

Ergonomsko oblikovanje radnog mjesta uz implementaciju kolaborativnog robota u proizvodnim sustavima

Mrazović, Silvestar

Undergraduate thesis / Završni 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:235:654159>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-16**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Silvestar Mrazović

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. Prof. dr. sc. Tihomir Opetuk, mag. ing.
Dr. sc. Maja Trstenjak, mag. ing.

Student:

Silvestar Mrazović

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. Prof. dr. sc. Tihomiru Opetuk i komentorici dr.sc. Maji Trstenjak na pomoći, savjetima i uloženom trudu kod izrade Završnog rada.

Zahvaljujem se i svojoj obitelji te svima ostalima koji su na bilo koji način pridonijeli mojem dosadašnjem studiranju.

Silvestar Mrazović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Silvestar Mrazović** JMBAG: **0035219334**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ergonomsko oblikovanje radnog mjesta uz implementaciju kolaborativnog robota u proizvodnim sustavima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Ergonomic design of a workplace by collaborative robot implementation in the manufacturing system**

Opis zadatka:

Industrija 5.0, kao nadogradnja koncepta Industrije 4.0 vraća čovjeka u središte proizvodnog sustava uz poseban naglasak na njegovo zdravlje i sigurnost. Implementacijom kolaborativnih robota u sustav omogućuje se fizičko rasterećenje radnika u obavljanju teških ili repetitivnih zadataka zbog čega se smanjuje mogućnost fizičke ozljede ili mentalnog zamora koji negativno utječu na produktivnost.

U radu je potrebno:

- Opisati pojam kolaborativnih robota.
- Navesti mogućnosti njihova korištenja u proizvodnji.
- Povezati njihovu implementaciju s postojećim ergonomskim metodama u smislu ergonomskog oblikovanja radnog mjesta.
- Na primjeru simulacije radne stanice (studija slučaja), uz korištenje tradicionalnih ergonomskih metoda pokazati unapređenje radnog mjesta u smislu povećanja sigurnosti radnika implementacijom kolaborativnog robota.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadao: *Opetuk*
Izv. Prof. dr. sc. Tihomir Opetuk

Dr. sc. Maja Trstenjak *Mašić*

Predsjednik Povjerenstva:
Gođec
Prof. dr. sc. Damir Gođec

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Industrija 4.0	1
1.2. Industrija 5.0	3
2. ERGONOMIJA	10
2.1. Podjela ergonomije	11
2.2. Vrste ergonomije.....	12
2.3. Ergonomske metode.....	13
2.3.1. Opće metode.....	15
2.3.2. Metode primjenjive na gornje udove, vrat i leđa	17
2.4. Ergonomija i industrija.....	19
3. KOLABORATIVNI ROBOTI	21
3.1. Povijest kolaborativnih robota	21
3.2. Vrste kolaborativnih robota	22
3.3. Primjena kolaborativnih robota u proizvodnji	22
3.4. Kolaborativni roboti i ergonomija.....	23
4. UNAPREĐENJE RADNE STANICE KORIŠTENJEM KOLABORATIVNOG ROBOTA	25
4.1. Postupak provođenja RULA metode	25
4.1.1. Držanje i položaj dijelova tijela.....	25
4.1.2. Tablice i bodovne liste	27
4.1.3. Razine akcije	29
4.2. Studija slučaja	30
4.2.1. Postupak korištenja RULA metode	34
5. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	43

POPIS SLIKA

Slika 1. Industrijske revolucije [2]	1
Slika 2. Koncept industrije 4.0 [3]	3
Slika 3. Industrija 5.0 s tri ključna pokretača [5]	6
Slika 4. Glavni ciljevi Industrije 4.0 [5]	6
Slika 5. Glavni ciljevi Industrije 5.0 [5]	7
Slika 6. Promjena istraživačkih tema u tehnologiji kod Industrija 4.0 i 5.0 [5]	7
Slika 7. Prikaz područja djelovanja ergonomije u sustavu čovjek-stroj-okolina [6]	10
Slika 8. Podjela ergonomije [6]	11
Slika 9. Upotreba virtualne stvarnosti [7]	19
Slika 10. Suradnja čovjeka i robota [8]	20
Slika 11. Primjena kolaborativnih robota [10]	23
Slika 12. Položaj nadlaktice [14]	25
Slika 13. Položaj podlaktice [14]	26
Slika 14. Položaj šake [14]	26
Slika 15. Položaj vrata [14]	26
Slika 16. Položaj trupa [14]	27
Slika 17. Universal Robots UR5 [16]	31
Slika 18. The Universal Robots teach pendant [16]	31
Slika 19. Leap motion kontroler [17]	32
Slika 20. Upravljanje robotom pomoću kontrolnog uređaja [18]	33
Slika 21. Položaj čovjeka kod upravljanja gestama [16]	33
Slika 22. Pravilo bodovanja nadlaktice [14]	34
Slika 23. Pravilo bodovanja podlaktice [14]	34
Slika 24. Pravilo bodovanja ručnog zgloba [14]	35
Slika 25. Pravilo za zakret ručnog zgloba [14]	35
Slika 26. Pravilo za ocjenu položaja vrata [14]	37
Slika 27. Pravilo za ocjenu položaja trupa [14]	37

POPIS TABLICA

Tablica 1. Veza između ključnih pokretača za Industriju 4.0 i Industriju 5.0 i ljudi, organizacije i tehnologije u praktičnom kontekstu [5].....	5
Tablica 2. Kontrast Industrije 4.0 i Industrije 5.0 [5].....	8
Tablica 3. Najčešće korištene metode za analizu položaja tijela [6].....	14
Tablica 4. Razlika između konvencionalnih robota i kobota [9]	21
Tablica 5. Tablica A strane [14].....	28
Tablica 6. Tablica kategorije težine tereta [14].....	28
Tablica 7. Tablica B strane [14]	29
Tablica 8. Tablica C za ukupnu procjenu [14]	29
Tablica 9. Razina akcije [14].....	30
Tablica 10. Očitavanje iz A tablice [14]	36
Tablica 11. Očitavanje za A stranu [14]	37
Tablica 12. Očitavanje iz B tablice [14]	38
Tablica 13. Očitavanje vrijednosti iz tablice C [14]	39
Tablica 14. . Rezultati RULA analize [17].....	39
Tablica 15. Rezultati ispitivanja upotrebljivosti [17].....	40

SAŽETAK

U ovom radu obrađena je tema ergonomskog oblikovanja radnog mjesta uz implementaciju kolaborativnog robota u proizvodnim sustavima. Za razumijevanje rada najprije su objašnjeni ključni pojmovi Industrije 4.0, Industrije 5.0, ergonomije i kolaborativnih robota. Fokus je stavljen na poboljšanje radnih uvjeta, povećanje produktivnosti i smanjenje rizika od ozljeda kod radnika. Kroz analizu različitih položaja tijela istražuju se optimalni uvjeti suradnje između čovjeka i robota. Rezultati analize RULA metodom pružaju smjernice za ergonomsku optimizaciju i implementaciju promjena koje bi poboljšale sinergiju između ljudi i robota. Kolaborativni roboti pokazuju potencijal za povećanje učinkovitosti, smanjenje fizičkog opterećenja radnika te stvaranje inovativnijih i sigurnijih proizvodnih okruženja. Ovaj rad naglašava važnost integracije tehnologije i ergonomije kako bi se postigla održiva i produktivna radna mjesta u proizvodnim sustavima. Suvremena implementacija kolaborativnih robota može pridonijeti stvaranju radnog okoliša koji je istovremeno učinkovit, ergonomski prilagođen i siguran za zaposlenike.

Ključne riječi: Industrija 4.0, Industrija 5.0, ergonomija, ergonomske metode, RULA metoda, kolaborativni roboti

SUMMARY

In this paper, the topic of ergonomic workplace design with the implementation of collaborative robots in manufacturing systems is addressed. To comprehend the paper, key concepts of Industry 4.0, Industry 5.0, ergonomics, and collaborative robots are first explained. The focus is on improving working conditions, increasing productivity, and reducing the risk of injuries among workers. Through the analysis of different body positions, optimal conditions for collaboration between humans and robots are explored. The results of the RULA analysis provide guidelines for ergonomic optimization and the implementation of changes that would enhance synergy between humans and robots. Collaborative robots show potential for increasing efficiency, reducing the physical burden on workers, and creating more innovative and secure manufacturing environments. This paper emphasizes the importance of integrating technology and ergonomics to achieve sustainable and productive workplaces in manufacturing systems. The contemporary implementation of collaborative robots can contribute to creating a work environment that is simultaneously efficient, ergonomically adapted, and safe for employees.

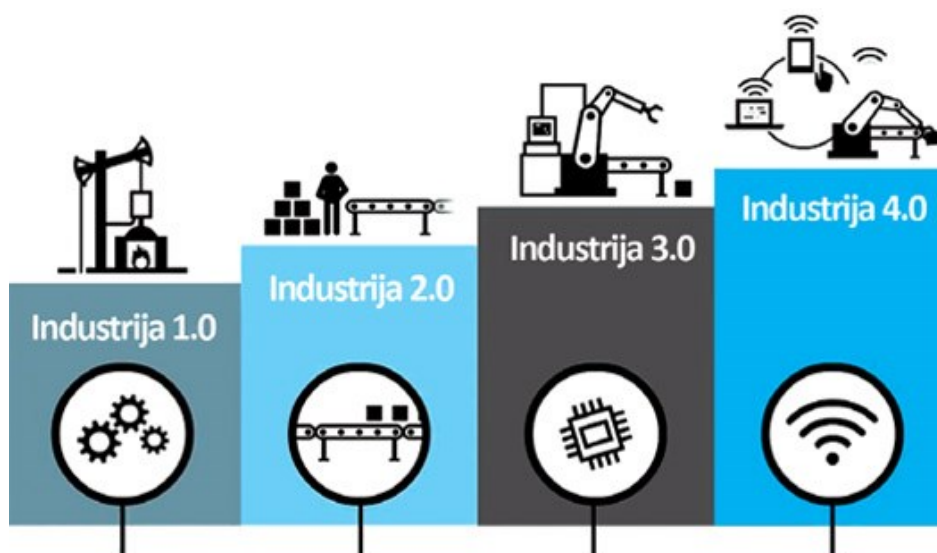
Key words: Industry 4.0, Industry 5.0, ergonomics, ergonomic methods, RULA method, collaborative robots

1. UVOD

U ovom radu obradit će se pojam kolaborativnih robota, implementacija kolaborativnih robota u proizvodne sustave te njihov utjecaj u Industriji 4.0 to jest u Industriji 5.0 kao nadogradnji na koncept Industrije 4.0 koja se usredotočuje na integraciju ljudi i tehnologije kako bi se postigla bolja produktivnost, a ujedno i očuvala ergonomija radnog mjesta.

1.1. Industrija 4.0

Koncept Industrije 4.0 ujedno se smatra i četvrtom industrijskom revolucijom, odnosno nastavkom na prve tri od koji je svaka imala neki značajni novi izum koji je uvelike promijenio svijet. Prva industrijska revolucija bila je u 18. stoljeću, a pokrenula ju je energija vode i pare koja je digla mehanizaciju na viši nivo. S vremenom je došlo do smanjenja zaposlenosti i do nemira radnika što je dovelo dalje do nove industrijske revolucije. U 19. stoljeću električna energija mijenja energiju vode i pare, a karakterizira ju i masovna proizvodnja odnosno pojava pokretne trake. Treću industrijsku revoluciju karakterizira pojava elektroničkih i informacijsko-komunikacijskih sustava, a s njima i temelj široke primjene automatizacije u raznim proizvodnim sustavima. [1]



Slika 1. Industrijske revolucije [2]

Na slici 1 prikazane su redom industrijske revolucije te njihova glavna obilježja. U početku 21. stoljeća, svijet je svjedok četvrte industrijske revolucije i transformacije poslovnog svijeta putem

digitalizacije, poznate kao Industrija 4.0. Ova revolucija nije samo prolazni trend, već ključna transformacija i bitno se razlikuje od prve tri industrijske revolucije. Prve tri industrijske revolucije su posljedica razvoja tehnologija, dok se četvrta oslanja na napredak u podjeli i korištenju informacija. Nakon što je koncept „Industrija 4.0“ prvi put predstavljen 2011. godine u Njemačkoj, digitalna transformacija koju je donijela odmah je privukla pažnju kako industrije tako i vlada širom svijeta. Transformacija se temelji na inteligentnom povezivanju strojeva i uređaja uz pomoć raznih novih i inovativnih tehnologija kao što su [1]:

- Internet stvari (eng. *Internet of things*, IoT), predstavlja koncept povezivanja fizičkih uređaja i objekata zbog lakše razmjene podataka i informacija. Ovaj koncept omogućava objektima da budu opremljeni raznim sensorima, softverima i drugom tehnologijom kako bi mogli prikupljati, analizirati i razmjenjivati podatke što omogućuje bolje razumijevanje okoline, efikasnije upravljanje resursima i donošenje odluka u stvarnom vremenu.
- 3D printanje. Omogućuje brzu izradu prototipa i proizvodnju personaliziranih komponenata
- Proširena stvarnost (eng. *augmented reality*, AR). Dopušta korisnicima da vide stvarni svijet oko sebe obogaćen informacijama i digitalnim objektima koji se preklapaju s njihovim trenutnim okruženjem.
- Horizontalna i vertikalna integracija sustava. Horizontalna se odnosi na povezivanje različitih dijelova proizvodnog procesa unutar jednog procesa, dok vertikalna podrazumijeva povezivanje različitih nivoa proizvodnje.
- Simulacije. 3D simulacije koriste se za prikaz materijala, proizvoda i proizvodnih procesa
- Rad u oblaku (eng. *cloud computing*). Omogućuje pristup velikoj količini podataka i resursa putem interneta, što čini obradu podataka bržom i efikasnijom.
- Napredna robotika igra ključnu ulogu u Industriji 4.0 predstavljajući značajan korak unaprijed u automatizaciji i optimizaciji proizvodnje. Roboti postaju fleksibilniji i autonomniji i koriste se za razne aktivnosti od početka proizvodnje do pripreme proizvoda za otpremu

Iako mnoga poduzeća koriste samo neke od navedenih tehnologija, cilj je sve te tehnologije integrirati zajedno u sve aspekte poduzeća te bi tada nastala „pametna“ tvornica (eng. *smart factory*). Pametna tvornica koristi informacijsku i komunikacijsku tehnologiju za upravljanje proizvodnim i poslovnim procesima, kao što je prikazano na slici 2 u tvornici i izvan nje, a glavni cilj je ostvariti dominaciju na tržištu. [3]



Slika 2. Koncept industrije 4.0 [3]

Ta transformacija odnosno digitalizacija proizvodnih sustava i drugih poslovnih modela u koncept Industrije 4.0, odnosno pametne tvornice rezultira povećanom produktivnošću i fleksibilnošću, većoj kvaliteti proizvoda i brzini razvoja proizvoda, smanjenjem troškova te samim time i povećanjem profita. No tu se javljaju i prigovori odnosno nedostaci na koncept Industrije 4.0. Na primjer, ubrzanje proizvodnje uz pomoć industrijske automatizacije može rezultirati većom potrošnjom energije i resursa što može stvoriti loše ekološke posljedice. Također, restrukturiranje industrije i digitalna transformacija mogla bi poremetiti stanje na tržištu rada, to jest da će digitalizacija i tehnologije koje smanjuju potrebu za radnom snagom, kao što su inteligentni roboti i autonomna vozila, mogle dovesti do eliminacije nekih niže kvalificiranih poslova, a isto tako stvarati nove pozicije u područjima visokih tehnologija. Smatra se da će doći do velikih promjena u zaposlenosti, a i do promjene potrebnog znanja kod zaposlenika koji će ostati zaposleni. Upravo zato što Industrija 4.0 stavlja veći naglasak na promicanje učinkovitosti i fleksibilnosti industrije, umjesto na industrijsku održivost i dobrobit radnika, tu se pojavljuju različiti suprotni stavovi i razna istraživanja te se s vremenom novo rješenje pronalazi u novom konceptu, to jest Industrij 5.0.

1.2. Industrija 5.0

Budući da se Industrija 4.0 niti nije počela masovnije primjenjivati, već je razvijen novi koncept Industrije 5.0. Postavlja se pitanje je li to samo nadogradnja Industrije 4.0, na što je prvi odgovor dao Michael Rada 2015. godine koji je smatrao da će s vremenom kod primjene Industrije 4.0 doći do totalne automatizacije i da bi čovjek mogao postati suvišan, stoga je smatrao da čovjeka na neki način treba vratiti u procese proizvodnje. Tehnički direktor tvrtke Universal Robots (UR) Esben H. Østergaard smatrao je da će i onaj mali dio radnika koji ostanu u industriji nakon reorganizacije

prema konceptu Industrije 4.0 raditi neke monotone poslove, odnosno da će raditi poput strojeva te se i on slaže da čovjeka treba vratiti na neki način. Tu se javlja ideja vraćanja čovjeka u industriju uz pomoć nekih novih tehnika, a to su kolaborativni roboti odnosno koboti (eng. *cobots*). Stoga temelj Industrije 5.0 je suživot čovjeka i robota. Industrija 5.0 nije temeljena na tehnologiji, nego na načelima kao što su humano centričnost, održivost i otpornost te je tako počela privlačiti više pažnje zadnjih godina, s ciljem rješavanja izazova koje je postavila Industrija 4.0. [3]

Glavna načela Industrije 5.0:

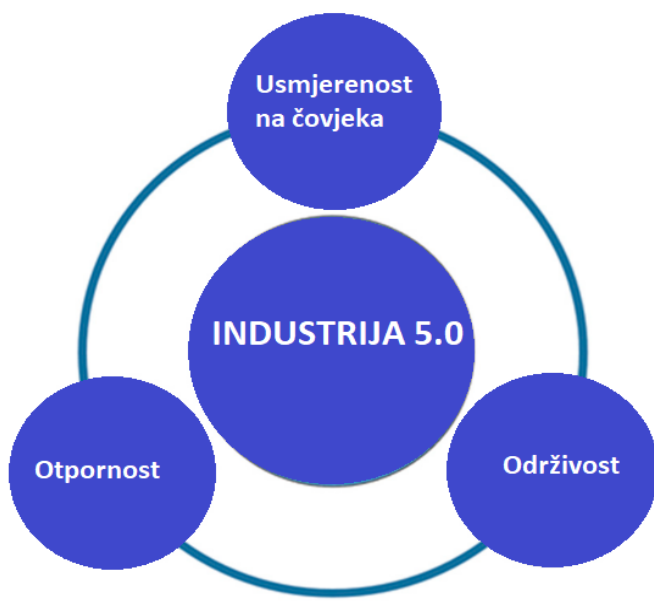
- **Usmjerenost na čovjeka** stavlja ljudske potrebe u središte proizvodnog procesa, postavlja pitanje kako tehnologija može služiti radnicima i kako može doprinijeti njihovoj dobrobiti. Posebnu pozornost treba posvetiti interakciji ljudi i robota, strojeva ili bilo kojeg drugog elementa sustava. Pokušava se stvoriti okvir za procjenu suradnje čovjeka i robota, a za procjenu je naglašeno pet dimenzija s aspekta ljudskog čimbenika, a to su: radno opterećenje, povjerenje, morfologija robota, fizička ergonomija i upotrebljivost. Stavljajući ljude natrag u središte industrijske proizvodnje uz pomoć alata, Industrija 5.0 ne samo da daje proizvode koje potrošači žele, nego i radnicima daje manje monotone poslove koji su sigurni za zdravlje i dobrobit radnika. Nova radna mjesta su usmjerena na programiranje, planiranje, obuku, organizaciju i održavanje. Razuman je i opravdan strah od nestanka radnih mjesta jer u nekim situacijama je automatizacijom procesa i uvođenjem robota ili strojeva vrlo lako zamijeniti ljudski rad, no u pozadini toga su otvorena nova radna mjesta koja omogućuju uvođenje procesa digitalizacije. Kako bi poduzeća opstala na konkurentnome tržištu, trebaju sposobne ljude koji znaju upravljati promjenama i širokim rasponom vještina.
- **Održivost** se odnosi na nužnost provedbe kružnih procesa koji omogućuju ponovnu upotrebu, prenamjenu i recikliranje prirodnih resursa, smanjujući otpad i štetu okolišu. Uvođenjem novih tehnologija postavlja se temelj za razvoj poslovnih modela, a ključno je iskoristiti tehnologije za stvaranje održivih poslovnih modela u pogledu ekoloških, društvenih i ekonomskih aspekata. Glavni izazovi u izgradnji održivih poslovnih modela su ravnoteža između profita, društvenih i ekoloških koristi, prilagodba resursa i procesa za nove modele, integracija tehnologija s poslovnim modelom te korištenje dosadašnjeg poslovnog modeliranja.

- **Otpornost.** Ljudi su ključni element u razvoju otpornosti, prepoznavanju problema i obuci. Organizacijska otpornost, koja uključuje unutarnje i vanjske faktore, omogućuje prilagodbu i upravljanje ranjivostima. Rizik upravljanja i integracija novih tehnologija igraju važnu ulogu u poboljšanju otpornosti. Pandemija COVID-19 naglasila je važnost suradničkih mreža za održavanje otpornosti u proizvodnoj industriji. [4]

U tablici 1 prikazana je veza između ključnih čimbenika za Industriju 4.0 i Industriju 5.0 te ljudi, organizacije i tehnologije.

Tablica 1. Veza između ključnih pokretača za Industriju 4.0 i Industriju 5.0 i ljudi, organizacije i tehnologije u praktičnom kontekstu [5]

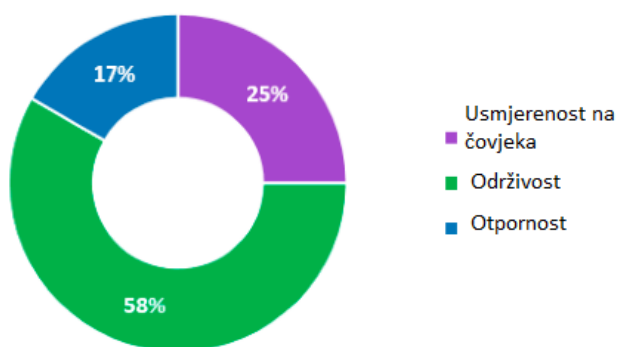
	Ljudi	Organizacija	Tehnologija
Humano centričnost	Operater 5.0 trebao bi surađivati s opremom koristeći vlastite fizičke, osjetilne i kognitivne sposobnosti.	Glavna područja ergonomije (fizička, kognitivna i organizacijska). Digitalizacija za poboljšanje kvalitete radnih mjesta.	Bolja prilagodba tehnologije ljudskim potrebama. Posebna pozornost vezana uz interakciju između ljudi i strojeva.
Održivost	Ljudi koji mogu upravljati promjenama i trebaju biti sposobni prijeći od tehnologije do rješenja i od rješenja do operacija. Novi poslovi i znanja.	Novi poslovni modeli za utjecaj na održivost utjecaja na ekološki, društveni i ekonomski segment.	Učinkovito korištenje energije. Informacijski logistički otpad u procesu. Analiza podataka za smanjenje potrošnje energije.
Otpornost	Ljudi su jedna od najvažnijih komponenti jer oni prvi otkrivaju anomalije, a njihova obuka i obrazovanje, podizanje svijesti i vodstvo, kao i vještine i talent ključni su čimbenici.	Skup specifičnih organizacijskih sposobnosti, rutina, praksi i procesa. Provedba planova rizika i tehnika prevencije. Mreže suradničke proizvodnje.	Decentralizirana <i>peer-to-peer</i> mreža. Integracija informacija kroz industrijske segmente, razine i procese. Sigurnost podataka. Pametne platforme za suradničke mreže.



Slika 3. Industrija 5.0 s tri ključna pokretača [5]

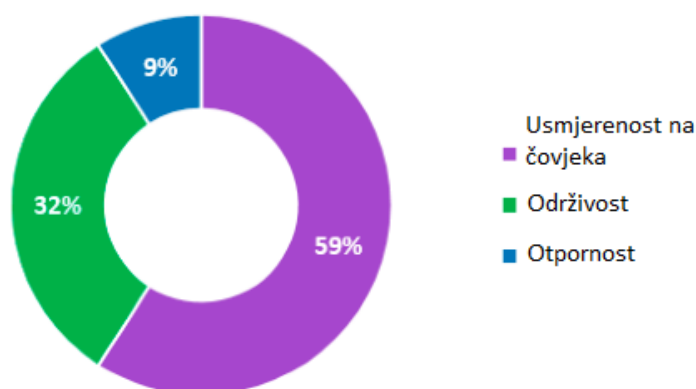
Slika 3 prikazuje Industriju 5.0 i njezina temeljna načela. Na slici 4 i 5 prikazano je kako su se promijenili ciljevi Industrije 5.0 u odnosu na Industriju 4.0. Kod Industrije 4.0 glavni istraživački cilj bila je održivost, dok je u Industriji 5.0 to postala usmjerenost na čovjeka.

Glavni ciljevi Industrije 4.0



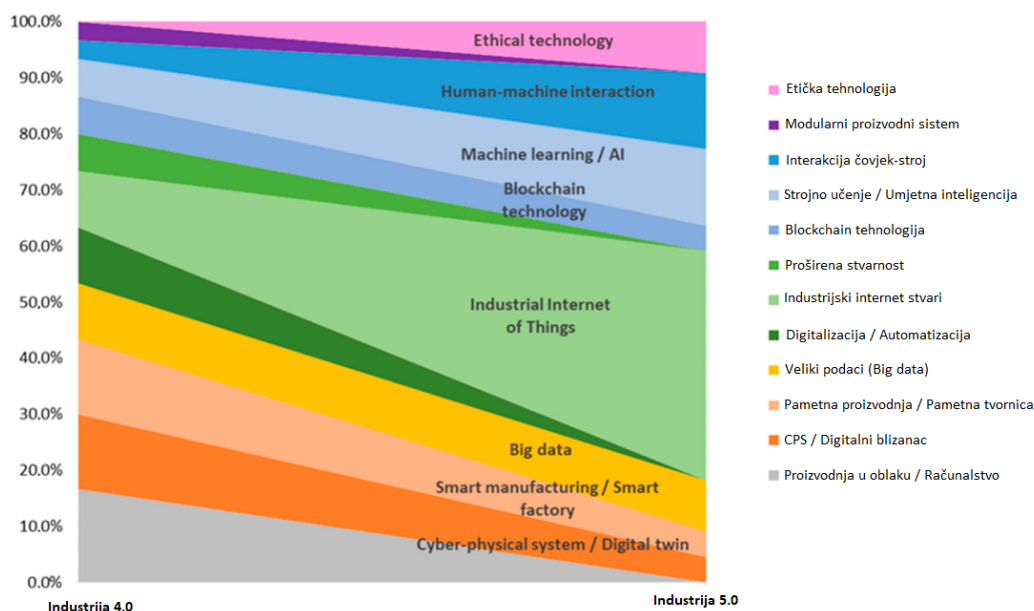
Slika 4. Glavni ciljevi Industrije 4.0 [5]

Glavni ciljevi Industrije 5.0



Slika 5. Glavni ciljevi Industrije 5.0 [5]

Također, što se tehnologije tiče, Industrija 4.0 je bila usmjerena na praćenje svih novih tehnoloških razvoja, no s dolaskom Industrije 5.0 vidi se promjena u fokusu istraživanja tehnologije. Na slici 6 prikazana je promjena trendova. Vidljivo je da se porastom interesa za interakciju čovjeka i stroja i umjetnom inteligencijom veći fokus stavlja na korištenje tehnologije kao potpore svakodnevnim zadacima radnika. Posebno je industrijski Internet stvari postao ključna tema u istraživanju tehnologije budući da je 5G mreža danas postala standard. [5]



Slika 6. Promjena istraživačkih tema u tehnologiji kod Industrija 4.0 i 5.0 [5]

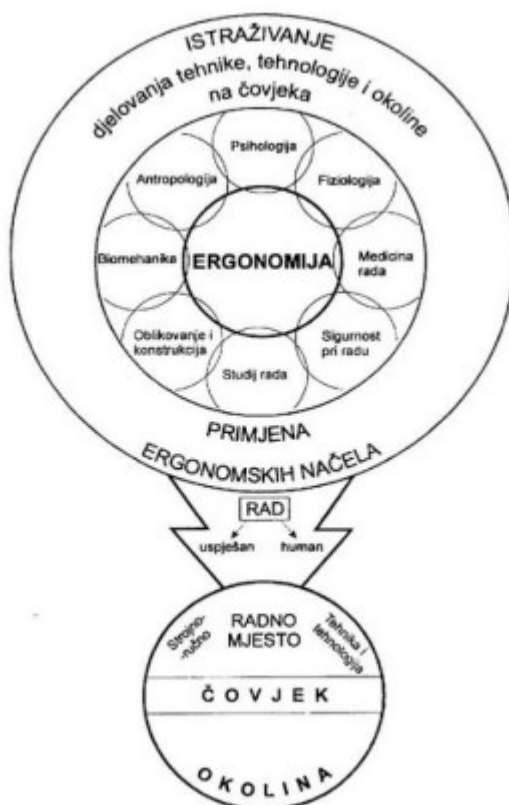
Tablica 2. Kontrast Industrije 4.0 i Industrije 5.0 [5]

	Industrija 4.0	Industrija 5.0
Cilj	Pametna proizvodnja (pametna masovna proizvodnja, pametni proizvodi, pametan rad, pametan opskrbeni lanac), optimizacija sustava	Održivost, upravljanje okolišem, društvena korist, umjerenost na čovjeka
Sustavni pristupi	Praćenje podataka u stvarnom vremenu, integrirani lanac koji prati kraj faza životnog ciklusa.	korištenje tehnologije na etički način za unapređenje ljudskih vrijednosti i potreba, sociocentrične tehnološke odluke, 6R metodologija i načela dizajna učinkovitosti logistike.
Ljudski faktor	Ljudska pouzdanost, interakcija čovjeka i računala, ponavljajući pokreti.	Sigurnost i upravljanje zaposlenicima, učenje/trening za zaposlenike.
Omogućavajuće tehnologije i koncepti	Računalni oblak, Internet stvari, Veliki podaci i analitika, kibernetika sigurnost, digitalizacija (simulacija, digitalni blizanci, umjetna inteligencija, proširena, virtualna ili mješovita tehnologija), automatizacija (napredna robotika, daljinski nadzor, autonomni roboti, komunikacija stroj-stroj), kibernetiko-fizički sustavi, horizontalna i vertikalna integracija (PLC, nadzorna kontrola i prikupljanje podataka (SCADA), sustav izvedbe proizvodnje (MES), planiranje resursa poduzeća (ERP)), aditivna proizvodnja.	Računalni oblak, internet stvari, veliki podaci i analitika, kibernetika sigurnost, digitalizacija (simulacija, digitalni blizanci, umjetna inteligencija, proširena, virtualna ili mješovita tehnologija), interakcija čovjek-stroj, višejezično prepoznavanje govora i gesta, tehnologije praćenja mentalnog i fizičkog radnog napora, kolaborativni roboti, bio-nadahnuti sigurnosna i potporna oprema, sustavi za podršku odlučivanju, pametne mreže, prediktivno održavanje.
Ekološke implikacije	Sustavi su ekonomični, Sprječavanje stvaranja otpada pomoću analitike podataka, aditivne proizvodnje i optimiziranih sustava, Povećana potrošnja materijala, Povećana potrošnja energije, Produžen životni ciklus proizvoda	Sprečavanje i recikliranje otpada, obnovljivi izvori energije, energetska učinkovita pohrana, prijenos i analiza podataka, pametni i energetska autonomni senzori.

Industrija 5.0 označava pokret prema vraćanju ljudskoga aspekta u proizvodnu industriju potaknut potrebom za personalizacijom i izražavanjem koju traže potrošači. U središtu ove paradigme stoji briga za okoliš, zdravlje zaposlenika kao prioritet i pristup tehnološkoj nadogradnji koja je ključna za budući razvoj industrije. Tim svojim naglaskom na dobrobiti radnika i korištenju raznih tehnologija, Industrija 5.0 osnažuje radnike i ispunjava njihove promjenjive zahtjeve za vještinama i obukom te pomaže povećati konkurentnost industrije i privući vrhunske talente. Orijentacija Industrije 5.0 prema etičkim ciljevima i stvaranju vrijednosti putem tehnologije postavlja temelje za održiviju i humaniziraniju industriju. Industrija 5.0 predstavlja korak unaprijed u evoluciji prema inovativnom suživotu između ljudi i tehnologije uz poboljšanje radnih uvjeta i dobrobiti zaposlenika kao ključnih prioriteta. U kontekstu ergonomije, Industrija 5.0 ima značajan utjecaj na stvaranje radnih okolina koje su fizički i psihološki prikladne za radnike. Održavanje zdravlja i sigurnosti zaposlenika postaje ključna komponenta ovog modela industrije, što uključuje dizajniranje radnih mjesta koja minimiziraju stres i fizički napor. Uvođenje tehnologija kao što su nosivi uređaji i proširena stvarnost pruža alate za poboljšanje učinkovitosti i ergonomске usklađenosti u radnom okolišu. [5]

2. ERGONOMIJA

Riječ ergonomija nastala je iz grčkih riječi *ergon* što znači rad i *nomos* što znači zakon, a ona je multidisciplinarna znanstvena cjelina koja se bavi proučavanjem i dizajniranjem radnih mjesta, proizvoda, sustava i okoline kako bi se osigurala maksimalna učinkovitost, sigurnost i udobnost za korisnike. Glavni joj je cilj stvoriti usklađenost između ljudskih sposobnosti, ograničenja i potreba te zahtjeva radnih zadataka i okoline. U problematici prilagođavanja radnih mjesta radnicima sudjeluju stručnjaci iz raznih područja, kao što su antropologija, psihologija, biomehanika, medicina, te razni konstruktori, projektanti i inženjeri koji se bave studijem rada i zaštitom na radu. Prema Međunarodnome ergonomske udruženju (IEA- *Internation Ergonomics Association*), ergonomija je znanstvena disciplina koja podrazumijeva međudjelovanje ljudi i drugih elemenata sustava, odnosno struka, koja primjenjuje teoriju, principe podatke i metode oblikovanja sa svrhom optimiranja dobrobiti čovjeka i općih svojstava sustava. [6]



Slika 7. Prikaz područja djelovanja ergonomije u sustavu čovjek-stroj-okolina [6]

Ergonomija ima ključnu ulogu u industriji jer se fokusira na stvaranje sigurnih, učinkovitih i produktivnih radnih mjesta za radnike. Danas je primjena ergonomije u industriji jako proširena te je u svim segmentima moguće primijetiti prisutnost raznih njezinih načela. Pravilna primjena ergonomskih načela u industriji može značajno doprinijeti smanjenju rizika od ozljeda na radu, povećanju produktivnosti i udobnosti radnika, a samim time i smanjenju određenih troškova. Dakle, primjena ergonomije u industriji ima koristi za radnike i za poslodavce. Radnici su zadovoljniji time što im se posao na neki način olakša ili postane zanimljiviji, manje su izloženi umoru i ozljedama, a poslodavci mogu biti zadovoljni smanjenjem troškova, vezanih uz bolovanja i smanjenu produktivnost, i povećanjem produktivnosti koja dovodi do povećanja profita. U konačnici primjena ergonomskih principa poboljšava radnu atmosferu i doprinosi boljim poslovnim rezultatima u industriji. [6]

2.1. Podjela ergonomije

Ergonomija se dijeli na koncepcijsku, sistemsku, korektivnu, ergonomiju programske potpore i ergonomiju računalnog sklopovlja.



Slika 8. Podjela ergonomije [6]

Koncepcijska ergonomija je područje ergonomije koje se bavi razumijevanjem i projektiranjem osnovnih koncepata i modela proizvoda, sustava ili sučelja kako bi se poboljšala njihova uporabljivost i efikasnost. Ova grana ergonomije usmjerena je na oblikovanje proizvoda ili sustava tako da odgovaraju potrebama i sposobnostima korisnika, čime se olakšava njihova interakcija s tim proizvodima ili sustavima.

Sistemska ergonomija je područje ergonomije koje se bavi proučavanjem i dizajniranjem sustava s ciljem poboljšanja sigurnosti, učinkovitosti i ljudske dobrobiti. Fokusira se na analizu interakcija između ljudi, tehnologije i okoline unutar složenih sustava, a cilj je razumjeti kako različiti faktori utječu na performanse i dobrobit ljudi unutar tih sustava i kako ih optimizirati.

Korektivna ergonomija je područje ergonomije koje se bavi ispravkom i prevencijom problema vezanih uz radnu okolinu i radne uvjete kako bi se poboljšala dobrobit i produktivnost zaposlenika. Usmjerena je na identifikaciju postojećih problema te pružanje pravih rješenja za njih.

Ergonomija programske potpore odnosi se na proučavanje dizajna i uporabljivosti računalnih programa i aplikacija s ciljem stvaranja korisnički prihvatljivih, učinkovitih i ugodnih digitalnih okolina za korisnike. Ovaj koncept primjenjuje principe ergonomije na softverske proizvode kako bi se osiguralo da su intuitivni, funkcionalni i da minimiziraju napore i stres koji korisnici doživljavaju pri njihovoj uporabi.

Ergonomija računalnog sklopovlja odnosi se na proučavanje hardverskih komponenti računala kako bi se osiguralo da su udobne, sigurne i učinkovite za korisnike. Ovaj koncept primjenjuje principe ergonomije na fizičke aspekte računalnih sustava kako bi se smanjio stres na tijelu korisnika i poboljšala produktivnost i udobnost tijekom korištenja računalnih uređaja. [6]

2.2. Vrste ergonomije

Kognitivna ergonomija se bavi proučavanjem mentalnih procesa, percepcija, pamćenja, razmišljanja i donošenja odluka u kontekstu ljudske interakcije s tehnologijom, sustavima i okolinom. Ona se usredotočuje na razumijevanje kako ljudski mozak funkcionira tijekom izvršavanja različitih zadataka i kako se taj proces može poboljšati kako bi se optimizirala produktivnost, sigurnost i udobnost korisnika. Neki od njezinih glavnih ciljeva su smanjenje mentalnog napora, smanjenje pogrešaka, optimizacija radnih procesa i poboljšanje korisničkog iskustva te je zato ova vrsta ergonomije bitan faktor u organiziranju svih vrsta rada.

Organizacijska ergonomija se bavi proučavanjem i poboljšanjem organizacije rada, sustava i radnih procesa kako bi se stvorilo produktivno i sigurno radno okruženje. Također se fokusira na organizacijske aspekte ljudskog rada, zajedno s fizičkim i kognitivnim aspektima kako bi se stvorili učinkoviti i održivi radni uvjeti. Ona igra ključnu ulogu u stvaranju radnih okruženja koja su produktivna, sigurna i zadovoljavajuća za zaposlenike.

Fizikalna ergonomija bavi se proučavanjem fizičkog aspekta radnih mjesta i kako ljudsko tijelo reagira u radnim okolinama s alatima, opremom i sustavima. Glavni joj je cilj osigurati da radna okolina i radni uvjeti budu prilagođeni čovjeku i njegovim tjelesnim sposobnostima, mogućnostima i ograničenjima kako bi se smanjili rizici od umora, nelagode i ozljeda, a samim time i povećala produktivnost. [6]

2.3. Ergonomske metode

Postoje više grupa metoda, a to su fizikalne metode, psihofiziološke, ponašajno kognitivne, timske, okolišne i makroergonomske. U ovom radu bit će spomenute i objašnjene fizikalne metode. Fizikalne metode su ključne za procjenu i kontrolu rizika od ozljeda radnika. Često ozljede mišićno-koštanog sustava započinju osjećajem nelagode u tijelu, a ignoriranje tog osjećaja može dovesti do ozbiljnih problema i ozljeda poput tendonitisa i sindroma karpalnog tunela. Pojava nelagode radni je indikator problema sa zdravljem radnika tijekom obavljanja svakodnevnih zadataka. Važno je napomenuti da nelagoda ne utječe samo na pojedinca, nego i na poslovanje tvrtke jer može smanjiti ekonomske performanse tvrtke. Većina ovih metoda usmjerena je na analizu pokreta, koji su vizualni pokazatelj rada mišićno-koštanog sustava. Korištenjem tih metoda mogu se identificirati potencijalni problemi čak i prije nego se pojavi osjećaj nelagode, što ih čini preventivnima. Tijekom ergonomske procjene, važno je poticati radnike da iznesu sve probleme povezane s njihovim radom, jer samo na taj način možemo poboljšati produktivnost i tvrtku. Metode se mogu podijeliti na one koje su usmjerene na događaje i one koje su usmjerene na vrijeme. Metode usmjerene na događaje pružaju visoku preciznost jer se koncentriraju na specifične parametre. S druge strane, metode usmjerene na vrijeme su primjenjive, ali manje osjetljive. [6]

Tablica 3. Najčešće korištene metode za analizu položaja tijela [6]

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

2.3.1. Opće metode

Ove metode u obzir uglavnom uzimaju cijelo tijelo i/ili cijeli tehnički sustav, a koriste se za općenitu ergonomsku procjenu.

OWAS metoda (eng. *Ovako Working Posture Analysing*) je metoda koja se koristi za procjenu rizika vezanih uz držanje tijela radnika. Ova metoda se sastoji od četiri glavne kategorije analize: položaj ruke, položaj leđa, položaj donjeg tijela i opterećenje. Primarna svrha OWAS metode je identificirati učestalost i trajanje određenih položaja tijekom izvođenja zadataka te ocijeniti jesu li ti položaji potencijalno štetni za radnike. Na temelju takve analize, metoda preporučuje korektivne radnje kako bi se smanjio rizik od ozljeda ili nelagode.

MODAPTS metoda (eng. *Modular Arragment of Predetermined Time Standards*) primjenjuje se za analizu pokreta i opterećenja koja se javljaju kod radnika tijekom izvođenja određenih radnih zadataka, s ciljem pojednostavljenja rada i oblikovanja učinkovite radne metode. Analiza rada primjenom MODAPTS metode provodi se putem promatranja radnih mjesta dok radnik obavlja određeni zadatak ili operaciju. Ova metoda često se koristi u proizvodnim sustavima gdje je uobičajen repetitivan rad tijekom izvođenja operacija, a njezina svrha je identificirati i spriječiti moguće ergonomske rizike na radnom mjestu. MODAPTS metoda omogućava identifikaciju nepovoljnih pokreta, što je ključno za oblikovanje učinkovitih radnih metoda i smanjenje opterećenja na radnike. Za provedbu ove metode razvijen je računalni program nazvan MODAPTSplus.

PLIBEL metoda (njem. *Plan für identifizierung av. Belastningfaktor*) se primjenjuje na način da se započinje inicijalnim razgovorom s radnikom te nadgledanjem izvođenja radnih zadataka i okoline na radnom mjestu. Prilikom prepoznavanja potencijalnih rizika, provodi se ispunjavanje odgovarajućih polja u upitniku koji su povezani s uočenim rizicima. Polja u upitniku strukturirana su prema dijelovima tijela, a rizici se rangiraju prema njihovoj važnosti i utjecaju na zdravlje radnika, uzimajući u obzir intenzitet djelovanja i pogođene dijelove tijela. Rezultati analize pružaju uvid u ergonomske uvjete na radnom mjestu, a rangirani su od najštetnijih do manje štetnih. Važno je napomenuti da PLIBEL metoda nije usmjerena na detaljno i precizno ispitivanje svakog pojedinog dijela tijela, kao što to čine neke druge metode, umjesto toga njezina svrha je pružiti općeniti pregled radne okoline i utjecaja na radnike koji u njoj rade.

NIOSH metoda – istraživanje mišićno-koštanog naprezanja (eng. *The Nationa Institute for Occupational Safety and Health*) – NIOSH je razvio upitnik koji se primjenjuje u raznim ergonomskim studijama diljem SAD-a. ovaj upitnik uglavnom se koristi za procjenu tjelesnih

faktora i vrednovanje oblikovanja samih zadataka, s povremenim uključivanjem psihosocijalnih aspekata posla. Upitnici sadrže grafičke prikaze tijela koja su podijeljena u različite regije, kako bi se olakšalo lociranje utvrđenih tegoba ili poremećaja. Tijekom istraživanja, grafike su se mijenjale kako bi se bolje prilagodile specifičnim potrebama istraživanja. Osnovna svrha ovog upitnika je prvo utvrditi prisutnost simptoma nelagode, kao što su bol, ukočenost i žarenje, a zatim procijeniti ozbiljnost tih simptoma na temelju trajanja, učestalosti i intenziteta. Važno je napomenuti da ova metoda nema preventivnu ulogu i temelji se na objektivnoj procjeni pojedinca ili usporedbi s drugim radnicima.

DMQ (eng. *Dutch Musculoskeletal Questionnaire*) **metoda**, poznata i kao Nizozemski upitnik za mišićno-koštane rizike, razvijena je kako bi stručnjacima za sigurnost na radu omogućila brzu, jednostavnu i standardiziranu procjenu rizika mišićno-koštanog sustava uzrokovanih radom. Ovaj upitnik predstavlja najtemeljitiiji i najpotpuniji alat za ocjenu rizika povezanih s mišićno-koštanim zdravljem. DMQ se sastoji od 60 pitanja koje radnici sami ispunjavaju. Ta pitanja obuhvaćaju različite aspekte, uključujući spol, dob, radno vrijeme, opterećenje, položaj tijela, organizaciju rada i općeniti način života radnika izvan radnog mjesta. Za provođenje DMQ metode potrebna su samo osnovna oprema, poput olovke i papira. Kako bi se ubrzao proces ocjenjivanja kada se metoda primjenjuje na velikom broju ispitanika, preporučuje se upotreba posebnog softvera.

REBA (eng. *Rapid Entire Body Assessment*) **metoda** je ergonomska alat za procjenu fizičkog položaja cijelog tijela i identifikaciju potencijalnih rizika vezanih uz mišićno-koštane probleme i druge opasnosti koje se mogu pojaviti tijekom radnih zadataka. Ova metoda je posebno razvijena za brzu i jednostavnu primjenu, ne zahtijeva napredno poznavanje ergonomije niti skupu opremu, a nastala je s namjerom da zadovolji potrebe za praktičnim alatom koji je osjetljiv na različite i nepredvidive radne položaje, posebno u zdravstvu i drugim uslužnim sektorima.

PDA uređaji (eng. *Personal Digital Assistant*) su prijenosna ručna računala ili miniračunala koja su izuzetno praktična zbog svoje kompaktne veličine. Oni mogu biti iznimno korisni u procesu ergonomske procjene radnih mjesta. Za ocjenu ergonomske ispravnosti radnih mjesta često se koristi Army Computer Workstation Checklist (ACWC), američka vojna lista za provjeru. Ova lista sastoji se od padajućeg izbornika na kojem se daju odgovori u obliku „da“ ili „ne“. Ako se odgovori „ne“, to ukazuje na potencijalnu opasnost, za koju se potom nude moguća rješenja. PDA uređaji se obično koriste za ocjenu radnih mjesta koja uključuju rad na računalima. Obuka za korištenje PDA tehnologije u svrhu ergonomske procjene nije posebno zahtjevna ni dugotrajna.

Svi uneseni podaci automatski se pohranjuju u bazu podataka, olakšavajući daljnju analizu i obradu. [6]

2.3.2. Metode primjenjive na gornje udove, vrat i leđa

Ove metode najčešće se primjenjuju pri procjeni poslova koji uključuju nošenje, podizanje i saginjanje (leđa) te kod sjedećih poslova (gornji udovi i vrat).

QEC metoda (eng. *Quick Exposure Checklist*) ili lista za brzu procjenu rizika izuzetno je svestrana i osjetljiva metoda koja može prepoznati čak i međusobnu povezanost različitih rizičnih faktora. Njezina primjena je prilično jednostavna i brza, a zahtijeva samo kratku obuku i minimalno iskustvo. Ova metoda se može primijeniti na različite dijelove tijela, uključujući leđa, gornje udove i vrat. QEC metoda pruža vrijedne informacije o ergonomiji radnog mjesta i dizajnu opreme, ukazujući na potrebne promjene kako bi se smanjio rizik od ozljeda. Proces primjene QEC metode se sastoji od 5 koraka: samoobuka, lista za provjeru (promatrač), lista za provjeru (izvođač), računanje stupnja izloženosti i razmatranje intervencije. Ova metoda je ekonomična jer za njezinu primjenu nije potrebna posebna oprema, već se koristi standardna oprema. Također je korisna za praćenje promjena u radnom okruženju, što je čini važnim alatom za kontinuirano poboljšanje ergonomije na radnom mjestu.

RULA (eng. *Rapid upper limb assessment*) je metoda razvijena s namjenom primjene u ergonomske istraživanjima radnih mjesta na kojima se javljaju poremećaji u ekstremitetima gornjeg dijela tijela, posebno trupa. Osnovna svrha ove metode je pružiti brzu procjenu opterećenja na vratu i gornjim udovima, često u kontekstu ponavljajućih i monotonih zadataka, kako bi se identificirali potencijalni rizici za poremećaje u mišićno-koštanom sustavu gornjeg dijela tijela specifično za analizirani posao. Procjena rizika putem RULA metode provodi se kroz dva koraka, a rezultati se zbrajaju prema određenim tablicama kako bi se dobila konačna ocjena. Važno je napomenuti, iako je RULA koristan alat, on pruža općenite informacije o položajima te ne pruža detaljne informacije, zbog čega se često koristi u kombinaciji s drugim metodama kao dio šireg ergonomske istraživanja. Da bi primjena RULA metode bila učinkovita, važno je razmotriti širi kontekst koji može uključivati informacije o proizvodima, zadacima, prethodnim ozljedama, faktorima okoliša i drugim relevantnim čimbenicima.

Metoda indeksa naprezanja (Strain Indeks) poznata je i kao metoda za procjenu naprezanja, a razvijena je kako bi se ocijenili radni zadaci i utvrdilo jesu li skloni uzrokovati mišićno-koštane poremećaje u gornjim ekstremitetima radnika. Ova metoda se oslanja na analizu fizioloških,

biomehaničkih i epidemioloških parametara. Fiziološki parametri uključuju promatranje intenziteta i trajanja opterećenja, kao i vrijeme potrebno za oporavak. Biomehanika doprinosi razumijevanju kako sile utječu na mišićno-tetivnu jedinicu. Epidemiološki parametri ukazuju na vezu između učestalosti ozljeda i trajanja te frekvencije primijenjenih sila. Općenito, veći otklon zglobova obično ukazuje na nepovoljnije uvjete i veću vjerojatnost ozljede. Izračun i opis indeksa naprezanja uključuju sljedeće varijable: intenzitet i trajanje izvedbe, broj ponavljanja u minuti, položaj dlana i zapešća, brzina i dnevno trajanje izvedbe. Ova metoda može biti provedena putem tradicionalnog načina, pomoću olovke i papira, ili uz pomoć računalnog softvera. Iako metoda pruža preciznu i korisnu ergonomsku ocjenu, njezina uporaba može biti otežana zbog velikog broja varijabli koje treba uzeti u obzir. Također, provođenje metode može potrajati dulje jer zahtijeva dodatnu obuku i edukaciju kako bi se koristila učinkovito.

OCRA metoda (eng. *Occupational Repetitive Action*) koristi se za procjenu izloženosti rizicima od ozljeda gornjih ekstremiteta. Prilikom provođenja ove metode, uzimaju se u obzir različiti faktori kao što su ponavljanje, primijenjena sila, neudobni položaji i pokreti, vrijeme za odmor te mehanički, okolišni i drugi čimbenici. Metoda je široko primjenjiva, ali nažalost, nije razvijen računalni softver za njezino olakšano provođenje. Za brzu i često početnu procjenu, koristi se pojednostavljena OCRA lista za provjeru. OCRA indeks rizika dobiva se kao omjer ukupnog broja faza rada tijekom smjene i broja preporučenih tehničkih akcija tijekom smjene.

LMM (eng. *Lumbar Motion Monitor - LMM*) je uređaj za praćenje pokreta leđa, a razvijen je kako bi se razumjela uloga gibanja trupa u mišićno-koštanim ozljedama. Ovaj uređaj predstavlja dinamičan pristup u usporedbi s dosadašnjim statičkim modelima i predstavlja veliki napredak u istraživanju ovog područja. LMM je egzoskeletni elektrogoniometar s tri osi koji se nosi kao prsluk i omogućuje mjerenje brzina i ubrzanja pokreta trupa tijekom rada. Pomoću pripadajućeg softvera, LMM pruža potpunu trodimenzionalnu sliku kinematike trupa i dostupan je u 4 različite veličine. Kombiniranjem svih faktora softver računa vjerojatnost pojave ozljeda u lumbalnom dijelu leđa. Omogućuje procjenu cijelog zadatka, njegovih dijelova ili određenih pokreta. Također je povezna s bazom podataka i olakšava brzu procjenu učinka intervencija. Oprema koja je potrebna za korištenje LMM-a uključuje odgovarajući softver, sam LMM uređaj i računalo, a upotreba LMM-a zahtijeva obuku ispitivača i suradnju s ispitanicima te može biti vremenski zahtjevna. [6]

2.4. Ergonomija i industrija

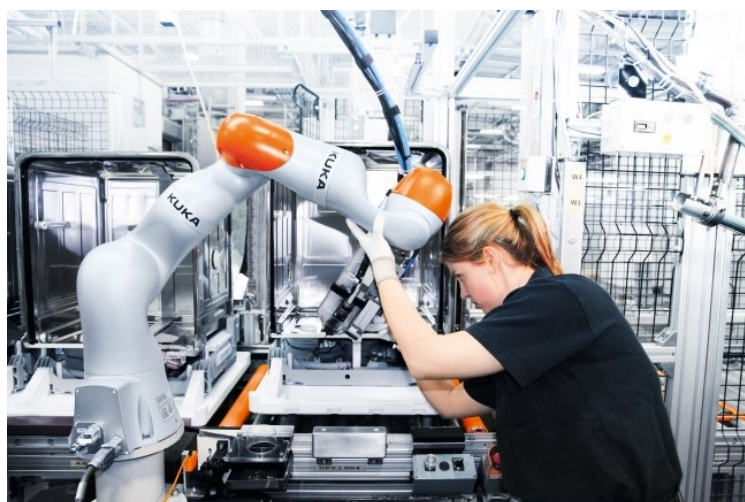
Industrije 4.0 i 5.0, kao što je već navedeno, su pune inovacija i predstavljaju različite faze razvoja industrije i industrijskih procesa, a ergonomija tu igra važnu ulogu i uvelike se primjenjuje s ciljem što bolje, lakše i produktivnije prilagodbe čovjeka na rad u novom okruženju, što učinkovitiju i sigurniju suradnju čovjeka i robota te sigurnost i opće dobro stanje radnika. Kako Industrija 4.0 uvodi automatizaciju i digitalizaciju u razne procese u industriji, koristeći razne spomenute tehnologije, ergonomija se tu primjenjuje kako bi omogućila i osigurala da radnici što učinkovitije surađuju s tim novim tehnologijama te da je prisutan što manji rizik od ozljeda, što manje stresa i što manje monotonog rada. Također, kod prilagodbe proizvodnih sustava ključno je ergonomsko oblikovanje radnog mjesta, odnosno omogućavanje prilagodbe radnih mjesta prema individualnim potrebama radnika kao što su na primjer visina stola ili stolica, kako bi radniku bilo što udobnije i kako bi se što bolje snašao i što kvalitetnije obavljao svoje zadatke u promjenjivom okruženju. Isto tako ergonomske smjernice se integriraju u razvoj tih novih pametnih radnih okruženja, gdje senzori i pametni sustavi za praćenje pokreta radnika doprinose boljem upravljanju ergonomskim rizicima, odnosno omogućuju prilagodbu radnih uvjeta s ciljem smanjenja umora radnika. Obuka radnika je pak olakšana razvojem ergonomski optimiziranih programa obuke pomoću kojih se radnici brže mogu prilagoditi novim tehnologijama upotrebom virtualne ili proširene stvarnosti. [3]



Slika 9. Upotreba virtualne stvarnosti [7]

Kako Industrija 5.0 ide korak dalje i stavlja čovjeka u centar i teži k održivom i otpornijem okruženju, tako i ergonomija, kod koje je isto čovjek u centru pozornosti, ima vrlo važnu ulogu za

postizanje tih zajedničkih ciljeva. Ergonomija postaje ključna u stavljanju čovjeka u centar proizvodnog sustava i oblikovanju radnog mjesta jer se ona tradicionalno bavi prilagodbom radnih uvjeta čovjeku, a ta radna mjesta moraju motivirati čovjeka i poticati mu zadovoljstvo. Ergonomija svoju ulogu s tradicionalnog fizičkog pristupa širi na pristup koji obuhvaća i emocionalno stanje radnika te je tako, osim što se prilagođava fizičkim potrebama, naglasak i na smanjenju stresa, motivaciji, sreći i općem zadovoljstvu, što također pridonosi rastu produktivnosti. Time se bavi kognitivna ergonomija koja je dopunska tradicionalnoj i ona bi se trebala uzimati u obzir u modifikacijama radnog okruženja. Važan aspekt kognitivne ergonomije je i mogućnost učenja radnika, koje je potrebno za prilagodbu radnika na nove hardverske i softverske alate koje čovjek unutar proizvodnog sustava mora naučiti i znati ih koristiti. Ergonomija također ima važnu ulogu u osmišljavanju sučelja koja olakšavaju interakciju ljudi i tehnologija, odnosno suživot čovjeka i robota, uključujući fizičke i psihološke aspekte.



Slika 10. Suradnja čovjeka i robota [8]

Glavna poveznica Industrije 5.0 i kognitivne i tradicionalne ergonomije leži u stvaranju proizvodnih sustava koji su usmjereni na ljude, a načela dobrobiti su od velike važnosti što potiče bolju kvalitetu života radnika i omogućuje osobni rast i zadovoljstvo te doprinose održivosti i društvenoj odgovornosti. Ergonomija tako postaje ključni element u ostvarivanju humanocentričnog, održivog i otpornog industrijskog okruženja.

3. KOLABORATIVNI ROBOTI

Kolaborativni roboti, poznati i kao koboti, su roboti koji mijenjaju način kako roboti i ljudi surađuju u zajedničkom prostoru. Oni su dizajnirani za suradnju s ljudima u radnom okruženju zbog potrebe za povećanjem produktivnosti i učinkovitosti u industriji. Razlikuju se od običnih konvencionalnih robota jer su namijenjeni za siguran i učinkovit rad u suradnji s ljudima, pružajući veću fleksibilnost i prilagodljivost na radnom mjestu. [9]

Tablica 4. Razlika između konvencionalnih robota i kobota [9]

	Konvencionalni robot	Kobot
Svrha	Izvršava zadatke automatski	Surađuje s ljudima
Programiranje	Unaprijed programirani	Ljudi ga lako programiraju
Sigurnost	Zahtijevaju sigurnosne mjere i barijere za zaštitu ljudi	Dizajniran za rad s ljudima bez njihovog ugrožavanja
Fleksibilnost	Dizajnirana za obavljanje određene skupine zadataka	Može obavljati širok raspon zadataka
Cijena	Tipično skupo	Jeftiniji od konvencionalnog robota
Složenost	Složeniji za programiranje i rad	Jednostavan za programiranje i rukovanje
Nosivost	Visoka	Manja
Točnost	Niža	Visoka
Veličina	Glomazan i zauzima prostor	Manji
Primjena	Proizvodne i montažne linije	Mala proizvodnja, istraživanje i razvoj

3.1. Povijest kolaborativnih robota

Redom kako su dolazile industrijske revolucije, svaka je bila povezana s nekom inovacijom, prva industrijska revolucija s parnim strojem te montažnom trakom i uz nju masivnom proizvodnjom, druga industrijska revolucija je zamijenila parne strojeve onim električnima, treću je pak obilježilo uvođenje računala i automatiziranih strojeva, što je dovelo do daljnje automatizacije proizvodnih procesa i do porasta produktivnosti. Nakon toga javlja se, kao što je već prije objašnjeno, Industrija

4.0 kao najnoviji i najnapredniji koncept, koji koristi digitalizaciju i umreženu proizvodnju. Dolaskom te najnovije revolucije, iako je njihov koncept postojao i ranije, kolaborativni roboti su postali sve relevantniji u proizvodnji i prerađivačkoj industriji. Oni su napravljeni tako da mogu učinkovito i sigurno funkcionirati pored ljudi u zajedničkom prostoru. Njihov fokus u Industriji 4.0 je na automatizaciji i smanjenju ljudskog faktora u proizvodnom sustavu i orijentirani su na suradnju s drugim strojevima, a manje s ljudima, odnosno nisu prilagođeni za blisku interakciju s ljudima. No, kako se u Industriji 5.0 čovjek stavlja u prvi plan, i kolaborativni roboti su dizajnirani za zajednički rad s ljudima u istom okruženju nudeći zajedničku suradnju između ljudske inteligencije i autonomnih strojeva. Upravo zato se koboti u industriji 5.0 ističu svojom visokom fleksibilnošću i prilagodljivošću kako bi se mogli integrirati u zajednički prostor s ljudima. [10,11]

3.2. Vrste kolaborativnih robota

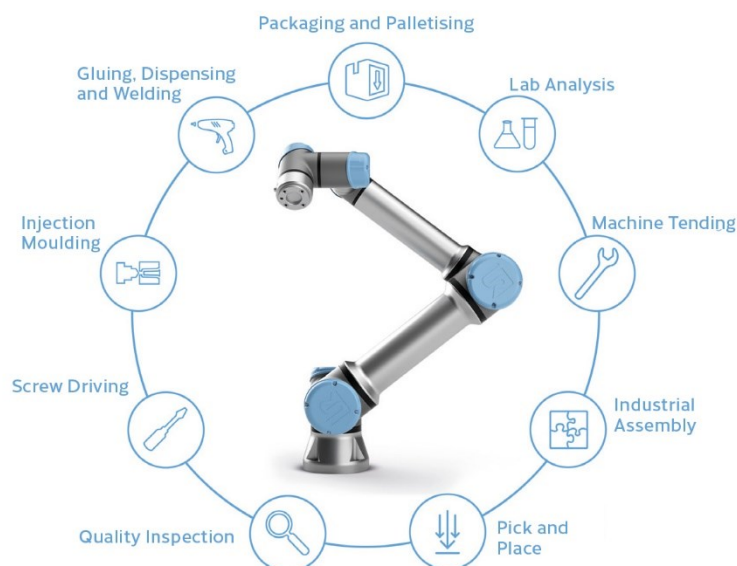
Postoje četiri vrste kobota koje se razlikuju prema načinu suradnje s ljudima i razini sigurnosnih značajki, a to su:

- **Neovisni.** Mogu raditi samostalno i surađivati s ljudima i stvoreni su za različite proizvodne procese i poslove. Kako bi se osigurala njihova suradnja s ljudima, i to bez kaveza ili sigurnosnih barijera, ovi koboti često koriste razne senzore i sigurnosne elemente.
- **Simultani.** Istovremeno rade s čovjekom na istom komadu na različitom proizvodnom procesu, ali neovisno jedan o drugome. Također kobot u takvim situacijama može izvršavati opasnije zadatke čime čovjeku povećava sigurnost.
- **Sekvencijalni.** Koriste se za poduzimanje uzastopnih proizvodnih postupaka na istom radnom predmetu s čovjekom. Kobot obavlja procese koji duže traju ili koji se ponavljaju čime operateru poboljšava uvjete rada.
- **Podržavajući.** Surađuju s čovjekom na istom zadatku i među njima postoji potpuna ovisnost. Čovjek i kobot žele postići isti cilj i pri tome svaki uravnotežuje prednosti i nedostatke drugoga. [10]

3.3. Primjena kolaborativnih robota u proizvodnji

U posljednjih nekoliko godina primjena kolaborativnih robota znatno je porasla, a tvrtke su ih uvele ili ih uvađaju u proizvodne okoline s ciljem povećanja fleksibilnosti, produktivnosti i upotrebljivosti. Oni su fleksibilni za obavljanje kompletnih monotonih, ponavljajućih i dosadnih

radnji te onih fizički i ergonomske izazovnijih što radnicima omogućuje da se više usredotoče na razvoj inovativnih rješenja i ulogu donošenja odluke. Zbog te svoje sigurne suradnje s ljudima u istom okruženju, kolaborativni roboti imaju široku primjenu u industriji. Koriste se u raznim montažama gdje pomažu ljudima, u proizvodnji su korisni za pakiranje i paletizaciju te sortiranje i prijenos tereta, a i na samom radu na liniji gdje mogu obavljati različite zadatke i tako smanjiti vrijeme ciklusa. Uz suradnji ljudi, vrlo su korisni i u kontroli kvalitete gdje mogu mjeriti razne dimenzije i prepoznati defekte. Primjenom senzora i kamera na njima omogućava im se vizualna identifikacija predmeta i praćenje kretanja po proizvodnoj liniji. Vrlo su korisni i u skladištima gdje se koriste za organizaciju i pakiranje proizvoda te manipulaciju paleta i za praćenje inventara. Sposobni su i za rad u osjetljivim okruženjima i mogu doprinijeti brzom prilagodbi u proizvodnji. Sve u svemu ova široka primjena kolaborativnih robota pokazuje da igraju ključnu ulogu u proizvodnim sustavima čineći ih sigurnijima, fleksibilnijima i efikasnijima. [10,11]



Slika 11. Primjena kolaborativnih robota [10]

3.4. Kolaborativni roboti i ergonomija

Kolaborativni roboti i ergonomija imaju vrlo sličan cilj i zadatak, a to je da se radniku olakša posao. Ergonomija je ključna u dizajniranju i implementaciji kolaborativnih robota u industriju kako bi se postigla sigurnost, udobnost, prilagodljivost i učinkovitost. Da ljudi budu sigurni u njihovoj blizini oni su opremljeni raznim sensorima i sustavima za prepoznavanje kako bi se

izbjegla nesreća odnosno kako bi reagirali na prisutnost ljudi, a koboti opremljeni sensorima mogu pratiti i ergonomske parametra radnog mjesta, kao što su položaj tijela i geste, a ti podaci omogućuju daljnju optimizaciju radnog okruženja. Koboti mogu preuzeti fizičke napore što kod radnika smanjuje naporan fizički rad i stres, čime se poboljšava ergonomija rada. Osim sigurne suradnje i olakšavanja fizičkih zadataka, kako su kolaborativni roboti prilagodljivi, omogućuju optimizaciju radnog okruženja prema ergonomske smjernicama. Isto tako kolaborativni roboti mogu umjesto ljudi obavljati precizne i druge ergonomske izazovne zadatke čime također poboljšavaju ergonomiju rada. Mogu sudjelovati i u timskim zadacima s ljudima i zajedno obavljati zadatke. Ukratko, ova kombinacija tehnologije, u obliku kolaborativnih robota, i ergonomije pomaže u stvaranju održivog i produktivnog radnog okruženja. [10,12]

4. UNAPREĐENJE RADNE STANICE KORIŠTENJEM KOLABORATIVOG ROBOTA

U ovom poglavlju navest će se postojeći primjeri primjene kolaborativnih robota na radom mjestu uz ergonomsku analizu (RULA) koja se koristi za unapređenje postojećeg radnog mjesta.

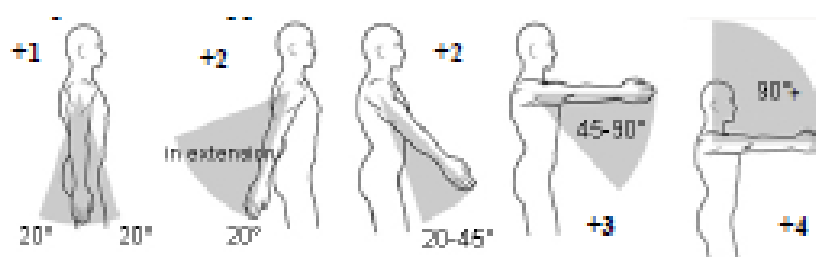
4.1. Postupak provođenja RULA metode

Provodi se u tri stupnja:

1. Najprije se prikupljaju potrebni podaci o radnom okruženju te radnim zadacima, kako bi se odredili ključni pokreti gornjih udova i položaji tijela.
2. U drugom koraku se obavlja snimanje i nakon toga ocjenjivanje tijela i njegovih pokreta pomoću tablice bodova za RULA metodu.
3. Određivanje razine opterećenja tijela po pojedinim segmentima pomoću potrebnih tablica za ocjenjivanje i na kraju analiza tih rezultata kako bi se identificirale faze s velikim rizikom. [13]

4.1.1. Držanje i položaj dijelova tijela

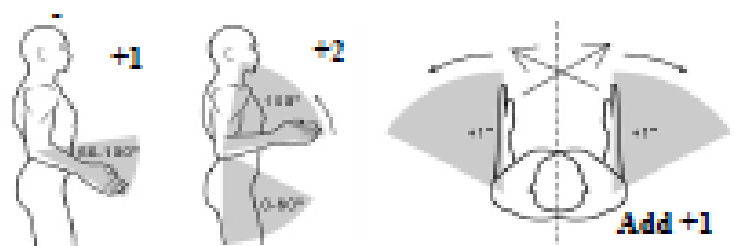
Pri ocjenjivanju se odabire radni položaj tijela prema uputama te su dodjeljuju ocjene. Tijekom procjene treba izabrati položaj u svakom odjeljku bodovne liste, uz uzimanje u obzir dodatnih bodova za eventualna dodatna opterećenja.



Slika 12. Položaj nadlaktice [14]

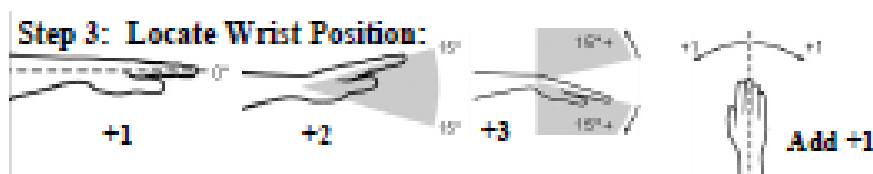
Na slici 12 prikazani su položaji nadlaktice tijekom obavljanja zadatka na analiziranoj radnoj stanici, uz pridružene ocjene za svaki položaj. Uočavamo četiri različita položaja prema kutu podizanja nadlaktice, s ocjenama od 1 do 4. ocjena 1 označava najmanje opterećenja, dok je ocjena 4 rezervirana za najveće opterećenje. Dodatni bodovi dodjeljuju se za podignuto rame (jedan bod),

prelazak simetrale tijela (jedan bod), dok se oduzima jedan bod ako je ruka poduprta ili se osoba oslanja na nju. [16]



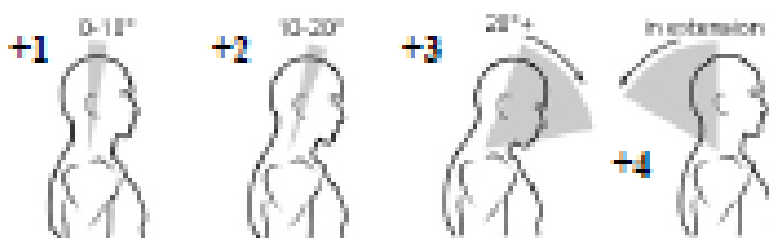
Slika 13. Položaj podlaktice [14]

Na slici 13. prikazane su podlaktice u različitim mogućim položajima prilikom obavljanja odabranog zadatka, uz prethodno određene ocjene za svaki položaj. Prvi slučaj prikazuje podlakticu podignutu pod kutom 60°-100° u odnosu na spuštene podlaktice uz tijelo. Drugi slučaj pokazuje podlakticu koja obavlja zadatke u rasponu od 0° do 60° i 100°+. Treći slučaj pruža korisniku mogućnost izbora. Ako korisnik pomiče podlaktice lijevo-desno ili jednom rukom prelazi simetralu tijela tijekom obavljanja zadatka, dodaje se jedan bod osnovnoj ocjeni u ovom odjeljku.



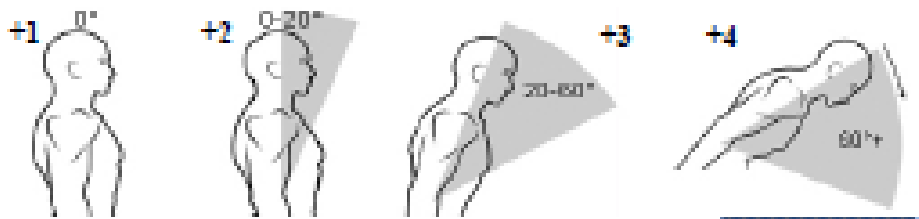
Slika 14. Položaj šake [14]

Slika 14 pokazuje položaj ručnog zgloba u radu. Prve tri sheme se odnose za zakretni kut, a četvrta pokazuje dodatni bod za zakret dlana oko svoje osi.



Slika 15. Položaj vrata [14]

U procjenu gornjeg dijela tijela spada i vrat. Na slici 15 prikazani su položaji vrata i bodovanje prema kutu nagiba. Iako nije prikazano na slici, dodaje se i po bod ako se vrat nagnje u stranu ili se zakreće lijevo ili desno.



Slika 16. Položaj trupa [14]

Slika 16 prikazuje položaj trupa kod obavljanja zadatka. Također se prema kutu nagiba dodaju od 1 do 4 boda, a u slučajevima gdje se trup nagnje u stranu ili se zakreće lijevo ili desno, dodaje se još po bod za svaku akciju.

4.1.2. Tablice i bodovne liste

Nakon što se odrede položaji određenih dijelova tijela, bodovi se upisuju u bodovne liste i prema tim sumama se iz tablice iščitavaju ocjene za daljnju procjenu. Prva tablica je A tablica i prikazana je tablicom 5.

Tablica 5. Tablica A strane [14]

TABLICA A		RUČNI ZGLOB							
		1		2		3		4	
NADLAKTICA	PODLAKTICA	ZAKRET ZGLOBA		ZAKRET ZGLOBA		ZAKRET ZGLOBA		ZAKRET ZGLOBA	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

U A tablici, ocjene za nadlakticu, podlakticu i ručni zglob kombiniraju se s rezultatom odjeljka upotrebe mišića. Upotreba mišića procjenjuje se na temelju toga je li držanje uglavnom statično, odnosno traje duže od 10 minuta, ili se radnja ponavlja četiri puta u minuti. Ako se primijeti jedan ili oba od ovih slučajeva, dodajemo po jedan bod. Na taj rezultat dodaje se i ocjena za težinu tereta, koja je specificirana u tablici 6.

Tablica 6. Tablica kategorije težine tereta [14]

TEŽINA TERETA	VRSTA OPTEREĆENJA	BODOVI
< 2 kg	isprekidano	0
2 kg – 10 kg	isprekidano	1
2 kg – 10 kg	statično ili ponavljano	2
> 10 kg	ponavljano ili na udare	3

Nakon završetka procjene na A strani radne liste, prelazi se na B stranu. Na B strani koriste se tri ocjene koje ulaze u B tablicu. Potrebne su ocjene za položaj vrata, trupa i nogu. Ocjene za vrat i

trup su već ranije prikazane slikama 15 i 16. U slučaju noga i stopala, dodaje se po jedan bod ako su poduprte, inače se dodaju dva boda. S prikupljenim podacima ulazi se u tablicu B prema danim ocjenama u tablici 7.

Tablica 7. Tablica B strane [14]

Ocjena položaja vrata	Ocjena položaja trupa (torza)											
	1		2		3		4		5		6	
	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE	NOGE
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

Kada i iz ove tablice se iščita rezultat, zbraja se isto kao i na A strani s ocjenom upotrebe mišića i težine tereta. S dobivenim rezultatima ulazi se u tablicu C, koja je dana tablicom 8, i u njoj se iščita konačan rezultat.

Tablica 8. Tablica C za ukupnu procjenu [14]

TABLICA C		OCJENA ZA VRAT/TRUP/NOGE						
		1	2	3	4	5	6	7+
OCJENA ZA ZGLOB/RUKA	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	4	6	6	7	7
	7	5	5	5	6	7	7	7
	8+	5	5	5	7	7	7	7

4.1.3. Razine akcije

Tablica 9 prikazuje razine akcija koje je potrebno poduzeti prema procjeni RULA metodom. Razina 1 dobiva prolaznu ocjenu i ne zahtijeva promjene. Razina 2 ukazuje na moguće probleme koji bi se trebali detaljnije istražiti i upozorava na moguće zahtjeve za promjenom, razina 3

upozorava da je analizom utvrđena potreba za skorom promjenom, dok razina 4 pokazuje da je stanje kritično i preporučuje hitno djelovanje i trenutne promjene. [15]

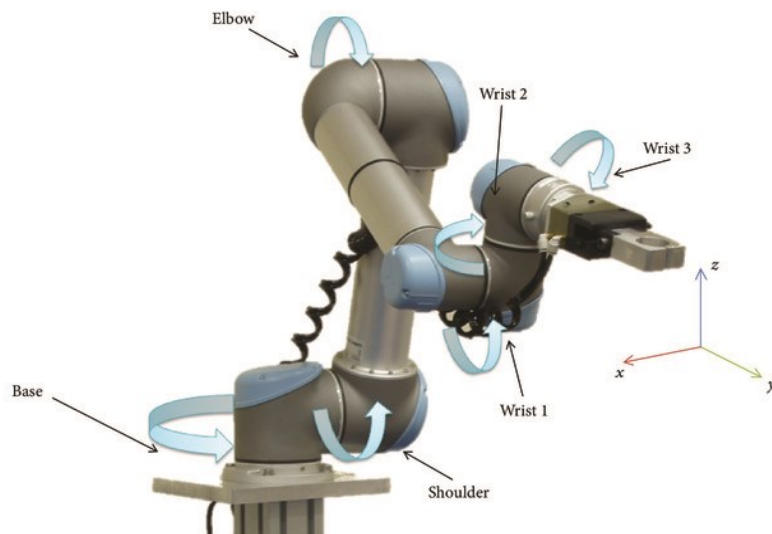
Tablica 9. Razina akcije [14]

Razina akcije 1	Ocjena 1 ili 2 ukazuje da je držanje tijela prihvatljivo ako se ne ponavlja duže vrijeme
Razina akcije 2	Ocjena 3 ili 4 ukazuje da je potrebna daljnja analiza, a možda će biti i potrebne promjene
Razina akcije 3	Ocjena 5 ili 6 ukazuje da su analiza i promjena potrebni uskoro
Razina akcije 4	Ocjena 7 ukazuje da je da su analiza i promjene potrebne odmah

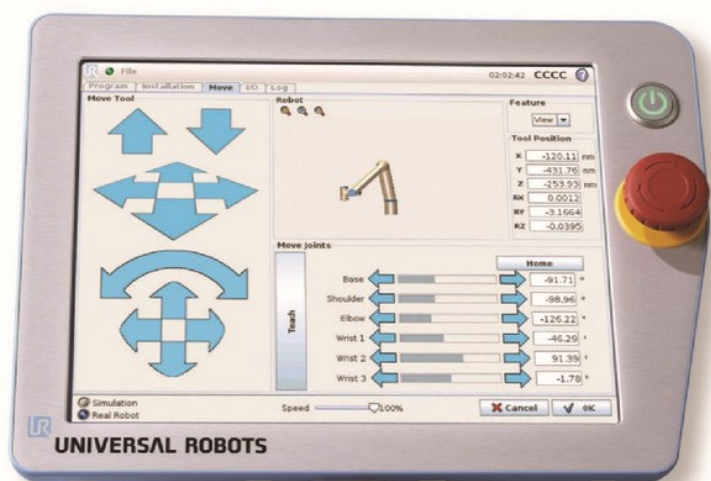
4.2. Studija slučaja

Radnici često trebaju raditi u lošim uvjetima i neudobnim položajima te se upravo zbog toga kao održiva proizvodna rješenja uvode suradnja robota i ljudi. Kolaborativni roboti mogu djelovati kao pomoćnici, smanjujući ručno rukovanje i poboljšavajući ergonomiju ručnih zadataka, što dovodi do povećane produktivnosti. Industrijski roboti su često programirani da ih se kontrolira preko kontrolnih uređaja, što zahtijeva obučene korisnike. To može imati negativne implikacije na ukupne troškove implementacije. No investicijski trošak učinkovitih sučelja čovjek-stroj može se nadoknaditi uštedama generiranim učinkovitijim radnim sustavom. U proizvodnim timovima, verbalna komunikacija i komunikacija gestama su neodvojive, a geste rukama često se koriste za pojačavanje govornikovih ideja. Korištenje gesta za komunikaciju u kooperativnim sustavima čovjeka i robota može biti vrijedno, posebno u nestrukturiranim otvorenim radnim prostorima. U Industriji 5.0 gdje se stavlja naglasak na suradnju između ljudi i autonomnih strojeva, gestama upravljanje robotima može poboljšati prilagodljivost i učinkovitost proizvodnih sustava.

U ovoj studiji slučaja uspoređivalo se rukovanje robotom Universal robots UR5, prikazanog na slici 17, i to u dva slučaja: upravljanje pomoću kontrolnog uređaja (slika 13) i upravljanje gestama pomoću uređaja Leap motion kontrolera (slika 19). [16]



Slika 17. Universal Robots UR5 [16]



Slika 18. The Universal Robots teach pendant [16]

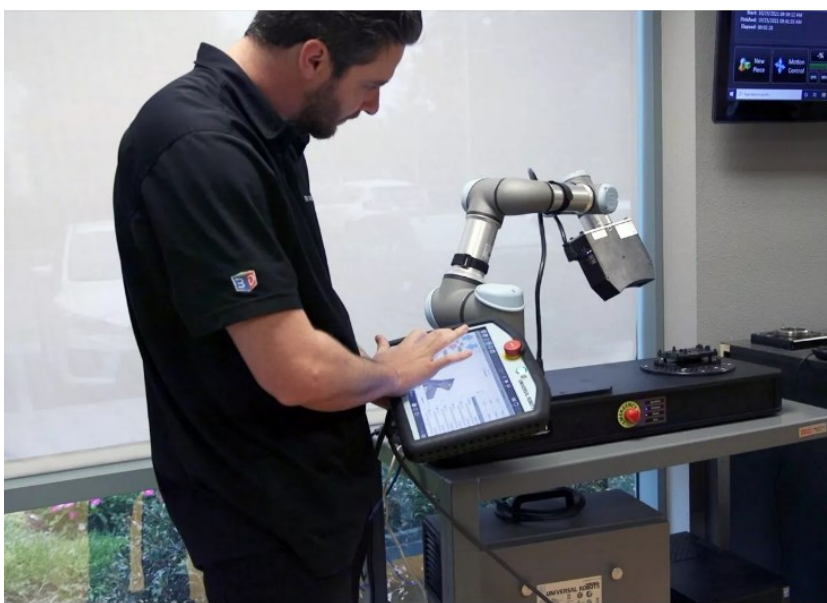


Slika 19. Leap motion kontroler [17]

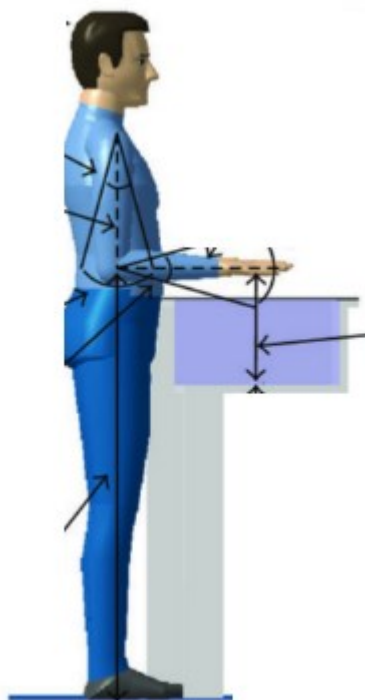
Eksperiment je proveden u laboratorijskom prostoru duljine četiri metra i širine četiri metra i to okružen zidovima. Sustav upravljanja gestama testiran je s robotom sa slike 17, Universal Robot UR5, postavljenim na postolju visine jedan metar. Robot ima doseg od 850 milimetara s kružnom radnom ovojnicom i ima kontrolni uređaj sa zaslonom osjetljivim na dodir. Za upravljanje robotom gestama koristio se uređaj za praćenje ruku, Leap Motion Controller, dizajniran kao sučelje čovjeka i računala, veličine 24 cm² koji se temelji na stereo vidu koji ima tri emitera infracrvenog i dvije infracrvene kamere. Vidno polje mu je približno 150°, a efektivni domet je približno 25 do 650 milimetara iznad uređaja. Sposoban je pratiti položaj ruku, prstiju i alatima sličnih prstima sa milimetarskom preciznošću.

Taj uređaj i prijenosno računalo postavljeni su uz rub robotove radne ovojnice na stolu podesive visine. Robot je bio opremljen hvataljkom s dva prsta koja je bila deaktivirana. Unutar radne ovojnice robota na radnoj ploči bile su obješene tri crne plastične cijevi koje su korištene kao prepreke tijekom testa. U istraživanju je sudjelovalo osam ljudi iz Sveučilišta Cranfield, četiri muškarca i četiri žene, od 23 do 51 godine, od kojih je pet imalo prijašnje iskustvo u radu s robotima. Svaki sudionik prolazio je kroz oba slučaja, upravljanje kontrolnim uređajem i upravljanje gestama. Svaki sudionik je imao iste uvjete za eksperiment, a nakon svojih testiranja svi su ispunjavali upitnik o sustavu upravljanja, ocjenjujući fizičko opterećenje, intuitivnost i zadovoljstvo sustavom na Likertovoj ljestvici od sedam stupnjeva gdje je 7 pozitivno, a 0 negativno. Cilj upitnika je bio mjeriti njihovo iskustvo u korištenju sustava. Eksperiment je bio usredotočen na procjenu ergonomskih aspekata sustava, a sudionici nisu dobili konkretan zadatak, nego upute da isprobaju sve moguće pokrete sa svakim sustavom. U RULA testu, upravljanje gestama pokazalo je niži rizik od ozljeda mišićno-koštanog sustava od upravljanja kontrolnim uređajem. Dodatni rizik kod kontrolnog uređaja javlja se ako mu je masa veća od 2 kilograma.

Analiza ukazuje na potencijalni problem s vratom prilikom korištenja kontrolnog uređaja zbog visokog radnog kuta, što može uzrokovati mišićno-koštane nelagode tijekom dulje upotrebe. Isto tako kod korištenja kontrolnog uređaja ruke moraju biti podignute što isto može uzrokovati umor nakon dugotrajne upotrebe. Na slici 20 prikazan je primjer upravljanja tim robotom pomoću kontrolnog uređaja, koji će nam poslužiti za provođenje RULA metode, a na slici 21 prikazan je položaj čovjeka kod upravljanja gestama. Rezultati RULA testa prikazani su u tablici 6. [16]



Slika 20. Upravljanje robotom pomoću kontrolnog uređaja [18]



Slika 21. Položaj čovjeka kod upravljanja gestama [16]

4.2.1. Postupak korištenja RULA metode

Prethodno objašnjenu RULA metodu ćemo provesti kroz ovaj primjer. Za analizu će se uzeti dva slučaja, prvi slučaj kada se robotom rukovalo pomoću kontrolnog uređaja, a drugi kada se upravljalo gestama. Za slučaj upravljanja s kontrolnim uređajem napraviti će se detaljna analiza, dok će se za slučaj rukovanja pomoću gesta dati samo krajnji rezultat za usporedbu.

1. Korak

Ocjena položaja nadlaktice



Slika 22. Pravilo bodovanja nadlaktice [14]

Za držanje kontrolnog uređaja, nadlaktica se kreće po ovom pravilu te je broj bodova za nadlakticu jednak 2.

2. Korak

Ocjena položaja podlaktice



Slika 23. Pravilo bodovanja podlaktice [14]

Za držanje kontrolnog uređaja, podlaktica se kreće po ovom pravilu pa je broj bodova za podlakticu jednak 1.

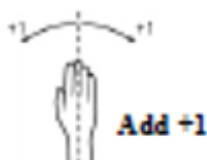
3. Korak

Ocjena položaja ručnog zgloba



Slika 24. Pravilo bodovanja ručnog zgloba [14]

Kod bodovanja položaja ručnog zgloba broj bodova je jednak 2, no još se dodaje jedan bod zbog zakreta zgloba što prikazuje slika 25 pa je zbroj bodova za položaj ručnog zgloba jednak 3.



Slika 25. Pravilo za zakret ručnog zgloba [14]

4. Korak

Očitavanje iz tablice A

Iz tablice se očitava vrijednost 3.

Tablica 10. Očitavanje iz A tablice [14]

TABLICA A		RUČNI ZGLOB							
		1		2		3		4	
NADLAKTICA	PODLAKTICA	ZAKRET ZGLOBA		ZAKRET ZGLOBA		ZAKRET ZGLOBA		ZAKRET ZGLOBA	
		1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9

5. Korak

Procjena upotrebe mišića

Ovdje se koristi pravilo po kojem je potrebno dodati jedan bod ukoliko se radnja odvija statički duže od deset minuta ili se ponavlja barem četiri puta u jednoj minuti. U ovom slučaju ispitivanje traje deset minuta u stojećem položaju pa se dodjeljuje jedan bod.

6. Korak

Procjena težine tereta

Kako se u primjeru navodi da kontrolni uređaj teži dva kilograma, prema tablici 6 dodaje se jedan bod.

7. Korak

Očitavanje iz tablice C

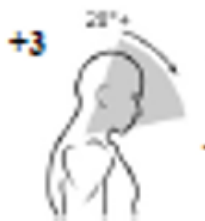
3 boda iz tablice A + 1 bod iz 6. koraka + 1 bod iz 7. koraka = 5 bodova

Tablica 11. Očitavanje za A stranu [14]

TABLICA C		OCJENA ZA VRAT/TRUP/NOGE						
		1	2	3	4	5	6	7+
OCJENA ZA ZGLOB/ RUKA	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	4	6	6	7	7
	7	5	5	5	6	7	7	7
	8+	5	5	5	7	7	7	7

8. Korak

Ocjena položaja vrata



Slika 26. Pravilo za ocjenu položaja vrata [14]

Prema pravilu o ocjeni položaja vrata, za pogled na kontrolni uređaj, dodjeljuje se 3 boda.

9. Korak

Ocjena položaja trupa



Slika 27. Pravilo za ocjenu položaja trupa [14]

Za položaj trupa dodjeljuje se 2 boda.

10. Korak

Ocjena za noge

Ispitanik je oslonjen na svoje noge stoga prema pravilu dodjeljuje se 1 bod.

11. Korak

Očitavanje vrijednosti iz tablice B preda dodijeljenim ocjenama

Tablica 12. Očitavanje iz B tablice [14]

Ocjena položaja vrata	Ocjena položaja trupa (torza)											
	1		2		3		4		5		6	
	NOGE		NOGE		NOGE		NOGE		NOGE		NOGE	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	5	6	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	7	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

12. Korak

Procjena upotrebe mišića

Ovdje se koristi pravilo po kojem je potrebno dodati jedan bod ukoliko se radnja odvija statički duže od deset minuta ili se ponavlja barem četiri puta u jednoj minuti. U ovom slučaju ispitivanje traje deset minuta u stojećem položaju pa se dodjeljuje jedan bod.

13. Korak

Procjena težine tereta

Kako se u primjeru navodi da kontrolni uređaj teži dva kilograma, prema tablici 6 dodaje se jedan bod.

14. Korak

Očitavanje iz tablice C

Tablica 13. Očitavanje vrijednosti iz tablice C [14]

TABLICA C		OCJENA ZA VRAT/TRUP/NOGE						
		1	2	3	4	5	6	7+
OCJENA ZA ZGLOB/RUKA	1	1	2	3	3	4	5	5
	2	2	2	3	4	4	5	5
	3	3	3	3	4	4	5	6
	4	3	3	3	4	5	6	6
	5	4	4	4	5	6	7	7
	6	4	4	4	6	6	7	7
	7	5	5	5	6	7	7	7
	8+	5	5	5	7	7	7	7

Iz tablice se očitava vrijednost 6. Prema razini akcije iz tablice 9 potrebna je analiza, a i skora promjena na to radnoj stanici.

Na početku ovog primjera naglašena je usporedba ovog slučaja i slučaja gdje se umjesto upravljanja kontrolnim uređajem upravlja gestama. Za kontrolu robota kontrolnim uređajem, kroz korake RULA metode, ustanovljen je rezultat s ocjenom 6, što govori da je toj radnoj stanici potrebna analiza, a s analizom i neke promjene. Za upravljanje gestama tim istim robotom dobiveni rezultat je ocjena 3 što je bolja ocjena. Ocjena 3 ukazuje da je potrebna daljnja analiza, a s daljnjom analizom javlja se mogućnost potrebe za promjenama, no svejedno napredak je u odnosu na upravljanje kontrolnim uređajem.

Tablica 14. . Rezultati RULA analize [17]

	Kontrolni uređaj	Upravljanje gestama
Analiza ruke i zgloba		
Rezultat držanja zapešća	3	3
Rezultat upotrebe mišića	1	1
Rezultat opterećenja sile	1	0
Rezultat za ruku i zglob	5	4

Analiza vrata, trupa i nogu		
Rezultat držanja trupa	3	1
Rezultat upotrebe mišića	1	1
Rezultat opterećenja sile	1	0
Rezultat za vrat, trup i noge	5	2
Konačni RULA rezultat	6	3

Dva ispitanika su dali kontradiktorne odgovore stoga su njihov rezultati odbačeni pa su rezultati ergonomske ispitivanja sažeti u sljedećoj tablici.

Tablica 15. Rezultati ispitivanja upotrebljivosti [17]

Sudionik	Manje naporan za korištenje		Intuitivnost		Ugodan za korištenje	
	Kontrolni uređaj	Upravljanje gestama	Kontrolni uređaj	Upravljanje gestama	Kontrolni uređaj	Upravljanje gestama
1	3	4	4	5	6	6
2	2	3	6	5	6	6
3	5	5	3	5	5	6
4	3	4	4	5	5	5
5	3	4	4	3	5	6
6	4	3	5	4	5	5
	3.33	3.83	4.33	4.5	5.33	5.67

Na temelju rezultata iz tablice 15 može se vidjeti da nije značajna razlika, no vidi se da je upravljanje gestama bolje zadovoljilo kod sva tri ispitivanja.

Zaključak eksperimenta je da razvijeni sustav upravljanja gestama ne teži potpuno zamijeniti kontrolni uređaj za upravljanje robotom, već djelovati kao dodatni ulazni uređaj u interaktivnom okruženju. Njegova svrha je smanjiti udaljenost operatera do mjesta kontrolnog uređaja i minimizirati rizik od ozljeda mišićno-koštanog sustava. Fokus je na primjenama u oporavku sustava i ispravljanju pogrešaka velikim proizvodnim okruženjima. Eksperiment pokazuje potencijal razvijenog sustava upravljanja gestama da se koristi kao ulazni uređaj za upravljanje

industrijskim robotom u smislu suradnje čovjeka i robota, s prijedlozima dodatnih značajki za poboljšanje jednostavnosti i intuitivnosti. Sustav omogućuje operaterima upravljanje robotom bez potrebe za složenom obukom. Upotrebljivost upravljanja gestama robotom može se poboljšati ako se nadopuni sučeljem s konvencionalnim elementima koji korisniku pružaju vizualnu povratnu informaciju. Vizualna povratna informacija može se postići korištenjem tehnologije proširene ili virtualne stvarnosti za pružanje informacija i uputa u stvarnom vremenu.[17]

5. ZAKLJUČAK

Ergonomsko oblikovanje radnog mjesta uz implementaciju kolaborativnog robota u proizvodnim sustavima predstavlja ključni aspekt unaprjeđenja radnih uvjeta, povećanja učinkovitosti i smanjenja rizika od ozljeda među radnicima. Kroz analizu učinka i primjenu RULA metode, evidentirane su ključne prednosti i potencijalni izazovi suradnje čovjeka i robota. Implementacija kolaborativnih robota donosi povećanje produktivnosti, učinkovitije iskorištavanje radnog vremena te smanjenje fizičkog opterećenja radnika. Ergonomska optimizacija radnih mjesta, ocjenjena kroz različite položaje tijela, omogućuje bolje prilagodbe radnom okolišu. Međutim kako bi se postigla potpuna sinergija između čovjeka i robota, potrebno je pažljivo razmotriti i implementirati preporuke za poboljšanje ergonomske učinkovitosti. Rezultati analize RULA metodom, pružaju smjernice za potrebne promjene na radnom mjestu. U konačnici, kolaborativni roboti imaju značajan potencijal za poboljšanje radnih uvjeta, smanjenje rizika od ozljeda i povećanje produktivnosti u proizvodnim sustavima uz istovremeno osiguravanje ergonomske održivosti radnih mjesta. Ovaj rad analizira integraciju tehnologije i ergonomije s ciljem stvaranja inovativnijih, učinkovitijih i sigurnijih proizvodnih okruženja.

LITERATURA

- [1] Hatlek K., Uloga globalizacije i Industrije 4.0 u vrijeme pandemije, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, 2021.
- [2] Četvrta industrijska revolucija, <https://www.mcb.rs/blog/cetvrta-industrijska-revolucija-industrija-4-0/>, pristupljeno 25.8.2023.
- [3] Nikolić G. Is industry 5.0 responding to industry 4.0 or its resume? Polytechnic and design. Vol. 6, No. 2, 2018
- [4] Pantak L., Pojava Industrije 5.0 i utjecaj na upravljanje organizacijom, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, 2023.
- [5] Crnjac Zizic M, Mladineo M, Gjeldum N, Celent L. From Industry 4.0 towards Industry 5.0: A Review and Analysis of Paradigm Shift for the People, Organization and Technology. Energies. 2022; 15(14) doi.: /10.19279/TVZ.PD.2018-6-2-01
- [6] Kvirin S. Uvod u ergonomiju. Karlovac: Veleučilište u Karlovcu; 2019.
- [7] VR in Industry 4.0, <https://www.alamy.com/virtual-reality-technology-in-industry-40-business-man-suit-wearing-vr-glasses-to-see-ar-service-machine-camera-vision-of-smart-robot-arm-machine-image243772225.html>, pristupljeno 12.2.2024.
- [8] Kolaborativni roboti, <https://metron.ba/kolaborativni-roboti/>, pristupljeno 12.2.2024.
- [9] Patil S, Vasu V, Srinadh K. Advances and perspectives in collaborative robotics: a review of key technologies and emerging trends. Discover Mechanical Engineering. 2023. Vol.2, 13
- [10] Mohd Javaid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, Shanay Rab, Rajiv Suman, Significant applications of Cobots in the field of manufacturing, Cognitive Robotics, 2022, Volume 2, p. 222-233
- [11] Prassidaa G., Asfari, A.: conceptual model for the acceptance of collaborative robots in industry 5.0. Procedia Computer Science. 2022. Vol. 197 61-67
- [12] Keshvarparast A, Battini D, Battaia D, Pirayesh A. Collaborative robots in manufacturing and assembly systems: literature review and future research agenda. Journal of Intelligent Manufacturing. 2023. doi. /10.1007/s10845-023-02137-w
- [13] Salvendy G. Handbook of Human Factors and Ergonomics Methods. New Jersey: John Wiley & Sons; 2012.
- [14] RULA, [https://www.physio-pedia.com/Rapid_Upper_Limb_Assessment_\(RULA\)](https://www.physio-pedia.com/Rapid_Upper_Limb_Assessment_(RULA)), pristupljeno 15.2.2024.

- [15] Klarić L., RULA metoda za ergonomsku procjenu rizika radnih zadataka, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2021.
- [16] Tang G., Webb P.: The Design and Evaluation of an Ergonomic Contactless Gesture Control System for Industrial Robots. *Journal of Robotics*. 9791286, 2018.
- [17] Leap Motion, <https://mocap.reallusion.com/iclone-motion-live-mocap/leap-motion.html>, pristupljeno 19.2.2024.
- [18] 3D Infotech, <https://www.universal-robots.com/case-stories/3d-infotech/>, pristupljeno 19.2.2024.