnirati radnu stanicu, prebacujući je iz ručne postavke u onu gdje ljudi i roboti dijele radni prostor. Transformacija je procijenjena putem simulacije, prateći metodološke korake opisane ranije. [16]

#### **7.3.1. Operacije montaže: Prije i poslije implementacije HRC**

Nakon procjene trenutne ručne radne stanice (korak 1 na Slici 31), projektni partneri zajednički su osmislili novo HRC rješenje. Digitalni bliznac (eng. Digital Twin) nove radne ćelije korišten je za simulaciju i procjenu izvedivosti s naglaskom na radno vrijeme i ergonomiju (korak 3 na Slici 31). Novi radni ciklus temelji se na postojećem ručnom ciklusu, uz prilagodbe prema standardima ISO 10218 i ISO/TS 15066 te redoslijedu operacija.

Glavne montažne operacije zadržane su u novoj konfiguraciji, ali su reorganizirane za koegzistenciju ljudi i robota. Zbog povjerljivosti, Tablica 18 prikazuje samo glavne zadatke montažnog ciklusa, kategorizirane kao "Prije HRC" i "Nakon HRC". [16]

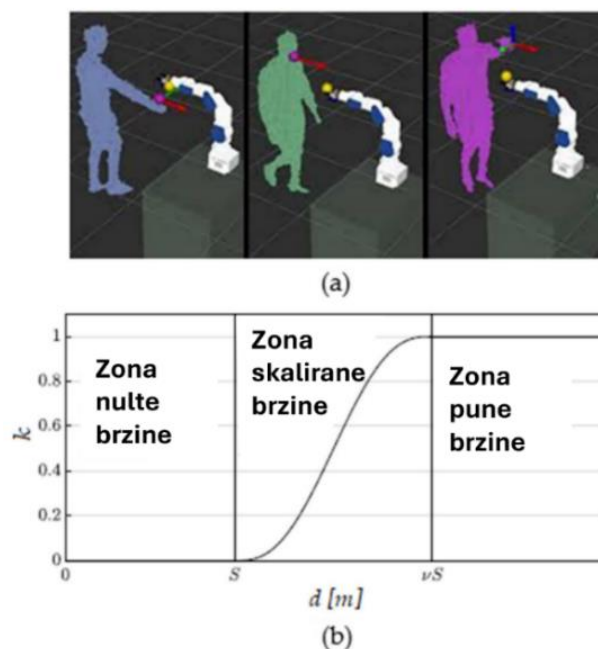
Tablica 18. Opće operacije montaže oplata zrakoplova prije i nakon HRC [16]

Šifra operacije	Prije HRC		Nakon HRC	
	Čovjek	Robot	Čovjek	Robot
OP10	Montaža spojeva, okvira i aluminijskih profila na CFRP oplati	N/A	Montaža spojeva, okvira i aluminijskih profila na CFRP oplati	N/A
OP20	Bušenje cijele oplata trupa	N/A	N/A	Bušenje cijele oplata trupa
OP30	Izrada upuštenja za cijelu oplatu trupa	N/A	N/A	Izrada upuštenja za cijelu oplatu trupa
OP40	Inspekcija rupa	N/A	N/A	Inspekcija rupa
OP50	Rastavljanje aluminijskih profila	N/A	Rastavljanje aluminijskih profila	N/A
OP60	Čišćenje aluminijskih profila	N/A	Čišćenje aluminijskih profila	N/A
OP70	Uklanjanje srha aluminijskih profila	N/A	Uklanjanje srha aluminijskih profila	N/A
OP80	Primjena brtvila	N/A	Primjena brtvila	N/A
OP90	Ponovno montiranje profila na oplatu	N/A	Ponovno montiranje profila na oplatu	N/A
OP100	Zakivanje cijele oplata trupa	N/A	N/A	Zakivanje cijele oplata trupa

N/A – nije dostupno (eng. Not Available)

### 7.3.2. *Specifičnosti uvođenja robota*

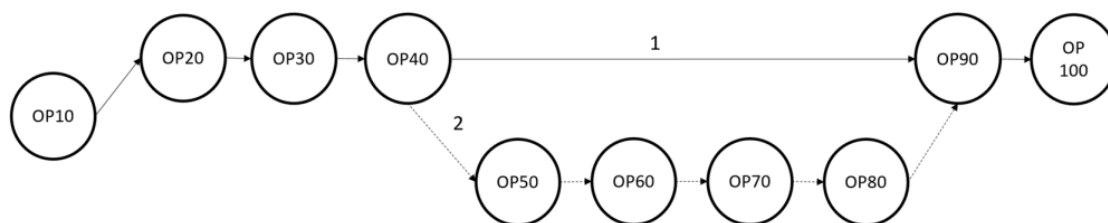
Roboti su uvedeni u proces kako bi poboljšali kvalitetu operacija poput bušenja, izrade upuštenja i zakivanja na oplati od karbonskih vlakana, gdje su potrebne visoke preciznosti i stroge tolerancije. Za ovaj projekt korišteni su roboti FANUC M 20iA u HRC konfiguraciji. Istraživanja pokazuju da roboti unutar optimalnih radnih zona mogu osigurati iznimnu preciznost, osobito kod bušenja. Na Slici 32 prikazan je trend brzine završnog efektora robota u odnosu na udaljenost od ljudskih ruku. Robot prilagođava svoju brzinu i minimalnu sigurnosnu udaljenost ( $S$ ) u stvarnom vremenu, ovisno o relativnim pozicijama i brzinama radnika i robota, čime se osigurava sigurnost i učinkovitost. [16]



**Slika 32.** (a) Detekcija ljudske ruke robotskim senzorima (b) trend brzine robota [16]

### 7.3.3. *Redosljed operacija i ograničenja*

Kako je predloženo u koraku 2 metodološkog postupka (Slika 31), u dizajnu radnog ciklusa uzeti su u obzir i redosljed operacija te ograničenja vezana uz specifične radne zadatke i norme sigurnosti. Slijed operacija pri montaži trupa prikazan je u grafu na Slici 33, a kodovi operacija navedeni su u Tablici 13. [16]



**Slika 33. Dijagram toka za operacije iz Tablice 13 [16]**

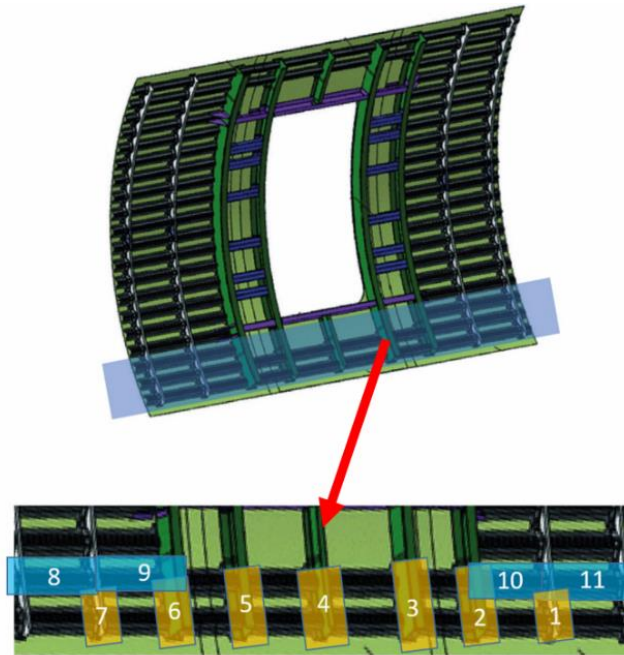
U ovom dijelu montaže trupa, postoje dva glavna puta operacija:

- Put 1 – slijedi se kada u radnoj zoni nema aluminijskih elemenata, te nije potrebno obavljanje zadataka od strane ljudi.
- Put 2 – slijedi se kada su u radnoj zoni prisutni aluminijski elementi, poput profila i okvira. Ovi zadaci zahtijevaju preciznu ručnu prilagodbu zbog dimenzijskih varijacija aluminijskih elemenata, što trenutni robotski sustavi nisu u mogućnosti obraditi na adekvatan način. Ljudska intervencija osigurava fleksibilnost i preciznost u izvršenju, ključne za sigurnost i kvalitetu montaže.

Kompletan radni ciklus za HRC definiran je uzimajući u obzir oba ova ograničenja (sigurnosne norme i redosljed operacija), te je simulacijom procijenjeno vrijeme potrebno za montažu oplata i eventualne ergonomske izazove. [16]

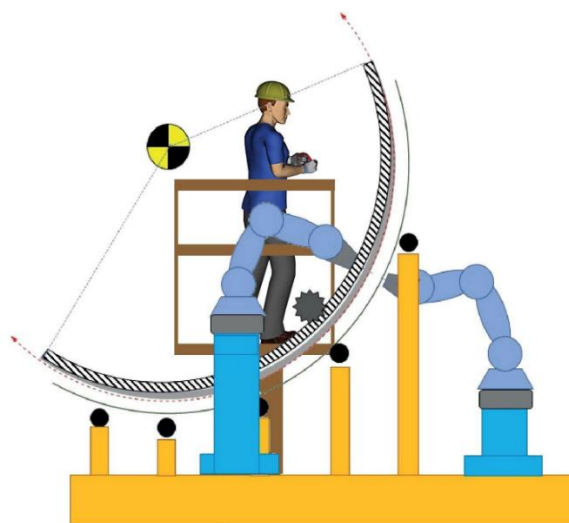
#### **7.3.4. Modeliranje radnog okruženja za simulaciju**

Prema koraku 3 metodološkog postupka (Slika 31), 3D CAD modeli nove radne stanice implementirani su za simulaciju u Tecnomatix Process Simulate softveru tvrtke Siemens. Slika 34 prikazuje generički prikaz oplata trupa zrakoplova korištenog u studiji slučaja, gdje se vide radne zone označene žutom i plavom bojom – plave zone predstavljaju dijelove gdje su potrebne samo operacije robota, dok su u žutim zonama prisutni i ljudski zadaci. Ovaj pristup primijenjen je na svaku sekciju oplata, kako bi se osigurala visoka preciznost u zonama u kojima roboti obavljaju rad. [16]



**Slika 34. Oplata zrakoplova razmatrana u studiji slučaja [16]**

Slika 35 prikazuje shematsku konfiguraciju radne stanice u kojoj čovjek i robot dijele isti radni prostor. Zbog povjerljivosti, stvarna stanica nije prikazana. Stvarni radni prostor uključuje skelu koja omogućuje radnicima pristup udaljenijim radnim zonama, dok jedan od robota ima mogućnost horizontalnog pomicanja. Oplata se također može rotirati, kao što je prikazano na slici. [16]



**Slika 35. Shematski prikaz radne stanice [16]**

Za potrebe simulacije korišten je digitalni model čovjeka (DHM), baziran na srednjem antropometrijskom profilu muškarca iz talijanske baze podataka, koji je zadužen za obavljanje ručnih zadataka. [16]

## 7.4. Rezultati

### 7.4.1. Analiza vremena rada čovjeka i robota u HRC konfiguraciji

Prema koraku 1 metodološkog postupka prikazanog na Slici 31, radna vremena radnika u HRC konfiguraciji procijenjena su na temelju trenutne ručne konfiguracije radne stanice. Iz sigurnosnih razloga, nije moguće navesti točno trajanje operacija, no važno je napomenuti da montaža cijele kompozitne oplata trupa zrakoplova zahtijeva oko tri radne smjene. Ova studija nastoji procijeniti može li se vrijeme dovršetka smanjiti u HRC konfiguraciji. Dodatno, koristi se faktor skaliranja (eng. Scale Factor, u daljnjem tekstu SF) kako bi se prikazala razlika između dvije konfiguracije, kako je prikazano u Tablici 13. Vrijednosti radnog vremena (eng. Time, u daljnjem tekstu T) prikazane u ovoj sekciji ekvivalentne su skaliranim stvarnim vrijednostima radnog vremena (eng. Real Time, u daljnjem tekstu RT) izraženima u satima (h) prema jednadžbi:

$$T = RT \cdot SF \quad (3)$$

Primjenom ove jednadžbe, radno vrijeme za montažu cijele oplata (Ta) iznosi 15 sati.

U koraku 2 metodološkog postupka, nekoliko istraživanja pokazuje da prisutnost robota, koji mogu imati predvidljive ili nepredvidljive pokrete, negativno utječe na radno vrijeme radnika. Ovisno o vrsti operacije, vrijeme rada ljudi povećano je u rasponu od 10 do 20% zbog prisutnosti robota. Što se tiče robota, KUKA (Keller und Knappich Augsburg) je procijenila da radno vrijeme za zadatke koje obavlja robot može biti smanjeno za oko 30% u odnosu na vrijeme koje bi utrošili ljudi. Tako su radna vremena za zadatke koje obavlja robot (bušenje, izrada upuštenja, inspekcija i zakivanje) smanjena za 30% u odnosu na prethodno procijenjeno vrijeme prema jednadžbi:

$$T = RT \cdot SF \cdot 0,70 \quad (4)$$

Ostale operacije robota, poput referenciranja radne zone, vremena kretanja, promjene alata završnog efektor i slično, ovise o karakteristikama robota. Na svakom digitalnom modelu

robotu implementiran je stvarni kontroler robotu kako bi se definirale minimalne i maksimalne linearne brzine, brzina rotacije zglobova i ostali važni parametri.

Simulacije su provedene za dva različita ciklusa montaže. Prvi se ne smatra HRC-om jer radnik i robot nikada ne rade istovremeno – kada radnik obavlja zadatak, robot je neaktivan i obrnuto. U drugom slučaju, radnik i robot dijele istu radnu zonu te mogu istovremeno izvoditi operacije, poštujući ograničenja koja nameće norma ISO-TS 15066.

Tablica 19 prikazuje dio radnog ciklusa u HRC konfiguraciji, gdje iste boje identificiraju operacije koje se obavljaju istovremeno. [16]

**Tablica 19. Dio radnog ciklusa u HRC konfiguraciji [16]**

ČOVJEK			ROBOT		
Opis operacije	Procijenjeno vrijeme – T [s]	Radni prostor	Opis operacije	Procijenjeno vrijeme – T [s]	Radni prostor
Pozicioniranje podizača	38	Slot 1, Područje 11	Referenciranje radnog područja	38	Slot 5, Područje 3
Uklanjanje zakovica	31	Slot 1, Područje 11	Izvođenje cijelog ciklusa bušenja, izrade upuštenja, inspekcije rupa, promjena alata, montaža pričvršćivača i kontrola		Slot 5, Područje 3
Rastavljanje aluminijskih profila	51	Slot 1, Područje 11			
Uklanjanje srha rupa	247	Slot 1, Područje 11			
Nanošenje brtvila	201	Slot 1, Područje 11	Referenciranje radnog područja	38	Slot 5, Područje 2



ČOVJEK			ROBOT		
Opis operacije	Procijenjeno vrijeme – T [s]	Radni prostor	Opis operacije	Procijenjeno vrijeme – T [s]	Radni prostor
Ponovno montiranje profila	51	Slot 1, Područje 11	Izvođenje cijelog ciklusa bušenja, izrade upuštenja, inspekcije rupa, promjena alata, montaža pričvršćivača i kontrola		Slot 5, Područje 2
Postavljanje spojki	76	Slot 1, Područje 11			
Pozicioniranje podizača	16	Slot 2, Područje 12			
Uklanjanje zakovica	15	Slot 2, Područje 12			
Rastavljanje aluminijskih profila	25	Slot 2, Područje 12			

Rezultati simulacije prikazani su u Tablici 20, gdje se uspoređuju različite konfiguracije: samo ručno, rad čovjeka i robota u sekvencijalnom izvođenju te HRC.

**Tablica 20. Rezultati simulacije [16]**

	Samo ručno	Čovjek-robot u sekvencijalnom izvođenju	HRC
Vrijeme montaže [h]	15	8,78	7,86
Smanjeno vrijeme [h]	0	6,22	7,14
Postotak smanjenog vremena	0	41,5%	47,6%

Uvođenje robota u radnu stanicu značajno smanjuje radno vrijeme potrebno za montažu cijelog panela. Ovo vrijeme dodatno se smanjuje u HRC konfiguraciji, gdje je razlika u odnosu na ručnu konfiguraciju gotovo 50%. [16]

#### 7.4.2. Ergonomska procjena

Druga analiza provedena je radi procjene ergonomske performansi u konfiguraciji HRC. Općenito, ergonomska analiza u proizvodnim procesima zahtijeva procjenu četiri glavna faktora koji uzrokuju ozljede zbog biomehaničkog opterećenja: radni položaji, ručno rukovanje materijalom, primijenjene sile i ponavljajuće radnje. U ovom slučaju, jedino radni položaji doprinose biomehaničkom opterećenju, budući da tijekom radne smjene nema ponavljajućih radnji, kao ni predmeta težih od tri kilograma koje je potrebno nositi ili podizati. Što se tiče primijenjenih sila, roboti obavljaju sve zadatke bušenja i izrade upuštenja, koji su jedini zadaci za koje je potrebna sila. Dakle, i primijenjene sile mogu se zanemariti u ergonomske analizi. Kako bi se analizirali radni položaji, korištena je metoda OWAS koja omogućuje procjenu rizika za cijelo tijelo analizom radnih položaj. Postoje četiri klase rizika, identificirane kroz četiri težinske vrijednosti, a definirane su kako slijedi:

- Klasa rizika 1: bez rizika.
- Klasa rizika 2: nizak rizik.
- Klasa rizika 3: srednji rizik.
- Klasa rizika 4: visok rizik.

Konačni rezultat metode je OWAS indeks, predstavljen u sljedećoj formuli:

$$I = [(a \cdot 1) + (b \cdot 2) + (c \cdot 3) + (d \cdot 4) \cdot 100] \quad (5)$$

gdje su  $a, b, c$  i  $d$  frekvencije promatranja za svaku klasu rizika. Frekvencije promatranja mogu se izračunati kao broj promatranja za svaku klasu ( $N_k$ ) podijeljen ukupnim brojem promatranja ( $N$ ):

$$k = \frac{N_k}{N} \cdot 100, \quad k = a \dots d \quad (6)$$

Konačni rezultat je između 100 i 400. Tablica 21 prikazuje izloženost radnika riziku na temelju OWAS indeksa i predlaže moguće korektivne mjere za visoko rizične slučajeve. [16]

Tablica 21. OWAS indeks rizika [16]

OWAS indeks rizika		
Vrijednost	Izloženost riziku	Posljedice
100	Bez rizika	Nema posljedica.
101-200	Nizak rizik	Ako je moguće, poboljšati strukturne faktore ili poduzeti druge organizacijske mjere.
201-300	Srednji rizik	Brzo poboljšati strukturne faktore ili poduzeti druge organizacijske mjere.
301-400	Visok rizik	Potrebna je hitna promjena metoda rada, korištene opreme ili radnih pozicija radnika.

Obično OWAS postupak uzima u obzir težinu veće od 10 kg. Budući da svi alati koje radnici koriste teže manje od 10 kg, masa ne pridonosi OWAS indeksu. Još jedan važan faktor koji utječe na točnost OWAS analize je uzorkovanje pokreta DHM-a. Velika prednost analize izvedene pomoću digitalne reprodukcije stvarne radne stanice jest mogućnost variranja vremena uzorkovanja radi postizanja kompromisa između kvalitete analize i računalnog vremena. Naime, smanjenjem vremena uzorkovanja, prikuplja se više položaja za analizu, ali se povećava i vrijeme obrade, i obrnuto. U ovoj studiji postignut je dobar kompromis postavljanjem vremena uzorkovanja na 0,05 sekundi (frekvencija od 20 Hz). Vrijeme obrade, uzimajući u obzir samo aktivna vremena radnika, iznosilo je oko osam sati (već skalirano prema SF-u). Uzimajući u obzir SF, Tablica 22 prikazuje broj akvizicija koje pripadaju svakoj kategoriji radnje i frekvencije promatranja. [16]

Tablica 22. Rezultati simulacije - OWAS koeficijenti [16]

Kategorija radnje	Broj promatranja	Frekvencije promatranja	Vrijednost
1	114,984	a	93,885%
2	4848	b	3,951%
3	2649	c	2,163%
4	0	d	0,000%
	122,472	<b>Ukupno</b>	100%

OWAS indeks može se izračunati primjenom Jednadžbe (5):

$$I = [(114,984 \cdot 1) + (4848 \cdot 2) + (2649 \cdot 3) + (0 \cdot 4) \cdot 100] = 108,278 \quad (7)$$

Vrijednost OWAS indeksa spada u područje niskog rizika; stoga, nema potrebe za hitnim korektivnim radnjama, ali, ako je moguće, mogu se poduzeti organizacijske mjere za poboljšanje radne stanice. Što se tiče simulacije, važan podatak je da samo 7489 promatranja pripada kategorijama radnje 2, 3 ili 4, oko šest minuta radnog ciklusa čovjeka, što naglašava činjenicu da je pojava mišićno-koštanih poremećaja vrlo malo vjerojatna za ovu radnu stanicu. Vrijednost '0' za kategoriju radnje 4 ukazuje na to da tijekom simulacije nisu zabilježeni radni položaji koji bi zahtijevali hitne korektivne mjere. Ovo je rezultat ergonomskeg dizajna radnog mjesta koji sprječava nastanak ekstremno nepovoljnih položaja. Nadalje, simulacijski model i uvjeti promatranja su postavljeni tako da reflektiraju sigurne i optimalne radne uvjete, čime se izbjegavaju situacije koje bi se svrstale u ovu kategoriju. [16]

### **7.5. Zaključak studije**

U ovom istraživanju ispitane su prednosti interakcije čovjeka i robota (HRC) u zrakoplovnoj industriji kroz redizajn radne stanice i stvarnu studiju slučaja montaže kompozitne oplata trupa. Simulacije su provedene uzimajući u obzir sigurnosne zahtjeve te su evaluirane performanse u smislu radnog vremena i ergonomije. Rezultati pokazuju smanjenje vremena montaže za 47,6% u HRC konfiguraciji te poboljšane uvjete rada s nižim ergonomskim rizicima, što je potvrđeno OWAS metodom. Validacija simulacijskih rezultata s eksperimentalnim podacima nije moguća jer fizička radna stanica još nije dostupna. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na optimizaciju radnog ciklusa i računalnih simulacija za postizanje maksimalnih koristi od HRC rješenja. [16]

## 8. ZAKLJUČAK

Ovaj diplomski rad istražuje potencijal primjene ergonomskih metoda u kontekstu Industrije 5.0, s naglaskom na suradnju čovjeka i tehnologije. Cilj rada bio je identificirati načine na koje integracija naprednih tehnologija, poput kolaborativnih robota, može poboljšati radne uvjete, smanjiti fizičke i mentalne napore radnika te povećati ukupnu produktivnost i sigurnost radnih sustava.

Teorijski dio rada pruža detaljan pregled ergonomskih metoda, povijesti i razvoja ergonomije te značajki Industrije 5.0. Ključni koncepti, poput humanocentričnosti, otpornosti i održivosti, stavili su fokus na ulogu ergonomije u stvaranju sigurnijih i učinkovitijih radnih mjesta. Rad ističe važnost prilagodbe radnih stanica fizičkim i kognitivnim potrebama radnika, čime se doprinosi stvaranju održivih radnih okruženja.

Empirijski dio rada obuhvatio je analizu tri studije slučaja koje su ilustrirale praktične primjene ergonomskih metoda u različitim industrijskim okruženjima. Prva studija pokazala je kako se integracijom kolaborativnih robota smanjuje fizičko opterećenje radnika i skraćuje ciklus proizvodnje, dok su sigurnosni standardi ostali na visokoj razini. Druga studija fokusirala se na fizičko ergonomsko poboljšanje radne stanice, gdje je redizajn rezultirao značajnim smanjenjem mišićno-koštanih rizika uz očuvanje ili unapređenje razina produktivnosti. Treća studija analizirala je interakciju čovjeka i robota pri montaži trupova zrakoplova, gdje su identificirani pozitivni učinci na produktivnost i smanjenje radnog stresa.

Rezultati ovog rada pokazuju da primjena ergonomskih principa unutar Industrije 5.0 može značajno unaprijediti radne uvjete i proizvodne procese. Smanjenje fizičkog opterećenja radnika uz pomoć tehnologije, optimizacija radnog prostora prema ergonomskim smjernicama te povećanje učinkovitosti proizvodnje ključni su doprinosi analiziranih rješenja. Unatoč brojnim prednostima, implementacija ovakvih rješenja suočava se s izazovima, uključujući visoke početne troškove i potrebu za temeljitom obukom zaposlenika.

Zaključno, ovaj rad doprinosi razumijevanju uloge ergonomije u tehnološki naprednim okruženjima i pruža smjernice za daljnju primjenu ergonomskih metoda u Industriji 5.0. Buduća istraživanja trebala bi se usmjeriti na analizu dugoročnih učinaka ergonomskih intervencija te na razvoj novih metoda prilagodbe radnih mjesta kako bi se povećala sinergija između ljudi i tehnologije.

## LITERATURA

- [1] Kirin, S.: Uvod u ergonomiju, Zdravstveno veleučilište, 2007.
- [2] "Workplace Ergonomics: Are You Doing It Right?". Preuzeto s <https://direct2u.co.uk/blog/workplace-ergonomics-are-you-doing-it-right/>, pristupljeno 31.10.2024.
- [3] Bridger, R. S.: Introduction to Ergonomics, CRC Press, 2017.
- [4] Karwowski, W.: Handbook of Human Factors and Ergonomics, Wiley, 2006.
- [5] "Office Workspace Ergonomic Self-Evaluation". Preuzeto s <https://www.ocwr.gov/ergonomics-outreach/office-workspace-ergonomic-self-evaluation/>, pristupljeno 1.11.2024.
- [6] Demir, K. A., Döven, G., & Sezen, B.: Industry 5.0 and human-robot co-working, Procedia Computer Science, 2021.
- [7] Passalacqua, M.: Human-Centered AI for Industry 5.0 (HUMAI5.0): Design Framework and Case Studies, 2024.
- [8] "Is Your Business Ready for Industry 5.0?". Preuzeto s <https://knowhow.distrelec.com/manufacturing/is-your-business-ready-for-industry-5-0/>, pristupljeno 3.11.2024.
- [9] Nahavandi, S.: Industry 5.0 - A human-centric solution, Sustainability, 2019.
- [10] "Industry 4.0 vs. Industry 5.0". Preuzeto s <https://smartfactory.rs/industry-4-0-vs-industry-5-0/>, pristupljeno 3.11.2024.
- [11] "Kolaborativni roboti". Preuzeto s <https://metron.ba/kolaborativni-roboti/>, pristupljeno 3.11.2024.
- [12] "Human-Robot Collaboration in Modern Manufacturing". Preuzeto s [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-38165-2\\_88](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-38165-2_88), pristupljeno 3.11.2024.
- [13] "How AI is Revolutionizing Workplace Ergonomics". Preuzeto s <https://tumeke.io/updates/how-ai-is-revolutionizing-workplace-ergonomics>, pristupljeno 3.11.2024.
- [14] Gualtieri, L., Rauch, E., & Vidoni, R.: A conceptual framework to evaluate human-robot collaboration: Analysis of manufacturing case studies, Sustainability, 2021.

- [15] Colim, A., Faria, C., Cunha, J., Oliveira, J., Sousa, N., & Rocha, L. A. Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics, *Sensors*, 2019.
- [16] Cimino, C., Pedrali, L., Negri, E., Peruzzini, M., & Germani, M.: Human–Robot Interaction for Improving Fuselage Assembly Tasks: A Case Study, *Applied Sciences*, 2020.