



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА

Марија И. Савковић

**УНАПРЕЂЕЊЕ ЕФЕКТИВНОСТИ
ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ
ЕРГОНОМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ
ИНДУСТРИЈСКИХ РАДНИХ СТАНИЦА**

докторска дисертација

Крагујевац, 2024



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF ENGINEERING

Marija I. Savković

**IMPROVEMENT OF EFFECTIVENESS OF
THE PRODUCTION PROCESS BASED ON
THE APPLICATION OF ERGONOMIC
OPTIMIZATION OF INDUSTRIAL
ASSEMBLY WORKSTATION**

Doctoral Dissertation

Kragujevac, 2024

Mojoj porodici

Аутор
Име и презиме: Марија Савковић
Датум и место рођења: 15. 07. 1984., Крагујевац
Садашње запослење: Истраживач-сарадник, Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Докторска дисертација
Наслов: Унапређење ефективности производних процеса применом ергономске оптимизације индустријских радних станица
Број страница: 225
Број слика: 121
Број библиографских података: 452
Установа и место где је рад израђен: Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу
Научна област (УДК): Индустријско инжењерство и инжењерски менаџмент
Ментор:
др Марко Ђапан, ванредни професор, Факултет инжењерских наука
Број одлуке и датум прихватања теме докторске дисертације:
IV-04-345/18 од 12. 05. 2021.

ЗАХВАЛНИЦА

Ова докторска дисертација је настала као резултат дугогодишњег бављења научно-истраживачким радом током докторских студија у оквиру Центра за теротехнологију Факултета инжењерских наука.

Овом приликом желим да изразим захвалност свима који су допринели како у изради ове дисертације тако и мом професионалном развоју.

Захваљујем се на прилици да учествујем на пројекту Одрживи развој технологија и опреме за рециклажу моторних возила који је финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије и пројектима Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције - Artificial intelligence for managing workplace safety (AI4WorkplaceSafety) и Modular and versatile collaborative intelligent waste management robotic system for circular economy (CircuBot), финансијски подржаних од стране Фонда за науку у оквиру којих сам имала прилику да проширим знање и стекнем нова искуства.

Посебну захвалност дугујем ментору, проф. др Марку Ђапану, ванредном професору Факултета инжењерских наука на несебичној и стручној помоћи, драгоценим саветима и конструктивним критикама током израде докторске дисертације. Захваљујем му се на посвећености, подрици и охрабрењу у савладавању изазова.

Захвалност изражавам члановима комисије, проф. др Ивану Мачужићу, редовном професору Факултета инжењерских наука, др Арсу Вукићевићу, доценту Факултета инжењерских наука, проф. др Евици Јовановић, редовном професору Факултета заштите на раду, проф. др. Миладину Стефановићу, редовном професору Факултета инжењерских наука и проф. др Данијели Тадић, редовном професору Факултета инжењерских наука, на корисним коментарима и сугестијама које су унапредиле квалитет дисертације.

Хвала колегама Carlu Caiazzi, Николи Коматини, Николи Мијаиловићу, Милошу Пушици на колегијалности, моралној подрици, заједничкој сарадњи и конструктивним предлозима током израде докторске дисертације.

Највећу захвалност дугујем својој породици. Хвала мојим родитељима, Иву и Радојци, баки Јелени, сестри Неди и сестрићу Павлу на безусловној љубави, подрици и разумевању кроз све ове године. Посебну захвалност дугујем деди Живојину за безграничну љубав и прелепе успомене које ће заувек остати у мом сећању. Ваша вера у мене била је мој највећи извор снаге.

Крагујевац, 2024. године

Марија Савковић

РЕЗИМЕ

У динамичном окружењу сарадња између организација и научних институција све више добија на значају. Ова сарадња се огледа у решавању комплексних проблема који се јављају у савременим индустријским системима као што су повећање ефикасности производних процеса, побољшање перформанси и благостања радника, повећање задовољства послом, превенција повреда на раду и побољшање здравља радника. Циљ ове сарадње јесте проналажење иновативних и специјализованих решења у критичним областима попут ергономије, безбедности и здравља на раду, организације и економије.

Основни циљ дисертације је унапређење ефикасности производних процеса кроз ергономску оптимизацију индустријских радних станица на којима радници обављају понављајуће, монотоне активности монтаже. Кроз емпиријску студију случаја и практична тестирања истражено је како ергономска оптимизација и побољшање радних услова могу допринети побољшању безбедности, повећању продуктивности и задовољства радника.

У дисертацији су спроведена напредна експериментална истраживања из области физичке ергономије, организационе ергономије и неуроергономије. Експериментална истраживања су спроведена на радној станици за монтажу у два сценарија - традиционалном (неергономском) и ергономском. Студија случаја представља интегративни мултимодални оквир за истовремено праћење физичког и когнитивног оптерећења радника применом напредних метода електро психофизиологије, праћење покрета очију и анализу положаја тела радника путем дигиталног моделирања.

Мултиваријантном анализом резултата праћења физичког и менталног оптерећења, праћења покрета тела и очију, продуктивности и дефеката показано је да постоји значајна корелација између свих параметара. Комбиновањем резултата истраживања добијених применом ових напредних технологија дубински је сагледан допринос ергономске оптимизације унапређењу радних процеса, што је од суштинског значаја за савремене индустријске системе.

Резултати спроведеног истраживања имају за циљ да пруже практичне смернице за дизајнирање радних простора у индустријском сектору, као и да допринесу ширем разумевању значаја ергономије у оптимизацији индустријских процеса. Допринос дисертације огледа се у квантификацији физичког и менталног оптерећења и утврђивању када долази до физичког умора, пада пажње и концентрације радника у циљу повећања продуктивности и смањења дефеката на радним станицама за монтажу.

Кључне речи: *безбедност и здравље на раду, ефикасност производних процеса, ергономска оптимизација, радна станица за монтажу, златна зона*

ABSTRACT

In a dynamic environment, cooperation between organizations and scientific institutions is gaining more and more importance. This cooperation is reflected in solving complex problems that arise in modern industrial systems, such as increasing the effectiveness of production processes, improving the performance and well-being of workers, increasing job satisfaction, preventing injuries at work and improving the health of workers. The aim of this cooperation is to find innovative and specialized solutions in critical areas such as ergonomics, safety and health at work, organization and economy.

The main goal of the dissertation is to improve the effectiveness of production processes through the ergonomic optimization of industrial workstations where workers perform repetitive, monotonous assembly activities. Through an empirical case study and practical tests, it was investigated how ergonomic optimization and improvement of working conditions can contribute to improving safety, increasing productivity and operator satisfaction.

Advanced experimental research in the field of physical ergonomics, organizational ergonomics and neuroergonomics was carried out in the dissertation. Experimental research was conducted on an assembly workstation in two scenarios - traditional (non-ergonomic) and ergonomic. The case study represents an integrative multimodal framework for the simultaneous monitoring of the operator's physical and cognitive load using advanced methods of electro-physiology, tracking of eye movements and analysis of the operator's body position through digital modeling.

A multivariate analysis of the results of monitoring physical and mental workload, monitoring body and eye movements, productivity and defects showed that there is a significant correlation between all parameters. By combining the results of research obtained by applying these advanced technologies, the contribution of ergonomic optimization to the improvement of work processes, which is of essential importance for modern industrial systems, was thoroughly examined.

The results of the conducted research aim to provide practical guidelines for designing work spaces in the industrial sector, as well as to contribute to a wider understanding of the importance of ergonomics in the optimization of industrial processes. The contribution of the dissertation is reflected in the quantification of physical and mental workload and determination of when physical fatigue occurs, a drop in attention and concentration of operators in order to increase productivity and reduce defects at assembly workstations.

Keywords: *safety and health at work, effectiveness of production processes, ergonomic optimization, assembly workstation, golden zone*

САДРЖАЈ

Листа слика.....	I
Листа табела	V
Листа скраћеница.....	VII
Преглед страних речи и израза.....	VIII
<i>1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА</i>	<i>1</i>
1.1 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА.....	5
1.2 ОСНОВНА ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА.....	6
1.3 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ	20
1.4 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА.....	20
1.5 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА	21
1.6 ОКВИРНИ САДРЖАЈ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	22
<i>2. БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ И ЕРГОНОМИЈА ИНДУСТРИЈСКИХ РАДНИХ СТАНИЦА</i>	<i>24</i>
2.1 БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ У ОКВИРУ ИНДУСТРИЈСКИХ РЕВОЛУЦИЈА.....	24
2.2 БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ - ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ.....	28
2.3 ПРИМЕНА НАПРЕДНИХ ТЕХНОЛОГИЈА ИНДУСТРИЈЕ 4.0 НА БЗР	33
2.4 БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ РАДНИКА КОЈИ ОБАВЉАЈУ МОНТАЖНЕ АКТИВНОСТИ НА ИНДУСТРИЈСКИМ РАДНИМ СТАНИЦАМА	37
2.5 РАЗВОЈ ЕРГОНОМИЈЕ	43
2.6 ЕРГОНОМИЈА - ТЕОРИЈСКЕ ПОСТАВКЕ.....	44
2.7 ДОМЕНИ ЕРГОНОМИЈЕ	48
2.8 ЗЛАТНА ЗОНА	49
2.9 РУЛА МЕТОДА.....	53
2.10 ИНТЕГРАЦИЈА ЕРГОНОМИЈЕ И LEAN ФИЛОЗОФИЈЕ У ЦИЉУ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА И ПОБОЉШАЊА БЗР	56
2.11 УЛОГА ЕРГОНОМИЈЕ У ПОБОЉШАЊУ ЕФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА.....	61
<i>3. ПСИХОФИЗИОЛОШКИ И НЕУРОЕРГОНОМСКИ ПОКАЗАТЕЉИ У ИНДУСТРИЈСКОЈ ЕРГОНОМИЈИ</i>	<i>68</i>
3.1 РАЗВОЈ ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈЕ.....	68
3.2 МИШИЋИ И УМОР МИШИЋА.....	69
3.3 ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈА	70

3.4	ТИПОВИ ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈЕ	73
3.5	ОСНОВНИ ПОКАЗАТЕЉИ КОЈИМА СЕ ПРАТИ МИШИЋНА АКТИВНОСТ ..	75
3.6	РАЗВОЈ ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАФИЈЕ.....	77
3.7	МОЗАК.....	78
3.8	ПРАЋЕЊЕ МОЖДАНЕ АКТИВНОСТИ И ПАЖЊЕ.....	79
3.9	МЕНТАЛНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ	83
3.10	ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАФИЈА.....	87
3.11	ПРАЋЕЊЕ ПОКРЕТА ОЧИЈУ	88
4.	<i>УНАПРЕЂЕНА LEAN ИНДУСТРИЈСКА РАДНА СТАНИЦА</i>	<i>90</i>
4.1	ТРАДИЦИОНАЛНА РАДНА СТАНИЦА	90
4.2	ПРЕДЛОЖЕНА РАДНА СТАНИЦА.....	94
5.	<i>ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА.....</i>	<i>104</i>
5.1	ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА	107
5.1.1	Лабораторија	107
5.1.2	Опрема	109
5.1.3	Испитаници.....	118
5.1.4	Производ.....	119
5.2	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОЦЕДУРА.....	121
6.	<i>РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА.....</i>	<i>125</i>
6.1	РЕЗУЛТАТИ ПРАЋЕЊА МИШИЋНЕ АКТИВНОСТИ	125
6.2	РЕЗУЛТАТИ ПРАЋЕЊА МОЖДАНЕ АКТИВНОСТИ.....	134
6.2.1	Ментално оптерећење.....	136
6.2.2	Корелација између индекса MWLi, Ei theta и Ei.....	147
6.3	РЕЗУЛТАТИ ПРАЋЕЊА ПРОДУКТИВНОСТИ И ДЕФЕКТАТА	150
7.	<i>ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА.....</i>	<i>178</i>
	<i>ЛИТЕРАТУРА</i>	<i>182</i>
	<i>ПРИЛОЗИ</i>	<i>218</i>

Листа слика

Ознака	Назив слике
Слика 1.1	<i>Структура дисертације</i>
Слика 2.1	<i>Историјски развој индустријских револуција</i>
Слика 2.2	<i>Историјски развој безбедности и здравља на раду</i>
Слика 2.3	<i>Сензори за праћење здравственог стања радника и параметара из радног окружења</i>
Слика 2.4	<i>Heinrich-ова пирамида безбедности</i>
Слика 2.5	<i>Модел за унапређење безбедности и здравља на раду</i>
Слика 2.6	<i>Основне технологије Индустрије 4.0 које имају утицај на БЗР</i>
Слика 2.7	<i>Нефиозиолошки положаји тела које радници заузимају током извођења монтажних активности</i>
Слика 2.8	<i>Обављање активности у неергономском положају тела</i>
Слика 2.9	<i>Трапезни мишићи</i>
Слика 2.10	<i>Најповољнији положаји за зглобове у зависности од обављања различитих типова радних задатака</i>
Слика 2.11	<i>Бенефити интеграције физичке, когнитивне и организационе ергономије</i>
Слика 2.12	<i>Обављање активности у оквиру златне зоне у вертикалном положају тела</i>
Слика 2.13	<i>Златна зона на монтажној радној станици приликом обављања радних активности у стојећем положају</i>
Слика 2.14	<i>Основне зоне (црвена, жута, зелена)</i>
Слика 2.15	<i>Обављање активности у оквиру златне зоне у седећем положају</i>
Слика 2.16	<i>Златна зона на монтажној радној станици када радник обавља активности у седећем положају</i>
Слика 2.17	<i>Златна зона рада за седећи и стојећи положај тела</i>
Слика 2.18	<i>Проблеми који настају уколико се радна места дизајнирају без узимања у обзир ергономских и leap принципа и веза са алатима производње светске класе</i>
Слика 2.19	<i>Структура и циљеви производње светске класе</i>
Слика 2.20	<i>Пет основних leap принципа</i>
Слика 2.21	<i>Улога технологија Индустрије 4.0 у управљању квалитетом</i>
Слика 2.22	<i>Ефекти примене ергономских принципа приликом дизајнирања радног окружења на перформансе</i>

Слика 2.23	<i>Дводимензионални модел</i>
Слика 3.1	<i>Структура мишића</i>
Слика 3.2	<i>Моторна јединица</i>
Слика 3.3	<i>Фазе примене електромиографије у циљу праћења мишићне активности</i>
Слика 3.4	<i>Детаљна процедура за примену електромиографије</i>
Слика 3.5	<i>Утицај различитих нивоа силе на промене у ЕМГ сигналу</i>
Слика 3.6	<i>Електромиографија иглом (а) и површинска електромиографија (б)</i>
Слика 3.7	<i>Комбинована примена иглене и површинске електромиографије</i>
Слика 3.8	<i>Приказ регија мозга са функцијама за које су одговорне</i>
Слика 3.9	<i>Структура неурона</i>
Слика 3.10	<i>Различити мождани ритмови</i>
Слика 3.11	<i>Различити типови можданих ритмова- графички приказ</i>
Слика 3.12	<i>Комбинована примена електромиографије и електроенцефалографије</i>
Слика 3.13	<i>Графички приказ међународног 10-20 система за позиционирање електрода током ЕЕГ снимања, са погледом одозго (а) и погледом са стране (б)</i>
Слика 4.1	<i>Традиционална радна станица (поглед 1)</i>
Слика 4.2	<i>Традиционална радна станица (поглед 2)</i>
Слика 4.3	<i>Изометријски приказ радне површине на традиционалној радној станици</i>
Слика 4.4	<i>PDCA циклус примењен на монтажну радну станицу</i>
Слика 4.5	<i>Модел предложене ергономске радне станице</i>
Слика 4.6	<i>Предложена leap радна станица</i>
Слика 4.7	<i>Свеобухватни приступ пројектовању радне станице у складу са ергономским и leap принципима</i>
Слика 4.8	<i>Изометријски приказ предложене унапређене радне станице</i>
Слика 4.9	<i>Предложене дистанце на радној површини</i>
Слика 5.1	<i>Структура експерименталног истраживања</i>
Слика 5.2	<i>Методологија</i>
Слика 5.3	<i>Температуре у лабораторији током извођења експеримента у традиционалном сценарију</i>
Слика 5.4	<i>Температура у лабораторији током извођења експеримента у ергономском сценарију</i>
Слика 5.5	<i>MuscleBAN BE уређај</i>
Слика 5.6	<i>Гел са електролитима</i>

Слика 5.7	<i>Постављање ЕМГ сензора на горње трапезне мишиће</i>
Слика 5.8	<i>Визуелизација ЕМГ сигнала у реалном времену</i>
Слика 5.9	<i>(а) ЕЕГ капа, (б) локализација електрода на ЕЕГ капи</i>
Слика 5.10	<i>Постављање ЕЕГ опреме</i>
Слика 5.11	<i>Дијаграм тока фазе обраде ЕЕГ-а</i>
Слика 5.12	<i>Филтрирање опсега 1- 40 Hz</i>
Слика 5.13	<i>Интерполација лоших канала</i>
Слика 5.14	<i>Интерполација лоших канала</i>
Слика 5.15	<i>Топографски приказ дистрибуције електричне активности по површини мозга</i>
Слика 5.16	<i>Финални производ</i>
Слика 5.17	<i>Пример лаке (а) и тешке шеме (б)</i>
Слика 5.18	<i>Исправно састављени производи</i>
Слика 5.19	<i>Дефектни производи</i>
Слика 5.20	<i>Распоред класера ван зоне максималног дохвата испитаника у истраживању</i>
Слика 5.21	<i>Испитаник изводи експеримент на традиционалној радној станици у неергономском сценарију</i>
Слика 5.22	<i>Испитаник изводи експеримент на предложеној модуларној радној станици за монтажу у ергономском сценарију</i>
Слика 5.23	<i>Фактори који утичу на процес монтаже</i>
Слика 6.1	<i>Сирови ЕМГ сигнал снимљен помоћу Muscle BAN BE уређаја у неергономском сценарију (лева страна)</i>
Слика 6.2	<i>Сирови ЕМГ сигнал помоћу Muscle BAN BE уређаја у неергономском сценарију (десна страна)</i>
Слика 6.3	<i>Сирови ЕМГ сигнал помоћу Muscle BAN BE уређаја у ергономском сценарију (лева страна)</i>
Слика 6.4	<i>Сирови ЕМГ сигнал помоћу Muscle BAN BE уређаја у ергономском сценарију (десна страна)</i>
Слика 6.5	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Н1</i>
Слика 6.6	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Н2</i>
Слика 6.7	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Н3</i>
Слика 6.8	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Н4</i>
Слика 6.9	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Е1</i>
Слика 6.10	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Е2</i>
Слика 6.11	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Е3</i>
Слика 6.12	<i>Резултати РУЛА анализе - положај Е4</i>

Слика 6.13	<i>Амплитуда ЕЕГ сигнала током времена</i>
Слика 6.14	<i>ЕЕГ сигнали за различите опсеге</i>
Слика 6.15	<i>Спектри једног ЕЕГ канала за различите опсеге</i>
Слика 6.16	<i>Филтриран 24-канални ЕЕГ сигнал снимљен током извођења задатка склапања у трајању од 5 секунди</i>
Слика 6.17	<i>Индекс менталног оптерећења у првих 15 минута експеримента</i>
Слика 6.18	<i>ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 1 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију</i>
Слика 6.19	<i>ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 5 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију</i>
Слика 6.20	<i>ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 11 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију</i>
Слика 6.21	<i>ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 13 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију</i>
Слика 6.22	<i>Индекс менталног оптерећења за свих 15 испитаника у неергономском и ергономском сценарију</i>
Слика 6.23	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 2 у првој сесији</i>
Слика 6.24	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 2 у другој сесији</i>
Слика 6.25	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 4 у првој сесији</i>
Слика 6.26	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 4 у другој сесији</i>
Слика 6.27	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 15 у првој сесији</i>
Слика 6.28	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 15 у другој сесији</i>
Слика 6.29	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 5 у првој сесији</i>
Слика 6.30	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 5 у другој сесији</i>
Слика 6.31	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 9 у првој сесији</i>
Слика 6.32	<i>Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 9 у другој сесији</i>
Слика 6.33	<i>Резултати праћења ангажовања свих 15 испитаника преко индекса ангажовања E_i</i>
Слика 6.34	<i>Резултати праћења ангажовања свих 15 испитаника преко индекса ангажовања $E_i + \theta$</i>
Слика 6.35	<i>Трајање сесија у традиционалном (неергономском сценарију)</i>
Слика 6.36	<i>Трајање сесија у ергономском сценарију</i>

Слика 6.37	<i>Укупно време трајања активности- лакше шеме у традиционалном (неергономском) сценарију</i>
Слика 6.38	<i>Укупно време трајања активности - лакше шеме у ергономском сценарију</i>
Слика 6.39	<i>Укупно време трајања активности - тешке шеме у традиционалном (неергономском) сценарију</i>
Слика 6.40	<i>Укупно време трајања активности - тешке шеме у ергономском сценарију</i>
Слика 6.41	<i>Просечно време трајања активности- лакше шеме у неергономском сценарију</i>
Слика 6.42	<i>Просечно време трајања активности- лакше шеме у ергономском сценарију</i>
Слика 6.43	<i>Просечно време трајања активности - тешке шеме у традиционалном (неергономском) сценарију</i>
Слика 6.44	<i>Просечно време трајања активности - тешке шеме у ергономском сценарију</i>
Слика 6.45	<i>Број исправно састављених производа у неергономском сценарију</i>
Слика 6.46	<i>Број исправно састављених производа у ергономском сценарију</i>
Слика 6.47	<i>Број дефеката у традиционалном (неергономском) сценарију</i>
Слика 6.48	<i>Број дефеката у ергономском сценарију</i>
Слика 6.49	<i>Хистограм - средња вредност</i>
Слика 6.50	<i>Хистограм - стандардна девијација</i>
Слика 6.51	<i>Хистограм - средња вредност</i>
Слика 6.52	<i>Хистограм - стандардна девијација</i>

Листа табела

Ознака	Назив табеле
Табела 2.1	<i>Бенефити примене технологија Индустрије 4.0 на БЗР</i>
Табела 2.2	<i>Поремећаји, фактори ризика на раду и симптоми</i>
Табела 2.3	<i>Прихватљива оптерећења и дозвољен број понављања унутар сваке зоне</i>
Табела 5.1	<i>Основне карактеристике MuscleBAN BE уређаја</i>
Табела 5.2	<i>Антропометријски подаци за свих 15 испитаника у испитивању</i>
Табела 6.1	<i>Резултати процене ергономског ризика РУЛА методом</i>
Табела 6.2	<i>Просечна вредност индекса менталног оптерећења (MWL) за испитанике бр.1 и бр.2 у току одмора и обављања монтажних активности</i>

Ознака	Назив табеле
Табела 6.3	<i>Квантификација менталног оптерећења и ангажовања испитаника преко индекса $MWLi$, $Ei+theta$ и Ei</i>
Табела 6.4	<i>Коефицијенти корелације</i>
Табела 6.5	<i>Коефицијенти корелације</i>
Табела 6.6	<i>Разлике по сценарију</i>
Табела 6.7	<i>Разлике између сесија</i>
Табела 6.8	<i>Трајање прве и друге сесије у неергономском и ергономском сценарију</i>
Табела 6.9	<i>Укупно време трајања активности - лакше шеме</i>
Табела 6.10	<i>Укупно време трајања активности - тешке шеме</i>
Табела 6.11	<i>Просечно време трајања активности приликом склапања лакших шема у неергономском и ергономском сценарију</i>
Табела 6.12	<i>Просечно време трајања активности током склапања тешких шема у традиционалном и ергономском сценарију</i>
Табела 6.13	<i>Упоредни преглед исправно састављених производа у оба сценарија</i>
Табела 6.14	<i>Резултати праћења дефеката у неергономском и ергономском сценарију</i>
Табела 6.15	<i>Резултати за неергономски сценарио</i>
Табела 6.16	<i>Резултати за ергономски сценарио</i>
Табела 6.17	<i>Очекиване вредности трајања сесије и времена извршавања (лаке и тешке шеме) на основу измерених података у спроведеним експериментима</i>
Табела 6.18	<i>Време потрошено на дефектне производе</i>
Табела 6.19	<i>Дескриптивна статистика времена потребног за извршење монтажних активности у неергономском и ергономском сценарију у обе сесије</i>
Табела 6.20	<i>Дескриптивна статистика времена потребног за извршење задатка у два сценарија у обе сесије и два типа шема</i>
Табела 6.21	<i>Дескриптивна статистика времена потребног за извршење задатка (у два типа шема) без и са дефектом у неергономском сценарију у 1. сесији</i>
Табела 6.22	<i>Дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у неергономском сценарију у 2. сесији</i>
Табела 6.23	<i>Дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у ергономском сценарију у 1. сесији</i>

Ознака	Назив табеле
Табела 6.24	<i>Дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у ергономском сценарију у 2. сесији</i>
Табела 6.25	<i>Разлике између сесија</i>
Табела 6.26	<i>Разлике између шема</i>
Табела 6.27	<i>Разлике у времену потребном за монтажу исправних делова и дефектних делова</i>

Листа скраћеница

Скраћеница	Значење
<i>BAT</i>	енгл. Brain Activity Tracker
<i>БЗР</i>	безбедност и здравље на раду
<i>DHM</i>	енгл. digital human modeling
<i>DMQ</i>	енгл. Dutch Musculoskeletal Questionnaire
<i>ЕЕГ</i>	електроенцефалографија
<i>Ei</i>	енгл. Engagement Index
<i>ЕМГ</i>	електромиографија
<i>HF/E</i>	енгл. Human Factors and Ergonomics
<i>MAV</i>	енгл. mean absolute value
<i>МСП</i>	мала и средња предузећа
<i>MWL</i>	енгл. Mental Work Load
<i>MWLi</i>	енгл. Mental Workload Index
<i>NIOSH</i>	енгл. National Institute for Occupational Safety and Health
<i>OCRA</i>	енгл. Occupational Repetitive Action
<i>QEC</i>	енгл. Quick Exposure Checklist
<i>PDCA</i>	енгл. Plan-Do-Check-Act
<i>PLC</i>	енгл. Programmable Logic Controller
<i>REBA</i>	енгл. Rapid Entire Body Assessment
<i>RULA</i>	енгл. Rapid Upper Limb Assessment
<i>RMS</i>	енгл. Root Mean Square
<i>TA</i>	енгл. Task Activity
<i>TQM</i>	енгл. Total Quality Management
<i>WHO</i>	енгл. world health organization
<i>WRMSDS</i>	енгл. work related musculoskeletal disorder statistics

Преглед страних речи и израза

<i>artificial intelligence</i>	енглески	<i>вештачка интелигенција</i>
<i>assembly workstation 4.0</i>	енглески	<i>радна станица за монтажу 4.0</i>
<i>augmented reality</i>	енглески	<i>проширена стварност</i>
<i>beta divided by alpha power</i>	енглески	<i>количник бета снаге и алфа снаге</i>
<i>beta power divided by the sum of alpha and theta power</i>	енглески	<i>однос бета снаге и збира алфа и тета снаге</i>
<i>big data</i>	енглески	<i>велики подаци</i>
<i>brain activity tracker</i>	енглески	<i>правилац активности мозга</i>
<i>cloud computing</i>	енглески	<i>рачунарство у облаку</i>
<i>cognitive load index</i>	енглески	<i>индекс когнитивног оптерећења</i>
<i>collaborative robots</i>	енглески	<i>колаборативни роботи</i>
<i>create flow</i>	енглески	<i>креирање тока вредности производње</i>
<i>cycle-time</i>	енглески	<i>радни циклус</i>
<i>digital human modeling</i>	енглески	<i>дигитално моделирање људи</i>
<i>Engagement Index</i>	енглески	<i>Индекс ангажовања</i>
<i>ergonomics - evaluation of static working postures</i>	енглески	<i>ергономија - процена статичких радних положаја</i>
<i>establish pull</i>	енглески	<i>повлачење производа кроз целу производњу</i>
<i>evaluation of working postures and movements in relation to machinery</i>	енглески	<i>оцена положаја тела и покрета у односу на машине</i>
<i>functional magnetic resonance</i>	енглески	<i>функционална магнетна резонанца</i>
<i>human factors and ergonomics</i>	енглески	<i>људски фактор и ергономија</i>
<i>human factor engineering</i>	енглески	<i>инжењеринг људског фактора</i>
<i>identify value</i>	енглески	<i>дефинисање вредности производа</i>
<i>international ergonomics association</i>	енглески	<i>међународна асоцијација за ергономију</i>
<i>internet of things</i>	енглески	<i>интернет ствари</i>
<i>magnetoencephalography</i>	енглески	<i>магнетоенцефалографија</i>
<i>map the value stream</i>	енглески	<i>идентификација тока вредности</i>
<i>mean</i>	енглески	<i>средња фреквенција</i>
<i>mean absolute value</i>	енглески	<i>средња апсолутна вредност</i>
<i>median</i>	енглески	<i>медијана</i>
<i>mental work load</i>	енглески	<i>ментално оптерећење</i>

<i>mental workload index</i>	енглески	<i>индекс менталног оптерећења</i>
<i>NASA task load index</i>	енглески	<i>NASA индекс оптерећења задатком</i>
<i>National Institute for Occupational Safety and Health</i>	енглески	<i>Амерички Национални институт за безбедност и здравље на раду</i>
<i>participatory ergonomics</i>	енглески	<i>партиципативна ергономија</i>
<i>plan-do-check-act</i>	енглески	<i>планирање, примена, провера и деловање</i>
<i>programmable logic controller</i>	енглески	<i>програмибилни логички управљачки уређај</i>
<i>risk assessment for repetitive handling at high frequency</i>	енглески	<i>процена ризика за понављајуће активности руковања на високој фреквенцији</i>
<i>root mean square</i>	енглески	<i>средњи квадратни корен</i>
<i>safety of machinery - human physical performance</i>	енглески	<i>безбедност машина - физичке перформансе људи</i>
<i>seek perfection</i>	енглески	<i>тежња ка савршенству</i>
<i>seiketsu</i>	јапански	<i>стандардизовати</i>
<i>seiri</i>	јапански	<i>сортирати</i>
<i>seison</i>	јапански	<i>очистити</i>
<i>seiton</i>	јапански	<i>организовати</i>
<i>shitsuke</i>	јапански	<i>одрживост</i>
<i>subjective workload assessment technique</i>	енглески	<i>субјективна техника процене оптерећења</i>
<i>takt-time</i>	енглески	<i>време такта</i>
<i>task activity</i>	енглески	<i>активност задатака</i>
<i>three-way repeated measures ANOVA</i>	енглески	<i>трофакторска анализа варијансе за поновљена мерења</i>
<i>Total Quality Management</i>	енглески	<i>Тотално управљање квалитетом</i>
<i>two-way repeated measures ANOVA</i>	енглески	<i>двофакторска анализа варијансе за поновљена мерења</i>
<i>virtual reality</i>	енглески	<i>виртуелна реалност</i>
<i>waste</i>	енглески	<i>отпад</i>
<i>wellbeing</i>	енглески	<i>благостање радника</i>
<i>work related musculoskeletal disorder statistics</i>	енглески	<i>статистика- радом изазвани мишићно-коштани поремећаји</i>
<i>world health organization</i>	енглески	<i>светска здравствена организација</i>

1. УВОДНА РАЗМАТРАЊА

У данашњем конкурентном и тржишно оријентисаном пословном окружењу, свака организација која послује у складу са *lean* принципима тежи да унапреди ефикасност и ефективност, оптимизује производне процесе кроз скраћивање времена такта (енгл. *takt-time*), побољшање квалитета производа, елиминисање свих облика губитака и трошкова (енгл. *waste*) у производном процесу како би се успоставило континуирано унапређење пословања и побољшао квалитет производа.

Да би остали конкурентни, савремени индустријски системи морају да буду способни да одговоре на високе захтеве и очекивања купаца кроз производњу јединствених персонализованих производа без дефеката по конкурентним ценама. Купци очекују производе који су без дефеката и који не захтевају додатне поправке и модификације. Побољшање квалитета финалних производа са једне стране има кључну улогу у повећању задовољства купаца и одржавању лојалности, а са друге стране у смањењу трошкова услед рекламација, модификације производа итд.

Такође, савремени индустријски системи су све више свесни важности побољшања система безбедности и здравља на раду (БЗР). БЗР представља кључну компоненту постизања дугорочног успеха организације. Услови у којима радници обављају радне активности остварују директан утицај на економске показатеље пословања - продуктивност, ефикасност и ефективност. Минимизирање ергономских ризика и стварање таквих радних услова у којима би радници имали осећај задовољства директно доприноси повећању продуктивности, смањењу трошкова и повећању квалитета финалних производа.

Побољшање безбедности и здравља на раду, смањење повреда на раду и професионалних болести и унапређење ергономских услова је законска обавеза сваког предузећа. Последњих неколико година, ова област истраживања добија све већи значај услед значајног утицаја на ефикасност и продуктивност система. У стандарду ISO 45001 се промовише важност спровођења превентивних мера у циљу смањења повреда на раду, професионалних обољења или нарушавања здравља радника (*BSI: ISO 45001*). Ове превентивне мере би требало да се спроводе континуирано - пре почетка обављања радних активности, током извођења радних активности и приликом промене радних активности.

Значај унапређења безбедности и здравља на раду може се сагледати са хуманог, социјалног и економског аспекта. Рад у хуманим условима представља задовољство за сваког појединца и за друштво у целини. Друштвени значај унапређења БЗР огледа се кроз континуирану тежњу да се смање повреде на раду, професионалне болести и друге болести повезане са радом. Економска димензија безбедности и здравља на раду сагледава се кроз последице које настају услед повреда на раду, професионалних обољења и других болести повезаних са радом и изражава се одређеним финансијским показатељима који зависе од броја и тежине таквих случајева.

У четвртој индустријској револуцији безбедност и здравље на раду и ергономија имају посебно значајну улогу. Четврта индустријска револуција подразумева свеобухватну трансформацију индустријске производње и потпуну аутоматизацију и дигитализацију производних процеса кроз увођење иновативних технологија попут колаборативних робота, интернета ствари, проширене стварности, виртуалне реалности и др.

Примена иновативних дигиталних технологија и напредних информационо-комуникационих технологија Индустрије 4.0 доприноси побољшању ефикасности и ефективности обављања монтажних активности. У паметном радном окружењу сви ентитети (машине, алати, уређаји) су међусобно повезани што олакшава њихову контролу и праћење у реалном времену (*Burggräf, 2020*).

Један од главних циљева Индустрије 4.0, поред побољшања ефективности производних процеса, јесте унапређење безбедности и здравља. Овај циљ се постиже кроз елиминисање повреда на раду, минимизирање професионалних обољења и обољења у вези са радом, минимизирање нелагодности и стреса. Безбедност 4.0 представља помак ка приступу безбедности на радном месту заснованом на анализи великих података и примени иновативних технологија. Интелигентни носиви уређаји и друге технологије Индустрије 4.0 омогућавају праћење виталних здравствених параметара и локације радника у реалном времену и идентификовање потенцијалних ризика (на пример, утврђивање изложености штетностима и опасним материјама).

Иако су многи производни процеси у савременим индустријским системима аутоматизовани и дигитализовани, одређени радни задаци и операције се и даље морају обављати ручно услед њихове сложености и ограничене флексибилности. Ово је посебно приметно код монотоних, понављајућих, физички заморних задатака и активности које радници обављају на традиционалним радним станицама за монтажу које нису ергономски дизајниране. Као последица тога радници су изложени професионалним болестима горњих екстремитета, најчешће мишићно-коштаним поремећајима. Посебан изазов представља унапређење ових традиционалних радних станица у циљу смањења повреда на раду и професионалних обољења и побољшања физичког и психичког здравља и задовољства радника.

Извођење понављајућих покрета доводи до оптерећења тетива, мишића и нерава на шакама и зглобовима. Услед обављања монтажних активности у неергономском положају тела током дужег временског периода радници осећају болове у врату и горњем делу леђа. У реалном индустријском окружењу, радници ове активности најчешће обављају у стојећем положају на традиционалним радним станицама што додатно доприноси погоршању њиховог здравственог стања у виду болова у доњем делу леђа. Уколико радна станица није ергономски дизајнирана (превисока је или прениска) радници морају да заузимају неергономске положаје тела, да савијају или истежу тело при чему оптерећују леђа, врат и рамена.

Такође, у току обављања ових понављајућих и монотоних активности често долази до пада пажње и концентрације, што изазива ментални замор, а у неким случајевима може чак доћи и до повреда на раду. Повреде на раду и професионална обољења доводе до смањења или у одређеним ситуацијама губитка радне способности и често проузрокују одсуствовање са посла, што даље доводи до застоја у производњи, смањења продуктивности и повећања трошкова.

Услед менталног умора радници нису у потпуности скоцентрисани на монтажне активности и подложнији су прављењу грешки и неисправном обављању активности, што може даље резултирати лошијим квалитетом финалног производа и негативно

утицати на продуктивност и ефективност. На основу свега наведеног може се закључити да посебна пажња треба да буде посвећена унапређењу традиционалних радних станица за монтажу.

Предмет докторске дисертације представља напредно истраживање могућности за унапређење продуктивности, ефикасности и ефективности производних процеса кроз ергономску оптимизацију индустријских радних станица на којима радници свакодневно обављају монотоне, понављајуће активности монтаже у седећем или стојећем положају тела. У оквиру ове дисертације истражују се могућности побољшања продуктивности и ефективности индустријских радних станица, унапређења безбедности и здравља радника кроз смањење ризика од појаве повреда на раду и професионалних болести, смањење физичког и когнитивног оптерећења и побољшање општег здравственог стања радника.

Применом напредних психофизиолошких метода (електрофизиологије – ЕЕГ и електромиографије - ЕМГ) биће идентификовани ергономски ризици који се могу јавити током извршења монотоних ручних задатака монтаже у циљу оптимизације традиционалних индустријских радних станица, повећања безбедности и здравља, смањења повреда на раду и свеукупног побољшања добробити и благостања радника који обављају монтажне активности. Основни фокус дисертације је на решавању идентификованих ергономских ризика и њиховог негативног утицаја на здравље радника.

Узимајући у обзир чињеницу да мишићно-коштана обољења и друге професионалне болести негативно утичу на ефикасност и продуктивност радника, од посебне је важности праћење мишићне активности радника приликом обављања понављајућих активности монтаже на радној станици. На овај начин је могуће утврдити оптерећење и напрезање мишића, испитати учесталост појаве болова у горњим деловима тела и утврдити када се јављају први симптоми болести. Са друге стране, праћењем мождане активности радника стиче се увид у когнитивно оптерећење, процењује се када ће доћи до пада пажње и концентрације и на тај начин се смањују дефекти и повећава се продуктивност.

Побољшање безбедности и здравља радника, повећање продуктивности и смањење дефеката при обављању монтажних активности у контексту Индустрије 4.0 и Индустрије 5.0 постаје велики изазов. Интеграција нових технологија Индустрије 4.0, као што су вештачка интелигенција и сензори и остале иновативне технологије у циљу континуираног праћења физичког и когнитивног статуса радника и праћења параметара из радне средине у којој радници обављају активности у реалном времену доприноси стварању безбеднијих и угоднијих радних окружења. Прикупљање и анализа података доприноси предикцији и минимизирању професионалних болести са којима се суочавају радници који обављају послове монтаже.

За разлику од Индустрије 4.0 која тежи ка концепту потпуно аутоматизованих фабрика, у којима производни процеси функционишу без директног присуства радника, Индустрија 5.0 промовише приступ усредсређен на човека и ставља радника у центар производних процеса (што је у научно-истраживачким радовима представљено кроз термин Радник 5.0) при чему се посебна пажња посвећује повећању њихове безбедности, здравља, задовољства и благостања на раду (Aromaa и други, 2018).

У новије време посебна пажња се посвећује ергономској оптимизацији радних места и дизајнирању радних места усредсређених на радника. Посебан нагласак је на елиминисању неергономских положаја тела и покрета који се изводе ван златне зоне. Бенефити овог приступа се огледају у побољшању ефективности и ефикасности,

смањењу повреда на раду, професионалних болести и побољшању благостања и задовољства.

Како би се решили сви проблеми са којима се суочавају радници који обављају монтажне активности на традиционалним радним станицама, у дисертацији ће бити предложена модуларна радна станица за монтажу која је дизајнирана узимајући у обзир чињеницу да се зоне манипулације разликују за сваку особу понаособ. Специфичности нове радне станице огледају се у чињеници да сваки радник може да прилагоди радно окружење индивидуалним карактеристикама, захтевима и потребама. На овај начин елиминисаће се неадекватно држање тела и извођење неергономских покрета.

Мотивација за писање дисертације проистиче из чињенице да је потребно редизајнирати традиционалне монтажне радне станице како би се оне прилагодили антрополошким карактеристикама, способностима и ограничењима радника. Физичка, организациона ергономија и неуроергономија имају много додирних тачака које је потребно идентификовати и истражити у оквиру научних истраживања.

Прегледом литературних извора утврђено је да је фокус већине научних радова на истраживању могућности за побољшање машина и алата. Мали број радова узима у обзир холистички приступ у дизајнирању радног окружења у целини, укључујући радника и радну станицу на којој се обављају активности и радно окружење.

У оквиру експерименталних истраживања испитаће се утицај ергономске оптимизације на кључне параметре производног процеса: ефикасност, продуктивност и дефекте. Повећање ефективности производних процеса применом ергономске оптимизације индустријских радних станица представља веома актуелну тему, како за истраживаче, тако и за стручњаке из индустрије. Детаљним прегледом литературе установљено је да је написан веома мали број научно-истраживачких радова који имају за циљ истраживање могућности за унапређење ефективности производних процеса применом ергономске оптимизације и може се закључити да постоји простор за спровођење даљих истраживања у овој области у будућем периоду.

Дисертација ће показати да детаљна анализа радне станице, алата, опреме и радног окружења у целини и дизајнирање и развој радног окружења прилагођеног људским потребама и могућностима доприноси смањењу физичког и менталног напора, повреда на раду и мишићно-коштаних поремећаја.

У дисертацији ће бити показано да је холистичким приступом дизајнирања организације радног окружења могуће обезбедити потпуно задовољство и благостање радника (енгл. *wellbeing*). Благостање је даље повезано са задовољством послом, додатним залагањем и ангажовањем радника, тежњом да се допринесе успеху организације итд.

На овај начин допуњују се постојећи теоријски оквири и даје се допринос у пракси при чему се посебан нагласак ставља на повећање ефикасности, смањење ризика од повреда на раду и побољшање општег квалитета живота радника. Ова истраживања ће пружити дубље увиде и препоруке за будућа истраживања у области ергономије, безбедности и здравља на раду и организације рада, с посебним освртом на интеграцију савремених технологија Индустрије 4.0 у радне системе за монтажу.

1.1 ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Основни циљ дисертације је унапређење ефективности процеса монтаже применом ергономске оптимизације. Ергономска оптимизација подразумева прилагођавање радног простора, алата и опреме потребама и карактеристикама појединаца, како би се омогућило ефикасније и продуктивније обављање активности, смањило време обављања активности и елиминисали губици, побољшала безбедност и здравље радника.

Ергономско дизајнирање радних места је један од најважнијих предуслова за унапређење производних процеса и стварање ефикаснијег, безбеднијег и удобнијег радног окружења. Имплементација ергономских и *lean* принципа води ка стварању позитивног радног окружења у којем запослени не само да могу да остваре свој пуни потенцијал, већ и да допринесу остваривању циљева организације. Кроз овакав приступ, запослени одржавају висок ниво задовољства и мотивације, што директно доприноси повећању ефективности производних процеса.

У дисертацији ће се извршити анализа радних услова на традиционалним радним станицама у циљу идентификације главних ергономских изазова (као што су неправилни положаји тела, претерано физичко оптерећење и неадекватан распоред делова, компоненти и алата) који у великој мери утичу на ефективност производних процеса. Полази се од премисе да у контексту производних процеса, физички и когнитивни статус радника у интеграцији са општим задовољством остварују директан утицај на њихове перформансе.

Подциљеви разматраног циља су:

- Развој и дизајн прилагодљиве *lean* индустријске радне станице у циљу спровођења комплексних испитивања у току симулације извршавања реалних монотоних, понављајућих радних задатака монтаже у окружењу сличном реалном.
- Примена напредних електроенцефалографије и електромиографије у циљу идентификације фактора који проузрокују физички и ментални замор током спровођења монтажних активности и фактора који утичу на физичко и когнитивно оптерећење радника.
- Опсервација испитаника преко камера у току спровођења задатих радних активности у циљу праћења понављања истих покрета, идентификовања примене силе, напрезања, рада у неергономском положају или дуготрајног обављања активности у истом положају тела.
- Мерење времена извршења активности у циљу праћења продуктивности и ефикасности радника. Праћење дефеката преко чек листа.
- Истраживање задовољства испитаника у току обављања мануелних активности на редизајнираној индустријској *lean* радној станици преко анкете.

У дисертацији ће бити примењен холистички приступ који подразумева интеграцију физичке ергономије, организационе ергономије и неуроергономије. Испитивање менталних и емоционалних реакција, праћење понашања радника и указивање на специфичности, испитивање свих значајних фактора који утичу на ток обављања монтажних активности отворена су питања којима треба да буде посвећена посебна пажња кроз научно-истраживачки рад.

1.2 ОСНОВНА ТЕОРИЈСКА РАЗМАТРАЊА

Како би задржале конкурентску предност савремене организације настоје да проактивно одговоре на промене на тржишту и обезбеде континуиран ток процеса кроз скраћивање времена између наручивања и испоруке производа и елиминисање свих облика губитака. Са друге стране, један од основних циљева производних система који послују у складу са *lean* принципима и принципима производње светске класе јесте унапређење безбедности и здравља радника које се постиже побољшањем услова рада, смањењем повреда на раду, професионалних обољења и обољења у вези са радом и обезбеђењем потпуног физичког, психичког и социјалног благостања радника.

Савремене организације се фокусирају на континуирано унапређење производних процеса кроз дугорочно стварање вредности купцима и минимизирање активности које не додају вредност, а повећавају време производње и проузрокују појаву трошкова (*Battini* и други, 2011; *Battaià* и други, 2018). Са друге стране, у складу са принципима Индустрије 4.0 организације настоје да остваре највиши ниво безбедности и здравља на раду, сведу повреде на раду, професионалне болести и болести у вези са радом на најмањи могући ниво и обезбеде оптимално радно окружење. Како наводи аутор (*Gordon*, 1998) на безбедност и здравље на раду утичу организациони, индивидуални и групни фактори. У циљу побољшања БЗР посебна пажња треба да буде посвећена анализи интеракције између свих поменутих фактора (*Bentley* и *Tappin*, 2010). Фокус је на дизајнирању радног окружења у складу са ергономским принципима у циљу побољшања БЗР и оптимизације перформанси система. Неадекватно организовано и недовољно добро уређено радно место може негативно утицати на достизање максималног потенцијала радника и довести до смањења перформанси.

За разлику од претходне три индустријске револуције Индустрија 4.0 подразумева потпуну аутоматизацију и дигитализацију производних процеса односно трансформацију производње на тај начин да се изоловане производне ћелије међусобно повезују и интегришу. Индустрију 4.0 карактерише интелигентно умрежавање објеката, децентрализовано доношење одлука, континуиран ток ресурса, стварање нове вредности купцима и независно управљање процесима. Границе између стварног и виртуелног света постају невидљиве. Примена напредних технологија Индустрије 4.0 као што су Интернет ствари, колаборативна роботика, сајбер физички системи, виртуална стварност, проширена реалност, адитивна производња суштински мења начин обављања монтажних активности на традиционалним радним станицама за монтажу и доприноси побољшању ефикасности производних процеса (*Hermann* и други, 2016). Интеграцијом алата и напредних технологија Индустрије 4.0 повећава се продуктивност радника, побољшава се квалитет финалних производа и смањују се грешке у раним корацима (*Romero* и други, 2019).

Један од основних циљева Индустрије 4.0, поред побољшања ефикасности производних процеса, јесте унапређење безбедности и здравља кроз постизање „нула повреда на раду и професионалних болести“. Овај циљ се може постићи идентификацијом и отклањањем опасности, минимизирањем повреда на раду, професионалних обољења и обољења у вези са радом, и минимизирањем нелагодности и стреса. Безбедност 4.0 је веома важна област која у последње време привлачи све већу пажњу истраживача и стручњака у многим областима. Ово се може закључити на основу већег броја научно-истраживачких радова написаних из ове области. У контексту Индустрије 4.0, долази до значајних промена. Фокус ових промена је на смањењу физички и ментално захтевних активности, што се постиже кроз дигитализацију и аутоматизацију производних процеса. Технологије Индустрије 4.0 могу значајно

побољшати безбедност и здравље радника кроз превенцију повреда на раду, професионалних обољења и смртних исхода и унапређење општег здравља и благостања радника.

За разлику од Индустрије 4.0 која се фокусира на дигитализацију производних процеса, Индустрија 5.0 уводи потребу за новим филозофијама дизајна и инжењеринга које стављају радника у центар пажње са циљем да се побољшају његове физичке и когнитивне способности. Овај приступ омогућава стварање хармоничнијег радног окружења, у којем се технолошке иновације користе не само за повећање ефикасности и продуктивности, већ и за побољшање здравственог стања и квалитета живота радника. С друге стране, основни постулати Индустрије 5.0 су производња са нула дефеката и постизање максималне ефикасности.

Међутим, упркос растућем тренду аутоматизације и примене напредних технологија, на многим радним местима у савременим индустријским системима није могуће да се спроведе потпуна дигитализација. Као пример таквих радних места могу се навести индустријске радне станице на којима радници ручно обављају активности монтаже. Аутори рада (*Aminoff* и други, 1996) указују на све веће повећање монотоних и понављајућих задатака монтаже у индустрији (посебно у земљама у развоју) у поређењу са другим радним задацима. Стога, радне станице на којима се обављају мануелне операције склапања представљају важно поље истраживања (*Loch* и други, 2016) којем треба бити посвећена пажња у наредном периоду.

Радници који обављају понављајуће и заморне активности склапања делова и компоненти у финални производ на традиционалним радним станицама за монтажу су често изложени значајном физичком оптерећењу (*Schaub* и други, 2013) који проузрокује замор мишића услед чега се јављају бројне професионалне болести (*Shikdar* и *Garbie*, 2011). Замор мишића се описује као постепено смањење капацитета мишића односно смањење мишићне активности. Фокус рада чији су аутори (*Banks* и *Aghazadeh*, 2009) је идентификација фактора који утичу на замор мишића. Како наводи аутор (*Takala*, 2002) замор мишића узрокован обављањем понављајућих активности је важан иницирајући фактор у развоју здравствених поремећаја горњих екстремитета - врата и рамена. Са друге стране, превисок ниво умора доводи до повећања небезбедних радњи, људских грешака, незгода (*Hallowell*, 2010). У раду аутори (*Yeow* и други, 2014) наводе да се 48,8 % људских грешака дешава услед замора мишића.

Послови монтаже на индустријским радним станицама се најчешће изводе у ергономски неадекватним и нефизиолошким положајима тела током дужег временског периода што доводи по појаве професионалних болести, најчешће мишићно-коштаних поремећаја, укључујући синдром карпалног тунела, тендонитис и др. (*Barr* и други, 2004; *Petreaanu* и *Seracin*, 2017). Поремећаји мишићно-коштано система настају као резултат понављања истог покрета великом брзином током дужег временског периода, напрезања и савијања тела, примене силе итд. Радници осећају здравствене тегобе у врату, рамену, лакту, шапи, доњем делу леђа које се манифестују трњењем, отоком и боловима (*Lemasters* и други, 1998). Ова стања могу бити веома болна и исцрпљујућа, што отежава или онемогућава радницима да обављају радне активности и проузрокује апсентизам (*Sanjuga* и други, 2010). Нека истраживања су показала да постоји корелација између повећане мишићне активности и мишићно-коштаних поремећаја (*Ostensvik* и други, 2009).

У студији коју су спровели аутори (*Deros* и други, 2010) истраживана је преваленција мишићно-коштаних поремећаја међу радницима који обављају задатке ручног руковања материјалом у аутомобилској индустрији у Малезији. Утврђено је да се

код ових радника најчешће јављају болови у доњем делу леђа и у врату и раменима. До истог закључка дошли су и аутори (*Mathiassen*, 1993). Аутори (*Mossa* и други, 2016) су указали на ергономски ризик током извођења ручних задатака ниског оптерећења са великом учесталости понављања и фокусирали се на проналажење оптималног распореда и редоследа обављања активности.

У земљама чланицама Европске уније (ЕУ) учесталост мишићно-коштаних поремећаја међу радницима варира између 25% и 33% свих професионалних обољења, што их чини једним од најзаступљенијих здравствених проблема повезаних са радом. Према подацима Европске агенције за безбедност и здравље на раду (енгл. *European Agency for Safety & Health at Work - EASHW*, 2019) у Белгији 62% радника има мишићно-коштане поремећаје, у Естонији 74%, у Финској 79%, у Хрватској 62%, а у Италији 50%. У истраживању које су спровели аутори (*Ulin* и *Keyserling*, 2004) истакнуто је да аутомобилску индустрију, иако је једна од технолошки најразвијенијих индустрија, карактерише висока стопа појављивања мишићно-коштаних поремећаја.

Посебно је примећена учесталост појаве болова у горњим екстремитетима у односу на друге делове тела (*Jones* и *Kumar*, 2004). Према студијама које су спровели аутори (*Ohlsson*, 1989) и (*Ohlsson* и други, 1995) 39% радника који обављају монтажне активности у аутомобилској индустрији пријавило је да осећа болове у врату, 38% је имало болове у рамену, а 14% болове у рукама. Аутор (*Luopajarvi*, 1979) је спровео истраживање и указао да се 37% радника који изводе монтажу делова и компоненти жалило на болове у врату, а 5,9% на болове у рукама. Према резултатима анкете која је спроведена у Норвешкој, 65% радника је осећало болове у пределу врата или рамена а 78% болове у рукама (*Mehlum*, 2009). Резултати студије коју су спровели аутори (*Nur* и други, 2014) указују да се радници у аутомобилској индустрији најчешће жале на болове на врату (49,3%), затим у шасти/зглобу (48%), рамену (46,7%) и леђима (33,6%).

За ову групу професионалних обољења се везује највећи број изгубљених радних дана у току године у државама чланицама ЕУ и значајни финансијски губици у организацијама услед пада продуктивности и повећања трошкова због повећаних изостанака са посла, лечења и санирања болести, флукуације запослених (*Nunes* и *Machado*, 2007; *Cheshmehgaz* и други, 2012; *Bergman* и други, 2001). Једна трећина укупног боловања радника у свету везана је за мишићно-коштане поремећаје и здравствене тегобе које настају услед неадекватног ергономског дизајна радног места.

Организације издвајају веће износе финансијских средстава за накнаду радницима услед појаве мишићно-коштаних поремећаја. У истраживању аутори (*Jones* и *Kumar*, 2004) су указали на чињеницу да мишићно-коштани поремећаји проузрокују 32% укупних трошкова у организацији и 40% укупног губитка времена у поређењу са другим професионалним болестима. У земљама ЕУ од 25% трошкова, мишићно-коштани поремећаји износе приближно 15%. У Финској финансијски трошкови везани за мишићно-коштана обољења износе 28,6 билиона евра. У Немачкој износе 17,2 билиона евра, а губици у предузећима које проузрокују мишићно-коштани поремећаји износе 30,4 билиона евра а то је између 0,5% и 1,0% бруто домаћег производа (БДП-а). Стога, истраживање могућности смањења мишићно-коштаних поремећаја и побољшања здравственог стања радника је од великог значаја у сваком предузећу.

Како наводи више аутора (*Das* и други, 2007; *Resnick* и *Zanotti*, 1997; *Das* и *Shikdar*, 1999) неадекватно дизајниране радне станице су уобичајена појава у бројним производним системима. Неадекватан дизајн радне станице и неправилно распоређени елементи у оквиру радног простора приморавају раднике да заузму неергономске положаје тела, или користе прекомерну силу, што може довести до дуготрајног

оптерећења мишића, тетива и зглобова и повећати ризик од појаве професионалних болести и повреда на раду. На пример, ако је радна станица превисока или прениска, радници морају да се истежу или погрбе, оптерећујући леђа, врат и рамена.

У студији аутора (*Wilks* и други, 2006) спроведеној у компанијама у Шведској, установљено је да сваки десети радник обавља активности на радној станици у седећем положају. Иако се сматрало да радници који обављају активности на радним местима у седећем положају имају смањен осећај нелагодности, код ових радника је посебно био изражен осећај нелагодности у горњим екстремитетима. Аутори (*Hedge* и *Rai*, 2004) су закључили да иако је радницима понуђено да обављају радне задатке у седећем положају на радној станици, они су 21,2% радног времена провели у стојећем положају, што је резултирало смањењем мишићно-коштаних поремећаја за 27,5%. Са друге стране, аутори рада (*Roelofs* и *Straker*, 2002) сматрају да се највећа нелагодност у доњим екстремитетима јавља када радници обављају активности само у стојећем положају. Такође, аутори рада (*Halim* и други, 2011) су указали на здравствене проблеме услед дуготрајног обављања активности у стојећем положају.

Обављање активности у стојећем положају тела препоручује се у ситуацијама када посао захтева од радника да често изводи исте покрете, манипулише тешким или великим предметима, или када је потребно да примени силу. Стојећи положај омогућава радницима већу мобилност и лакше извршавање радних задатака који захтевају кретање око радне станице. С друге стране, седећи положај се препоручује уколико се обављају послови током дужег периода времена и код послова који захтевају прецизност и контролу покрета руку.

У литератури се као основни фактори ризика за развој и настанак мишићно-коштаних поремећаја и других професионалних болести и болести у вези са радом наводе: примена силе, неергономско држање тела, извођење понављајућих покрета, психосоцијални фактори, физичко и психичко преоптерећење радника, неадекватни ергономски услови у којима радници обављају активности и др. (*Carayon* и други, 1999; *Shikdar* и *Garbie*, 2011; *Bevan*, 2015; *Bernard* и други, 1994). Студија коју су спровели аутори (*Judith* и други, 1999) је показала да је ручно руковање материјалима и компонентама један од главних фактора ризика за настанак мишићно-коштаних поремећаја.

Аутор рада (*Ellegast*, 2016) истиче да су понављајући покрети посебно важан фактор ризика за настанак мишићно-коштаних поремећаја. Такође, студије које су спровели аутори (*Barr* и други, 2004; *Hansson* и други, 2000) су показале да су болови у зглобовима и рукама повезани са обављењем понављајућих активности. До мишићно-коштаних поремећаја долази уколико радне станице нису усклађене са антропометријским карактеристикама радника или услед неадекватних услова у радној околини. Такође, традиционалне радне станице карактерише лоша организација опреме, делова, компоненти тако да се радници оптерећују изнад њихових могућности, што доводи до професионалних обољења и смањења способности извођења операција.

Студија коју су спровели аутори (*Deros* и други, 2011) бавила се испитивањем положаја тела радника који обављају производњу компоненти за аутомобиле. Истраживање је имало за циљ да идентификује и евидентира неергономске положаје тела током обављања различитих активности. Главни фокус истраживања био је на елиминисању нефизиолошких положаја тела у циљу смањења ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја.

Физички, организациони, психосоцијални и индивидуални фактори имају пресудну улогу у појави и настанку мишићно-коштаних обољења. Аутор (*Linton*, 2000)

такође сматра да на мишићно-коштане поремећаје у великој мери утичу психичко-социјални фактори. Такође, аутори (*Eatough* и други, 2012) су указали на везу између психосоцијалних фактора и мишићно-коштаних обољења.

Прегледом литературних извора установљено је да је фокус већине научно-истраживачких радова праћење положаја тела како би се елиминисало извођење неергономских покрета и спречила појава мишићно-коштаних поремећаја. Са друге стране, мали број радова је оријентисан на праћење когнитивног статуса радника током извођења монтажних активности и утврђивање менталног замора.

Производни циклуси на радним станицама на којима се обавља манипулација деловима и компонентама и прецизно склапање ових делова и компоненти у финални производ су мали што може проузроковати пад пажње и концентрације. Приликом ручног састављања компоненти и делова, радници понекад једну исту радну операцију понављају више хиљада пута у току радне смене, што негативно утиче на њихову концентрацију и пажњу (*Fisherl*, 1993). Као последица, повећава се вероватноћа повреда на раду и долази до смањења продуктивности и задовољства радника (*Gerr* и други, 2014). Аутори (*Rabby* и други, 2019) такође истичу да когнитивно оптерећење негативно утиче на пажњу и способност расуђивања. У неким ситуацијама, радници не успевају да остану будни услед наглог смањења концентрације и пажње.

Са повећањем захтева радних задатака повећава се пажња и ментално оптерећење (*Hockey*, 1997). На ментално оптерећење утичу сложеност радних задатака, фактори из спољне околине (бука, осветљење, температура итд.), индивидуалне карактеристике (когнитивне способности, радно искуство, стручност, итд.), физиолошки фактори (умор, стрес, итд.). Према ауторима (*Lysaght* и други, 1989) на когнитивно оптерећење у великој мери утичу количина посла коју је неопходно урадити, временски притисак и радно искуство радника. Аутори (*Saïas* и други, 2011) су истраживали на који начин фактори из спољашњег окружења утичу на когнитивно стање радника и како различита когнитивна стања утичу на перформансе радника.

Током обављања монотоних, понављајућих мануелних задатака монтаже делова и компоненти долази до пада пажње и концентрације и појаве менталног замора (*Bergman* и други, 2021). Као последица тога долази до смањења продуктивности радника и повећања дефеката, а у неким ситуацијама услед пада концентрације може доћи до повреда на раду. Когнитивно оптерећење доводи до менталног умора (*Kolus* и други, 2018). Аутори (*Finnsgård* и други, 2008) су показали да умор и ментално оптерећење негативно утичу на продуктивност. Како су истакли аутори (*Gonen* и други, 2016) услед менталне исцрпљености радника долази до смањења ефикасности и продуктивности. У раду аутора (*Falck* и *Rosenqvist*, 2012) је указано да високи когнитивни захтеви у комбинацији са радним оптерећењем у току обављања активности директно доводе до појаве грешака.

Према ауторима (*Jorgen* и *Eklund*, 1995), три пута је већа вероватноћа да дође до појаве дефеката приликом обављања задатака монтаже у поређењу са другим радним задацима. Број грешака које радници направе током извођења монтажних активности повећава се са повећањем сложености и разноврсности компоненти, повећањем корака које треба извршити или уколико монтажа захтева специфичне вештине и квалификације радника. У литератури се може наћи велики број студија које указују на јаку корелацију између неповољних услова (неадекватног осветљења, буке) и повећане учесталости грешака (*Alves* и други, 2018; *Habibi* и други, 2013). Такође, грешке често настају услед немара, пада пажње и концентрације, менталног замора радника итд.

Монтажне активности се сматрају физички и ментално заморним, досадним, монотоним и радници их најчешће обављају без осећаја ентузијазма и задовољства урађеним. Радници који обављају ове активности немају контролу над обављањем ових активности, имају мало слободе приликом одабира радног садржаја, немају могућност да доносе одлуке и немају прилику да планирају сопствене активности (*Bullinger* и други, 1997), а то је даље повезано са ниским задовољством послом (*Melin* и други, 1999). Аутори (*Nielsen* и други, 2017) су пратили задовољство испитаника који обављају монтажне радне активности. Према ауторима (*Bryson* и други, 2017; *Oswald* и други, 2015) задовољство послом повезано је са бољим радним учинком. Како истичу аутори (*Böckerman* и *Ilmakunnas*, 2010; *Böckerman* и *Ilmakunnas*, 2009) неергономски услови рада могу довести до повећања незадовољства радника. На основу наведеног, може се закључити да постоји потреба за побољшањем традиционалних радних станица у индустријском окружењу. Од изузетне је важности да ова радна места буду дизајнирана према ергономским принципима. На важност узимања у обзир ергономских принципа приликом дизајнирања радног окружења у којем се обављају понављајуће активности монтаже указују и бројни научно-истраживачки радови (*Coury* и други, 2000; *Neumann* и други, 2002).

Унапређење ефективности производних процеса се постиже кроз идентификовање, анализу и елиминисање ергономских ризика који се јављају у току извођења понављајућих, монотоних активности монтаже делова и компоненти, а који доводе до повреда на раду и разних професионалних обољења. У индустријским системима, изложеност факторима ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја се процењује помоћу анкета, опсервације и применом објективних метода (*Vignais* и други, 2013). Како истичу аутори (*Bao* и други, 2001) у већини студија су коришћене субјективне методе мерења замора мишића, а објективне методе су примењене на ограниченом броју испитаника.

Опсервационе методе се базирају на посматрању радника током обављања радних активности. Опсервационе методе се спроводе директно током извођења радних задатака, или се извођење радних активности снима видео камером и преко снимака се накнадно анализирају покрети и положаји тела радника. У раду аутора (*Bernardo*, 2018) је извршена процена замора мишића приликом ручног управљања материјалом кроз анализу покрета. У студији коју су спровели аутори (*Deros* и други, 2011) учествовали су радници који су обављали монтажне активности у аутомобилској индустрији. Посматрани су и детаљно анализирани покрети и положаји тела радника током обављања радних активности. Резултати су показали да је ово радно место потребно редизајнирати како би се елиминисали неергономски покрети и нефизиолошки положаји тела. Аутори (*Rogé* и други, 2001) су снимали испитанике видео камером и квантификовали напрезање током извођења покрета. Они су закључили да извођење више покрета истовремено негативно утиче на пажњу.

Као предности примене ове методе наводе се једноставност и то што не захтева финансијска улагања. Као главни недостатци примене опсервационе методе истичу се непрецизност и осетљивост на тзв. *Hawthorne* ефекат, који се односи на чињеницу да долази до побољшања перформанси када је радник свестан да се његов учинак директно прати од стране истраживача.

Методе процене ризика на радном месту се описују као превентивне мере у циљу смањења мишићно-коштаних поремећаја (*Neumann* и други, 2002). Ове методе имају велику примену у пракси. У радовима чији су аутори (*Lu* и други, 2016; *Lasota* и *Hankiewicz*, 2016; *Arghavani* и други, 2014) су примењене методе за ергономску процену

ризика приликом обављања монтажних активности у циљу смањења ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја. Аутори (*Mahatme* и други, 2014) су спровели детаљну ергономску анализу и редизајнирали радну станицу за обављање операције ручног сечења на машинској преси. На постојећој радној станици радник је ручно узимао диск и стављао га на подлогу за сечење зубаца. Након завршетка радне операције уклањао је диск и постављао га на излазну позицију. За анализирање ергономских услова коришћена је метода РУЛА (енгл. *Rapid Upper Limb Assessment-RULA*).

РУЛА представља једну од најцитиранијих и најчешће коришћених метода за процену ергономског ризика на радним местима (*Vignais* и други, 2013; *McAtamney* и *Corlett*, 1993). Овај алат кроз брзу ергономску процену горњих екстремитета и праћење положаја тела указује на неопходност спровођења ергономских мера у циљу смањења изложености ризику од појаве мишићно-коштаних поремећаја. Процена држања тела, понављања покрета и силе се врши на радном листу. Резултати за део А који се односи на руке и зглобове и за део Б који је везан за врат морају се унети како би се добио коначни резултат. Аутори (*Vaidya* и други, 2014) су спровели студију у којој је учествовало 15 радника. Постурална анализа је извршена коришћењем РУЛА и РЕБА метода (енгл. *Rapid Entire Body Assessment-REBA*). Резултати студије су показали да већина радника обавља активности у неергономским положајима тела и стога постоји потреба за увођењем промена како би се смањили мишићно-коштани поремећаји.

Дигитално моделирање људи (енгл. *Digital human modeling-DHM*) омогућава развој виртуелних прототипова како би се проценили ергономски ризици у кратком временском периоду. Најчешће коришћени алати су *AniBodi*, *Catia/Delmia Human Model*, *Jack*, *Ramsis* и *Santos*. У научним радовима чији су аутори (*Chaffin*, 2007; *Salvendy*, 2012; *Chang* и *Wang*, 2007; *Sanchez-Lite* и *Garcia-Garcia*, 2012; *Kurillo* и други, 2012) су примењени 3Д симулациони алати за процену покрета и положаја тела током обављања активности на радним станицама. Такође, аутори (*Rajesh* и *Srinath*, 2016; *Binoosh* и други, 2017; *Bruzzone*, 2004) су применили дигитално моделирање и виртуелне симулације у процени ергономских ризика.

У научно-истраживачким радовима аутора (*Cimino* и *Mirabelli*, 2009, *Longo* и *Mirabelli*, 2009) је предлоžen редизајн постојећих радних станица помоћу алата за моделирање и симулацију. Аутори рада (*Francesco* и други, 2006) су предложили дизајн монтажне линије за производњу грејача користећи моделирање и симулацију. Према аутору (*Ding*, 2013) моделирање и симулација у комбинацији са спровођењем ергономских анализа представљају моћан алат за обезбеђивање ефикасног дизајна система за монтажу. У истраживањима аутора (*Chaffin*, 2007) је истакнуто да увођење дигиталних људских модела у циљу анализирања тренутног стања и прилагођавања радних система људима може смањити време развоја и трошкове.

Електромиографија је најпопуларнији алат за објективно мерење замора мишића. Замор мишића у великој мери утиче на мишићну активност (*Enoka* и *Duchateau*, 2008). Аутори рада (*Shair* и други, 2017) су показали да ЕМГ метода пружа валидне податке у анализи промена у напору мишића. Аутор (*David*, 2005) је применио ЕМГ методу за процену мишићне активности и утврђивање замора мишића. У раду аутора (*Larsson* и други, 1995) је указано да су промене у активацији трапезних мишића значајан индикатор стреса. Фокус рада чији је аутор (*Ahmed* и други, 2023) је праћење нивоа стреса преко електромиографије и електрокардиографије.

У раду аутора (*Luijckx* и други, 2014) је указано на јаку повезаност између промена у ЕМГ сигналу трапезних мишића и физичког напора. Аутори (*Guo* и други, 2020) су мерили замор мишића осамнаест испитаника током обављања активности ручног

паковања у трајању од једног сата и закључили су да обављање ових активности изазива умор, болове у мишићима на рукама, раменима и леђима. Даље, аутори (*Bennie* и други, 2002) су спровели истраживање праћења мишићне активности у трајању од осам сати и установили да је дошло до повећања замора мишића. Слично, аутори (*Mathiassen* и други, 1995) су спровели лабораторијску студију током шест дана и идентификовали тренд повећања замора трапезних мишића. У раду (*Maluf* и *Enoka*, 2005) је извршена упоредна анализа физичког замора приликом обављања два слична радна задатка и закључено је да уколико је задатак комплекснији долази до повећања замора мишића.

У студији коју је спровео аутор (*Sundelin*, 1993) праћена је активност трапезних мишића ЕМГ методом током извођења задатака преузимања и постављања делова десном руком у лабораторијским условима у трајању од једног сата. Резултати студије су показали повећање амплитуде и смањење фреквенције ЕМГ сигнала што се поклопило са резултатима субјективне процене замора мишића. У раду (*Potvin*, 2008) примењена је површинска електромиографија за процену ризика од здравствених поремећаја доњег дела леђа. Аутори су у раду (*Cifrek* и други, 2009) применили површинску електромиографију за процену замора мишића. Такође, у научно-истраживачким радовима чији су аутори (*Bonato* и други, 2002; *Halim* и други, 2011) су праћене промене у мишићној активности преко површинске електромиографије током обављања понављајућих задатака.

Постоје опречна мишљења у вези са тим који параметри су најпогоднији за процену физичког умора (*Stulen* и *De Luca*, 1981). Средња фреквенција се у бројним научним радовима помиње као кључан параметар за откривање напора у мишићима (*De Luca*, 1984; *Knaflitz* и други, 1990). Аутори (*Thongpanja* и други, 2013) као кључне параметре истичу средњу фреквенцију и медијану. Према ауторима (*Karlsson* и *Gerdle*, 2001) најважније карактеристике ЕМГ сигнала су амплитуда и фреквенција. Ниво мишићне активности варира у зависности од сложености радних задатка и положаја у којем радник обавља активности. Смањење фреквенције указује на смањење брзине проводљивости дуж мишићних влакана (*De Luca*, 1984).

Аутори рада (*Basmajian* и *De Luca*, 1985) су установили да се амплитуда ЕМГ сигнала повећава док се истовремено спектар помера ка нижим фреквенцијама. Према ауторима (*Cifrek* и други, 2009) повећана мишићна активност, употреба силе и физички замор су повезани са повећаном амплитудом ЕМГ и померањем удесно у ЕМГ спектру. С друге стране, смањење мишићне активности и замора се поклапају са смањеном амплитудом ЕМГ и померањем улево у ЕМГ спектру. Смањење фреквенције ЕМГ може се приписати успоравању брзине проводљивости мишићних влакана (*Hunter* и други, 2003). У раду чији су аутори (*Farina* и *Mesin*, 2008) је показано да је већа варијабилност амплитуде ЕМГ сигнала мишића леђа и трапезних мишића током времена повезана са спорим развојем и манифестацијом умора.

Мали број студија се фокусирао истовремено на анализу промена у ЕМГ сигнаlima и праћење когнитивног стања (*Pourmohammadi* и *Maleki*, 2020). У литературном извору (*Schleifer* и други, 2008) је указано на повећану активацију трапезних мишића током извођења когнитивно захтевних задатака. Како истиче аутор (*Snook*, 1985) фокус традиционалног приступа је на одређивању такозване максимално прихватљиве тежине терета приликом подизања и максималног домета за преузимање неопходних компоненти при чему се занемарују когнитивни аспекти. Са друге стране, у радовима који се фокусирају на когнитивну ергономију углавном се занемарују физички аспекти који такође у великој мери утичу на перформансе (*Karwowski*, 1991).

Превисок као и пренизак ниво менталног оптерећења радника, негативно утиче на перформансе. Стога, од посебне важности је процена когнитивног оптерећења. Како истичу аутори (*Wickens* и *McCarley*, 2008) процена менталног оптерећења је једна од најшире проучаваних тема у области ергономије. Традиционална истраживања менталних и когнитивних аспеката ослањају се на теоријске претпоставке које карактерише субјективност (*Parasuraman*, 2003).

Субјективне методе за процену когнитивног оптерећења радника су NASA индекс оптерећења задатком (енгл. *NASA Task Load Index* - NASA-TLX) и техника субјективне процене оптерећења (енгл. *Subjective Workload Assessment Technique* - SWAT). NASA метода самопроцене радног оптерећења укључује шест подскала: ментални захтеви, физички захтеви, временски притисак, напор, фрустрација и перформансе. За сваку подskalу, резултати се крећу од 0 (веома низак) до 100 (веома висок). Иако постоји процедура пондерисања за бодовање сваке подскале, често се користе необрађени подаци због лакоће процене и компаративне анализе са пондерисаним резултатима (*Hart*, 2006). Техника субјективне процене радног оптерећења омогућава процену три фактора: временски притисак, ментални напор и стрес.

Техника процене радног оптерећења у ваздушном саобраћају као што и сам назив каже најпре је коришћена у ваздушном саобраћају, а временом је нашла примењену у бројним областима (*Loft* и други, 2014). Овом методом испитаници процењују ниво когнитивног оптерећења на скали од 1 (мало оптерећење) до 7 (велико оптерећење). Предност ове методе се огледа у томе што испитаници могу да пријаве радно оптерећење у сваком тренутку, а не морају да чекају да се заврши радни задатак да би то урадили.

Све субјективне методе се најчешће примењују током дизајнирања радних места а не у сврху модификације постојећих услова рада (*Patrizi* и други, 2015). Како наводе аутори (*Parasuraman* и *Rizzo*, 2006; *Parasuraman*, 2003) резултати добијени применом ових метода су непоуздани, непрецизни и пристрасни. Такође, попуњавање упитника захтева прекидање обављања радних активности. Како би се превазишли недостаци субјективних метода развијени су нови домени ергономије - когнитивна ергономија и неуроергономија (*Mehta* и *Parasuraman*, 2013 а,б). Савремени тренд је да се субјективне методе допуне физиолошким мерењима помоћу уређаја као што је ЕЕГ (*Thorvald* и *Lindblom*, 2014).

Неуроергономија је постала један од главних праваца у ергономским истраживањима (*Sarter* и *Sarter*, 2003). У новије време фокус неуроергономије је померен ка анализи неуролошких одговора испитаника, посебно ка праћењу менталног оптерећења радника. Ментално оптерећење је један од најчешће коришћених концепата у ергономији и људским факторима и представља тему од све већег значаја. С обзиром да савремена технологија намеће све веће когнитивне захтеве, разумевање утицаја менталног оптерећења на перформансе и добробит радника је све значајније (*Young* и други, 2015).

Психофизиолошке методе омогућавају објективно праћење когнитивног стања током обављања активности у реалном времену (*Trimmel* и други, 2009; *Parasuraman*, 2003) и предикцију менталног оптерећења. Ове методе омогућавају дубље разматрање менталног оптерећења радника (*Parasuraman* и *Rizzo*, 2006; *Ayaz* и *Dehais*, 2019). Како истиче аутор (*Parasuraman*, 2003) предности психофизиолошких метода се огледају у детектовању скривених когнитивних реакција које није могуће уочити у оквиру других ергономских домена.

ЕЕГ је једна од најчешће коришћених метода за праћење когнитивног стања радника и процену менталног оптерећења. Већи број аутора (*Antonenko* и други, 2010;

Brouwer и други, 2015; *Mijović* и други, 2015; *Charles* и *Nixon*, 2019) је идентификовао везу између когнитивног оптерећења и промена у ЕЕГ сигналу. У радовима чији су аутори (*Kramer* и *Parasuraman*, 2007; *Parasuraman* и *Wilson*, 2008) су примењене неуроергономске мере за процену когнитивног стања радника. У раду (*Zhang* и *Yu*, 2010) је извршена процена менталног замора преко ЕЕГ-а и праћења откуцаја срца. Такође, у студији коју су спровели аутори (*Byrne* и *Parasurman*, 1996) је применом физиолошких мера процењено ментално оптерећење. Аутори (*Gevins* и други, 1995) су указали на предности примене ЕЕГ методе у мерењу мождане активности на радним местима која захтевају велику концентрацију радника (као што су активности монтаже). ЕЕГ метода омогућава поуздану процену менталног оптерећења у реалном времену (*Borghini* и други, 2014). Ова метода пружа објективне резултате и тако превазилази главне недостатке субјективних метода (као што су интервју и анкета).

Време састављања и дефекти су такође метрике релевантне за процену менталног оптерећења. Веће време монтаже може указати да је радни задатак био комплексан. Са друге стране, уколико се тежина задатка одржава константном, дуже време састављања је показатељ да је радник уложио мање менталног напора. Што се тиче дефеката, појава већег броја неправилности и дефеката указује да је радник изложен већем когнитивном оптерећењу.

Праћењем мишића на лицу током обављања активности склапања делова и компоненти може се закључити да ли су радници истовремено изложени физичком замору и менталном оптерећењу. Мрштење и стезање разних мишића лица може указивати на појаву умора и незадовољства.

Ментално оптерећење се може идентификовати и преко праћења покрета очију. Праћење реакције ока је веома погодна техника за анализу понашања људи. Најчешће коришћене мере за процену оптерећења радника преко покрета очију су брзина трептања, фокусирање погледа, брзина кретања очију, величина зенице, фокусна удаљеност и трајање затварања ока. Аутори (*Fogarty* и *Stern*, 1989) су установили да се стопа трептања ока смањује са повећањем оптерећења које је резултат обраде визуелних стимуланса. Међутим, запажено је да стопа расте са повећаним оптерећењем које је резултат обављања задатака који захтевају памћење (*Wilson* и други, 2004). Према аутору (*Castor*, 2003) корелација између брзине трептања и радног оптерећења је слаба. Овај аутор истиче да се трајање затварања очију смањује са повећаним оптерећењем које је резултат прикупљања података из широког видног поља, док се кашњење трептаја повећава са захтевима за памћењем и реаговањем.

Посебна пажња у оквиру Индустрије 5.0 посвећује се ергономској оптимизацији и добробити радника. Фокус студије (*Arnold* и други, 2004) је био на оптималном распоређивању и редоследу активности монтаже. Ергономија настоји да минимизира негативне утицаје радног окружења на људе и на тај начин омогућава свакој особи да максимизира допринос послу (*Qutubuddin* и други, 2013; *Fernandez*, 1995а). Дизајнирање радног окружења у складу са потребама радника може значајно допринети оптимизацији перформанси и истовремено смањити оптерећење запослених. Постизањем оптималног односа између радника и њиховог радног окружења остварује се највиши ниво ефикасности и продуктивности, а са друге стране, повећава се безбедност и благостање (*Battini* и други, 2020).

У данашње време, у производним системима удео ручног рада је веома висок, што захтева посвећивање посебне пажње ергономији. Ергономија као интердисциплинарна наука интегрише знања из различитих дисциплина као што су психологија, биомеханика, антропологија и инжењеринг у циљу ефикасног пројектовања радног окружења. Три

аспекта ергономије које је подједнако важно узети у обзир приликом дизајнирања радног окружења су физичка, когнитивна и организациона ергономија. Физичка ергономија се фокусира на праћење положаја тела, покрета који се често понављају како би се смањило ризик од настанка поремећаја мишићно-коштаног система и других професионалних болести.

Организациона ергономија се бави оптимизацијом производних процеса кроз прилагођавање радних места потребама радника, са циљем повећања ефикасности и побољшања безбедности и здравља на раду. Фокус организационе ергономије је на стварању оптималних услова рада и повећања продуктивности и задовољства радника. Когнитивна ергономија се фокусира на истраживање менталних процеса током извођења активности на радном месту са посебним акцентом на разумевање како разне ситуације утичу на когнитивно стање радника и како когнитивна стања као што су перцепција, резоновање и реакције радника утичу на перформансе радника. Посебан нагласак у научним радовима се ставља на интеграцију физичке и когнитивне ергономије (Mehta, 2016) што омогућава свеобухватнији приступ унапређењу радног окружења и повећању ефикасности радника.

Најзначајнији стандарди из области ергономије везани за монтажне радне станице и обављање понављајућих активности су: ISO 11226: 2000, Ергономија - процена статичких радних положаја (енгл. *Ergonomics- evaluation of static working postures*), ISO 11226:2000/Cor 1: 2006, Ергономија - процена статичких радних положаја (енгл. *Ergonomics evaluation of static working postures*), UNE-EN 1005-4+A1: 2009 Безбедност машина - физичке перформансе људи - део 4: оцена положаја тела и покрета у односу на машине (енгл. *Safety of machinery - human physical performance - part 4: evaluation of working postures and movements in relation to machinery*), UNE-EN 1005-5:2007, Безбедност машина - физичке перформансе људи - део 5: процена ризика за понављајуће активности руковања на високој фреквенцији (енгл. *Safety of machinery - human physical performance - part 5: risk assessment for repetitive handling at high frequency*).

Ергономске перспективе су еволуирале од фокусирања искључиво на прилагођавање човека другим ентитетима у оквиру радног система до побољшања когнитивних вештина радника у циљу обраде више информација. Стога, когнитивна ергономија, која се концентрише на менталне процесе као што су перцепција, памћење, обрада информација и расуђивање преузима примат у Индустрији 5.0. Посебна пажња је посвећена когнитивним способностима и ограничењима радника како би се смањило когнитивно оптерећење и повећала ефикасност.

Законска регулатива из ове области подсећа организације на важност укључивања ергономског аспекта приликом пројектовања монтажне радне станице (Otto и Scholl, 2011). На важност узимања у обзир ергономских принципа приликом дизајнирања радног окружења у којем се обављају понављајући послови монтаже указују и бројни научно-истраживачки радови (Coury и други, 2000; Neumann и други, 2002). Имплементација ергономских принципа укључује спровођење промена са циљем смањења изложености факторима ризика и побољшању здравља радника. Могу бити примарне односно активности фокусиране на факторе на радном месту (нпр. промене које се фокусирају на дизајнирање радних станица у складу са принципима ергономије), секундарне односно мере усмерене ка раднику као појединцу како би се ублажили симптоми болести или повећала отпорност на изложеност факторима ризика и терцијарни који укључују мере рехабилитације осмишљене са циљем да се радници са израженим симптомима мишићно-коштаних поремећаја убрзо врате на посао.

У већем броју студија и научно-истраживачких радова (*Salvendy, 2001; Das и Sengupta, 1996; Das, 1987; Qutubuddin и други, 2012*) истакнути су позитивни ефекти примене ергономских принципа приликом дизајнирања радног места, машина и алата, радног окружења. Према стандарду *ISO 9241-210:2010* бенефити дизајнирања радних система усредсређених на човека се огледају у побољшању ефективности и ефикасности система рада уз истовремено побољшавање благостања и задовољства корисника и смањења негативних ефеката на здравље и безбедност радника.

Истраживачи (*Neumann и Dul, 2010; Imada, 1990*) истичу да примена ергономских принципа може унапредити безбедност и здравље радника тако што ће допринети смањењу акцидентата, повреда на раду и професионалних болести. Аутори рада (*Gerr и други, 2014*) су такође показали да примена ергономских принципа на монтажним радним станицама доприноси смањењу повреда на раду и побољшању здравља радника. Према ауторима (*Suarjana и други, 2022*) обављање активности у ергономском положају доприноси смањењу појаве мишићно-коштаних поремећаја. Посебно је важно да радно место буде прилагођено индивидуалним антрополошким карактеристикама радника. Према физиологији, не постоје два идентична људска бића и по физичким, али и психичким карактеристикама.

Истраживачи (*Temple и Adams, 2000, Russell и други, 2007, Cimino и други, 2009*) предлажу ергономски редизајн традиционалних индустријских радних станица. У раду аутора (*Erisman и Wick, 1992*) је указано на позитивне ефекте редизајнирања радне станице. Аутор (*Leskova, 2014*) је дизајнирала радну станицу за обављање мануелне монтаже и предложила смернице за пројектовање ергономских радних станица узимајући у обзир варијабле попут типа радних активности, основне карактеристике запослених итд. Циљ рада чији су аутори (*Hernandez-Arellano и други, 2015*) је дизајнирање нове радне станице која је прилагођена радницима. Анализа процене мишићног умора је урађена на постојећој и редизајнираној радној станици. Резултати су показали да су радници током обављања активности на постојећој радној станици изложени високом нивоу оптерећења у раменима, врату, леђима и рукама.

Аутори (*Ebara и други, 2008*) су испитивали ефекте подесиве радне станице на којој радници обављају активности у седећем положају. У истраживању су учествовала 24 испитаника који су седели на стандардној радној станици, на високој столици и обављали радне активности на радној станици са подесивим седиштем. Резултати су показали да су најбољи ефекти постигнути на подесивој радној станици.

У оквиру два научно-истраживачка рада (*Brito и други, 2017a и 2017b*) је показано да је веома важно да се посебна пажња приликом дизајнирања и развоја радних станица посвети ергономским аспектима. На овај начин се повећава продуктивност, смањује се време извођења активности и смањују се ризици од појаве мишићно-коштаних поремећаја.

Стандард *ISO 6385* захтева укључивање више аспеката приликом пројектовања радних места и радне опреме - антропомолошке карактеристике људи, држање тела, могућност кретања. Приликом пројектовања радне станице потребно је обезбедити довољно радног простора за обављање монтажних задатка уз заузимање ергономских положаја тела и извођење ергономских покрета, пружање могућности за варијације у положајима тела и омогућавање лаког приступа компонентама и деловима (*ISO 6385, 2016*).

Посебан нагласак је на обављању активности у оквиру златне зоне. Неопходно је да се елиминишу или минимизирају покрети изван зоне максималног дохвата радника (црвена зона). Ово важи и за покрете у жутој зони, иако нису толико критични као у

црвеној зони. Такође, неопходно је да се обављање активности у црвеној зони ограничи на максимално 15 понављања на сат времена или не дуже од 30 минута током радног дана. У оквиру жутих зона циљ је ограничење покрета на максимално 30 пута у току једног сата или мање од једног сата у току радног времена. Радна станица мора бити усклађена са 5C¹ принципима. 5C представља основу за систематско постизање организације, чистоће и стандардизације радног места. Добро организовано радно место је безбедније и пружа веће могућности за ефикасније и продуктивније обављање активности.

Поједини аутори сматрају да честе промене положаја тела и извођење радних активности у комбинацији седећег и стојећег положаја и веће паузе доприносе смањењу нелагодности (*Mc Lean* и други, 2001). Студија коју су спровели аутори (*Hedge* и *Rai*, 2004) показала је да радници обављају активности на радној станици која има могућност подешавања висине у стојећем положају између 20 и 30% радног времена. Међутим, главни недостатак већине студија је то што су све студије трајале кратак временски период (мање од месец дана) и испитаници су знали да учествују у студији.

Према (*Hendrick*, 2001) добра ергономија је добра економија. Велики број бенефита у виду смањења трошкова и побољшања квалитета након имплементације ергономских принципа представило је Државно одељење за рад и индустрију у држави Вашингтон².

Ергономска оптимизација се истиче као кључно средство у побољшању ефикасности и ефективности радних станица за монтажу. Аутори (*Jorgen* и *Eklund*, 1995) су указали на повезаност између ергономије и квалитета производа. Како истичу аутори (*Axelsson*, 2000; *Erdinc* и *Vayvay*, 2008) примена ергономских принципа на радном месту директно утиче на смањење дефеката и повећање квалитета финалних производа.

Прегледом литературе закључено је да су на ергономски адекватно дизајнираним радним станицама оптимизоване перформансе радника, смањене грешке и побољшан квалитет производа (*Baudin*, 2002; *Dul* и други, 2004; *Axelsson*, 2000). Аутори радова (*Rivera-Rodriguez* и други, 2014) истичу да како би се повећала продуктивност и побољшао квалитет производа, од виталне је важности да радно окружење у којем радници обављају радне активности буде дизајнирано у складу са ергономским принципима. Аутори (*Walder* и други, 2007; *Vieira* и други, 2012; *Al Zuheri* и други, 2014) су анализирали утицај дизајна радног места на продуктивност. У студији коју су спровели аутори (*Al Zuheri* и други, 2014) је утврђено да постоји корелација између ергономских аспеката и продуктивности. Продуктивност се најчешће прати преко времена потребног за монтажу компоненти и делова. У студији аутора (*Hartanti*, 2016) је мерено време монтаже у производној компанији која производи пластичне производе у Индонезији. Студијом времена су мерене перформансе радника током обављања радних задатака.

Аутори (*Falck* и *Rosengvist*, 2012) су установили да се имплементацијом активности у оквиру физичке и организационе ергономије могу смањити грешке и постићи позитиван ефекат на квалитет финалних производа. Такође, аутори радова (*Hamrol* и други, 2011; *Thun* и други, 2011) су закључили да имплементација активности из области физичке и организационе ергономије може смањити појаву грешака, а то даље има позитиван утицај на квалитет производа. Према резултатима истраживања аутора

¹ 5C (уређење радног места): 1C-Сортирати (јпн. *Seiri*), 2C-Организовати (јпн. *Seiton*), 3C-Очистити (јпн. *Seison*), 4C-Стандардизовати (јпн. *Seiketsu*), 5C- Одрживост (јпн. *Shitsuke*)

²[https://www.pshfes.org/resources/Documents/ROI%20Cost%20Calculator/Ergonomics cost benefit case study collection.pdf](https://www.pshfes.org/resources/Documents/ROI%20Cost%20Calculator/Ergonomics%20cost%20benefit%20case%20study%20collection.pdf)

(Yeow и Sen, 2006) показано је да су побољшањем ергономије приликом обављања мануелних активности смањени дефекти за 30%. Према резултатима студије коју су спровели аутори (Baraldi и Paulo, 2011) на две линије за склапање аутомобила, новој линији чији је дизајн прилагођен ергономским принципима и традиционалној линији, установљено је да се на новој монтажној линији догодило 30% мање грешака у поређењу са традиционалном линијом. Такође, на новој монтажној линији смањено је време монтаже и повећана је продуктивност радника.

Аутори (Yeow и Sen 2003; Erdinc и Vayvay, 2008) сматрају да и најјефтинија ергономска решења могу значајно позитивно утицати на квалитет обављања активности. У студији коју су спровели аутори (González и други, 2003) показано је да се квалитет финалног производа повећао за 2%, а да је додатна обрада значајно смањена након побољшања физичке ергономије.

У последње време *lean* производња и ергономија привлаче све већу пажњу производних компанија (dos Santos и други, 2015; Botti и други, 2017; Antonakis, 2006). У студијама и научно-истраживачким радовима (De Treville и Antonakis, 2006; Kester, 2013; Smith, 2003) је детаљно истраживан утицај имплементације *lean* принципа на безбедност и здравље радника. У радовима аутора (Jackson, 2011; Sprigg и Jackson, 2006) је указано на корелацију између *lean*-а, БЗР и ергономије. Аутори (Galante и други, 2014) су показали да се интегрисањем *lean* и ергономских принципа побољшава безбедност и здравље радника, док (Yusuff, 2016) показује да је повећана ефикасност.

Такође, интеграција принципа *lean* производње, ергономије и људских фактора значајно доприноси континуираном унапређењу производних процеса, повећању продуктивности, побољшању радних услова, смањењу изостанака радника са посла (Aqlan и други, 2014; dos Santos и други, 2015; Nunes и Machado, 2007; Botti и други, 2017). Фокус рада чији су аутори (Eswaramoorthi и други, 2010) је на редизајнирању радне станице комбинацијом ергономских метода и *lean* алата. Аутори (Quiroz и други, 2021) су показали да се редизајнирањем радних станица и комбиновањем ергономије са *lean* алатима минимизирају мишићно-коштани поремећаји.

Lean производња се фокусира на додатну вредност која се перципира са становишта купца (Bhamu и Singh, 2014). Посебан нагласак је на систематском елиминисању отпада, побољшању протока као и континуираном побољшању и флексибилности тј. брзом прилагођавању. Основни принципи *lean* производње су: дефинисање вредности производа (енгл. *identify value*), идентификација тока вредности (енгл. *map the value stream*), креирање тока вредности производње (енгл. *create flow*), повлачење производа кроз целу производњу (енгл. *establish pull*) и тежња ка савршенству (енгл. *seek perfection*).

У оквиру *lean* филозофије, крута аутоматизација се може посматрати пре као препрека него као предност и посебан нагласак је на интеграцији људског фактора у аутоматизацију што је познато под термином „аутоматизација са људским додиром“. Посебно треба истаћи чињеницу да ни потпуно аутоматизовани системи ни ручно обављање активности монтаже не могу испунити захтеве за масовним прилагођавањем, јер аутоматизацији недостаје флексибилност, а продуктивност код мануелног обављања активности је знатно мања. Индустрија 4.0 има за циљ да реши овај јаз кроз повезивање људи и савремених технологија (Bonini и други, 2015). *Lean* производња представља основу за развој радних станица за монтажу 4.0 (енгл. *Assembly workstation 4.0*), пружајући трансверзални оквир за концептуализацију нове улоге радника (Bortolini и други, 2017).

1.3 ОСНОВНЕ ХИПОТЕЗЕ

Основне хипотезе од којих се полази у овој докторској дисертацији, а које произилазе из претходно описаног предмета и циља дисертације су:

- **Хипотеза 1:** Узимајући у обзир индивидуалне антрополошке карактеристике сваког појединачног радника који обављају послове монтаже могуће је конструисати нову ергономски прилагодљиву *Lean* радну станицу.
- **Хипотеза 2:** Могуће је унапредити продуктивност и ефективност радника оптимизовањем индустријске радне станице на којој се обављају мануелне понављајуће радне активности применом ергономских принципа.
- **Хипотеза 3:** Могуће је повећати задовољство радника на редизајнираној индустријској радној станици кроз приступ укључивања радника у процес унапређења (енгл. *Participatory ergonomics*).
- **Хипотеза 4:** Могуће је смањити напрезање, нефизиолошки положај тела радника и ергономске ризике свеобухватно приликом симулирања извођења радних активности које укључују понављајуће операције монтаже праћењем психофизиолошких и неуроергономских показатеља применом ЕМГ-а и ЕЕГ-а.

1.4 МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

За потребе истраживања која су реализована у оквиру ове докторске дисертације биће коришћене следеће методе:

- Дизајнирани и развијени модел индустријске радне станице, као платформа за спровођење експерименталних истраживања у току симулације извршавања монотоних, понављајућих радних задатака монтаже у два сценарија - у окружењу сличном реалном на традиционалној радној станици и у ергономском сценарију, на предложеној новој радној станици.
- Опсервација у циљу праћења положаја тела и покрета испитаника током спровођења монтажних активности преко камере како би се идентификовали покрети који се понављају више пута, примена силе, напрезање тела, неергономски положаји или дуготрајно обављање активности у истом положају тела.
- У оквиру експерименталних истраживања пратиће се мишићна активност и мождана активност испитаника, време извршења активности и дефекти током обављања активности монтаже у два сценарија - традиционалном (неергономском) и ергономском сценарију како би се упоредили резултати. Детаљном анализом података прикупљених преко ЕЕГ уређаја и ЕМГ сензора установиће се који фактори проузрокују замор мишића и који фактори утичу на смањење пажње и концентрације радника. У току експеримента симулираће се спровођење активности на детаљно осмишљеном реалном примеру мануелних операција.
- Анкета и усмени интервју. Усменим интервјуом ће се добити информације о физичком и менталном оптерећењу током обављања монтажних активности у оба сценарија. Анкетом ће се добити повратне информације о задовољству испитаника у току обављања активности на редизајнираној индустријској *lean* радној станици. Анкета ће се базирати на сету питања везаних за дизајн радне станице, обављање монтажних активности, радно окружење, итд.

1.5 ОЧЕКИВАНИ РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА

Основни допринос реализованих истраживања у овој докторској дисертацији се огледа у унапређењу процеса производње применом ергономске оптимизације. Истраживања која су реализована у оквиру докторске дисертације су усмерена ка решавању идентификованих ергономских ризика и њиховог негативног утицаја на здравствено стање радника који свакодневно обављају монотоне, понављајуће послове монтаже у седећем положају на индустријским радним станицама кроз примену напредних ергономских метода (електрофизиологије и електромиографије) у циљу унапређења ефикасности индустријских радних станица.

Дисертација има практичан карактер, јер се применом резултата истраживања остварује значајан допринос увођењу савремених напредних технологија Индустрије 4.0 у анализи ергономских ризика који могу изазвати професионалне болести или у одређеним случајевима повреде на раду.

Основни допринос дисертације огледа се у:

- конструкцији нове *lean* индустријске радне станице која је у потпуности прилагођена индивидуалним антропометријским карактеристикама, потребама, способностима и ограничењима радника и која омогућава радницима да обављају активности у златној зони у којој је њихова ефикасност и продуктивност на највишем нивоу;
- побољшању безбедности и здравља радника кроз смањење ризика који се могу јавити током извршења мануелних физички захтевних активности монтаже и који могу проузроковати појаву професионалних болести (најчешће мишићно-коштаних поремећаја), а у неким конкретним случајевима и повреде на раду;
- повећању ефикасности производног процеса кроз скраћење времена извршења активности монтаже, смањење времена такта и времена циклуса узимајући у обзир чињеницу да адекватни ергономски услови остварују позитиван утицај на економске показатеље пословања - продуктивност, ефикасност и ефикасност;
- смањењу дефеката и неправилности које настају у току обављања активности монтаже односно повећање квалитета финалних производа.

Резултати истраживања ће показати да је на предложеној ергономски дизајнираној радној станици смањен ризик од повреда на раду и професионалних болести услед смањења физичког напрезања и менталног оптерећења, побољшано здравствено стање радника, повећана продуктивност, смањен број грешака и неправилности и повећано задовољство. С обзиром да је предложена радна станица у потпуности прилагођена индивидуалним карактеристикама радника стандардима златне зоне уклониће се потреба за досезањем и напрезањем и заузимањем нелагодних положаја тела и побољшава се здравље и безбедност оператера.

Узимајући у обзир технолошки прогрес Индустрије 4.0 и растуће потребе индустријске праксе за дигитализацијом и унапређењем производних процеса у *lean* оријентисаним организацијама докторска дисертација даје допринос у овој области. Добијени резултати могу да буду од великог значаја, како у теоријском, тако и у практичном домену јер представљају полазну основу за спровођење напредних истраживања у наредном периоду у циљу побољшања ефикасности производних процеса.

1.6 ОКВИРНИ САДРЖАЈ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ова докторска дисертација је структурирана у осам поглавља (слика 1.1). Поглавља су представљена следећим редоследом:

1. Уводна разматрања - У првом поглављу дисертације дате су уводне напомене везане за проблематику побољшања ефикасности пословних процеса применом ергономске оптимизације. Представљени су предмет и циљ истраживања и основне хипотезе од којих се полази у истраживању. Такође, у овом делу дисертације наведене су основне методе које су коришћене у истраживањима и описани су очекивани резултати. На крају поглавља је дат оквирни садржај дисертације.

2. Безбедност и здравље на раду и ергономија индустријских радних станица - У оквиру овог поглавља су дате теоријске основе везане за безбедност и здравље на раду и ергономију са посебним фокусом на безбедност и здравље радника који обављају монтажне активности и ергономске аспекте индустријских радних станица. У овом делу дисертације дат је преглед релевантних литературних извора из области безбедност и здравља на раду и ергономије с посебним освртом на ергономску оптимизацију индустријских радних станица на којима се обављају понављајући послови монтаже. Посебан акценат стављен је на корелацију између ергономских аспеката и ефикасности производних процеса.

3. Психофизиолошки и неуроергономски показатељи у индустријској ергономији - Треће поглавље дисертације се фокусира на психофизиолошке и неуроергономске аспекте приликом дизајнирања радних станица за монтажу. Указано је на важност праћења мишићне и монтажне активности радника у циљу смањења ергономских ризика са којима се суочавају радници који обављају послове монтаже. У овом поглављу дисертације дати су преглед и анализа истраживања из области примене психофизиолошких и неуроергономских метода у ергономији. Представљене су основне метрике електромиографије и електроенцеелографије преко којих се прати физички замор и ментално оптерећење радника који обављају монтажне активности на индустријским радним станицама.

4. Унапређена *lean* индустријска радна станица - У овом поглављу дат је детаљан опис предложене модуларне радне станице за монтажу и указано је на основне специфичности ове нове радне станице. Такође, у оквиру овог поглавља истакнуте су предности предложене радне станице у односу на традиционалне радне станице које су најчешће заступљене у индустрији.

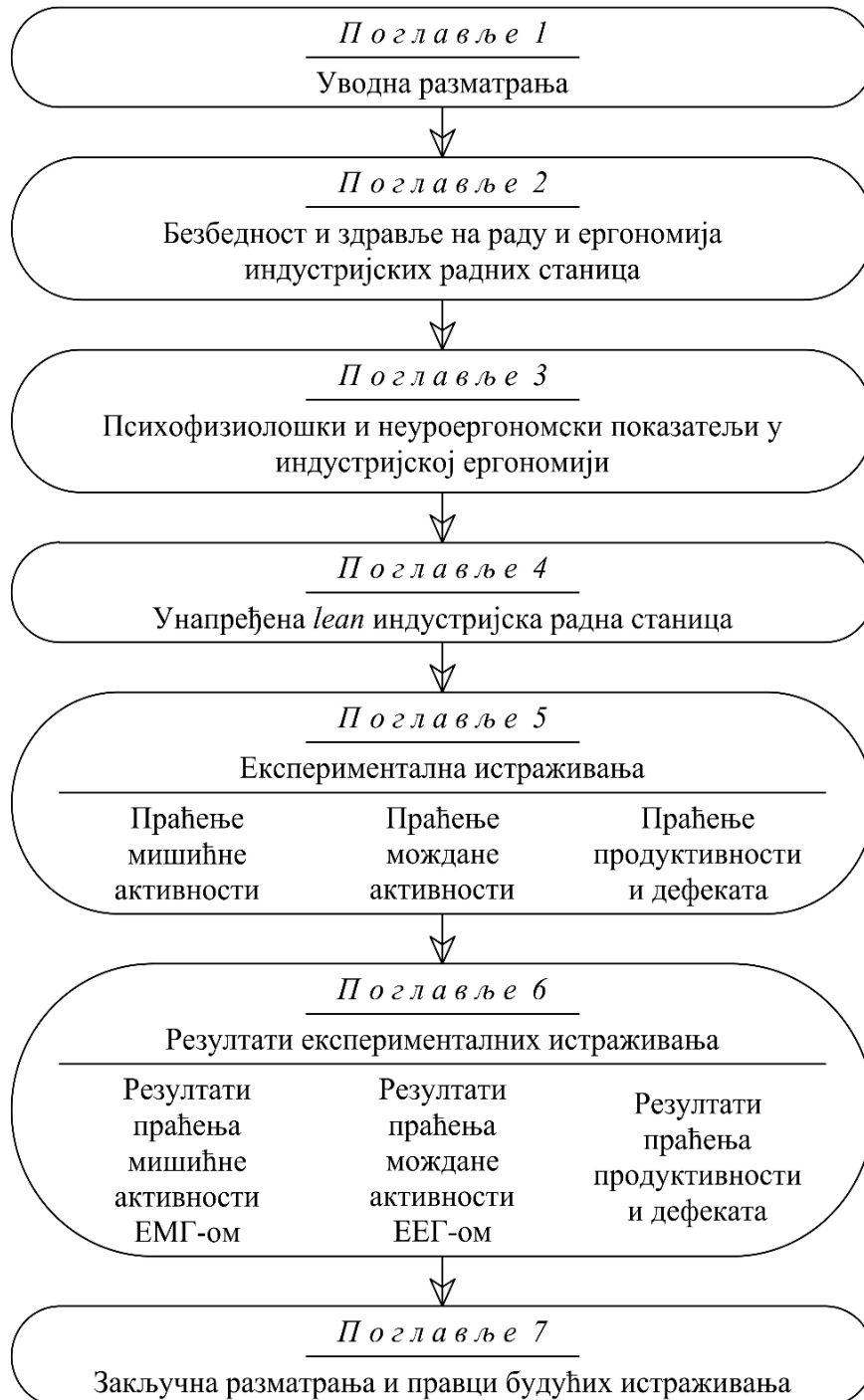
5. Експериментална испитивања - У петом поглављу дисертације представљена је студија случаја у оквиру које су праћени мишићна и монтажна активност, продуктивност и дефекти у два сценарија - традиционалном (неергономском) и ергономском сценарију. Детаљно је описана експериментална поставка истраживања - испитаници, опрема која је коришћена, услови у којима је спроведено истраживање.

6. Резултати експерименталних испитивања - У шестом поглављу дисертације су приказани резултати експерименталних истраживања спроведених у традиционалном и ергономском сценарију. Посебан фокус овог поглавља дисертације је на компаративној анализи резултата у оба сценарија и истицању позитивних ефеката након имплементације ергономских мера на индустријским радним станицама на којима се обављају монтажне активности.

7. Закључна разматрања и правци будућих истраживања - У оквиру овог поглавља изнета су закључна разматрања везана за тему дисертације. Такође, у оквиру овог поглавља извршено је поређење добијених резултата са унапред постављеним

хипотезама. У овом делу дисертације су истакнути главни доприноси дисертације и ограничења, као и правци будућих истраживања у овој области.

Списак коришћених литературних извора дат је у посебном поглављу у оквиру дисертације. Коришћене референце су сортиране и представљене абecedним редом. На крају дисертације дат је Прилог (резултати праћења мишићне активности, ЕЕГ протокол, ЕМГ протокол, упитник 1 - Усмени интервју- питања и упитник 2 - Упитник о задовољству предложеном новом радном станицом).



Слика 1.1 Структура дисертације

2. БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ И ЕРГОНОМИЈА ИНДУСТРИЈСКИХ РАДНИХ СТАНИЦА

2.1 БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ У ОКВИРУ ИНДУСТРИЈСКИХ РЕВОЛУЦИЈА

Индустрија је прошла бројне трансформације од својих почетака у 18. веку (слика 2.1). Прва индустријска револуција је обухватала период између 1760. и 1830. године. Проналаском парне машине мануелна производња је замењена производњом у оквиру фабрика јер је тако било финансијски исплативије (*Badri* и други, 2018). У то време, највећу производњу имала је Енглеска. Прву индустријску револуцију карактерише прелазак са мануелне, занатске производње на обављање активности уз помоћ машина што је допринело повећању продуктивности. 1712. године *Thomas Newcomen* је створио прву парну машину. Ову машину је 1764. године усавршио шкот *James Watt* тако да се од тада она користила за покретање других машина, локомотива и бродова. Проналазак парне машине изазвао је револуцију у индустрији. У овом периоду примена закона је била веома ограничена (*Chia* и други, 2019). Такође, у овом периоду рад деце је био уобичајена појава, а радници су били изложени опасностима у радном окружењу.

Друга индустријска револуција се везује за период од друге половине 19. века до почетка Првог светског рата 1914. године. У току друге индустријске револуције, која се назива и технолошка револуција, дошло је до развоја нових технологија и масовне производње. Овај период је везан за увођење електричне енергије (која је заменила енергију паре) што је омогућило производњу велике количине идентичних производа по ниским трошковима. Прва електрана за производњу електричне енергије изграђена је 1882. године на Менхетну. Проналазак струје је допринео повећању ефикасности (*Badri* и други, 2018). Проналазак електричне енергије је утицао на промену дотадашњег начина производње.

Индустрија 2.0 је представљала раздобље брзог индустријског развоја у Великој Британији, Немачкој, САД-у, Француској, земљама Источне Европе, Италији и Јапану. У фабрикама су биле заступљене серијска и масовна производња. Посебно се развијала текстилна индустрија, хемијска индустрија, аутомобилска индустрија и индустрија папира. Прекретницу у производњи представљало је увођење покретне траке. *Henry Ford* 1913. године је увео покретну траку за масовну производњу Фордовог Модела Т. Теслин проналазак вишефазне струје и трансформатора омогућио је јефтино преношење електричне енергије на велику удаљеност. Током овог периода први пут су уведени монтажни системи. Повећање броја радика у овом периоду довело је до тога да су се у предузећима улагала мала финансијска средства у побољшање безбедности и здравља. Закони из области БЗР су почели да се примењују у већем броју држава (*Chia* и други, 2019).

Парадигма масовне производње је превазиђена током треће индустријске револуције. Трећу индустријску револуцију, која је почела 60-их година прошлог века карактерише све већа аутоматизација производње која је постигнута развојем електронике и информационо-комуникационих технологија (*Polak-Sopinska* и други, 2020). Ова индустријска револуција подразумевала је дигитализацију производних процеса кроз увођење рачунара и робота у производне процесе што је допринело оптимизацији производње и повећању продуктивности. Ова револуција је названа дигиталном револуцијом с обзиром да се заснивала на трансформацији аналогне технологије у дигиталну. Заслуга за то припада физичарима *John Bardeen-у*, *Walter Brattain-у* и *William Shockley-у* који су за своје достигнуће 1956. године примили Нобелову награду. 1970. је изумљен програмабилни логички управљачки уређај (енгл. *Programmable Logic Controller - PLC*). У овом периоду организације су настојале да испуне захтеве купаца кроз производњу разноврсних производа по конкурентним ценама што је дефинисано термином „масовно прилагођавање“.

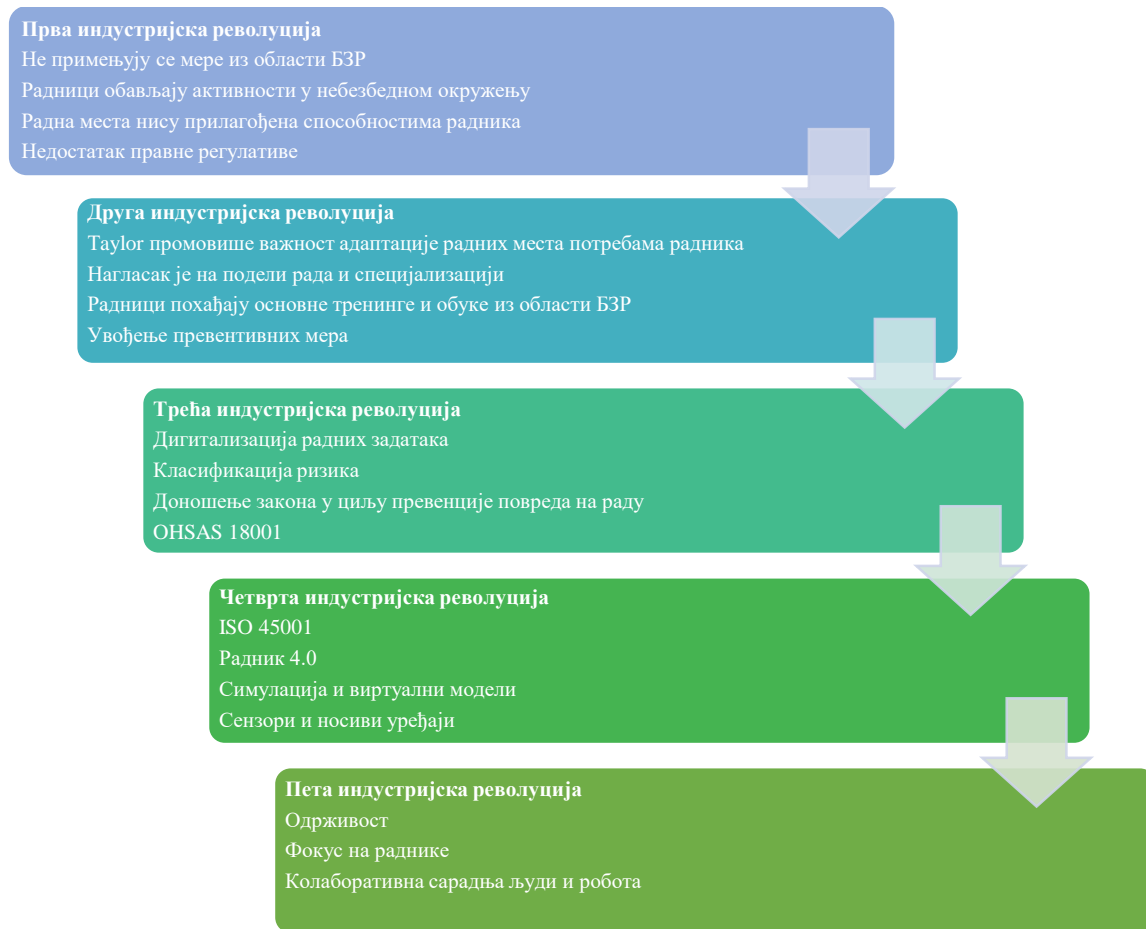


Слика 2.1 Историјски развој индустријских револуција (прилагођено према *Caiza* и други, 2020)

У току треће индустријске револуције креирана је нова стратегија безбедности и здравља на раду под називом Стратегија БЗР 3.0 (*Chia* и други, 2019). Она се базирала на персонализованој процени ризика и увођењу превентивних мера у циљу заштите радника, смањења повреда на раду и професионалних болести, побољшања радних услова и промовисања „потпуног“ здравља радника (слика 2.2). Посебан акценат у овом периоду је стављен на повећање безбедности машина. Прекретницу у доношењу и спровођењу закона из области безбедности и здравља на раду представљао је Закон који је донешен у Великој Британији 1974. године. Овај закон је подразумевао предузимање превентивних мера у циљу заштите безбедности и здравља радника.

Четврта индустријска револуција је прва индустријска револуција која је планирана унапред - остале револуције се могу анализирати само из историјске перспективе. Претходне три револуције имале су неку врсту окидача у виду новог техничког изума који је подигао производњу на виши ниво. Једино за четврту индустријску револуцију се не може узети неки посебан догађај па се код појединих истраживача јавља дилема да ли је у питању четврта индустријска револуција или само логични континуирани тренд модернизације индустрије.

Четврта индустријска револуција подразумева потпуну аутоматизацију и дигитализацију производње и примену дигиталних технологија (*Polak-Sopinska* и други, 2020). Сви ентитети у оквиру паметне организације су дигитално повезани и имају способност да међусобно комуницирају и аутоматски размењују податке у реалном времену. Напредне технологије Индустрије 4.0 омогућавају праћење производних процеса у реалном времену (*Badri* и други, 2018; *Chia* и други, 2019). Ову нову производну парадигму карактерише брже и прецизније децентрализовано одлучивање, планирање, контрола и надгледање у реалном времену, тотална реорганизација производних система, промене у начину организације рада и давање већих овлашћења и одговорности радницима. Такође, акценат је на персонализованој производњи и учешћу купаца у дизајну производа.

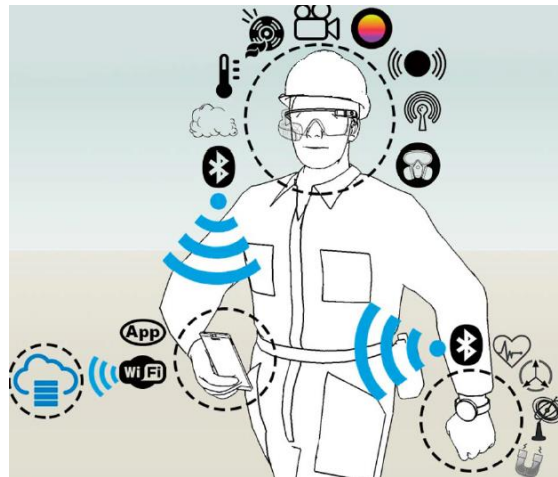


Слика 2.2 Историјски развој безбедности и здравља на раду (прилагођено према *Milea* и *Cioca*, 2024)

Нова стратегија безбедности и здравља на раду везана за четврту индустријску револуцију има за циљ промовисање, побољшање и унапређење БЗР у складу са специфичностима Индустрије 4.0. БЗР 4.0 карактерише примена нових технологија (сензори, носиве технологије и др.). Посебну улогу имају вештачка интелигенција (енгл. *artificial intelligence*), интернет ствари (енгл. *internet of things*), велики подаци (енгл. *big data*), виртуелна реалност (енгл. *virtual reality*), проширена стварност (енгл. *augmented reality*), колаборативни роботи (енгл. *collaborative robots*) и рачунарство у облаку (енгл. *cloud computing*). Интелигентни носиви уређаји и остале иновативне технологије Индустрије 4.0 омогућавају праћење здравствених параметара радника и параметара радне средине у којој радници обављају активности у реалном времену и на тај начин

омогућавају да се идентификују и елиминишу потенцијални ризици (на пример, откривање изложености штетностима и опасним материјама).

На слици 2.3 је приказано више сензора који имају улогу да континуирано прате здравствено стање радника (нпр. праћење откуцаја срца или мишићне активности) и параметре из радног окружења у којем они извршавају активности у реалном времену (температура, влага, осветљеност, присуство прашине и опасних гасова итд.). Анализа прикупљених података доприноси предикцији и минимизирању повреда на раду и професионалних болести (Ledda и Palomba, 2020). Радници у реалном времену добијају информације и упозорења о потенцијалном излагању опасностима и штетностима.



Слика 2.3 Сензори за праћење здравственог стања радника и параметара из радног окружења (преузето са <https://www.linkedin.com/pulse/future-ppe-connected-worker-erik-jensen/>)

Пета индустријска револуција представља нову еру у развоју индустрије, у којој се фокус помера са потпуне аутоматизације ка стварању синергије између људи и аутономних машина која има за циљ да комбинује креативност и интелигенцију људи са прецизношћу и ефикасношћу напредних технологија. Ова револуција ставља радника у центар производних процеса и тежи ка успостављању баланса између примене нових технологија и укључивања радника.

Посебан нагласак је посвећен креирању радног окружења прилагођеног индивидуалним потребама радника. У паметним организацијама радници нису замењени већ раде у тандему са дигиталним технологијама како би се остварили оптимални резултати. Ергономија и безбедност и здравље на раду контексту Индустрије 5.0 добијају нову димензију. Иновативне технологије Индустрије 5.0 имају улогу да замене раднике у извођењу физички и ментално захтевних активности и на овај начин се унапређује безбедност и здравље радника, смањује физичко и ментално оптерећење, повећава задовољство.

За разлику од Индустрије 4.0, која је фокусирана на аутоматизацију и дигитализацију, Индустрија 5.0 се базира на колаборативној сарадњи између робота и радника (Yusocky и Novak, 2016). Колаборативни роботи су посебна врста робота који сарађују са радницима у заједничком радном простору и помажу им у обављању свакодневних активности, омогућавајући да те активности буду ефикасније, флексибилније и безбедније. Роботи преузимају обављање рутинских и физички захтевних задатака а радници се фокусирају на обављање активности у којима могу да истражу креативност и когнитивне способности и вештине (Kim и други, 2018; Kim и други, 2019).

2.2 БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ НА РАДУ - ТЕОРИЈСКЕ ОСНОВЕ

Према Закону о безбедности и здрављу на раду Републике Србије, безбедност и здравље на раду подразумева обезбеђивање таквих услова рада у којима се смањују повреде на раду, професионална обољења и обољења у вези са радом, и који у великој мери стварају предуслове за пуно физичко, психичко и социјално благостање запослених (*Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu*, 2015). Безбедност и здравље на раду подразумева спровођење техничких, организационих, правних, здравствених, психолошких, едукативних и осталих мера, у циљу откривања и отклањања или умањења опасности које могу да угрозе живот и здравље запослених.

Како истиче аутор (*Ilić*, 2000) унапређивање услова рада и радне средине, превенција повреда на раду, професионалних болести и болести у вези са радом, као и побољшање безбедности и здравља запослених су од кључне важности у свакој организацији. Значај побољшања безбедности и здравља на раду може се посматрати са хуманог, социјалног и економског аспекта. Рад у безбедним и хуманим условима не само да доприноси повећању задовољства сваког појединца, већ и подиже општи квалитет живота у друштву у целини. Социјални значај безбедности и здравља на раду огледа се у континуираном настојању да се смањи број запослених који се повреде или изгубе живот на радном месту, оболе од професионалних болести и других болести повезаних са радом, за које одговорност преузима друштво. Економска димензија БЗР се мери преко последица повреда на раду, професионалних и других болести, и прати се кроз финансијске показатеље који су условљени бројем и тежином оваквих случајева (*Ivanjac*, и други, 2006).

Свака организација која послује по стандардима производње светске класе настоји да смањи повреде на раду и професионалне болести, и унапреди безбедност и здравље на раду. Према Закону о пензијском и инвалидском осигурању, повредом на раду сматра се свака повреда осигураника која се догоди у просторној, временској и узрочној повезаности са обављањем посла по основу ког је осигуран, а која је проузрокована непосредним и краткотрајним механичким, физичким или хемијским дејством, наглим променама положаја тела, изненадним оптерећењем тела или другим променама физиолошког стања организма (*Zakon o penzijskom i invalidskom osiguranju*, 2003).

Повреде на раду су индикатори неадекватних услова рада (*Babović*, 2009). До повреда на раду најчешће долази услед: небезбедног рада на машинама, непоштовања прописаних мера заштите на раду, лоше организације рада, некоришћења средстава за личну заштиту на раду, распоређивања запослених на радна места и прераспоређивања запослених са једних послова на друге без стручне оспособљености (посебно у практичном делу) и оспособљености за безбедан рад. Узроци повреда на раду могу да буду људски фактор и фактори који потичу из радне средине. Када је реч о људском фактору, посебно су значајне карактеристике радника. На пример, најмлађи радници се најчешће повређују због одређених психолошких карактеристика (непромишљеност, нестабилност, теже прилагођавање стандардима и нормама), недостатка радног искуства, немогућности адаптације на нову радну средину и слично.

Heinrich-ова пирамида, позната и као пирамида безбедности, резултат је детаљних анализа статистичких података о повредама на раду (*Mačuzić* и *Đapan*, 2016). У њеној основи налази се „принцип леденог брега“, који указује на то да су тешке повреде на раду, укључујући и оне са смртним исходом, директна последица небезбедних поступака и услова који нису на време препознати и елиминисани.

На врху пирамиде налазе се фаталне повреде. Испод њих су тешке повреде на раду, затим лакше повреде, и на крају повреде које захтевају само прву помоћ. На дну пирамиде су постављени „случајеви за мало“ и небезбедни поступци и услови који су најчешћи, мада често остају непримећени (слика 2.4).

Статистика показује следеће односе:

- На једну смртну повреду на раду долази 7 до 10 тешких повреда.
- На једну тешку повреду следи 7 до 10 лакших повреда.
- На једну лакшу повреду долази 7 до 10 повреда које захтевају само прву помоћ.
- „Случајеви за мало“ јављају се 7 до 10 пута чешће од повреда које захтевају прву помоћ.
- Највећу учесталост имају небезбедни поступци и услови, који се јављају 7 до 10 пута чешће од „случајева за мало“.



Слика 2.4 Heinrich-ова пирамида безбедности (Маџић и Ђаран, 2016)

Овај концепт јасно наглашава значај превентивних мера и континуиране идентификације небезбедних услова и поступака. Спречавањем ових иницијалних ризика могуће је значајно смањити учесталост озбиљнијих акцидента. Heinrich-ова пирамида безбедности представља основу за развој проактивних стратегија у циљу унапређења безбедности и здравља радника, са посебним фокусом на рано препознавање и елиминисање ризика.

Професионална болест представља привремену или трајну болест, физичку или менталну неспособност радника која је настала услед природе посла који радник обавља или је обављао, или због услова рада. Према дефиницији Светске здравствене организације (*World health organization*) професионалне болести и болести у вези са радом обухватају широк дијапазон обољења, која су на неки начин, али не увек узрочно повезане са спровођењем радних активности и условима рада.

Радници у предузећима у Србији генерално су чешће изложени повредама на раду и професионалним обољењима за разлику од радника у предузећима у развијенијим државама. Ово је посебно изражено у малим и средњим предузећима. Најчешћи

проблеми који се јављају у малим и средњим предузећима односе се на велики број радника који су запослени на одређено време (у поређењу са већим предузећима), ангажовање радника без уговора о раду, углавном на непуно радно време или су радници принуђени да раде прековремено. Поред тога, радници немају одговарајућу стручност и радно искуство и нису довољно обучени за обављање активности. Такође, мала и средња предузећа не воде евиденцију о исправности машина и електричних инсталација. Све ово доприноси повећању ризика од повреда на раду и професионалних обољења.

Радници у свим организацијама су често изложени буци, јакој светлости, екстремним температурама, зрачењу. Посебан проблем представља изложеност хемијским опасностима - гасовима, прабини и токсичним испарењима. Због подизања и ношења тешких терета, обављања понављајућих покрета у неергономским положајима тела током дужег временског периода и др. радници пате од мишићно-коштаних поремећаја (*Savković* и други, 2021a).

Повреде на раду и професионална обољења могу довести до смањења радне способности радника што може проузроковати продужено одсуство са посла, застоје у производњи и повећање трошкова. Стога, од посебне важности је побољшање безбедности и здравља радника и смањење ризика од повреда на раду и професионалних обољења.

Побољшање безбедности и здравља на раду, смањење смртних случајева, повреда на раду и професионалних болести, унапређење ергономских услова и постизање потпуног физичког, менталног и социјалног благостања запослених законска је обавеза свих предузећа. На нивоу Европске уније безбедност и здравље на раду регулисани су конвенцијама Међународне организације рада, директивама Европске уније и Лисабонским уговором. Закон о безбедности и здрављу на раду, заједно са пратећом правном регулативом, представља основу за унапређење услова рада и осигурање безбедности и здравља радника у Србији. У стандарду ISO 45001 је такође указано на важност спровођења превентивних мера у циљу смањења повреда на раду, професионалних обољења или нарушавања здравља радника (стандард BSI: ISO 45001).

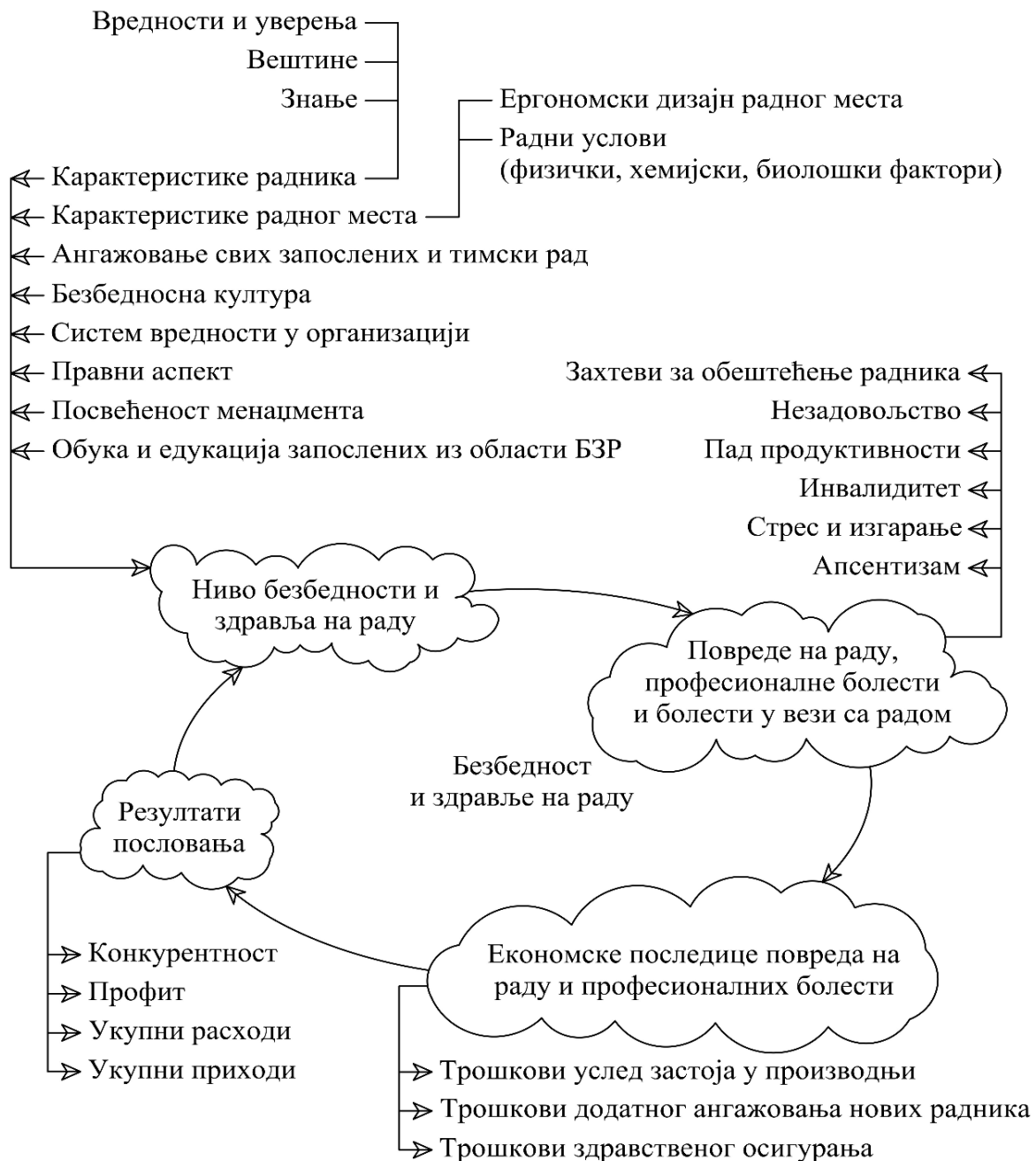
Кроз систематичну анализу фактора који утичу на безбедност и здравље на раду, могу се проценити ризици који постоје у радном окружењу (*Reese*, 2018). Процентом фактора стручњаци за БЗР су у могућности да идентификују потенцијалне опасности и предузму неопходне мере за смањење ризика. Континуираним спровођењем мера у циљу превенције и контроле ризика значајно се смањују повреде на раду и професионална обољења.

Кључни фактори који утичу на здравље и безбедност на раду су (*Keren* и други, 2009, *Flynn* и други, 2000, *Zhou* и други, 2008; *Lu* и *Tsai*, 2008; *Savković* и други, 2019):

- посвећеност менаџмента,
- обука/едукација запослених из области безбедности и здравља на раду,
- радно окружење,
- компетенције и мотивисаност запослених,
- спровођење поступака и правила за безбедан рад,
- ангажовање лица одговорних за безбедност и здравље на раду.

Слика 2.5 приказује интегрисани модел за унапређење безбедности и здравља на раду, који указује на узрочно-последичну везу између четири зависне варијабле: нивоа безбедности и здравља на раду, повреда на раду и професионалних болести, економских

последича повреда на раду и професионалних болести, као и пословних резултата (Savković и други, 2021a).



Слика 2.5 Модел за унапређење безбедности и здравља на раду (Savković и други, 2021a)

Ниво безбедности и здравља радника зависи од већег броја фактора: лидерства и посвећености менаџмента, свести о безбедности и здрављу на раду, система вредности у организацији, усклађености радне праксе са прописима и процедурама у овој области, обуке/едукације запослених, карактеристика радног места и карактеристика радника. Повећање нивоа безбедности доприноси смањењу повреда на раду, професионалних болести и болести повезаних са радом. Највећу одговорност за унапређење БЗР сnose послодавци и менаџмент, иако у великој мери и радници преузимају одговорност за безбедно извршавање активности (Lansdown и други, 2007). Менаџмент има активну улогу у усмеравању запослених и промовисању безбедности на радном месту.

Послодавци су обавезни да запосленима обезбеде безбедне услове у радном окружењу, као и неопходну опрему и средства за личну заштиту у складу са захтевима радног места.

Послодавац је обавезан да обезбеди да активности које радници обављају буду прилагођене њиховим физичким и менталним способностима. У случају да дође до непланираних и нежељених догађаја, послодавац је дужан да посети место на којем се инцидент догодио, прикупи потребне податке, изјаве испитаника и очевидаца, одговорних лица и стручњака из области БЗР, и сачини записник о самом догађају. Менаџмент је такође одговоран за мотивисање запослених да обављају активности на безбедан начин (*Boyd and Nowell, 2020*). Руководиоци морају обезбедити да сви запослени буду упознати са прописима из области безбедности и здравља на раду. Са друге стране, запослени сnose одговорност за безбедно руковање опремом и имају обавезу да пријаве послодавцу и вишем менаџменту ако се појави проблем који би могао угрозити њихову безбедност.

Узимајући у обзир чињеницу да је унапређење безбедности и здравља на раду један од главних показатеља финансијског успеха организације, савремени индустријски системи теже постизању највишег нивоа безбедности и здравља на раду. Пораст повреда на раду и професионалних болести узрокује повећање трошкова у компанији (трошкови БЗР, трошкови застоја у производњи, трошкови везани за запошљавање нових радника, итд.). Повреде на раду и професионалне болести доводе до смањења или у неким случајевима губитка радне способности и смањења животних активности, што често узрокује одсуство са посла, а то даље доводи до застоја у производњи, повећања трошкова и издатака. Пораст свих трошкова доводи до повећања укупних трошкова компаније и смањења профита, што даље доводи до смањења улагања финансијских ресурса у програме безбедности и здравља на раду (*Savković и други, 2021a*).

Основни циљ програма БЗР је да се спрече повреде, болести и смртни случајеви на радном месту, побољша усклађеност са законима и прописима, смање трошкови, повећа продуктивност и побољша укупно пословање (*Savković и други, 2021a*). Минимизовање повреда на раду и обезбеђивање радних услова у којима радници осећају задовољство директно доприноси повећању продуктивности, смањењу трошкова и повећању квалитета производа. Унапређење БЗР може се постићи применом проактивних мера, повећањем улагања финансијских ресурса у БЗР програме, континуираном едукацијом послодавца и запослених у овој области, и сл. На овај начин, опасности ће бити елиминисане или смањене, а безбедност, здравље и благостање радника у радном окружењу ће бити побољшани.

Континуирано спровођење обука и тренинга допринеће спречавању небезбедног извођења радних активности. Постављање јасних упутстава за безбедан рад на машинама и опреми спречиће се повреде на раду. Обезбеђивање личне заштитне опреме и подстицање запослених да је користе минимизира ризик од повреда и професионалних болести.

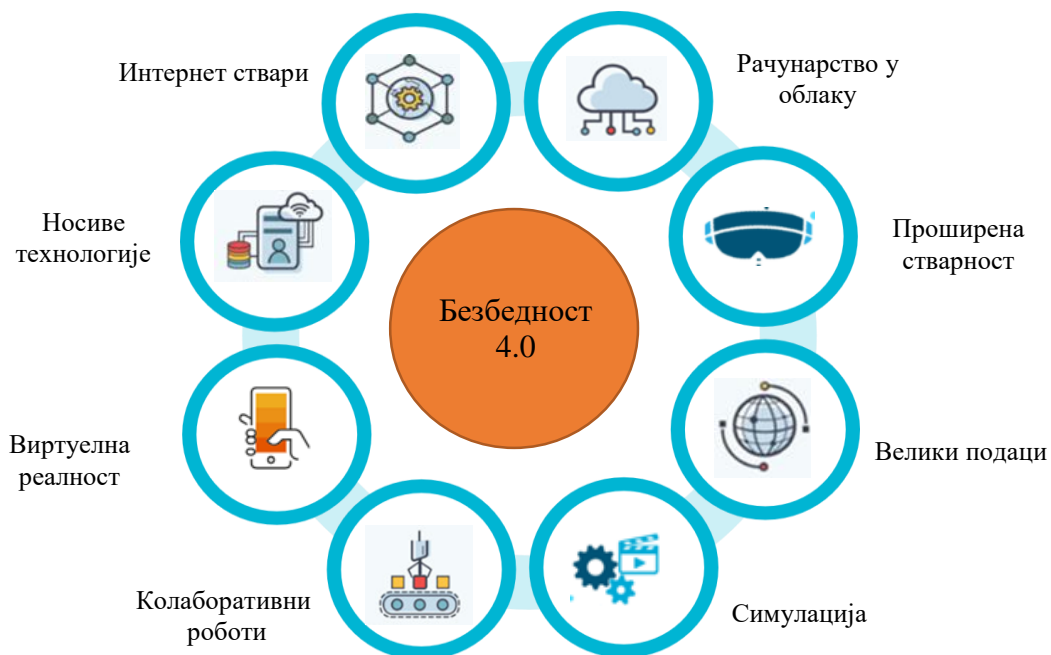
Ризик од појаве професионалних болести и болести повезаних са радом се смањује кроз праћење основних здравствених параметара радника и приказивањем упозорења о појави опасности или штете, спровођење превентивних мера и побољшавају радни услови кроз континуирано праћење параметара радног окружења у реалном времену (влажност, бука, осветљење итд.), смањујући или елиминишући њихов негативни утицај.

2.3 ПРИМЕНА НАПРЕДНИХ ТЕХНОЛОГИЈА ИНДУСТРИЈЕ 4.0 НА БЗР

Индустрија 4.0 представља један од десет кључних пројеката које је немачка влада усвојила у оквиру акционог плана „*High-Tech Strategy 2020 for Germany*“. Овај пројекат је усмерен на развој новог концепта који је заснован на дигиталном повезивању свих ентитета у ланцу вредности, од производње до крајњег корисника. Умрежавање и размена информација у реалном времену, велики подаци, колаборативна сарадња радника и робота, даљинско откривање, праћење и контрола процеса у реалном времену, као и аутономне дигиталне технологије, постају основне карактеристике савремених индустријских система.

Ова нова производна парадигма доводи до промена у производњи, организацији рада и начину извођења радних активности, што се све више одражава на безбедност и здравље радника. Високо аутоматизоване паметне компаније карактеришу виртуализација, интероперабилност, децентрализовано доношење одлука, стварање нове вредности купцима, као и независно управљање процесима. Кључне карактеристике Индустрије 4.0 су хоризонтална интеграција, вертикална интеграција и свеобухватна интеграција, као и дигитализација информација током животног циклуса производа.

Индустрија 4.0 у великој мери остварује утицај на безбедност и здравље радника. Безбедност 4.0 представља помак ка приступу безбедности на радном месту заснованом на анализи великих података и примени иновативних технологија. Аутоматизовани системи, колаборативни роботи, вештачка интелигенција, интелигентна лична заштитна опрема, велики подаци, рачунарство у облаку и аутономна возила позитивно утичу на безбедност и здравље на раду (*Bahrin* и други, 2016).



Слика 2.6 Основне технологије Индустрије 4.0 које имају утицај на БЗР (прилагођено према: <https://www.sap.com/hk/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html>)

Нове технологије доприносе унапређењу општег здравља и благостања радника, кроз пружање подршке радницима током извођења свакодневних сложених, понављајућих и монотоних активности. На тај начин омогућавају радницима да те

зататке обављају ефикасније, продуктивније, флексибилније и на безбеднији начин. Поред тога, иновативне технологије омогућавају праћење здравствених параметара и параметара у радном окружењу који утичу на сам производни процес, што доприноси унапређењу радних услова и смањењу ризика по безбедност и здравље радника (*Savković* и други, 2021б). Персонализованом проценом ризика за свако радно место понаособ могу се значајно смањити ризици од повреда на раду и професионалних болести, што доводи до смањења трошкова, повећања продуктивности и задовољства радника.

Колаборативни роботи доприносе побољшању безбедности и здравља радника кроз креирање безбеднијег радног окружења, смањење физичког напора и ризика од здравствених проблема (*Kim* и други, 2018). Ови аутономни роботи карактеришу се мањом сложености и једноставнијим управљањем. За разлику од конвенционалних робота који функционишу на принципу унапред програмираних команди, колаборативни роботи имају уграђене сензоре који им омогућавају да препознају и анализирају намере радника и прилагоде своје активности њиховим способностима (*Bradshaw* и други, 2012). На тај начин смањује се стрес, замор и оптерећење код радника, чиме се побољшава њихово здравствено стање.

Ови роботи су безбедни за рад са људима и не морају бити ограђени оградом као роботи. Колаборативни роботи су опремљени сензорима који им омогућавају да перципирају околину, реагују на динамичке услове и препознају објекте у својој близини (*Cherubini* и *Navarro-Alarcon*, 2021). Ако особа уђе у зону деловања робота, роботи могу да промене активности, смање брзину рада и на тај начин не нашkode радницима. Поред тога, колаборативни роботи имају могућност самоконтроле, при чему смањују или повећавају брзину у зависности од близине радника, што доприноси већој безбедности радника. Они су програмирани тако да заустављају рад када радник улази у заједнички радни простор и настављају да раде када се радни простор ослободи.

Егзоскелети су носиви механички уређаји који имају улогу да пруже подршку радницима у обављању тешких, понављајућих и физички захтевних радних задатака који се не могу аутоматизовати. На овај начин побољшавају се физичке способности радника, смањују се компресија силе на доњи део леђа, рамена, лактове и зглобове, смањује се замор и физички напор и побољшава опште здравље радника. Они пружају подршку телу радника током позиционирања или коришћења радних алата, манипулације објектима и сл. Постоје два типа егзоскелета- активни и пасивни. Активни егзоскелети користе актуаторе како би подржали покрете и активности радника који обављају заморне активности током дужег временског периода у нефизиолошком положају тела, пружајући им додатну снагу. У Фијатовој фабрици у Италији активни егзоскелет за горњи део тела коришћен је да подржи руке радника како би могли да подижу терет без потешкоћа. На овај начин смањено је оптерећење зглобова и мишића. Пасивни егзоскелети се најчешће примењују на доњи део тела када радници често мењају положаје тела или стоје током дужег времена и имају улогу „столице“. Примена овог егзоскелета смањује оптерећење на ногама и олакшава усвајање правилних положаја тела с једне стране, док истовремено омогућава флексибилност и покретљивост с друге стране.

Велики подаци (енгл. *big data*) представљају податке чија величина превазилази могућности традиционалних база података и софтвера за прикупљање, обраду, анализу и складиштење података. Прикупљање и анализа великих података у реалном времену у интелигентним радним окружењима позитивно утиче на безбедност и здравље радника кроз побољшање њиховог здравственог стања, смањење негативних утицаја из радног

окружења и спречавање повреда на раду и професионалних болести (*Mattsson* и други, 2016).

Мобилне паметне носиве дигиталне технологије (нпр. паметне наруквице, паметне наочаре) и минијатурни уређаји уграђени у паметну личну заштитну опрему (кациге, заштитна одела или траке за руке) омогућавају континуирано праћење активности радника, здравствених параметара и услова радне средине у реалном времену и на тај начин доприносе стварању безбеднијих услова рада, елиминисању несрећа, смањењу повреда на раду и професионалних болести.

Праћењем основних здравствених параметара радника (као што су број откуцаја срца, пулс, температура, ниво стреса, замор, концентрација), могуће је утврдити физичко и когнитивно оптерећење радника, неергономске покрете и положаје тела, смањити стрес радника, смањити когнитивно и физичко оптерећење и избећи повреде на раду (*Savković* и други, 2021б). Сензори прате кретање радника, његову локацију, број корака које је направио, активности које обавља, положаје тела које заузима итд. Подаци прикупљени иновативним технологијама указују на могућности појаве опасности и штетности на радном месту (излагање високим температурама, токсичним гасовима, штетним хемикалијама и високим нивоима буке итд.). На овај начин, могуће је елиминисати и контролисати опасности пре него што дође до озбиљнијих проблема.

Континуирана потреба за обрадом, анализом и складиштењем великих количина података довела је до све веће примене рачунарства у облаку које подразумева коришћење ИТ инфраструктуре (хардвера и софтвера) преко интернета, коришћење различитих ИТ услуга на физички удаљеним серверима уз помоћ мрежне инфраструктуре и одговарајућих интернет протокола. Свака машина, уређај и компонента у паметном индустријском окружењу генерише податке који се складиште у облаку, а затим се прикупљени подаци обрађују како би се у реалном времену могли пратити и анализирати, упоређивати са подацима из претходног периода и идентификовати проблеми који могу настати.

Виртуелна реалност се односи на коришћење информационих технологија за прецизну и реалистичну репрезентацију сценарија из реалног окружења. Виртуелна стварност омогућава радницима да уроне у виртуелни свет и омогућава им интеракцију са виртуалним окружењем у реалном времену. Виртуелна стварност налази примену у процени ризика на радним местима. Опасности и ризичне ситуације које могу настати могу се практично представити применом виртуелне стварности. Такође, виртуелна стварност омогућава ефикасније спровођење обука и едукација запослених. Применом иновативних технологија могуће је утврдити који радници би требало да похађају додатне обуке из области безбедности и здравља на раду како би активности изводили на безбеднији начин. Поред тога, инструктори обука могу прилагодити обуку из области БЗР појединачно сваком раднику, у складу са његовим радним местом.

Проширена стварност представља комбинацију физичког и дигиталног света, у којој дигитални елементи (слика, текст, анимација или звук) допуњују физички свет. Проширена стварност омогућава да информације из стварног света буду пропраћене компјутерски генерисаним подацима (слике, текст) који се комбинују у једну целину и приказују на екранима рачунара или мобилних телефона, или да се компјутерски генерисане слике пројектују на стварне објекте у реалном времену. Проширена стварност налази велику примену током обуке запослених, јер повећава флексибилност радника и скраћује време потребно за учење новог задатка, што додатно побољшава безбедност и здравље радника (*Chia*, 2019).

Вештачка интелигенција представља симулацију процеса људске интелигенције помоћу машина, посебно рачунарских система. Вештачка интелигенција игра важну улогу у унапређењу безбедности и здравља на раду и благостања радника. Дигиталне технологије засноване на вештачкој интелигенцији омогућавају праћење и усмеравање радника на основу прикупљања велике количине података у реалном времену, путем мобилних уређаја, уређаја уграђених у одећу или личну заштитну опрему, или постављених директно на тело радника. Примена метода вештачке интелигенције омогућава правовремену идентификацију ризика и опасности (Badri и други, 2018).

Примена ових иновативних технологија Индустрије 4.0 доприноси побољшању безбедности и здравља на раду омогућавајући откривање и елиминацију или смањење опасности које могу угрозити живот и здравље радника. Унапређењем радних услова, смањењем професионалних повреда и болести повезаних са радом стварају се предуслови за физичко, ментално и социјално благостање запослених, као и за побољшање економских показатеља - ефикасности и продуктивности (Savković и други, 2021б; Celik и Oztürk, 2017).

У паметним радним окружењима радници су укључени у извођење активности које додају вредност, креативних активности које захтевају размишљање, доношење одлука и решавање ситуација у случају појаве непредвиђених догађаја. Радници су мање изложени стресу јер могу самостално организовати своје активности, чиме остварују већи степен аутономије. Флексибилни радни услови у интелигентним радним окружењима омогућавају радницима да постигну бољи баланс између пословног и приватног живота, као и између личног и професионалног развоја, што даље води ка повећању задовољства радника и мотивације за рад.

Табела 2.1 *Бенефити примене технологија Индустрије 4.0 на БЗР (Savković и други, 2021б)*

<i>Технологија</i>	<i>Бенефити</i>
Велики подаци	<ul style="list-style-type: none"> • неограничено прикупљање података • смањење неизвесности • спречавање повреда на раду и професионалних болести
Колаборативни работи	<ul style="list-style-type: none"> • замењују раднике у извођењу понављајућих и физички захтевних активности • преко сензора перципирање радне околине
Вештачка интелигенција	<ul style="list-style-type: none"> • препознавање опасности у реалном времену • праћење радника и доношење одлука у реалном времену
Носиве технологије	<ul style="list-style-type: none"> • праћење здравствених параметара радника • праћење параметара из радног окружења
Виртуелна реалност	<ul style="list-style-type: none"> • виртуелна процена ризика на радним местима • обуке из области безбедности и здравља на раду

2.4 БЕЗБЕДНОСТ И ЗДРАВЉЕ РАДНИКА КОЈИ ОБАВЉАЈУ МОНТАЖНЕ АКТИВНОСТИ НА ИНДУСТРИЈСКИМ РАДНИМ СТАНИЦАМА

Упркос растућем тренду примене савремених технологија Индустије 4.0, на многим радним местима у савременим индустријским системима не постоји могућност да се у потпуности спроведе дигитализација и аутоматизација. Примери таквих послова су монотони и понављајући задаци склапања делова и компоненти у финални производ који се обављају на традиционалним индустријским радним станицама најчешће у неергономским положајима тела. Због природе посла и ограничене флексибилности радници су приморани да ове активности обављају мануелно. На традиционалним радним станицама радници изводе понављајуће покрете током дужег временског периода, што може довести до здравствених проблема који у неким случајевима могу изазвати трајне последице по њихово здравље.

Задаци ручног склапања су широко распрострањени у многим производним организацијама. Процес монтаже представља један од најважнијих пословних процеса, како у аутомобилској индустрији, тако и у другим индустријским секторима. Ручно склапање укључује претраживање и избор делова, компоненти и подклопова, њихово монтирање у финални производ и самим тим захтева физичку и менталну спремност радника.

Процес склапања подразумева низ операција које се систематски изводе како би се различите компоненте спојиле у финални производ. Основне операције у монтажи укључују (*Chakravarthy* и други 2015):

- претраживање и избор делова, компоненти и подклопова - процес идентификације и селекције потребних делова и компоненти за монтажу, проналажење потребних делова
- позиционирање - прецизно постављање делова или компоненти на одговарајуће место у односу на остале делове
- оријентацију - обезбеђивање да сваки део буде исправно оријентисан пре него што се споји са другим компонентама чиме се спречава појава грешки у монтажи и осигурава квалитет финалног производа
- спајање - последњи корак у процесу монтаже, који подразумева физичко спајање компоненти коришћењем различитих техника као што су заваривање, вијци, лепкови или механички спојеви.

Монтажне активности одлукују специфичне карактеристике (прилагођено према *Swift* и *Booker*, 2013):

- стопе производње варирају од ниске до средње у зависности од комплексности финалног производа, броја и величине компоненти и делова који се монтирају у финални производ
- монтажне активности спадају у групу прилично комплексних радних активности (комплексност зависи од величине и сложености финалног производа који се склапа)
- време производње је прилично дуго (у неким ситуацијама овај процес траје данима)
- поступак монтаже је организован и синхронизован у односу на делове и компоненте чија се монтажа изводи у различито време и на различитим локацијама

- у процесу монтаже, активности се врло често обављају ручно, јер се сматра да је аутоматизација неких операција превише комплексна и захтева знатна финансијска улагања
- обављање монтажних активности у неергономским положајима тела негативно утиче на здравље радника
- услед обављања понављајућих активности током дужег периода времена долази до психичког замора и пада концентрације, што може довести до повреда на раду
- квалитет финалног производа у великој мери зависи од способности и вештина радника који склапају производ
- монтажа је обично последњи процес у којем се манифестују неправилности из претходних фаза и процеса
- до дефеката долази уколико је производ сложен, ако се делови и компоненте тешко интегришу или ако је простор за уметање ограничен, уколико се монтажне активности изводе неправилно итд.

Како истичу аутори (*Karlqvist* и други, 2003) монтажни задаци су физички напорни и ментално захтевни а то може имати озбиљне импликације на здравље и добробит радника. Услед извођења честих понављајућих покрета горњих екстремитета, посебно ако је време извођења једне операције мање од 30 секунди радници су изложени ризицима од настанка здравствених проблема. Мишићно-коштани поремећаји представљају најчешћи здравствени проблем међу радницима који обављају активности монтаже на традиционалним радним станицама.

Амерички Национални институт за безбедност и здравље на раду (енгл. *National Institute for Occupational Safety and Health-NIOSH*) дефинише мишићно-коштане поремећаје као поремећаје и обољења који оштећују мишићно-коштани систем, периферне нерве и неуроваскуларни систем, а који су узроковани или погоршани услед изложености ергономским ризицима. Светска здравствена организација (енгл. *World Health Organization-WHO*) дефинише мишићно-коштане поремећаје као поремећаје мишића, тетива, периферних нерава или васкуларног система који нису резултат акутног или тренутног стања већ настају кумулативно (*Karthikeyan* и други, 2022). Према аутору (*Dennerlein*, 2008) мишићно-коштани поремећаји обухватају низ обољења која погађају меко ткиво мишићно-коштаног система, укључујући тетиве, лигаменте, хрскавицу, мишиће и нерве и најчешће се манифестују кроз болове у врату, раменима, шакама, рукама и доњем делу леђа. Ови поремећаји могу настати као резултат хроничног напрезања, нефизиолошких положаја тела, извођења понављајућих покрета или прекомерног оптерећења, што доводи до бола, отока, укочености и смањене функционалности.

У земљама чланицама Европске уније (ЕУ), мишићно-коштани поремећаји представљају једну од најчешће заступљених болести код радника који обављају монтажне активности на индустријским радним станицама. Према статистичким подацима, око 60% радника пати од ове врсте професионалних болести (*Carolyn* и други, 2013). Аутори (*Khan* и *Pope-Ford*, 2015) сматрају да постоји тренд повећања мишићно-коштаних поремећаја код радника који обављају активности монтаже у поређењу са радницима који обављају друге активности.

Према ауторима (*Balasubramanian* и други, 2018; *Punnett* и *Wegman*, 2004) најчешћи мишићно-коштани поремећаји који су повезани са обављањем монтажних радних активности су синдром карпалног тунела, тендонитис зглоба и латерални

епикондилитис. Синдром карпалног тунела настаје услед компресије или притиска на медијални нерв који пролази кроз карпални тунел у зглобу. Када дође до притиска на овај нерв, појављују се симптоми као што су бол, пецкање, трњење, слабост или утрнулост у прстима и шапи. Најчешћи узрок настанка синдрома карпалног тунела је извођење понављајућих покрета руке и прстију током дужег временског периода.

Тендинитис је упала или иритација тетиве, фиброзног ткива које повезује мишиће са костима. Ово стање настаје услед преоптерећења тетиве или понављајућих покрета, што доводи до бола и осетљивости око захваћеног подручја. Најчешће се јавља у областима као што су рамена, лактови и зглобови. Латерални епикондилитис, познат и под називом „тениски лакат“, представља упално-дегенеративно обољење тетива које се везују за латерални епикондил хумеруса. Овај поремећај најчешће настаје као резултат хроничне преоптерећености екстензорских мишића подлактице, посебно екстензора карпуса. Симптоми укључују бол и слабост у пределу спољашњег дела лакта, што ограничава способност извођења покрета који захтевају примену снаге и ротацију подлактице.

Као један од главних фактора ризика за настанак поремећаја мишићно-коштано система, у литератури се наводе нефизиолошки положај тела и неадекватно дизајнирано радно место (Alexopoulos и други, 2003; Petreanu и Seracin, 2017). Потенцијални фактори ризика за појаву мишићно-коштаних поремећаја и других здравствених проблема код радника укључују понављајућа кретања, статичко држање тела, подизање тешких предмета, прекомеран напор, као и изложеност вибрацијама. Задаци који подразумевају склапање/повезивање компоненти и делова често се обављају у неправилним положајима тела или уз одржавање статичног положаја тела током дужег периода времена. На слици 2.7 су приказани нефизиолошки положаји тела које радници заузимају током обављања монтажних активности.



Слика 2.7 Нефизиолошки положаји тела које радници заузимају током извођења монтажних активности (преузето из рада: Colim и други, 2021 б)

Обављање послова у ергономски неадекватном положају тела током дужег периода времена може резултирати дугорочним здравственим проблемима (Bjoringa и Hagga, 2000; Khan и други, 2020). Бројни научно-истраживачки радови су указали да дуготрајно обављање активности у седећем положају доводи до нелагодности код радника (Callaghan и други, 2010).

Извођење монотоних и понављајућих покрета великом брзином захтева повећан напор тетива, мишића и нерава на шакама и зглобовима, што може изазвати напетост мишића и додатно повећати ризик од развоја мишићно-коштаних поремећаја (Hussain, 2004; Bjoringa и Hagga, 2000; Schneider и други, 2010; Bevan, 2015). Аутор (Punnett и други, 1991) је спровео истраживање у погону за склапање аутомобила како би кроз

праћење постуралних и биомеханичких ризика установио потенцијалну корелацију између статичног држања тела и ризика од појаве мишићно-коштаних поремећаја.

Са друге стране, аутор (*Bernard, 1997*) је указао на корелацију између појаве мишићно-коштаних поремећаја и обављања монотоних и понављајућих радних активности. Такође, у истраживању аутора (*Ellegast, 2016*) је указано на појаву професионалних обољења у виду мишићно-коштаних поремећаја и болова у леђима код радника који обављају заморне, понављајуће активности у индустрији. Аутор (*Ghasemkhani* и други, 2006) је спровео студију случаја како би истражио појаву мишићно-коштаних симптома код групе радника који раде на монтажној траци у аутомобилској индустрији, с обзиром на то да су мишићно-коштани поремећаји главни узрок инвалидитета и апсентизма, смањења продуктивности и повећања трошкова у већини организација.

На слици 2.8 је приказано обављање активности у неергономском положају тела током дужег временског периода услед чега долази до појаве болова у врату, раменима и у леђима.



Слика 2.8 Обављање активности у неергономском положају тела (преузето са: <https://www.progressiveautomations.com/blogs/how-to/how-ergonomic-workstations-benefit-packing-and-assembly-lines>)

Током извођења мануелних, понављајућих, прецизних радњи састављања, глава и врат радника су нагнути напред током дужег временског периода. Овај неергономски положај тела изазива болове у врату и леђима (*Chandrasakaran* и други, 2003). Такође радници осећају нелагодност у другим деловима тела - раменима, лактовима, зглобовима и шакама или областима око ових делова тела. Аутори (*Ohlsson* и други, 1989) и (*Ohlsson* и други, 1995) су спровели две студије и установили да се 39% радника који обављају монтажне активности у аутомобилској индустрији жалило на болове у врату, 38% је осећало болове у раменима, а 14% болове у рукама.

Према студији коју су спровели аутори (*Luopajarvi, 1979*) 37% радника који раде на радним станицама за монтажу жалило се на болове у врату а 5,9% на болове у рукама. Поред акутног бола, радници осећају и хронични бол у поменутих деловима тела, што може у неким ситуацијама проузроковати трајну неспособност за рад (*Buckle* и *Devereux, 2002*; *Walker-Bone* и *Cooper, 2005*). Како наводи аутор (*Roquelaure, 2016*), током попуњавања упитника, радници су пријавили бол или осећај нелагодности у горњем делу тела, укључујући врат, руке, лактове/подлактице, шаке/зглобове и леђа. Процена је вршена на скали од 0 до 10, при чему је 0 означавало да радници нису осећали никакав бол или нелагодност, док је 10 указивало да су радници имали неподношљиве болове.

Резултати студије коју су спровели аутори (*Nur* и други, 2014) су показали да је преваленција мишићно-коштаних поремећаја највећа у врату (49,3%), затим у шаши/зглобу (48%), рамену (46,7%) и леђима (33,6%).

У студији коју је спровео аутор (*Tewari* и *Vinay*, 2019) установљено је да извођење монотоних, понављајућих активности проузрокује настанак мишићно-коштаних поремећаја. Аутор наводи да континуирано понављање истих покрета (исти покрет се изводи два до четири пута у минути или у циклусима краћим од тридесет секунди) и одржавање статичких положаја тела доводе до прекомерног оптерећења мишића, тетива и зглобова. Аутори (*Guerreiro* и други, 2021) су пратили раднике који су обављали активности на монтажној траци у аутомобилској индустрији током 7 месеци, како би утврдили утицај радног времена на присуство и интензитет симптома обољења горњих екстремитета. Установљено је да дуготрајно обављање монтажних задатака може довести до смањеног функционалног капацитета за извршавање задатака и смањења снаге радника. Продужени периоди обављања активности без одговарајућих пауза и ротације радних задатака су резултирали повећаним замором мишића. У табели 2.2 приказани су фактори ризика и симптоми најчешћих поремећаја горњих екстремитета.

Табела 2.2 Поремећаји, фактори ризика на раду и симптоми (ССОHS, 2019)

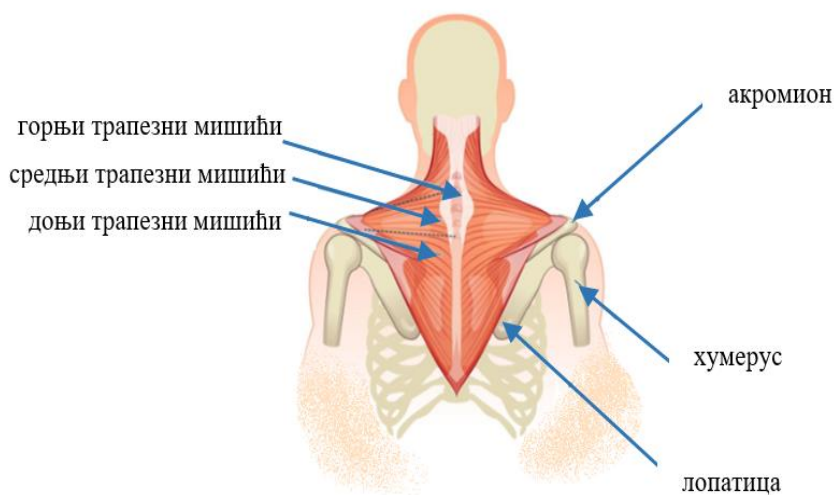
Здравствени поремећаји	Фактори ризика на раду	Симптоми
Тендинитис	Прекомерно оптерећење, понављајући покрети рамена, руке, зглобова	Оток, бол, слабост, ограничена покретљивост
Епикондилитис (тениски лакат)	Понављајући покрети руке, подизање терета	Бол у лакту, ослабљен стисак
Синдром карпалног тунела	Понављајући покрети руку и зглобова, статичко држање тела	Бол, утрнулост, слабост у шаши и прстима
Бурситис	Притисак на зглобове, продужено статичко држање	Бол у рамену, ограничен опсег покрета
De Quervainova болест	Понављајући покрети палца, увртања	Бол и оток, ограничено кретање
Синдром торакалног излаза	Статичко држање, притисак на рамена, руке су постављене изнад рамена током дужег периода времена	Бол у врату и раменима, утрнулост у рукама

Мишићно-коштани поремећаји су један од главних узрока одсуства са посла и смањене продуктивности радника. Ова група професионалних болести је повезана са великим бројем изгубљених радних дана у току године, а са тим и значајним финансијским губицима које организације трпе због пада продуктивности и повећаних трошкова услед лечења и других видова подршке које су неопходне за рехабилитацију радника (*Carey* и *Gallwey*, 2002).

Неправилан дизајн радне станице може резултирати мањим задовољством послом и смањеном продуктивношћу (*Gerr* и други, 2014). У студији коју је спровео аутор

(Warner, 1998) је наведено да је због појаве мишићно-коштаних болести дошло до смањења продуктивности за 65%. Аутори (Jones и Kumar, 2004) су указали на чињеницу да мишићно-коштани поремећаји представљају 32% укупних трошкова у организацији и узрокују 40% укупног губитка времена у поређењу са другим професионалним обољењима.

Приликом извођења монтажних активности највише су погођени горњи трапезни мишићи (Bongers, 2006). Трапезни мишић је велики површински мишић који се налази налази непосредно испод коже у горњем делу леђа (и већем делу врата). Назив је добио по облику који подсећа на геометријски облик трапеца. Овај мишић се протеже уздужно од спољашње избочине потиљачне кости (најнижи део лобање) до доњих торакалних пршљенова (средњи део кичме) и бочно до лопатице. Дели се на горњи, средњи и доњи трапезни мишић (слика 2.9).



Слика 2.9 Трапезни мишићи (преузето са: <https://www.narayanahealth.org/blog/trapezius-muscle-anatomy-function-disorder-and-treatment>)

Горњи трапезни мишић се протеже од базе лобање (поттиљачне кости) и бочних страна вратних пршљенова до акромиона (врха лопатице). Овај мишић подржава кретање руке. Такође је задужен за покрете главе, као што су ротација и нагињање главе у страну. Средњи трапезни мишић почиње у горњем делу грудних пршљенова и протеже се до лопатице. Овај део мишића је одговоран за повлачење лопатице уназад ка кичми, што је од посебне важности за стабилизацију рамена и правилно држање тела. Доњи трапезни мишић се протеже од доњих грудних пршљенова до доњег дела лопатице. Основна улога овог мишића је ротирање лопатице и повлачење рамена надоле.

Физички, организациони и психосоцијални фактори имају значајну улогу у појави и настанку мишићно-коштаних обољења (Chiasson и други, 2015). Штавише, аутори (Linton, 2000 и Pincus и други, 2002) сматрају да су мишићно-коштани поремећаји више условљени психичко-друштвеним факторима ризика у поређењу са физичким факторима.

2.5 РАЗВОЈ ЕРГОНОМИЈЕ

Године 1857, *Vojčeh Jastržebovski* је први пут употребио реч „ергономија“ у пољским новинама, чиме је поставио темеље за ову научну дисциплину која се бави проучавањем односа између људи и њиховог радног окружења. Иако би се могло рећи да ергономија није нова идеја, јер су се ручни алати користили од најранијих времена, концепт формалног проучавања и примене ергономских принципа у дизајну радних места и алата јесте релативно нова идеја. Историјски гледано, људи су природно прилагођавали алате и околину како би побољшали удобност и ефикасност, али тек са развојем ергономије као науке, постало је могуће систематски анализирати и оптимизовати начин на који људи користе алате и обављају радне задатке, што је довело до значајног побољшања продуктивности, безбедности и здравља.

Од каменог доба, људи су правили различите ручне алате, што је уједно означило и почетак интересовања за ергономски дизајн. У Уједињеном Краљевству, стручњаци из различитих области, као што су психологија, инжењеринг и медицина, били су заинтересовани за проучавање колико добро људи обављају свој посао и како теорије и методе могу побољшати њихове перформансе. У осамнаестом веку, *Ramacini* је у делу под називом „Болести радника“ показао како су различите врсте рада повезане са специфичним здравственим ризицима. На пример, он је указао на појаву кумулативних трауматских поремећаја и других здравствених проблема узрокованих понављајућим покретима руку и нефизиолошким држањем тела.

Током дуге историје, ергономија је доживела многе промене. Током Првог светског рата, ергономске иновације обухватале су побољшање екрана, контрола и седишта у авионима, што је значајно унапредило ефикасност. Током Другог светског рата, ергономске идеје су имплементирани у дизајн оружја и машина, како би се повећала њихова ефикасност на бојном пољу. Ергономија је направила велики корак напред након што је први пут примењена у индустрији 1950-их година, са посебним интересом за побољшање учинка и задовољства радника. Фокус је био на дизајну опреме и радних места која су прилагођена људским способностима, што је резултирало значајним смањењем повреда на раду, повећању продуктивности и побољшању квалитета производа. Неки од кључних аспеката ергономије су еволуирали у различитим периодима: когнитивна ергономија 1960-их, организациона ергономија 1970-их, позитивна ергономија 1980-их, емоционална ергономија 1990-их и духовна ергономија 2000-их.

У четвртој индустријској револуцији безбедност на раду и ергономија имају важну улогу у организацијама. Примена напредних технологија суштински мења начин обављања активности кроз интелигентно повезивање и напредну аутоматизацију. Нове технологије су омогућиле да се многи радни задаци аутоматизују, што је допринело смањењу физичког замора и ризика за развој мишићно-коштаних поремећаја.

Индустрија 5.0 враћа раднике у производне процесе и посебну пажњу поклања приступу оријентисаном на човека. Посебан фокус у оквиру Индустрије 5.0 посвећује се ергономској оптимизацији и повећању добробити радника. Приликом дизајнирања радних система од посебне је важности да све компоненте и алати неопходни за реализацију радних активности буду прилагођени потребама радника како би се побољшала њихова безбедност и здравље, смањиле повреде на раду и професионалне болести, створило сигурније и пријатније радно окружење и побољшало физичко и ментално стање радника.

Следеће личности су имале важну улогу у развоју ергономије:

- *Bernardino Ramazzini*, аутор је књиге „Болести радника“ у којој је први пут поменута ергономија као термин. Овај аутор је указао на везу између обављања активности и појаве мишићно-коштаних пореметања.
- *Vojčeh Jastržebovski*, који представља кључну фигуру у филозофском схватању ергономије, постављајући темеље науке „утемељене на истинама природе“.
- *Frederick Winslow Taylor*, амерички инжењер који се први бавио проучавањем односно детаљном анализом времена потребног за извођење сваког покрета понаособ узимајући у обзир покрете и положаје тела радника приликом приликом обављања радних операција и одређивао је потребна времена за сваку радну операцију на основу детаљних анализа. Он је развио методе за нормирање времена за сваки радни покрет, што је допринело повећању ефикасности операција.
- *Lillian Moller Gilbreth* (психолог), проучавала је на који начин је могуће смањити ментални умор односно психичко преоптерећење и физичку исцрпљеност и на тај начин допринети повећању продуктивности и смањењу дефеката.

2.6 ЕРГОНОМИЈА - ТЕОРИЈСКЕ ПОСТАВКЕ

Реч ергономија потиче из грчког језика, од речи „*ergon*“ што у преводу значи рад и речи „*nomos*“ која значи закон односно у преводу ергономија је наука о раду (*Saïnas* и други, 2011). У пракси се може наћи и термин људски фактор и ергономија (енгл. *Human Factors and Ergonomics - HF/E*) (*Salvendy*, 2012). У америчкој традицији користи се термин Инжењеринг људског фактора (енгл. *Human Factor Engineering*).

Ергономија представља мултидисциплинарну научну дисциплину која се бави изучавањем и разумевањем интеракције између радника и осталих елемената радног окружења (*Salvendy*, 2012). Ергономија примењује теоријске принципе и методе приликом дизајнирања радног окружења како би се оптимизовала безбедност и здравље радника и побољшале перформансе (*International Ergonomics Association*, 2000). Основни циљ ергономије је да осигура усклађеност задатака, опреме и радног окружења са потребама и могућностима радника односно успостављање оптималне равнотеже између карактеристика радника и захтева радних задатака. Ергономија се фокусира на истраживање психолошких, биолошких и физичких карактеристика људи и примени добијених информација у циљу побољшања безбедности и здравља људи и оптимизације перформанси.

Основни циљ примене мера из домена ергономије је да се радно окружење, алати неопходни за реализацију радних активности и радне активности прилагоде потребама радника како би се смањиле повреде на раду и професионалне болести, створило безбедније и пријатније радно окружење, побољшало физичко и ментално благостање и задовољство послом, продужио радни век и побољшао квалитет живота радника.

Ергономија и људски фактори имају кључну улогу у елиминисању штетних и небезбедних радних пракси у индустријском окружењу. Ова научна дисциплина се фокусира на разумевање способности и ограничења људи, примену теоријских аспеката у практичним условима како би се радно место прилагодило раднику, минимизирао физички и психички замор и побољшали радни услови (*Salunkhe* и други, 2019).

Према (*Valero* и други, 2016; *Park* и други, 2015) занемаривање ергономије негативно утиче на здравље, безбедност и добробит запослених. Недовољно усмеравање

пажње правилном дизајну радних места и опреме може довести до појаве мишићно-коштаних поремећаја, физичког умора, смањења продуктивности и повећања ризика од повреда на раду.

Према основним смерницама из области ергономије приликом обављања радних активности, неопходно је осигурати да радници заузму положај тела који захтева најмањи утрошак енергије и минимизира покрете радника. Радницима треба бити омогућено да обављају активности у физиолошком положају тела, како би се смањило физичко оптерећење. Основни принципи укључују прилагођавање радног места раднику, а не радника радном месту, што подразумева оптималан распоред опреме, алата и машина у складу са антропометријским и биомеханичким карактеристикама радника. Монотон и статички рад, који подразумева дуготрајно одржавање истог положаја тела, треба заменити динамичким активностима које омогућавају честе промене положаја тела.

Смернице указују да стојећи положај тела треба заменити седећим када год је то могуће, јер се на тај начин смањује оптерећење на мишиће и зглобове. Уколико је неопходно да се радне активности обављају у стојећем положају тела, треба избегавати прекомерно заузимање неприродних положаја тела како би се смањило физичко оптерећење. Пожељно је да се током извођења радних активности користе обе руке истовремено, а покрети руку треба да буду усклађени. Сви потребни предмети, компоненте и алати би требали бити позиционирани унутар видног поља радника, које подразумева 55° према горе, 45° према доле, и 60° лево и десно. Ово осигурава да радник не мора да изводи непотребне покрете главом и вратом, чиме се смањује физички замор и повећава продуктивност.

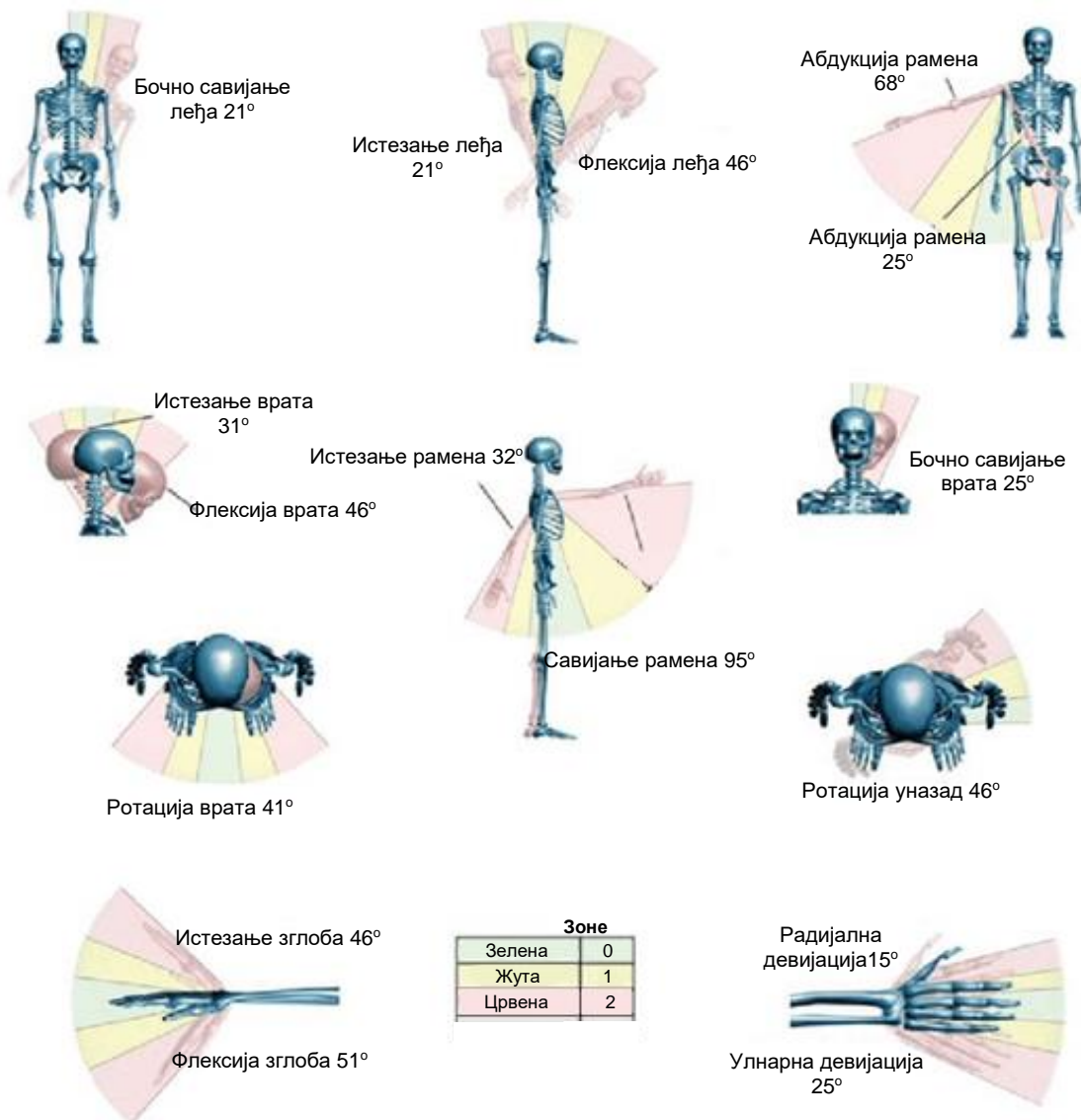
Ергономска оптимизација има важну улогу у побољшању ефикасности и ефективности радних станица за монтажу. Ергономска оптимизација подразумева прилагођавање радног простора, алата и опреме потребама и карактеристикама појединаца, како би се омогућило ефикасније и продуктивније обављање активности, побољшала безбедност и здравље радника. Аутори (*Salvendy*, 2001; *Qutubuddin* и други, 2012) су истакли позитивне ефекте примене ергономских принципа приликом дизајнирања радних места. Прегледом литературе закључено је да су на ергономски адекватно дизајнираним радним станицама оптимизоване перформансе радника, смањени дефекти и побољшан квалитет производа (*Baudin*, 2002; *Dul* и други, 2004). Како је истакнуто у раду чији су аутори (*Rivera-Rodriguez* и други, 2014) радно окружење дизајнирано у складу са ергономским принципима доприносе повећању продуктивности и побољшању квалитета производа. Такође, аутори (*Hamrol* и други, 2011; *Thun* и други, 2011) су истакли да имплементација активности из области физичке и организационе ергономије може смањити појаву грешака, а то даље има позитиван утицај на квалитет производа.

Аутор (*Buckle*, 2005) је указао на важност партиципативног приступа који укључује активно учешће радника у процесу дизајнирања и оптимизације радних места. Овај приступ омогућава да се узму у обзир стварне потребе и искуства радника, како би се креирала радна окружења која су боље прилагођена њиховим физичким и когнитивним капацитетима.

Посебна пажња мора бити посвећена анализи положаја тела и оптерећења на зглобовима током извођења различитих радних задатака. Неправилни положаји тела и дуготрајно излагање неповољним статичким позицијама представљају значајан фактор ризика за развој мишићно-коштаних поремећаја. Ергономска анализа радних станица омогућава идентификацију критичних тачака на телу радника које су највише изложене

напрезању током рада (*Battini* и други, 2014; *Sek* и други, 2017). Прилагођавање радног места и алата према специфичностима радних задатака може значајно смањити оптерећење на зглобове и смањити ризик од повреда.

На слици 2.10 приказани су најповољнији положаји за зглобове који су највише оптерећени у зависности од различитих типова радних задатака.



Слика 2.10 Најповољнији положаји за зглобове у зависности од обављања различитих типова радних задатака (*Bridger*, 2017)

Савијање рамена би требало да буде минимално, руке би требале да буду у природном положају поред тела, како би се избегло претерано напрезање. Обављање активности у златној зони омогућава да рамена остану у природном положају, без потребе за учесталим подизањем руку изнад нивоа рамена. Абдукција рамена (одмицање руке од тела) треба да буде сведена на минимум, јер свака активност која захтева ширење руку повећава оптерећење мишића рамена. Оптимално је да лактови буду што ближе телу.

Флексија леђа треба да се одвија под што мањим угловима. Најбољи положај за леђа је неутрални положај, без претераног савијања или окретања леђа у страну.

До истезања долази када се активности обављају у нефизиолошким положајима тела које захтевају поглед нагоре или бочно током дужег временског периода. Ово доводи до напрезања мишића врата и може изазвати бол и нелагодност. Савијање врата треба изводити тако да је глава у неутралном положају, са благим нагибом напред. Бочно савијање врата подразумева нагиб главе у страну, при чему се уво приближава рамену. Овај покрет може довести до напрезања врата и рамена па је пожељно да савијање буде под мањим углом. Претерано савијање врата (флексија) може довести до замора мишића и бола у пределу врата и горњег дела леђа. Ротација врата подразумева окретање главе улево или удесно. Најбоља опција је избегавање екстремне ротације врата и одржавање главе у неутралном положају што је дуже могуће, како би се смањио притисак на мишиће врата.

Истезање зглоба се везује за испружен положај шаке и прстију. Овај положај треба бити ограничен, јер прекомерно истезање зглоба може довести до тензије у зглобовима и тетивама руке. Флексија зглоба подразумева савијање шаке према унутра, према подлактици. Ови покрети треба бити сведени на минимум како би се избегло оптерећење флексорних мишића и здравствени проблеми попут синдрома карпалног тунела.

Радијална девијација је померање шаке ка палцу, односно према спољашњој страни подлактице. Овај покрет је природан, али претерана радијална девијација може довести до напрезања мишића. Уларна девијација представља померање шаке ка малом прсту, односно према унутрашњој страни подлактице. Слично као и код радијалне девијације, извођење ових покрета треба бити ограничен како би се спречило претерано оптерећење зглобова.

У табели 2.3 су приказана прихватљива оптерећења и број понављања у временском периоду од сат времена.

Табела 2.3 Прихватљива оптерећења и дозвољен број понављања унутар сваке зоне (Finnsgård и други, 2011)

зона	тежина терета који се подиже (у кг)			
Број понављања/h	1-10	10-30	30-60	60-
	12 кг	7 кг	3 кг	2 кг
	7 кг	5кг	2 кг	1 кг
	2.5 кг	2 кг	-	-

Као што се види са слике у зеленој зони могуће је понављати подизање терета до 12 килограма десет пута без значајног негативног утицаја на здравље радника. Жута зона, која обухвата простор до 50 cm, представља подручје у којем обављање активности може имати негативан утицај у зависности од броја понављања и трајања задржавања одређеног положаја тела. У овој зони није дозвољено исто оптерећење као у зеленој зони тј. терет треба бити мањи а учесталост подизања ређа. Црвена зона је зона у којој постоји највећи ризик од повреда на раду и професионалних болести посебно ако обављање активности у овој зони траје више од два сата дневно. Обављање активности у овој зони ће неизбежно имати негативан утицај на здравље радника.

2.7 ДОМЕНИ ЕРГОНОМИЈЕ

Разликују се три главна домена ергономије: физичка ергономија, организациона ергономија и когнитивна ергономија (*Stanton* и други, 2004).

Физичка ергономија се фокусира на проучавање односа између физичких аспеката и обављања радних активности. Овај аспект ергономије обухвата анализу анатомских, антропометријских, физиолошких и биомеханичких карактеристика субјеката које утичу на способност појединца да обавља радне задатке ефикасно и безбедно. Посебан фокус физичке ергономије је на анализи држања тела, елиминисању неергономских покрета, ергономској процени и дизајнирању радног окружења са циљем да се смањи ризик од поремећаја мишићно-коштаног система и повећа продуктивност. Основни циљ физичке ергономије јесте унапређење безбедности и здравља радника, смањење физичког оптерећења кроз пројектовање и организовање радних система. Ова грана ергономије има кључну улогу у стварању безбеднијег радног окружења, кроз смањење ризика од повреда на раду и професионалних болести.

Како истиче (*Hedge*, 2005) физичка ергономија представља један од најважнијих праваца у ергономским истраживањима. Узимајући у обзир чињеницу да радници обављају радне активности у неергономском положају тела у седећем или стојећем положају током дужег временског периода од посебне важности је дизајнирање радних окружења.

Организациона ергономија се бави оптимизацијом социо-техничких система. У овом домену ергономије кључне теме су тимски рад, организациона структура и организациона култура и управљање квалитетом. За разлику од физичке ергономије која проучава однос између човека и радног окружења, организациона ергономија бави се ширим аспектима радног окружења, који укључују организацију радних задатака, оптимизацију радног времена, тимски рад и побољшање протока информација међу члановима тима, смањење стреса и изгарања, као и повећање продуктивности. Организациона ергономија има значајну улогу у унапређењу радног окружења, повећању задовољства и мотивације радника, што дугорочно може имати позитиван утицај на пословне резултате.

Когнитивна ергономија, треће главно поље специјализације унутар ергономије, концентрише се на менталне процесе (као што су перцепција, размишљање и др.) у току интеракције између људи и осталих елемената система (*Zolotova* и *Giambattista*, 2019; *Dittmar* и други, 2021). Овај домен ергономије се бави истраживањем процеса који се одвијају у људском мозгу, а који могу имати утицај на понашање и перформансе запослених (*Parasuraman* и *Rizzo*, 2006; *Parasuraman*, 2011). Посебан нагласак је на истраживању како људски мозак обрађује информације и решава проблеме током обављања радних задатака и развоју стратегија за побољшање пажње и концентрације, смањење когнитивног оптерећења, управљање стресом и др.

Сва три типа ергономије остварују значајан допринос у унапређењу пословања кроз побољшање ефикасности и квалитета, побољшање безбедности и здравља радника, повећање задовољства, физичког и психичког благостања, смањење апсентизма и свих облика трошкова (слика 2.11). Когнитивна и физичка ергономија су постале доминантне области ергономије у новије време због све веће комплексности радних процеса и примене савремених технологија (*Norros*, 2014; *Savioja* и други, 2014).



Слика 2.11 *Бенефити интеграције физичке, когнитивне и организационе ергономије*

2.8 ЗЛАТНА ЗОНА

Приликом дизајнирања радне станице посебна пажња се посвећује антропометријским својствима радника како би радна станица била погодна истовремено за особе мушког и женског пола и како би радници обављали активности монтаже у оквиру златне зоне.

Златна зона представља област у нивоу струка радника у којој се извршавају мануелни радни задаци са минималним физичким напором и максималном ефикасношћу. Ова зона је веома значајна јер се у овој зони минимизују покрети, досезање материјала, истезање и савијање тела с обзиром да су сви предмети, материјали, компоненте и алати распоређени у висини струка радника. Како би се избегло лоше држање и неповољан положај тела радна површина и распоред материјала, компоненти и алата су прилагођени индивидуалним потребама сваког радника. Смањење покрета, савијања и истезања даље доприноси смањењу напора мишића и самим тим смањењу повреда на раду и професионалних болести (најчешће мишићно-коштаних обољења). У овој зони радници постижу највећу ефикасност и продуктивност.

На слици 2.12 је приказано радно место на коме радници обављају активности у вертикалном положају тела у оквиру „златне зоне“. Радно место је организовано у складу са ергономским смерницама прописаним правилницима и уредбама закона о безбедности и здрављу на раду. Све потребне компоненте и алати су распоређени по радној површини у складу са дохватом руке радника како би се елиминисало истезање руку и савијање тела приликом обављања монтажних активности. На овај начин смањује се физички напор и унапређује се опште здравствено стање и добробит радника а истовремено се повећава продуктивност.



Слика 2.12 *Обављање активности у оквиру златне зоне у вертикалном положају тела (Marković, 2022)*

Висина радне станице на којој се обављају активности прилагођена је висини радника, све потребне компоненте и средстава за рад се налазе на удаљености која није већа од дужине руке. Радни простор је адекватно осветљен тако да радник има потпуни преглед приликом обављања активности без додатног напрезања очију.

На слици 2.13 су приказане зелена и црвена зона на монтажној радној станици када радник обавља радне активности у стојећем положају.



Слика 2.13 *Златна зона на монтажној радној станици приликом обављања радних активности у стојећем положају (преузето са: <https://blog.item24.com/en/manual-production/overview-of-work-bench-design-in-production>)*

Тачка 1. указује на могућност подешавања полица са компонентама потребним за монтажу при чему радник у зависности од потреба може подесити висину и удаљеност која њему одговара. Тачка 2. се односи на висину стола која је подесива у зависности од потреба радника. Тачка 3. представља положај полица које су фиксиране за радну

станицу. Полице су на постављене у оквиру златне зоне, на дохват руке раднику а њихова висина не сме да премашу висину погледа радника када је у стојећем положају.

На слици 2.14 су приказане три зоне: црвена, жута и зелена приликом обављања активности у вертикалном положају.



Слика 2.14 Основне зоне (црвена, жута, зелена) (Finnsgård и други, 2008)

Зелена зона представља златну зону, односно идеалан радни простор у којем се радне активности одвијају уз минимални напор и највећу ефикасност. У оквиру ове области би требали да буду постављени делови, компоненте и алати који се најчешће користе како би се смањило физички напор и побољшала продуктивност. Жута зона је подручје које се налази изнад и испод зелене зоне (cm). У овој зони се постављају предмети који се ређе користе. Црвена зона представља најнеповољније подручје за обављање активности. У овој зони се постављају предмети и алати који се веома ретко користе јер њихово хватање захтева истезање тела или подизање руку изнад рамена, што значајно повећава ризик од настанка професионалних обољења и смањује ефикасност.

На слици 2.15 је приказана златна зона приликом обављања активности у седећем положају. Као што се види са ове слике радница обавља активности у оквиру златне зоне. Сви потребни делови и компоненте су распоређени да буду на дохват руке без потребе за савијањем и истезањем тела.

На слици 2.15 су приказане карактеристичне тачке. Тачком 1. су представљене позиције полица на којима се налазе класери. Сви класери са деловима и компонентама неопходним за монтажу су распоређени у оквиру златне зоне. Класери су распоређени на висини која је у складу са видним пољем радника који обавља монтажне активности у седећем положају при чему удаљеност класера није већа од дужине руке како радник не би истезао тело приликом преузимања компоненти. Класери су у различитим бојама ради лакшег разликовања компоненти које се налазе у њима и које је потребно монтирати. Тачка 2. представља позицију светла које мора бити адекватно и имати могућност подешавања. Светло мора имати опцију окретања лево - десно или горе - доле како би била обезбеђена довољна количина светлости и како би се избегло напрезање очију.

Тачка 3. представља висину помоћних транспортних система. Тачка 4. се односи на висину монтажне радне станице која је подесива и усклађена са антрополошким карактеристикама радника. Посебан фокус је на дистанци између радне површине и столице. Тачка 5. је везана за висину столице која такође има могућност подешавања у зависности од висине радника и сразмерна је висини радне станице на којој радник обавља активности како би положај кичме био ергономски.



Слика 2.15 Обављање активности у оквиру златне зоне у седећем положају (Marković, 2022)

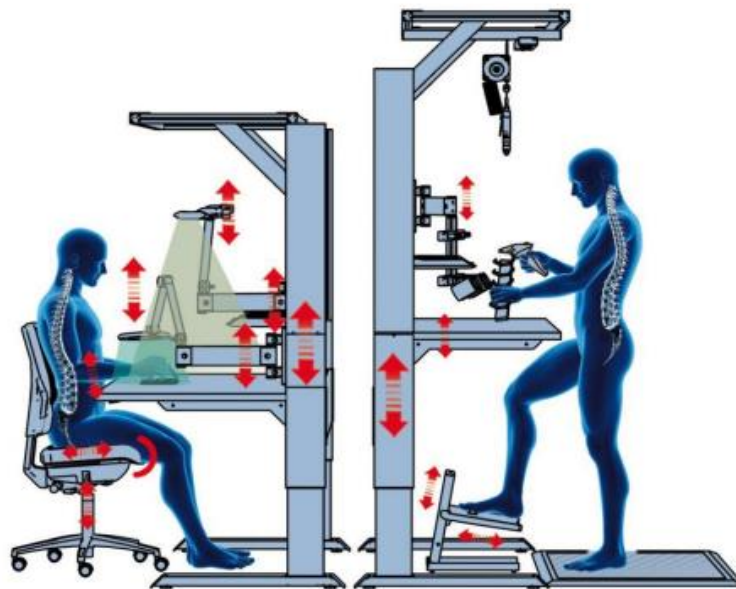
На слици 2.16 је приказана златна зона на монтажној радној станици када радник обавља активности у седећем положају.



Слика 2.16 Златна зона на монтажној радној станици када радник обавља активности у седећем положају (преузето са: Ergonomic sitting at industrial workbenches, <https://blog.item24.com/en/workbenches/ergonomic-sitting-at-industrial-workbenches>)

На слици 2.17 је приказана радна станица која омогућава раднику да активности обавља у ергономском положају тела у седећем и стојећем положају. На левој страни је приказан пример радне станице на којој радник обавља активности у седећем положају а на десној страни је приказана радна станица на којој радник обавља активности у

стојећем положају. Црвеним стрелицама на радној станици приказани су смерови у којима се висина стола може померати односно прилагођавати антропометријским карактеристикама особе која обавља монтажне активности. Монтажне активности подразумевају константно извођење покрета рукама. Радна столица такође има опцију подешавања висине. На радној станици је постављена подесива платформа за ноге, која служи за одмарање и смењивање ногу како би се смањило притисак на вене и смањила напетост у ногама.



Слика 2.17 Златна зона рада за седећи и стојећи положај тела (преузето са: <https://ergoimpuls.com/industrie>)

2.9 РУЛА МЕТОДА

Процена ергономског ризика има за циљ идентификацију и смањење потенцијалних опасности које могу довести до мишићно-коштаних поремећаја и других здравствених проблема код радника (Colombini, 2002). Овај процес обухвата анализу радног места, радних задатака и положаја тела и покрета радника како би се утврдило који фактори доприносе прекомерном оптерећењу и напрезању мишића. На основу резултата процене, могу се предложити и имплементирати одговарајуће ергономске мере у циљу прилагођавања радне станице, алата и опреме потребама и захтевима радника. За процену ризика од мишићно-коштаних обољења у радном окружењу, користе се различите методе.

Најзначајније су:

- RULA (*Rapid Upper Limb Assessment*),
- REBA (*Rapid Entire Body Assessment*),
- NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*),
- DMQ (*Dutch Musculoskeletal Questionnaire*),
- QEC (*Quick Exposure Checklist*),
- OCRA (*Occupational Repetitive Action*).

РУЛА метода коју су развили *McAtamney* и *Corlett* 1993. године представља једну од најцитиранијих и најчешће коришћених метода за процену ергономског ризика на радним местима (*McAtamney* и *Corlett*, 1993). РУЛА представља брзу методу процене ергономских ризика која омогућава брзу ергономску процену горњих екстремитета и праћење положаја тела, покрета и примене силе у току обављања активности у стојећем или седећем положају у циљу смањења изложености ризику од појаве мишићно-коштаних поремећаја.

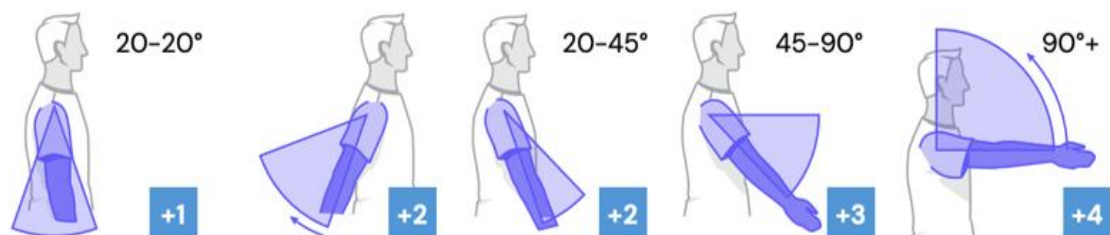
РУЛА метода узима у обзир више фактора ризика, укључујући положаје тела, број покрета, понављање одређених покрета, трајање активности, ангажовање мишића, примену силе, увођење пауза током обављања активности. Како би се прецизно анализирао ризик од настанка мишићно-коштаних поремећаја тело се дели у две групе:

Група А обухвата горње удове, укључујући руке, подлактице и зглобове. Ови делови тела се детаљно анализирају како би се утврдили ризици повезани са заузимањем одређених положаја руку, учесталост покрета и применом силе.

Група Б укључује врат и труп. Фокус је на анализи ризика који произилазе из заузимања статичних или нефизиолошких положаја тела током дужег временског периода.

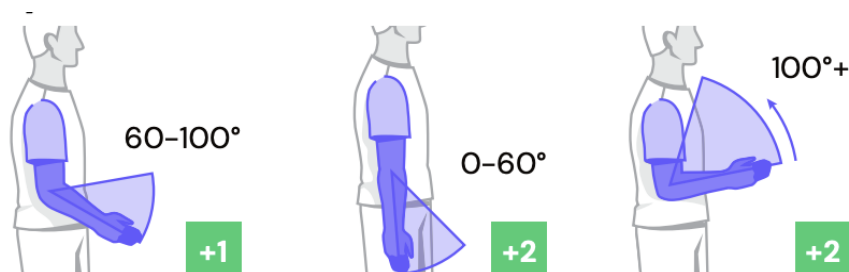
РУЛА метода укључује:

- Анализу положаја надлактице:



Приликом процене положаја надлактице ако је раме подигнуто додаје се +1 и ако је надлактица одмакнута од тела додаје се +1 а ако је рука ослоњена или се особа наслања смањује се -1. Након анализе положаја врши се процена флексије или екстензије рамена и уписује се оцена између 1 и 6. На пример ако је раме савијено за нешто мање од 90 степени, додаје се +3.

- Анализу положаја доњег дела руке:

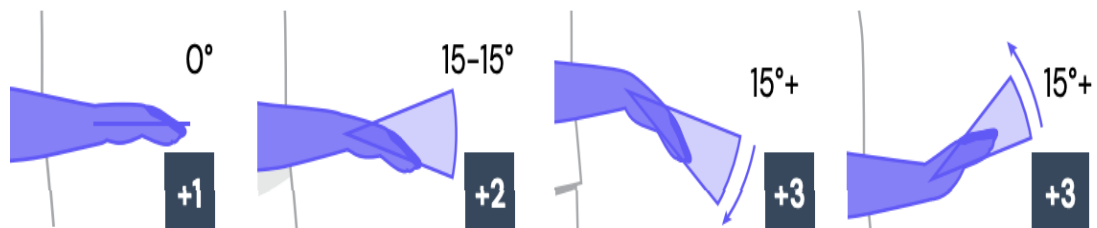


Ако се било која рука подиже или спушта изнад или испод средње линије тела, или ако се рука постави са једне стране тела, додатно се додаје +1 поен у скали процене. Процена савијања лакта према РУЛА методи узима у обзир угао савијања у односу на средњу линију тела. Оцена за овај положај се додељује на скали од 1 до 3, зависно од

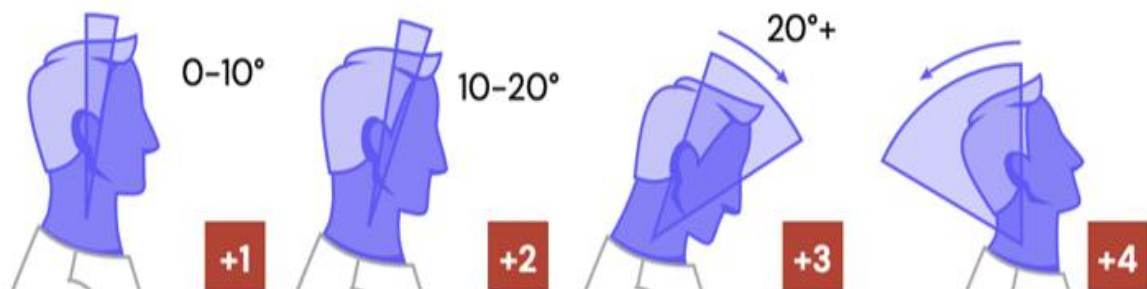
степену савијања. На пример, ако је лакат савијен за мање од 60 степени, додаје се +2. Ако је лакат у скоро потпуно исправљеном положају, додаје се +1. Ако је савијање преко 100 степени или значајно одступа од неутралне позиције, додаје се +3.

- Анализу положаја зглоба:

Процена положаја зглоба руке узима у обзир савијање (флексију или екстензију) и девијацију зглоба у односу на средњу линију тела. Оцена се даје на основу степена кретања зглоба и може се кретати између 1 и 4. На пример ако је зглоб савијен за више од 15 степени (у флексији или екстензији), додаје се +3. Ако је зглоб у неутралној позицији или благо савијен, додаје се +2. Ако је присутна значајна девијација зглоба, као што је улнарна или радијална девијација (одступање у страну), додаје се +1.

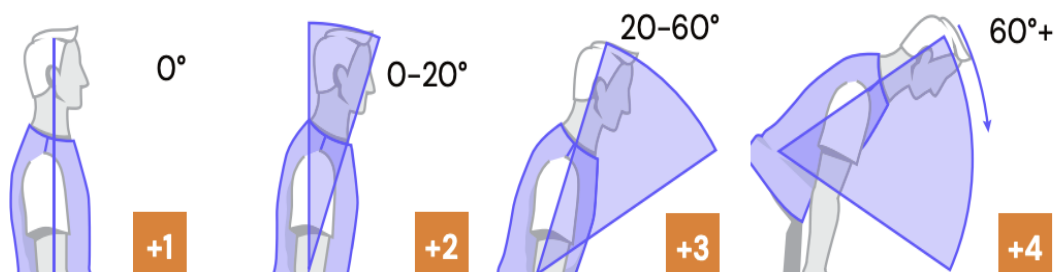


- Анализу врата:



Процена положаја врата узима у обзир флексију или екстензију, као и увијање или бочно савијање врата. Оцена се уписује на основу степена покрета и може се кретати од 1 до 6. Ако је присутно увијање врата, додаје се +1, а ако се врат савија бочно, такође се додаје +1.

- Анализу трупа:



Процена флексије или екстензије трупа врши се на основу степена савијања напред или назад, као и да ли је било увијања или бочног савијања трупа. Оцена се даје у опсегу од 1 до 6, у зависности од положаја трупа. Ако је труп уврнут, додаје се +1 а у случају да се труп бочно савија, такође се додаје +1.

На крају се сумирају резултати. Оцене указују на следеће:

- **Оцена 1 и 2** (зелена боја) - положај тела је прихватљив ако се не одржава или понавља током дужег временског периода. У овом случају нема потребе за увођењем промена.
- **Оцена 3 и 4** (жута боја) - потребно је спровести даља истраживања, јер постоји могућност да ће бити потребно увођење промена.
- **Оцена 5 и 6** (наранџаста боја) - указује на неопходност даљих истраживања и увођењу промена у блиској будућности, јер постоје значајни ергономски ризици.
- **Оцена 7** (црвена боја) - положај је са ергономског аспекта неприхватљив и неопходно је одмах спровести детаљна истраживања и измене како би се спречили мишићно-коштани поремећаји и друге професионалне болести.

2.10 ИНТЕГРАЦИЈА ЕРГОНОМИЈЕ И LEAN ФИЛОЗОФИЈЕ У ЦИЉУ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА И ПОБОЉШАЊА БЗР

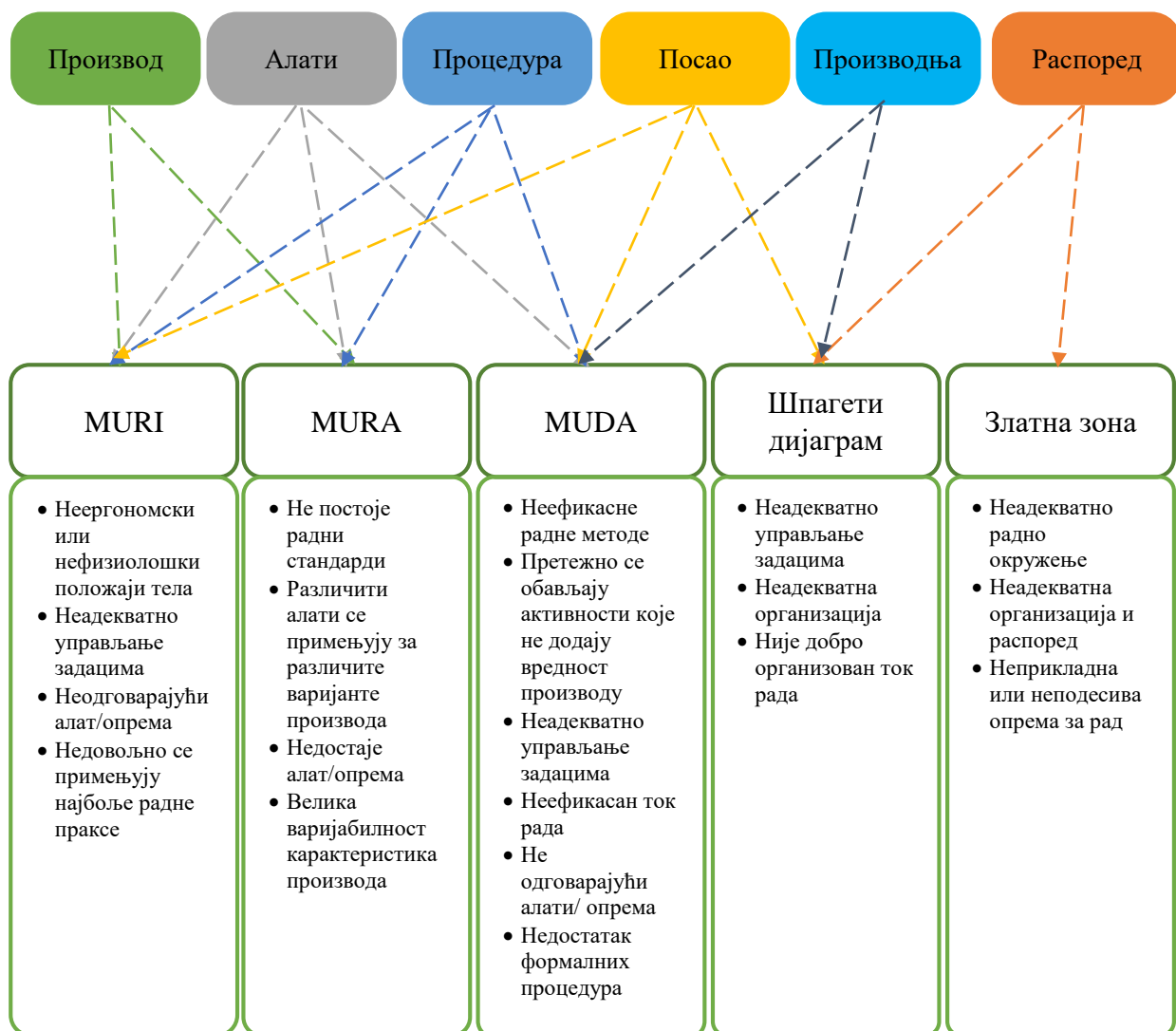
Савремени индустријски системи све више препознају значај оптимизације радног окружења као кључног фактора за повећање ефикасности и добробити радника. У научно-истраживачким радовима је показано да перформансе радника у великој мери зависе од ергономских услова (*Wygant* и други, 1993; *Resnick* и *Zanotti*, 1997; *Shikdar* и *Sawaqed*, 2004; *Dul* и други, 2004; *Xu* и други, 2012). Правилно дизајнирани радни услови доприносе смањењу физичког и менталног оптерећења радника и смањењу ризика од настанка поремећаја мишићно-коштаног система.

Традиционалне радне станице у реалном индустријском окружењу нису пројектоване у складу са ергономским принципима тако да радници обављају радне активности у неергономском положају тела што проузрокује настанак бројних професионалних болести (најчешће мишићно-коштаних поремећаја). Неадекватно постављене компоненте и алати на радној површини приморавају раднике да улажу додатне напоре како би ефикасно обавили радне задатке.

Неергономски пројектоване радне станице могу значајно утицати на физичко и психичко оптерећење радника и допринети смањењу ефикасности и повећању грешака. Према аутору (*Axelsson*, 2000; *González* и други, 2003) занемаривање потреба и захтева радника доприноси смањењу ефикасности. Неадекватни ергономски услови доводе до смањења продуктивности и квалитета производа (*Erdinc* и *Vayvay*, 2008). Резултати студија које су спровели аутори (*Lin* и други, 2001) показали су да је 30-50% дефеката проузроковано неадекватним ергономским условима. Сличну студију је спровео аутор (*Axelsson*, 2000) и показао да се 80% грешака догодило када су радне активности обављане у неергономским условима.

Решење за представљене проблеме се налази у редизајнирању радних станица кроз примену ергономских принципа и оптимизацију радних процеса. Примена ергономских и *lean* принципа има значајну улогу побољшању ефикасности производних процеса.

На слици 2.18 су представљени главни проблеми који настају уколико радна места нису дизајнирана у складу са ергономским и *lean* принципима и веза са алатима производње светске класе.



Слика 2.18 Проблеми који настају уколико се радна места дизајнирају без узимања у обзир ергономских и *lean* принципа и веза са алатима производње светске класе (Ciccarelli и други, 2022)

Све врсте губитака могу да се класификују у три групе, што је у литератури познато под називом 3М:

- Muda (енгл. *waste*) - губици
- Muri (енгл. *overburden*) - преоптерећење
- Mura (енгл. *inconsistency*) - неусаглашеност

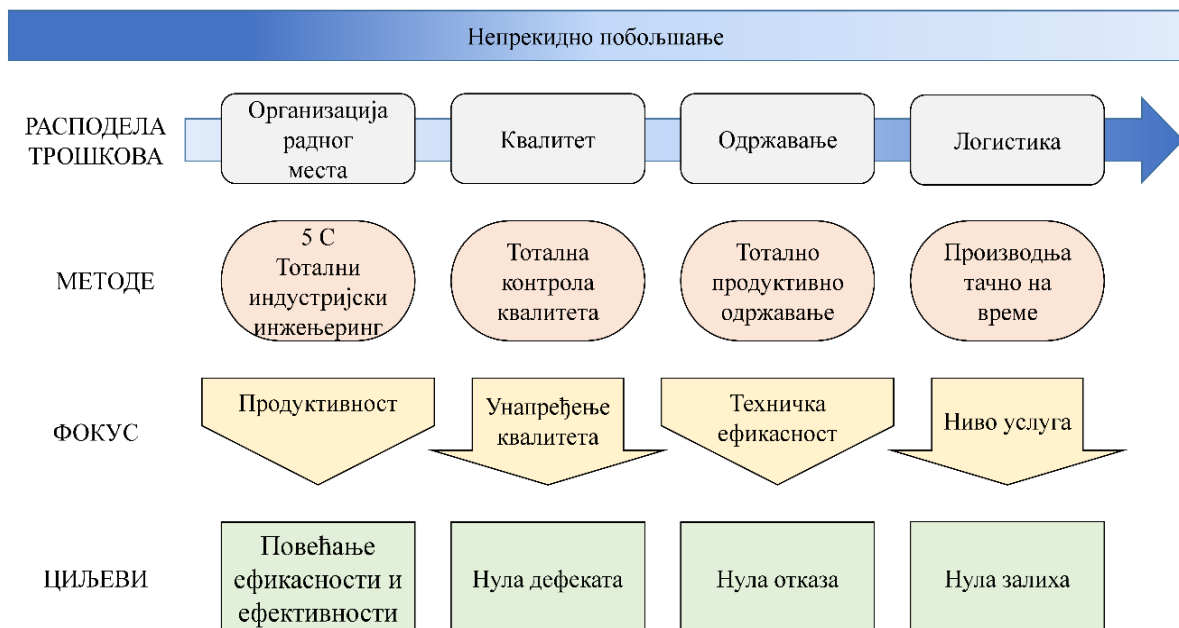
Муда представља расипање ресурса, односно извођење активности које не додају вредност у производном процесу. У контексту ергономије, посебна пажња се посвећује елиминисању непотребних покрета и нефизиолошких положаја тела.

Мури се односи на претерано оптерећење радника што може довести до повећања дефеката и смањења ефикасности. У контексту ергономије, посебан нагласак је на оптимизацији радних процеса и распоређивању потребних делова, компоненти и алата у златну зону како би се елиминисало физичко и ментално оптерећење.

Мура је везан на неравнотежу, неуједначеност и варијације у производњи. Уклањање варијација у корацима, активностима и смањење времена обављања радних задатака може довести до смањења оптерећења и замора, и повећања продуктивности.

Ергономски приступ у дизајну радних места подразумева оптимизацију радних задатака и окружења како би се умањили негативни ефекти на раднике и побољшале перформансе. Ергономија се фокусира на адаптацију радних услова потребама како би се смањило физичко и ментално оптерећење радника, елиминисале повреде на раду и побољшало опште здравствено стање и задовољство радника. У контексту ергономије, примена *lean* концепта подразумева унапређење радних места у циљу елиминације свих здравствених проблема који настају услед неефикасног распоређивања потребних делова, компоненти, алата, заузимања нефизиолошких положаја тела, извођења непотребних покрета и др (Santos и други, 2019). Посебан нагласак је на континуираном унапређењу радног процеса, редизајнирању радних места и прилагођавању индивидуалним карактеристикама радника. У *lean* концепту пословања, фокус је на обављању само оних активности које додају вредност и елиминисање свих облика губитака и непотребног расипања. Све активности које не доприносе директно стварању вредности за крајњег корисника се у контексту *lean* филозофије сматрају губицима.

Производња светске класе подразумева примену најбољих пракси и метода у организацији производних процеса, са циљем постизања врхунског квалитета, продуктивности и ефикасности. Основни циљ је оптимизација свих аспеката производног процеса (слика 2.19).



Слика 2.19 Структура и циљеви производње светске класе (прилагођено према Маџић и Ђаран, 2016)

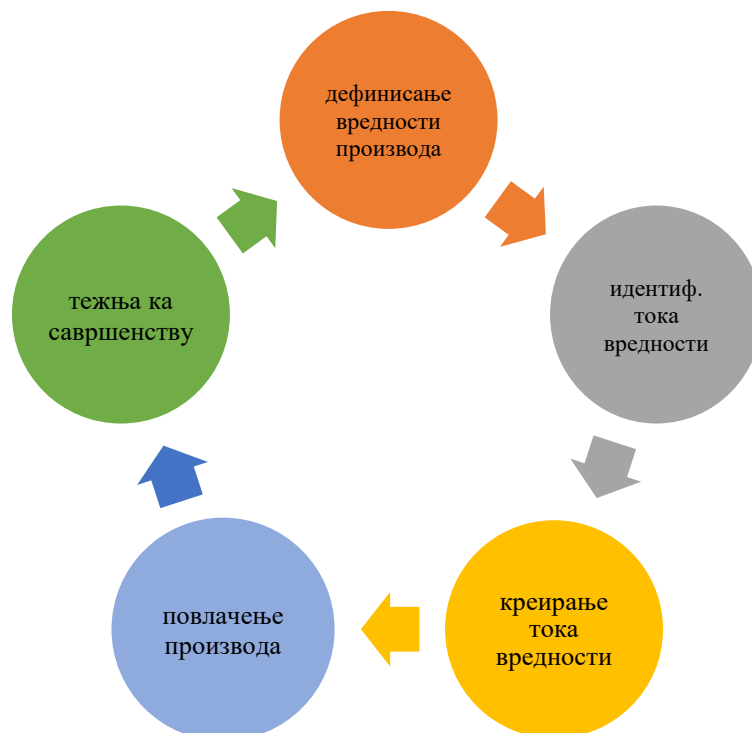
Кључни елементи структуре и циљева овог приступа могу се представити кроз стварање уређеног, функционалног и ефикасног радног простора, чиме се омогућава несметан ток процеса и смањење губитака. Континуирано одржавање опреме и примена метода као што је тотално продуктивно одржавање осигуравају непрекидано функционисање производних линија. Превентивне и корективне мере осигуравају минимизирање неправилности и постизање нултог броја дефеката. Повећање

продуктивности постиже се кроз рационализацију процеса, елиминацију губитака и побољшање ефикасности.

Lean филозофија се базира на дугорочном креирању вредности купцима, минимизирању отпада и непотребних активности које повећавају време производње и проузрокују појаву трошкова, континуираном унапређењу процеса и перформанси радника (*Bhamu* и *Singh*, 2014). *Lean* филозофија подржава стварање организационе културе у којој су запослени активно укључени у идентификацију проблема и предлагање решења, чиме се доприноси сталном побољшању процеса.

Пет основних принципа *lean* производње су (*Mačuzić* и *Đaran*, 2016) (слика 2.20):

- Дефинисање вредности производа (енгл. *identify value*)
- Идентификација тока вредности производа (енгл. *map the value stream*)
- Креирање тока вредности производње (енгл. *create flow*)
- Повлачење производа кроз целу производњу тј. примена pull система (тј. производња производа у количинама које се захтевају од стране купаца (енгл. *establish pull*)
- Тежња ка савршенству (енгл. *seek perfection*).



Слика 2.20 Пет основних *lean* принципа (*Mačuzić* и *Đaran*, 2016)

Интеграција ергономских и *lean* принципа у савременим индустријским окружењима представља кључну стратегију ка повећању продуктивности радника, побољшању ефикасности радних процеса и побољшању безбедности и здравља радника. Аутори (*Eswaramoorthi* и други, 2010; *Temple* и *Adams*, 2000, *Russell* и други, 2007, *Cimino* и други, 2009) су указали на важност редизајнирања постојећих радних станица комбинацијом ергономских метода и *lean* алата. Основни фокус је на обављању само оних активности које додају вредност, уз истовремено елиминисање свих облика губитака. Ово даље доприноси оптимизацији процеса, повећању ефикасности,

побољшању квалитета финалних производа, смањењу дефеката и трошкова. Интеграција *lean* принципа са ергономским принципима доприноси побољшању безбедности и здравља радника кроз смањење ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја и других професионалних обољења, повећању продуктивности и смањењу дефеката (*Erismann* и *Wick*, 1992; *Salvendy*, 2001; *Qutubuddin* и други, 2012; *Nunes* и *Machado* (2007).

Аутори радова (*Neumann* и *Dul*, 2010 и *Imada*, 1990) су показали да примена ергономских принципа може унапредити безбедност и здравље радника кроз смањење повреда на раду и професионалних болести. У студијама које су спровели аутори (*Gerr* и други, 2014) је показано да примена ергономских принципа на радним станицама за монтажу доприноси смањењу повреда на раду и побољшању здравственог стања радника. Такође, аутори су у радовима (*Quiroz* и други, 2021; *Suarjana* и други, 2022) показали да се редизајнирањем радних станица и комбиновањем ергономије са *lean* алатима минимизирају мишићно-коштани поремећаји и друге професионалне болести.

Побољшање ефикасности радних процеса и смањење физичког напрезања радника постижу се детаљном анализом кретања и активности које радници обављају у радном окружењу. Шпагети дијаграм као *lean* алат подразумева графички приказ и визуализацију кретања радника током обављања радних активности како би се идентификовало непотребно кретање и покрети који укључују напрезање радника. Нагласак је на оптимизацији тока рада и смањењу ризика од појаве професионалних болести.

У раду чији су аутори (*Hernandez-Arellano* и други, 2015) је указано на важност дизајнирања радне станице у складу са ергономским принципима и стандардима златне зоне. Златна зона представља најповољнији радни простор у којем радници изводе радне активности без потребе за савијањем и истезањем тела или подизањем руку изнад нивоа рамена. Постављање најчешће коришћених делова, компоненти и алата значајно смањује физички напор и повећава ефикасност радника. Аутор (*Muhundhan*, 2013) истиче да организација радних места уз уважавање ергономских принципа доприноси повећању продуктивности и побољшању квалитета производа.

У фабрици будућности људи су главни актери у процесу сталног унапређења и стварања додате вредности. Из овога произлази потреба да индустријски системи прихвате приступ који је усмерен на људе и побољшање њихове безбедности и здравља. У већем броју студија и научно-истраживачких радова је показано да интегрисање иновативних напредних технологија Индустрије 4.0 са ергономским и *lean* принципима доприноси побољшању безбедности и здравља радника који обављају мануелне, понављајуће, физички захтевне монтажне активности на радним станицама (*Schwab*, 2016; *Battini* и други, 2020; *Pinzone* и други, 2020). Такође, као бенефит се према ауторима (*Colim* и други, 2021a) може истаћи повећање ефикасности које се постиже кроз смањење времена производње и смањење грешака.

2.11 УЛОГА ЕРГОНОМИЈЕ У ПОБОЉШАЊУ ЕФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА

Постизање потпуног задовољства купаца највишим квалитетом производа представља један од главних циљева савремених производних организација. Како би одржале конкурентну предност и повећале удео на тржишту у савременом конкурентном и тржишно оријентисаном пословном окружењу, организације теже да побољшају ефикасност производних процеса и унапреде квалитет финалних производа елиминисањем дефеката и неправилности. Квалитет производа постаје све важнији аспект пословања у савременом пословном окружењу. Побољшање квалитета производа даље доприноси побољшању ефикасности и продуктивности, смањењу трошкова итд.

У циљу постизања високог нивоа квалитета производа и повећања задовољства купаца, примењују се следећи приступи:

- смањење производа лошег квалитета - кроз унапређење производних процеса, напредну контролу квалитета и имплементацију стандарда квалитета.
- смањење прекомерне обраде производа - оптимизацијом процеса и елиминацијом непотребних корака у обради, чиме се смањују трошкови и побољшава ефикасност производње.
- смањење количине отпада у току производног процеса - увођењем lean принципа идентификују се и елиминишу активности које не додају вредност производу.
- смањење жалби купаца - кроз праћење повратних информација од купаца.

Кључни аспект јесте идентификација и елиминација узрока настанка неусаглашености, чиме се обезбеђује поузданост и конзистентност производног процеса. Прелазак са корективног концепта (контрола квалитета) на проактивни концепт (обезбеђење квалитета) омогућава унапређење свих аспеката производног процеса.

Да би се произвео финални производ одговарајућег нивоа квалитета, неопходно је да се монтажне активности обављају коректно. Виши ниво усаглашености постиже се смањењем неправилности и прекомерне обраде. Од суштинске је важности да организације испуне захтеве, потребе и очекивања купаца. Савремени купци захтевају јединствене и персонализоване производе са више варијација. Традиционалне монтажне радне станице које су биле карактеристичне за *Ford*-ову организацију не могу се применити у савременом индустријском окружењу. Персонализација није била велики изазов у прошлости, јер је већина произвођача функционисала према филозофији *Henry Ford*-а: „Можете добити било коју боју, све док је црна.“ Персонализација се односи на јединствену вредност коју купци препознају као кључни аспект у задовољавању њихових индивидуалних потреба.

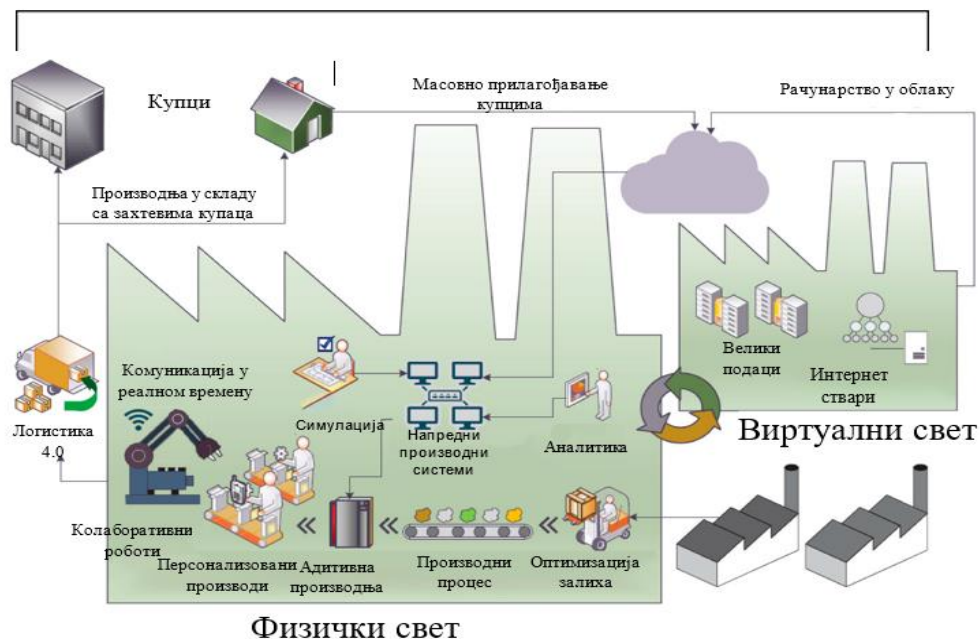
Мануелна производња је доживела потпуни преображај увођењем машина у производне процесе. Примена парних машина омогућила је значајно повећање обима производње. Овај период карактерише увођење механизације у производне процесе при чему су ручни рад и занатска производња постепено замењени аутоматизованим методама.

Мануелна производња, посебно израда стандардизованих делова, захтевала је улагање напора. Употреба машина значајно је олакшала и убрзала процес израде стандардизованих делова, што је подстакло развој масовне производње. Овај период се везује за истраживања у циљу оптимизације производних процеса. Фокус тих истраживања био је на повећању продуктивности, смањењу трошкова и побољшању квалитета производа кроз бољу организацију рада.

Adam Smith је анализирао могућност повећања продуктивности кроз поделу рада и специјализацију у фабрици за производњу чиода. Он је закључио да у случају када један радник обавља цео процес производње чиода, тај радник може произвести највише 20 чиода дневно. Међутим, ако се процес производње подели на 18 једноставнијих операција, 10 радника може произвести чак 48.000 чиода дневно. Проучавање рада је једна од најчешће коришћених метода за одређивање стандардног времена потребног за извршење одређеног радног задатка на основу детаљне анализе садржаја рада, при чему се узимају у обзир фактори као што су умор радника и индивидуалне потребе. Анализа времена има за циљ да обезбеди прецизне податке о времену потребном за обављање одређених радних операција, чиме се омогућава ефикаснија организација радног процеса, планирање производње и постављање реалних стандарда.

Frederick Taylor, *Frank* и *Lillian Gilbreth* су проучавали перформансе радника кроз анализу радних задатака и времена, са циљем да смање време циклуса за радне задатке који се понављају. Они су се фокусирали на примену научних принципа у проучавању рада ради постизања максималне ефикасности и продуктивности кроз прецизну анализу и оптимизацију свих аспеката производног процеса, оптимизацију односа између излазних и улазних параметара, односно, на проналажење начина да се уз исту или мању количину ресурса произведе више резултата. Према овом приступу сваки аспект рада може бити проучен научним методама како би се одредили најефикаснији покрети и технике за обављање сваког задатка. Ово је подразумевало мерење времена потребног за извођење различитих радних задатака и уклањање непотребних покрета. *Taylor* је сматрао да се радни процеси требају поделити на мале, поједностављене задатке које радници могу да изводе ефикасно. Њихова истраживања су утицала на развој научног менаџмента и поставила темеље за развој савремених метода за анализу и оптимизацију производње.

Индустрија 4.0 је унела значајне промене у управљању квалитетом, што је истакнуто кроз термин Квалитет 4.0. Квалитет 4.0 подразумева примену дигиталних технологија за побољшање управљања квалитетом, инспекције и контроле производних процеса. Филозофија Квалитета 4.0 је усредсређена на производњу са минималним дефектима и максималном ефикасношћу (*Хи* и други, 2021) (слика 2.21).



Слика 2.21 Улога технологија Индустије 4.0 у управљању квалитетом

Развој нових технологија Индустије 4.0 остварује свеобухватан утицај на традиционалне методе и праксе управљања квалитетом (*Sader* и други, 2022). Бенефити примене нових технологија Индустије 4.0 се огледају у минимизацији неправилности и дефеката, повећању ефикасности и побољшању квалитета финалног производа (*Javaid*, 2021; *Jacob*, 2017). Квалитет 4.0 као и *lean* филозофија подстиче културу сталног побољшања и постизање нула дефеката и неправилности на радним станицама за монтажу.

Интеграција сајберфизичких система, Интернета ствари и аналитике великих података значајно је проширила потенцијал *lean* производње, омогућавајући континуирани мониторинг кључних параметара у производњи и оптимизацију процеса у реалном времену. Ови напредни технолошки системи омогућавају прикупљање и анализу велике количине података, што доприноси прецизнијем идентификовању потенцијалних неусаглашености и повећању квалитета производа (*Belli* и други, 2019).

Квалитет 5.0 представља значајан помак од традиционалног реактивног модела контроле квалитета, који се углавном фокусира на идентификацију и корекцију недостатака након што се појаве. Овај нови концепт подразумева проактиван приступ, заснован на предиктивној аналитици и прилагођавањима у реалном времену, са циљем спречавања дефеката пре него што се уопште појаве.

У научно-истраживачким радовима је указано на позитивне ефекте примене ергономских принципа приликом дизајнирања радних места и радног окружења (*Anon*, 2005; *Cimino* и други, 2009). Применом мера из домена физичке, когнитивне и организационе ергономије минимизирају се негативни утицаји из радног окружења на људе и омогућава се сваком раднику да максимизира свој допринос (*Qutubuddin* и други, 2013). Дизајнирање радног окружења у складу са потребама радника може значајно допринети перформанси радника и оптимизацији система у целини (слика 2.22).



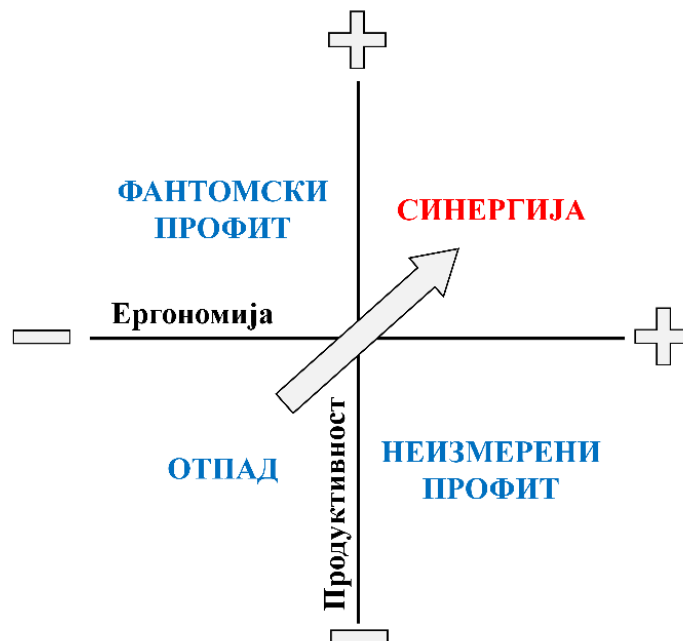
Слика 2.22 Ефекти примене ергономских принципа приликом дизајнирања радног окружења на перформансе

Како истичу аутори (*Battini* и други, 2020; *Burri* и *Holander*, 1991) постизањем оптималног односа између захтева и потреба радника и радног окружења у којем се

обављају активности повећава се са једне стране ефикасност и продуктивност, а са друге стране, повећава се физичко и ментално благостање.

Аутори (*Cimino* и други, 2008; *Dainoff*, 2002) истичу да примена ергономских принципа у дизајнирању индустријских радних станица значајно доприноси повећању продуктивности радника. У студијама које су спровели аутори (*Das* и други, 2007; *Eswaramoorthi* и други, 2010) показано је да је продуктивност радника након увођења ергономских принципа значајно побољшана.

Аутори (*Erdinc* и *Vayvay*, 2008) су показали да су након примене ергономских принципа побољшане перформансе радника и унапређен квалитет финалних производа. Аутори (*Axelsson*, 2000) су указали на корелацију између ергономије и квалитета производа. Сprovedено истраживање је показало да су дефекти смањени за чак 90% након ергономске оптимизације. Слика 2.23 илуструје једноставан дводимензионални модел који показује како ергономски дизајн може довести до двоструког добитка (горњи десни део модела).



Слика 2.23 Дводимензионални модел (преузето из: *Neumann*, 2004)

Примена ергономских принципа може допринети повећању продуктивности (доњи десни део модела) а недовољно посвећивање пажње ергономским аспектима може негативно утицати на продуктивност, што може довести до такозваног „фантомског профита“ (горњи леви део модела), односно илузорне добити која се неће остварити због проблема у домену ергономије. Стога, посебна пажња мора бити посвећена идентификацији и квантификацији ергономских ризика и примени ергономских мера.

Редовно праћење и анализа кључних индикатора перформанси омогућавају идентификацију потенцијалних проблема и континуирано унапређење како би се постигли оптимални резултати и повећала ефикасност производног процеса.

Ефикасност производних процеса представља један од основних показатеља успешног пословања организације. Ефикасност се изражава као однос остварених ефеката (вредносно изражених) и уложене количине рада и пореди се са објективним планираним циљевима. Ефикасност радника се повећава са смањењем времена такта и радног циклуса.

$$\text{ефективност} = \frac{\text{ефекти (вредносно изражени)}}{\text{количина рада}}$$

Ефективност је један од основних циљева *lean* производње. *Lean* производња представља скуп принципа и пракси који имају за циљ да максимизирање ефикасности и ефективности у производним процесима кроз елиминисање активности које не додају вредност и смањење непотребних трошкова чиме се побољшава квалитет производа и конкурентност на тржишту.

Време такта, време циклуса, дефекти и рад у току су кључни параметри процеса монтаже. Време такта се односи на брзину производње и представља време које је потребно да се произведе један производ како би се задовољила потражња купаца. Овај показатељ указује на учесталост производње производа или дела производа на радној станици како би се задовољила тражња купаца. Време такта омогућава да се производни процес синхронизује са реалном потражњом на тржишту, чиме се избегава нагомилавање залиха и осигурава оптимална употреба ресурса. Време такта дефинише ритам производње и одређује временски интервал који протекне између производње готових производа на излазу радне станице за монтажу. Израчунава се као однос између укупног радног времена у току дана (умањеног за трајање паузе) и броја производа који захтева тржиште односно као однос расположивог радног времена и потражње од стране купаца.

$$\text{време такта} = \frac{\text{укупно расположиво радно време}}{\text{потражња од стране купаца}}$$

при чему је, укупно расположиво радно време = трајање смене - паузе.

Повећање времена такта може указати на повећање физичког и менталног оптерећења радника.

Радни циклус (енгл. *cycle-time*) представља стварно време које је потребно да се заврши један производни циклус или произведе једна производна јединица. Време циклуса је заправо стварно време потребно да један производ прође кроз одређени сегмент производње или кроз целу производну линију односно то је време које производ проведе у процесима производње и монтаже. Док време такта одређује циљну брзину производње, време циклуса показује колико брзо заиста радници могу да обаве радни задатак. Ово време директно утиче на време испоруке, што је кључни фактор за задовољство купаца. Што дуже производ остаје у производном процесу, то је дужи рок испоруке, што може негативно утицати на репутацију организације.

Време циклуса се заснива на расположивости целокупног производног процеса. У сваком процесу неопходно је да се дефинише време циклуса како би се испунили захтеви (дефинисани *takt-time*-ом). Аутори (*Bauters* и други, 2018) истичу да је време циклуса један од најважнијих индикатора јер је овај индикатор директно повезан са продуктивношћу. У идеалном случају вредност радног циклуса треба да буде мања у односу на дефинисано време такта. Уколико је време циклуса дуже од времена такта, то указује на потенцијалне застоје у процесу који захтевају оптимизацију. У концепту *lean* производње, кључно је да се време циклуса одржава у складу са временом такта како би се избегли губици и обезбедио континуитет производње.

Приликом уравнотежења производње честа појава јесте да се време циклуса не узима у разматрање, и такав приступ има за последицу један од губитака - прекомерна производња. Прекомерна производња односи се на производњу делова или компоненти које се не уграђују у финални производ. На овај начин заузима се простор у производним погонима, повећавају се трошкови складиштења, смањује се ефикасност и ремети континуирани ток производње што негативно утиче на целокупан производни систем.

Lead време представља време потребно да један производ прође кроз целокупан производни процес, од почетка до краја (Маџуџић и Даран, 2016). Овај временски период почиње доласком сировина у фабрику, а завршава се испоруком готовог производа купцу. Дугачке производне линије, велики број радних места, радника, алата, транспортера, делова, материјала и додатног материјала значајно продужавају *lead* време производа. Због тога је неопходно оптимизовати производни процес и физички смањити растојање од улаза сировина до излаза финалног производа. Прецизно израчунавање *lead* времена је од суштинског значаја за ефикасно планирање производње и задовољавање захтева купаца.

Lead време се израчунава као однос количине залиха и дневних захтева купаца

$$\text{Lead време} = \frac{\text{количина залиха}}{\text{дневни захтеви купца}}$$

Скраћивањем *lead* времена кроз унапређење организације производног простора, рационализацију рада и смањење непотребних корака, смањују се трошкови и скраћује време испоруке.

Такође, још један важан показатељ успешности радних станица на којима се обављају активности монтаже је број дефеката. Дефекти представљају значајан извор расипања и негативно утичу на квалитет производа. Стопа дефеката је веома значајна метрика која показује да ли је монтажа компоненти и делова обављена тачно у складу са датим упутствима или су у току процеса монтаже направљене грешке. Повећање стопе дефеката при склапању делова и компоненти у финални производ може указати да је радни задатак био превише комплексан или да је радник услед пада пажње и концентрације изгубио фокус.

На традиционалним индустријским радним станицама грешке су готово неизбежне, а бројни дефекти се не могу лако открити у даљим фазама производње или током процеса инспекције (Wallace и Vodanovich, 2003). Грешке и неправилности негативно утичу на квалитет финалних производа и узрокују повећање трошкова услед додатних поправки или корекција. Стога, веома је важно да посебна пажња буде посвећена праћењу и елиминисању дефеката и побољшању квалитета финалних производа. Према ауторима (Kumar и други, 2018) незадовољавајући квалитет производа има негативан утицај на оперативне и финансијске перформансе организације. Штавише, како наводе аутори (Jun и други, 2020) незадовољавајући квалитет финалних производа може негативно утицати на репутацију компаније.

Типичне грешке и неправилности које се јављају током обављања монтажних активности су неправилна уградња компоненти и делова, непоштовање редоследа уградње компоненти и делова, недостатак појединих делова и компоненти (које је требало да буду уграђене у финални производ), склапање финалног производа од погрешних компоненти или неизвршавање одређених радних операција итд.

Према ауторима (*Маџић* и *Ђаран*, 2016) листа најчешћих грешака, поређаних по важности обухвата:

- у спровођењу радних активности одређени кораци се прескачу
- јављају се грешке у процесу (нпр. принцип и техника обављања активности не задовољавају прописане стандарде)
- погрешно позиционирање делова и компоненти
- недостају делови и компоненте
- погрешни делови се уграђују
- неисправан рад машине и опреме
- алати нису припремљени на адекватан начин.

Током обављања монтажних активности постоји неколико фаза у којима радници посебно могу направити грешке. Број грешака које радници праве током монтаже повећава се са повећањем комплексности производа (тј. ако је потребно саставити више компоненти у финални производ) и са повећањем варијација у врстама производа, повећањем броја корака које треба извршити или ако процес монтаже захтева специфичне вештине и квалификације радника. Такође, грешке често настају услед немара, губитка пажње и концентрације, менталног замора радника итд.

Lean филозофија тежи смањењу дефеката кроз примену стандарда и побољшање квалитета у свакој фази процеса. Интеграцијом принципа методологије *Six Sigma* и Тоталног управљања квалитетом (енгл. *Total Quality Management-TQM*) могу се ефикасније идентификовати неправилности и смањити варијабилност. *Six Sigma* представља методологију за систематско решавање проблема која се ослања на статистичке алате и технике са циљем смањења варијабилности у процесима и минимизирања дефеката кроз идентификовање основних узрока неефикасности и унапређење перформанси. Тотално управљање квалитетом представља свеобухватну методологију усмерену на континуирано побољшање квалитета у свим аспектима пословања. Ова методологија се заснива на ангажовању свих запослених, при чему је задовољење потреба купаца примарни циљ.

3. ПСИХОФИЗИОЛОШКИ И НЕУРОЕРГОНОМСКИ ПОКАЗАТЕЉИ У ИНДУСТРИЈСКОЈ ЕРГОНОМИЈИ

3.1 РАЗВОЈ ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈЕ

Почеци развоја студија из области електромиографије везани су за откриће електрицитета и откриће да нерви и мишићи могу да производе електричну енергију. *Francesco Redi*, италијански лекар и природњак је имао кључну улогу у развоју ЕМГ-а. Он је документовао постојање електричних зракова способних да генеришу електричну енергију.

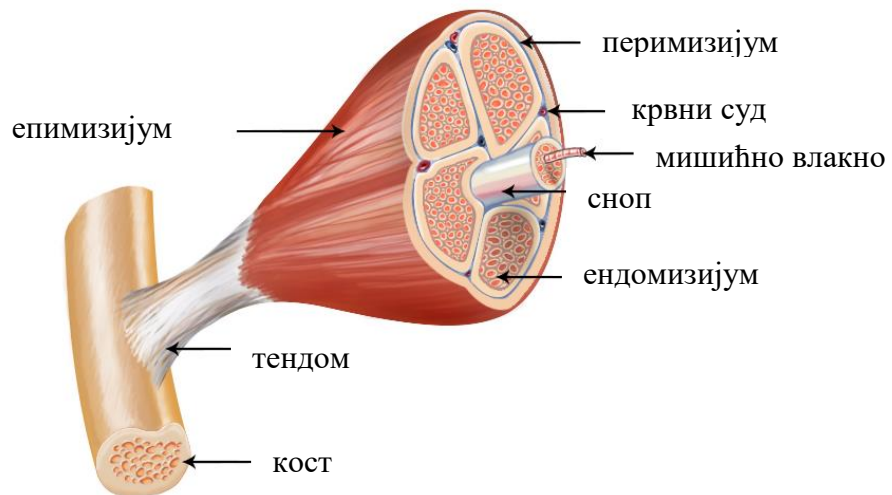
Истраживања о нервној проводљивости и електромиографији имају своје корене у раним студијама. Значајан напредак у пољу електромиографије остварио је *Luidi Galvani* који је показао да електрична стимулација може изазвати контракцију мишића, чак и код мртвих животиња као што су жабе, које су биле предмет његових експеримената. Ова открића су поставила темељ за даља истраживања у овој области. Немачки физиолог *Emil Heinrich DuBois-Raymond* је показао да је могуће забележити електричну активност током добровољне контракције мишића. Термин „електромиографија“ први пут је употребио француски научник *Étienne-Jules Marey* још 1890. године. Први ЕМГ снимак направио је француски физиолог *Étienne-Jules Marey*, који је такође први увео термин електромиографија. Значајан корак у развоју електромиографије остварио је немачки лекар по имену *Wilhelm Erb*, који је развио методе за примену електричне стимулације у клиничкој неурологији. Његов рад је допринео бољем разумевању поремећаја у проводљивости нерва и функционисању мишића.

Током 1950-их и 1960-их, развијене су технике за снимање електромиографских сигнала уз употребу вишеканалних система, што је омогућило истовремено праћење активности више мишића. Истовремено, интеграција рачунарских технологија у анализу ЕМГ сигнала омогућила је развој сложених алгоритама за обраду података, укључујући спектралну анализу и идентификацију обрасца.

Даљи развој електромиографије подстакнут је развојем електронских појачавача и осцилоскопа. Ови уређаји омогућили су прецизније снимање и анализу електричне активности мишића, што је значајно повећало примену ЕМГ-а у медицинским истраживањима у циљу дијагностике болести као што су мишићна дистрофија, миастенија гравис и других неуромишићних обољења. Развој савремених уређаја за снимање и анализу мишићне активности у 20. веку проширио је примену електромиографије и у другим областима - ергономији, биомедицинском инжењерингу, спортској медицини итд.

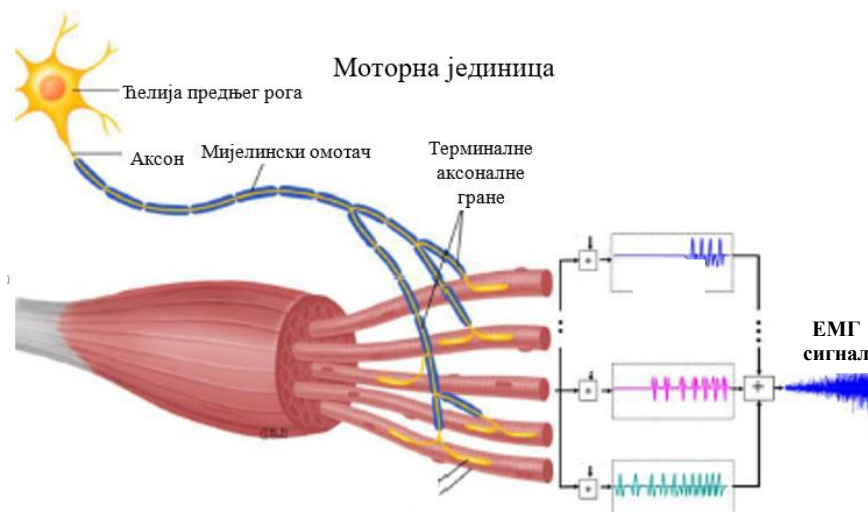
3.2 МИШИЋИ И УМОР МИШИЋА

Мишић је састављен од стотина, или чак хиљада, мишићних влакана повезаних и умотаних у омотач везивног ткива (слика 3.1). Сваки мишић је окружен омотачем везивног ткива који се назива епимизијум. Сваки сноп мишићних влакана назива се фасцикулус и окружен је слојем везивног ткива који се назива перимизијум. Унутар фасцикулуса, свака појединачна мишићна ћелија, названа мишићно влакно, окружена је везивним ткивом који се назива ендомизијум. Унутар мишића налазе се крвни судови и нерви који су повезани са примарном функцијом мишића - контракцијом.



Слика 3.1 Структура мишића (преузето са: <https://training.seer.cancer.gov/anatomy/muscular/structure.html>)

Моторичке јединице су основни функционални елементи неуромишићног система, а акциони потенцијали генерисани у њима представљају електрични сигнал којим се активирају мишићна влакна. Моторна јединица (слика 3.2) се сматра најмањом функционалном јединицом која може описати неуронску контролу контракције мишића. Она обухвата једну ћелију предњег рога, један аксон, њене неуромишићне спојеве и сва мишићна влакна инервисана овим аксоном.



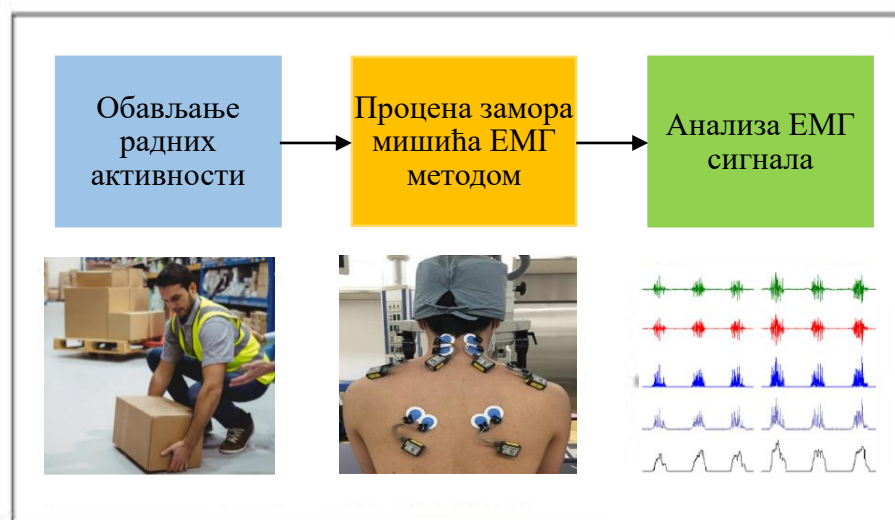
Слика 3.2 Моторна јединица (прилагођено према: <https://www.docplexus.com/posts/-the-pattern-of-motor-neuron-discharge-and-the-characteristics-of-the-motor-unit>)

Праћење мишићне активности радника и идентификовање умора је од великог значаја, с обзиром да умор негативно утиче на здравствено стање и перформансе радника (Sommerich, 2000). Како наводе аутори (Graham, 2009; Bosch, 2009) ниво мишићне активности варира у зависности од сложености задатка који се обавља и положаја тела у којем радник обавља активности. Аутори (Søgaard и други, 2006) дефинишу замор мишића као смањење способности мишића да произведе снагу. Према ауторима (Enoka и Duchateau, 2008) замор мишића у великој мери утиче на мишићну активност. Аутори (Larsson и други, 1995; Dieën и други, 2009) истичу да су промене у активацији мишића значајан индикатор умора. У студији чији су аутори (Björklund и други, 2000) праћен је ефекат обављања радног задатка који се понавља на осећај умора у рамену. У истраживањима (Dingwell и други, 2008) су указали на корелацију између умора мишића и прављења промена у покретима мишића. Развој замора мишића се може класификовати у три фазе: прва фаза је неумор (одморан мишић има максималну снагу); друга фаза подразумева прелазак на замор (након што одморан мишић почне да се замара, нова мишићна влакна се регрутују); трећа фаза је замор (развој мишићног замора током мишићне контракције) (Al-Mulla и други, 2011).

3.3 ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈА

Електромиографија представља најпопуларнији алат за објективно мерење замора мишића (Konrad, 2005). Ова метода омогућава регистрацију акционих потенцијала мишићних влакана моторних јединица која настају контракцијом мишића. Праћење мишићне активности радника и утврђивање када долази до умора је од посебне важности, с обзиром на то да умор има негативан утицај на целокупно здравствено стање радника и проузрокује професионалне болести (Dimitrova и Dimitrov, 2003). Аутори радова (Shair и други, 2017) истичу да ЕМГ метода за разлику од субјективних метода пружа валидне податке у анализи промена у активности мишића.

На слици 3.3 су приказане фазе примене електромиографије у циљу праћења мишићне активности у реалном времену и идентификације умора.



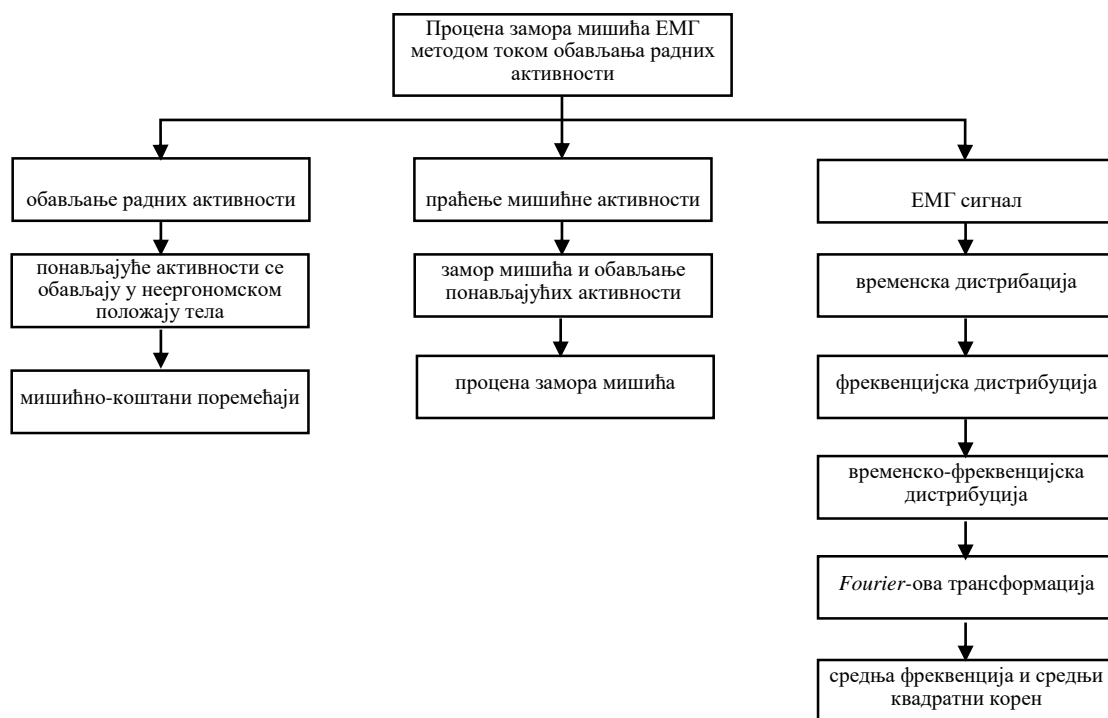
Слика 3.3 Фазе примене електромиографије у циљу праћења мишићне активности

Најпре се ЕМГ сензори постављају на тачно одређену локацију на кожи. Сензори имају улогу да прате мишићну активност радника током обављања радних активности како би се установило када долази до замора мишића и како би се предузеле ергономске

мере у циљу спречавања појаве мишићно-коштаних поремећаја и других професионалних болести. Сензори се пажљиво позиционирају у складу са препорукама за прецизно мерење електричне активности мишића. ЕМГ уређаји бележе сигнале који одражавају интензитет мишићне активности током сваке фазе обављања радних активности. Прикупљени сигнали се даље анализирају. Анализа укључује израчунавање основних параметара као што су средња вредност, медијана, корен средње вредности квадрата и Н максимална вредност.

Слика 3.4 приказује детаљну процедуру за примену електромиографије у циљу мерења активности мишића и процене замора током обављања радних активности, идентификацију ергономских фактора ризика за настанак мишићно-коштаних поремећаја. Прикупљени ЕМГ сигнали се анализирају применом следећих метода:

- временска дистрибуција, која показује промене у мишићној активности у одређеним временским интервалима;
- фреквенцијска дистрибуција, која омогућава идентификацију доминантних фреквенција и процену умора мишића;
- временско-фреквенцијска анализа, која комбинује временски и фреквенцијски домен како би се детаљније пратиле промене у сигналу током одређених активности (детаљно објашњено у поглављу бр. 5 докторске дисертације).



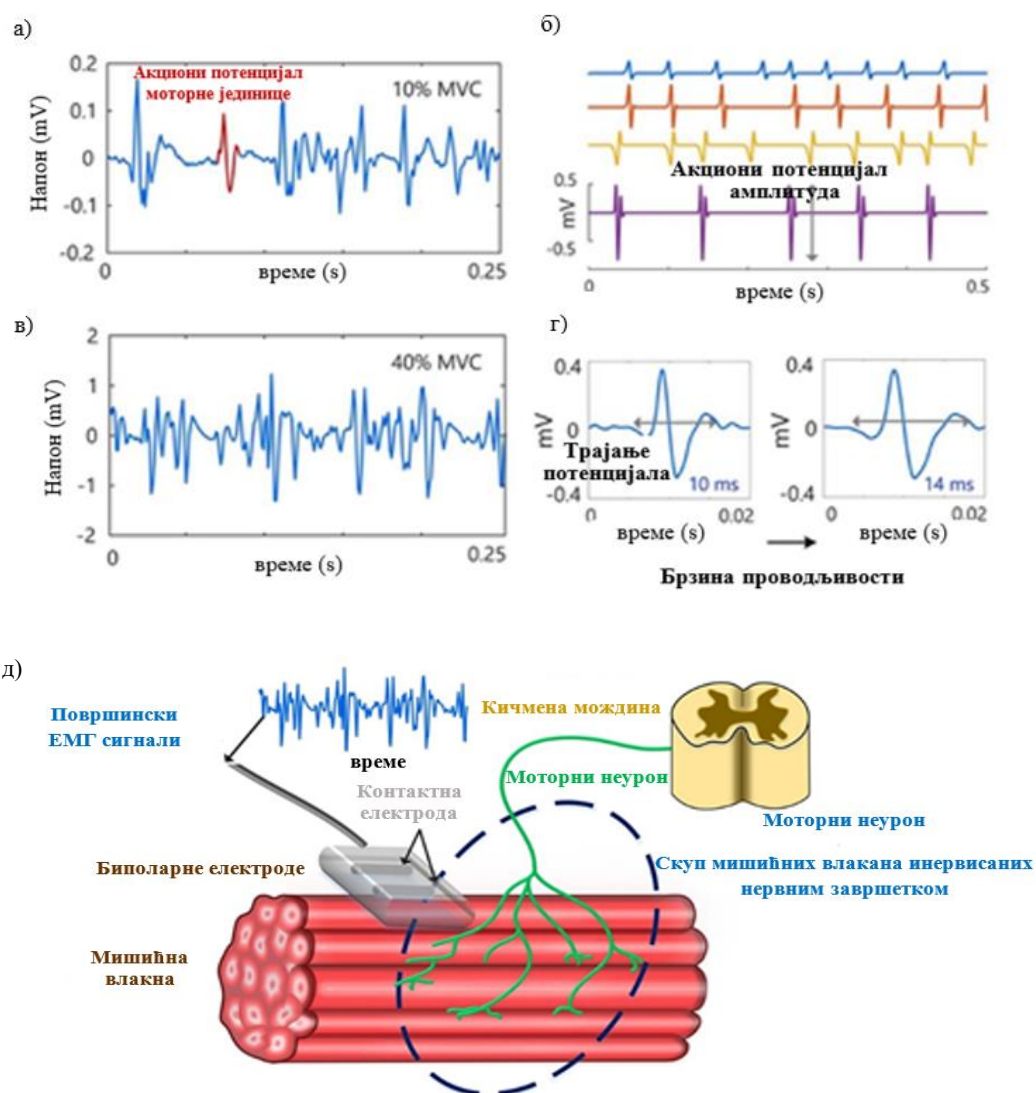
Слика 3.4 Детаљна процедура за примену електромиографије

ЕМГ сигналом се представља електрична активност коју генерише мишић током контракције. Ова активност се може детектовати постављањем електрода на кожу изнад мишића, чиме се мери проток наелектрисаних честица (јона) кроз мембрану мишићних влакана током њихове активације. Брзина протока наелектрисања се мери у амперима, а унутар мишића ове честице мењају електрични потенцијал у околном ткиву. Разлика у електричном потенцијалу, или напону, између две тачке се мери у волтима. Смањена

брзина проводљивости значајно продужава трајање акционог потенцијала, што има утицај на мишићну ефикасност и капацитет за брзу активацију. На овај начин се пружају значајне информације о контракцији мишића, на почетку и током трајања мишићне активности.

Расподела напона током времена директно зависи од нивоа оптерећења мишића. Са повећањем силе контракције, амплитуда ЕМГ сигнала се повећава, док се фреквенција активирања моторичких јединица такође повећава. У мировању или при мањем оптерећењу, амплитуде су ниже, а напон се јавља у мањим интервалима. У условима високог оптерећења, ЕМГ сигнал показује снажну активност, са већим бројем акционих потенцијала у кратким временским периодима.

На слици 3.5 је приказан пример ЕМГ сигнала како би се изанализирао утицај различитих нивоа силе на промене у ЕМГ сигналу.



Слика 3.5 Утицај различитих нивоа силе на промене у ЕМГ сигналу (преузето са: <https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2020.576729/full>)

Као што се види са слике 3.5 под а) код ниског нивоа силе (10% максималне добровољне контракције), сигнал је слабији у поређењу са сигналом при вишем нивоу силе, као што је 40% максималне добровољне контракције в). При вишем нивоу силе

долази до повећања броја активираних моторичких јединица, као и до пораста амплитуде и фреквенције ЕМГ сигнала.

Акциони потенцијал моторичке јединице је кључни показатељ активације мишића. Под б) се могу видети различити интервали између пикова акционог потенцијала и њихова веза са брзином покретања моторних јединица током обављања различитих задатака током времена, што је приказано у г). Илустрација моторне јединице и начин на који се површински ЕМГ сигнал може снимити из мишића помоћу биполарне електроде приказани су на под д). На овој слици се види како моторичке јединице генеришу електричне сигнале који се детектују на површини коже. Анализа ЕМГ сигнала у временском домену пружа вредне информације о активацији мишића.

ЕМГ метода налази примену у ергономским истраживањима у циљу праћења замора мишића у реалном времену. Ову методу карактерише прецизност и објективност за разлику од субјективних метода (*Shair* и други, 2017). У последње време, површинска електромиографија постаје све популарнија метода за истовремено снимање и анализу података из више група мишића.

Аутори (*Molinari*, 2006; *Porter* и други, 2010) су применом ЕМГ методе проценили када је наступио замор током обављања активности. Аутори (*Bosch* и други, 2007) су пратили замор трапезних мишића приликом обављања ручних активности током 8-часовног и 9,5-часовног периода. Аутори (*Heydari*, 2010) су спровели велику студију у којој је учествовало више од 100 радника (при чему су неки имали симптоме хроничног бола а неки не), тестирајући лумбалне параспиналне мишиће као предиктор ризика од појаве болова у доњем делу леђа. Две године касније поновљено је истраживање на истим испитаницима и идентификована је подгрупа испитаника са већим ризиком од појаве болова у леђима. У неким научно-истраживачким радовима, површинска електромиографија је комбинована са опсервацијским методама и методама самопроцене, како би се добила свеобухватна слика у којој мери се напрезање мишића јавља код радника који обављају монтажне активности.

3.4 ТИПОВИ ЕЛЕКТРОМИОГРАФИЈЕ

Две најчешће коришћене методе електромиографије су електромиографија са иглом и површинска електромиографија. Електромиографија са иглом представља технику снимања и анализе електричних сигнала изведених из појединачних мишићних влакана, у стању мировања и током добровољне контракције мишића, помоћу иглене електроде која се убацује директно у мишић. Уметањем игала у изабрани мишић прати се мишићна активност (*Henneberg*, 2000). Електрични сигнали генерисани из мишићних влакана, било у мировању или током контракције, се снимају а затим интерпретирају како би се проценила функција мишићних влакана у које је игла уметнута. Квалитет и карактеристике сигнала добијених помоћу иглене ЕМГ технике зависе од многих фактора, укључујући тип електроде која се користи, филтере, појачавач и др.

Електромиографија иглом је инвазивна метода и најчешће се примењује у медицинским истраживањима за анализу функције мишића пацијената с обзиром да омогућава продирање до мишића који се налазе дубље од површине. Међутим, као недостаци ове методе наводе се могуће компликације, као што су бол, модрице и оток на месту убода игле и стога неопходно је присуство лекара током спровођења ове методе. Такође, ова метода није практична за примену у области спорта или ергономије за

праћење замора мишића приликом обављања активности које захтевају кретање (*Troiano* и други, 2008).

Површинска електромиографија представља неинвазивну технику за снимање и анализу електричних сигнала из мишића и њихових моторних јединица, како у стању мировања, тако и током добровољне контракције. Ова метода подразумева коришћење ЕМГ уређаја који се постављају на површину коже испитаника. ЕМГ уређаји су једноставни за постављање, не изазивају бол, не представљају опасност за испитанике и не захтевају присуство медицинског особља и као такви имају велику примену у бројним истраживањима. Међутим, за прецизно мерење ЕМГ сигнала од посебне важности је адекватна припрема коже, јер висока импеданса може утицати на квалитет сигнала. Стога, пре постављања ЕМГ уређаја, кожа на изабраној локацији мора бити темељно очишћена алкохолном, како би се одстранила нечистоћа. Након тога наноси се мала количина гела са електролитима пре самог постављања електрода/уређаја.

На слици 3.6 је приказан поступак примене иглене (а) и површинске електромиографије (б).



Слика 3.6 Електромиографија иглом (а) и површинска електромиографија (б)
(преузето са: <https://www.shutterstock.com/search/electromyography>
<https://www.smitmedical.com/project/ambu-neuroline-emg-needle/>)

Слика 3.7 приказује истовремену примену иглене и површинске електромиографије на истој руци при чему су три површинске ЕМГ електроде постављене на руци испитаника, док су две игличасте ЕМГ електроде уметнуте у шаку пацијента. Неколико електрода је постављено на кожу руке и оне имају улогу да региструју електричне сигнале који настају при контракцији мишића.



Слика 3.7 Комбинована примена иглене и површинске електромиографије
(преузето са: <https://www.nuffieldhealth.com/tests-scans/electromyography-emg>)

3.5 ОСНОВНИ ПОКАЗАТЕЉИ КОЈИМА СЕ ПРАТИ МИШИЋНА АКТИВНОСТ

Мишићна активност и замор мишића се могу пратити преко више параметара. Медијана (енгл. *median*), средња фреквенција (енгл. *mean*) и средњи квадратни корен (енгл. *root mean square- RMS*) су значајне метрике за праћење промена у ЕМГ сигналима (Plamondon и други, 2014). Услед замора мишића вредности медијане и средње фреквенције се смањују, а вредност средњег квадратног корена се повећава. Средња фреквенција се у бројним научним радовима помиње као кључан параметар за откривање напрезања у мишићима (De Luca, 1984; Knaflitz и други, 1990). Аутори (Thongpanja и други, 2013) сматрају да су најзначајнији параметри средња фреквенција и медијана. Према ауторима (Karlsson и Gerdle, 2001) најважнији показатељи су амплитуда и фреквенција. Замор мишића се повезује са повећањем амплитуде и померањем са високих на ниске фреквенције (Merlo и Campanini, 2010; Basmajian и De Luca, 1985). Према ауторима (Cifrek и други, 2009) повећана амплитуда указује на повећану мишићну активност а смањење мишићне активности се везује за смањену амплитуду. Аутори (Farina и други, 2008) су показали да је већа варијабилност амплитуде повезана са споријим развојем умора. Како истиче аутор (De Luca, 1984) смањење фреквенције указује на смањење брзине проводљивости дуж мишићних влакана.

Са друге стране, аутори (Suetta и други, 2004) су користили средњу апсолутну вредност (енгл. *Mean absolute value- MAV*) да би описали замор мишића. Аутори (Plamondon и други, 2014) су пратили замор десног и левог мишића лонгиссимуса на основу средње фреквенције и средњег квадрата. Они су установили да је средња фреквенција смањена за 12% а средњи квадрат повећан за 23%. Аутори (Lomax и други, 2015; de Luca, 1997) су такође мерили замор мишића преко средње фреквенције.

Н max представља максималну амплитуду ЕМГ сигнала забележену током трајања радног задатка. Овај индекс показује највиши ниво мишићне активности у неком тренутку и често се користи за процену интензитета мишићне контракције. Висок ниво Н max указује на снажну мишићну контракцију и може бити индикатор максималног напрезања мишића. Нагли скокови у Н max се често повезују са великим напрезањем и замором мишића.

Медијана представља средњу вредност у расподели амплитуда ЕМГ сигнала, при чему једна половина података има вредности мање од медијане, а друга половина веће. У контексту мишићне активности, медијана показује типичну амплитуду мишићних контракција током задатка и може указивати на просечан ниво оптерећења. Она је стабилнији показатељ просечне мишићне активности, посебно када постоје велика одступања у сигналима.

Средња вредност је просечна вредност свих амплитуда ЕМГ сигнала забележених током трајања радног задатка. Она показује укупни ниво мишићне активности и примењује се за процену оптерећења мишића током времена. Висока средња вредност указује на висок ниво ангажовања мишића, док нижа средња вредност указује на мање напрезање мишића. Међутим, средња вредност може бити подложна утицају екстремних вредности (пикова), тако да се углавном примењује у комбинацији са другим параметрима.

Квадратни корен средње вредности квадрата амплитуде ЕМГ сигнала се често користи у анализи ЕМГ сигнала, јер представља значајан показатељ укупне снаге сигнала и директно је повезан са напрезањем мишића током обављања радног задатка. Висока вредност овог показатеља указује на већи ниво напрезања мишића. У поређењу са средњом вредношћу, RMS је стабилнији показатељ укупног интензитета мишићне активности, јер узима у обзир варијације и пикове сигнала.

Рачунање параметара ЕМГ сигнала

Дат је дигитални ЕМГ сигнал H_i где је $i=1..N$, при чему је N број одбирака сигнала. Сигнал је представљен преко означених 16 битних бројева у опсегу од -32768 до 32767 што одговара стварној вредности сигнала од -1.14 до 1.14 mV а при чему је фреквенција одабирања $T_s = 1000$ одбирака у секунди.

Претходна интерпретација сигнала је према броју одбирака. Други начин да се прикаже сигнал је као функција времена

$$H(t) = H_i \text{ при чему је } t = i \cdot T_s$$

Анализа сигнала је спроведена рачунањем следећих параметара:

H_{max} - максимална вредност сигнала

$$H_{max} = \max_i H_i$$

H_{min} - минимална вредност сигнала

$$H_{min} = \min_i H_i$$

$avg(H)$ - средња вредност сигнала

$$avg(H) = \frac{1}{N} \sum_i H_i$$

$mediana(H)$ - медијана сигнала

$$mediana(H) = \begin{cases} H_{(N+1)/2} & N \text{ непарно} \\ \frac{H_{N/2} + H_{N/2+1}}{2} & N \text{ парно} \end{cases}$$

$mediana(|H|)$ - медијана апсолутне вредности сигнала

$$mediana(|H|) = \begin{cases} |H|_{(N+1)/2} & N \text{ непарно} \\ \frac{|H|_{N/2} + |H|_{N/2+1}}{2} & N \text{ парно} \end{cases}$$

$max|H|$ - максимум апсолутне вредности сигнала

$$max|H| = \max_i |H_i|$$

RMS - Средња квадратна вредност

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_l H_i^2}{N}}$$

r - коефицијент корелације ЕМГ сигнала

$$r = \frac{N \sum_i H_i t_i - \sum_i H_i \sum_i t_i}{\sqrt{[N \sum_l H_i^2 - (\sum_i H_i)^2][N \sum_l t_i^2 - (\sum_i t_i)^2]}}$$

Овај коефицијент показује какав је тренд сигнала у односу на време и може имати вредност између -1 и 1. Вредност 1 указује да сигнал има растући линеарни тренд током времена. Вредност -1 указује на линеарни тренд, али са негативним предзнаком док у осталим случајевима узима неку од вредности из интервала -1 и 1.

3.6 РАЗВОЈ ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАФИЈЕ

Немачки научник *Berger*, неуропсихијатар са Универзитета у Јени у Немачкој је 1929. године снимио први ЕЕГ сигнал преко једне електроде како би пратио мождану активност, која је имала фреквенцију око 10 Hz, што је данас познато као алфа (α) талас (*Pizzagalli*, 2007). Овај револуционарни корак представљао је почетак разумевања електричне активности мозга и поставио темеље за даљи развој електроенцефалографије. Велики допринос развоју електроенцефалографије је дао и аутор *Collura* који је графички приказао електричне струје које се стварају у мозгу. Он је указао да се мождани таласи мењају у зависности од стања свести субјеката (упадање у сан, примена анестезије, неуролошка болест као што је епилепсија). Истраживачи су почели да дефинишу типове можданих таласа као што су алфа, бета, тета и делта, који су повезани са различитим менталним стањима.

Технолошки напредак омогућио је развој сложенијих уређаја за снимање и анализу ЕЕГ сигнала. Примена вишеканалних ЕЕГ система донела је могућност истовременог праћења активности из више делова мозга, пружајући детаљније информације о неурофизиолошким процесима који се одвијају у мозгу. Ови подаци су били кључни за проучавање когнитивних процеса (примена у психологији) и дијагностику неуролошких поремећаја (примена у медицини).

Развојем неуроергономије (*Parasuraman*, 2003), нове научне дисциплине која интегрише неуронауке и ергономију дошло је до значајног напретка у примени нових уређаја за мерење мождане активности у реалним индустријским окружењима. Међу најчешће коришћеним методама у овој области издвајају се електродермална активност коже и електроенцефалографија. Ове методе омогућавају праћење промена у менталном оптерећењу, нивоу стреса, ангажованости и концентрације радника током обављања радних активности пружајући валидне податке за оптимизацију производних процеса и побољшање ергономских услова.

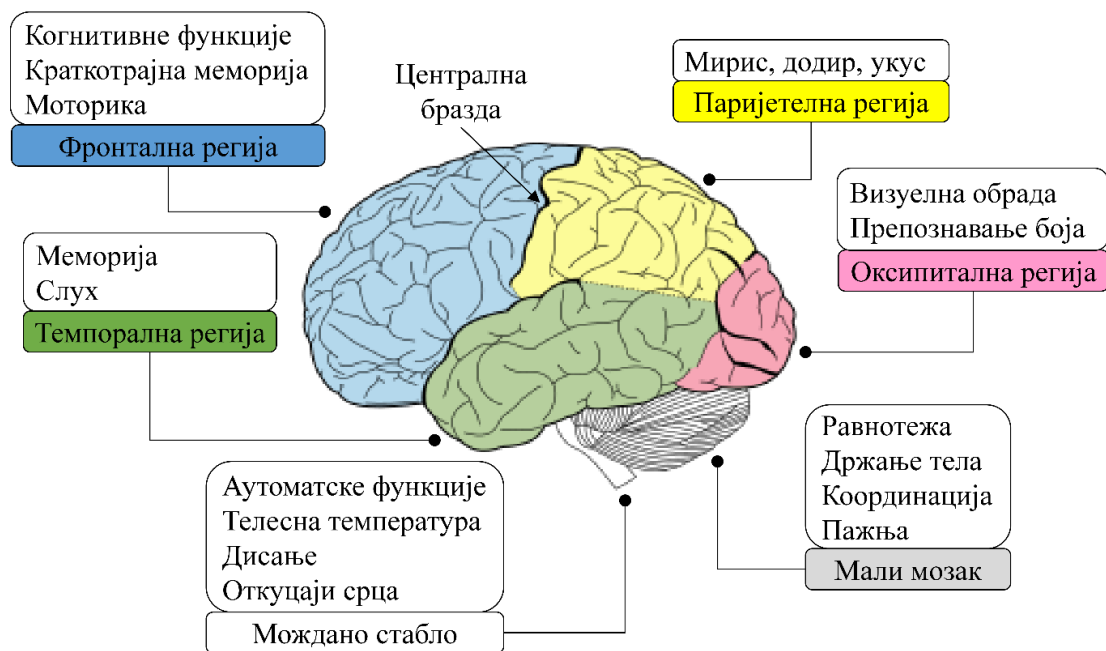
3.7 МОЗАК

Мозак је централни орган нервног система, одговоран за разноврсне функције попут перцепције, пажње, памћења, доношења одлука и предузимања акција. Велики мозак се састоји од две хемисфере, десне и леве које су подељене у четири режња: фронтални, паријетални, окципитални и темпорални. Сваки од ових режњева има специфичну улогу.

Фронтални режањ смештен у предњем делу мозга, одговоран је за доношење одлука, решавање проблема, резонување, планирање моторичких радњи, регулацију пажње и контролу емоција. Паријетални режањ је одговоран за разумевање, препознавање, перцепцију, оријентацију. Окципитални режањ је задужен за визуелну обраду. Темпорални режањ, који се налази у близини ушију, примарно је задужен за памћење, обраду информација, препознавање говора и лица.

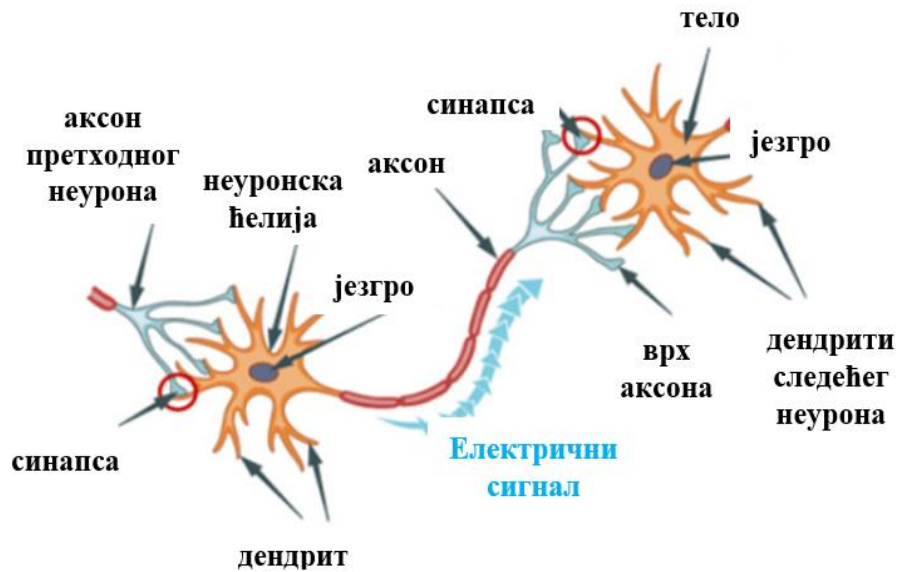
Мали мозак је друга највећа структура мозга која садржи више од половине можданих неурона. Мали мозак је повезан са вољним покретима мишића, финим моторичким вештинама и регулацијом равнотеже. Мождано стабло се налази на дну мозга и повезује велики мозак са кичменом мождином. Он контролише виталне функције тела, укључујући дисање, свест, покрете очију и уста, откуцаје срца и крвни притисак.

На слици 3.8 приказани су региони мозга и функције које су са њима повезане.



Слика 3.8 Приказ регија мозга са функцијама за које су одговорне (прилагођено према Liu и други, 2019)

Људски мозак се састоји од око 100 милијарди нервних ћелија названих неурони. Неурон може преносити одређене информације помоћу електричних сигнала. На слици 3.9 је приказана структура неурона. Неурони имају три основна дела: тело ћелије, аксон и дендрите. Сваки неурон се састоји од много синапси које су даље повезане са великим бројем неурона. Аксон је дугачак, узак део неурона који повезује језгро сопственог неурона са дендритом другог. Дендрит је кратак део неурона који прима сигнале од других неурона или сензорних ћелија и преноси их ка телу ћелије. Ове сигнале дендрити примају преко синапси, где се одвија комуникација између неурона.



Слика 3.9 Структура неурона (прилагођено према Sanei и Chambers, 2007)

3.8 ПРАЋЕЊЕ МОЖДАНЕ АКТИВНОСТИ И ПАЖЊЕ

Детаљан преглед научно-истраживачких радова из ове области показао је да је већина научно-истраживачких радова оријентисана на праћење положаја тела које заузимају радници током обављања физички заморних задатака монтаже у циљу елиминисања нефизиолошких положаја тела и смањења напрезања мишића. Мање пажње је посвећено праћењу когнитивних аспеката (Fish и други, 1997). Праћење когнитивних процеса постало је све значајније у новије време. Истраживачи настоје да разумеју како мозак функционише и прате моздану активност у реалном времену током обављања различитих задатака.

Примена метода из домена неуроергономије омогућава дубљи увид у ментално оптерећење радника (Parasuraman и Rizzo, 2006; Ayaz и Dehais, 2019). Праћењем моздане активности пружа се увид у то како људи размишљају, обрађују информације, решавају проблеме и доносе одлуке у различитим ситуацијама. На овај начин омогућава се праћење промена у мозданом таласима када особа прелази са једноставних на сложеније когнитивне задатке, чиме се може проценити колико енергије мозак улаже у те процесе. Психофизиолошке методе омогућавају објективну квантификацију когнитивног стања у реалном времену (Trimmel и други, 2009).

Когнитивна ергономија, као нова грана ергономије, фокусира се на проучавање когнитивних капацитета људи (као што су памћење, перцепција, пажња итд.), током интеракције са елементима радног окружења. Резултати добијени применом метода из домена когнитивне ергономије су допуна класичним ергономским истраживањима и истраживањима везаним за дизајнирање радних места (Fafrowicz и Marek, 2007). У контексту Индустрије 5.0, све важније постаје разумевање на који начин нове технологије утичу на когнитивне захтеве радника и њихову интеракцију са напредним системима. Овај увид омогућава оптимизацију производних процеса и доприноси побољшању добробити и здравља радника.

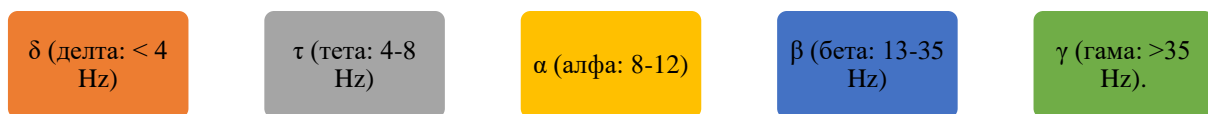
Спровођење активности мануелне монтаже подразумева велики број понављања радних операција. Радници у неким ситуацијама понављају једну исту операцију и по неколико хиљада пута током радне смене што доводи до пада пажње (Spath и други,

2012). Како истиче аутор (*Fisherl*, 1993) услед обављања ових монотоних и ментално захтевних активности долази до пада пажње и појаве менталног замора, а то даље повећава ризик од повреда на раду и појаве професионалних болести. Когнитивно оптерећење негативно утиче на пажњу радника и способност расуђивања (*Rabby* и други, 2019). У неким ситуацијама радници не успевају да остану будни (*Spath* и други, 2012). Такође, радници који обављају монтажне активности на радној станици су континуирано изложени стресу. Ово је узроковано пре свега великом количином информација које радници добијају приликом обављања монтаже великог броја компоненти и делова којима је потребно руковати.

Аутор (*Parasuraman*, 2003) сматра да је проучавање когнитивних процеса веома важно. Когнитивно оптерећење у великој мери утиче на перформансе радника (*Brolin* и други, 2017; *Kohlmorgen* и други, 2007). Високо когнитивно оптерећење негативно утиче на брзину и време извођења монтажних активности, појаву недостатака и квалитет финалних производа. Услед повећања когнитивног оптерећења долази до грешака (*Falck* и *Rosenqvist*, 2012). Према (*Wallace* и *Vodanovich*, 2003) пад концентрације и пажње проузрокује грешке.

Благовремено откривање пада пажње и концентрације може допринети превенцији дефеката и повреда на раду. Стога, бројни аутори су истраживали мождану активност, пажњу и концентрацију радника. Аутори (*Fan* и други, 2022) су на основу праћења ЕЕГ сигнала утврдили када се јавља замор приликом војње и предложили методу за детекцију замора.

Когнитивни аспекти, који укључују процесе попут пажње, памћења, учења и решавања проблема су у корелацији са активностима различитих можданих регија. Сваки фреквентни опсег је повезан са специфичним когнитивним стањима, пружајући увид у когнитивне процесе и ментална стања на основу релативне снаге унутар ових фреквенцијских опсега (*Bakshi*, 2018). Фреквенција је један од најважнијих параметара за процену когнитивног стања (*Fisch*, 1999). Амплитуде и фреквенције можданих ритмова се мењају у зависности од когнитивног стања особе нпр. будност, узбуђење, опуштеноост итд. (*Sanei* и *Chambers*, 2013; *Aftanas* и други, 2002). Мождани ритмови се могу поделити у фреквентне опсеге (*Sanei* и *Chambers*, 2013). На слици 3.10 су приказани мождани ритмови.



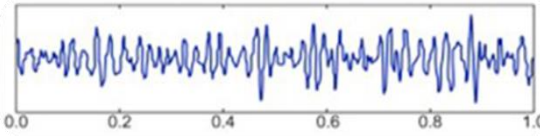
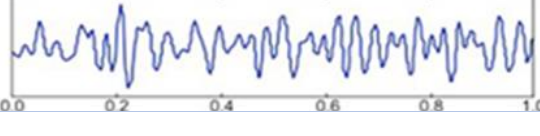
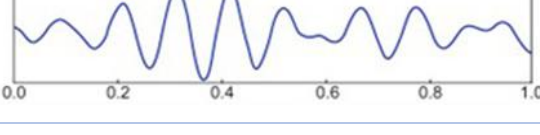
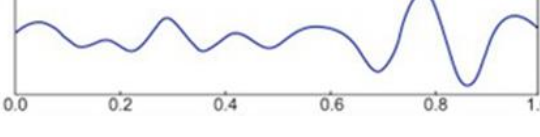
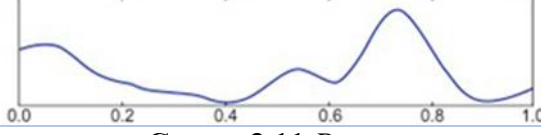
Слика 3.10 Различити мождани ритмови

Делта (δ) таласи се налазе у опсегу од 0.5 до 4 Hz и првенствено су повезани са дубоким сном с тим да се ови таласи могу јавити и у стању будности. Тета (θ) таласи се налази у фреквентном опсегу између 4 и 8 Hz са амплитудом већом од 20 μV . Тета таласи се јављају када је особа у будном стању, али има тенденцију преласка у стање поспаности (*Sanei* и *Chambers*, 2013) односно у лагани сан (*De Vos*, 2009). Утврђено је да долази до повећања тета ритма у фронталној и темпоралној области током обављања сложенијих задатака и приликом креативног размишљања. Алфа (α) таласи су повезани са фреквенцијским опсегом од 8 до 13 Hz и амплитудом 30-50 μV , који се јављају када субјект има затворене очи или је у стању опуштања односно везани су за смањену пажњу тј. указују да је особа будна, али није способна да активно обрађује информације (*De Vos*,

2009). Обично су повезани са интензивном менталном активношћу и тензијом. Аутори (Wang и други, 2020) су установили да се делта таласи и алфа таласи могу користити за откривање поспаности.

Бета таласе који су у фреквенцијском опсегу од 13 Hz до 35 Hz карактерише мала амплитуда и променљиве фреквенције које су симетрично присутне са обе стране у фронталној области мозга. Ови таласи се генеришу када је испитаник узбуђен и активно укључен у обављање менталних активности, као што су решавање конкретних проблема, доношење одлука и усредсређеност на радни задатак. Повећана активност бета таласа је показатељ високог когнитивног напора и будности, што је уобичајено у ситуацијама које захтевају интензивно размишљање и концентрацију. То указује да особа активно размишља и фокусирана је на решавању проблемских ситуација (Sanei и Chambers, 2013). Гама (γ) таласи имају фреквенцију већу од 35 Hz, и повезани су са различитим когнитивним и моторичким функцијама. Ови таласи су повезани са високо сложеним менталним процесима, као што су учење, памћење и обрада информација.

На слици 3.11 је дат графички приказ различитих типова можданих ритмова.

	<p>Гама таласи, указују на високо когнитивно оптерећење, услед процесирања информација, учења и памћења. Повећана активност ових таласа током обављања задатака често указује на висок ниво менталног оптерећења.</p>
	<p>Бета таласи су повезани са активношћу мозга током стања будности, доношења одлука и решавања проблема.</p>
	<p>Алфа таласи су повезани са стањем мировања и опуштања, али ако се њихова активност смањи, то може указати на повећани ментални напор.</p>
	<p>Тета таласи су везани за релаксацију и креативност, али могу указати на почетни ниво когнитивног оптерећења.</p>
	<p>Делта таласи су повезани са дубоким одмором и сном, али њихово присуство у будном стању може указивати на изузетан умор или смањену свест.</p>

Слика 3.11 Различити типови можданих ритмова- графички приказ (прилагођено према: http://econtact.ca/14_2/ortiz_biofeedback.html)

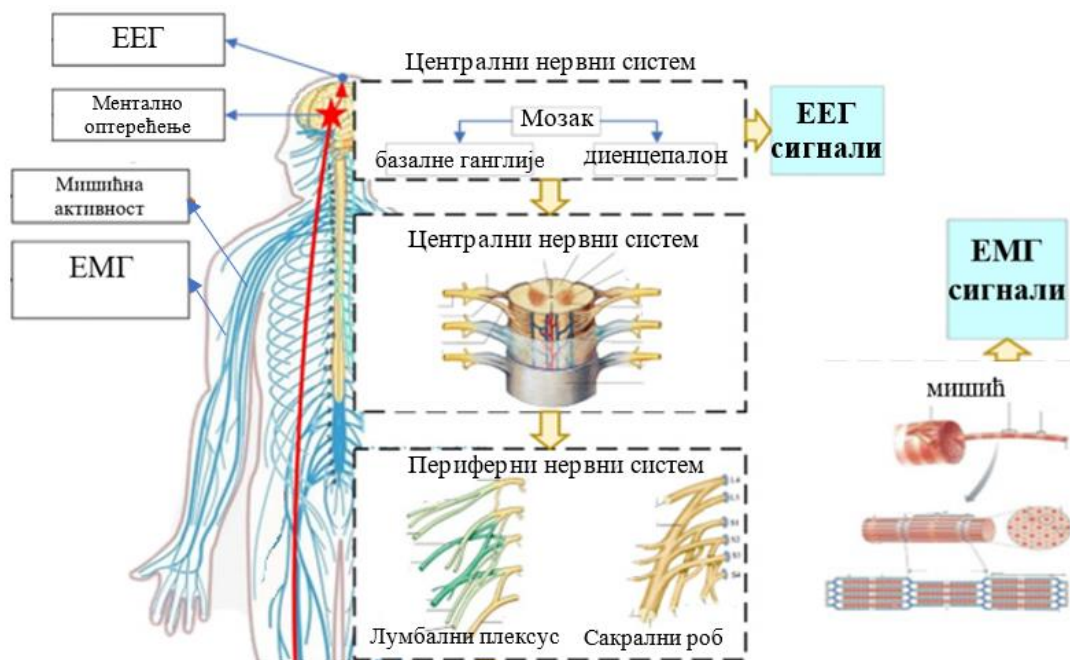
Како истичу аутори (Jung и други, 1997) стрес, активно размишљање и повећана пажња узрокују померање можданих таласа ка опсезима виших фреквенција. Конкретно, повећана активност у вишим фреквенцијама, као што су бета и гама таласи, указује на високо когнитивно оптерећење, интензивно размишљање и фокусирање на радне задатке. Повећање активности бета таласа указује да је особа укључена у ментално

захтевне активности или је под стресом. Смањење активности бета таласа може указивати на умор или пад концентрације.

Мали број научно-истраживачких радова и студија се фокусирао на истовремено праћење промена у ЕМГ сигнаlima и праћење когнитивног стања радника (*Pourmohammadi* и *Maleki*, 2020; *Segning* и други, 2021). Како истиче аутор (*Snook*, 1985) традиционални приступ се фокусира на одређивању такозване максимално прихватљиве тежине терета приликом подизања и максималног домета приликом преузимања неопходних компоненти и делова при чему се занемарују когнитивни аспекти. Са друге стране, у радовима који су усмерени на когнитивну ергономију углавном се занемарују аспекти физичке ергономије који у великој мери утичу на перформансе (*Karwowski*, 1991).

Према ауторима (*Mehta* и *Parasuraman*, 2013а,б) резултати праћења когнитивног статуса радника помоћу ЕЕГ методе, у комбинацији са резултатима праћења физичког замора, омогућавају холистичко разумевање свих аспеката радних места. Овај приступ пружа свеобухватан увид у интеракцију менталних и физичких аспеката радника у контексту ергономских истраживања у циљу оптимизације радних места.

На слици 3.12 је приказана комбинована примена електромиографије и електроенцефалографије. Основни циљ је био истовремено праћење активности мишића и можданих активности, пружајући дубљи увид у неуронске процесе и мишићно напрезање током обављања различитих физички и когнитивно захтевних радних задатака.



Слика 3.12 Комбинована примена електромиографије и електроенцефалографије (прилагођено према: *Zhang* и други, 2022)

3.9 МЕНТАЛНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ

Ментално оптерећење је један од најчешће коришћених концепата у ергономији и људским факторима и представља тему од све већег значаја. С обзиром да савремена технологија намеће све веће когнитивне захтеве радницима док се истовремено физички захтеви смањују, разумевање утицаја когнитивног оптерећења на перформансе и добробит радника је све значајније (*Young* и други, 2015).

Ментално оптерећење (енгл. *Mental Work Load - MWL*) се дефинише као обим менталних или когнитивних ресурса који су неопходни за испуњавање захтева одређеног задатка. То је заправо разлика између захтеваног радног оптерећења и капацитета радника (*Kantowitz*, 1988). До когнитивног оптерећења долази када захтеви радних задатака премашују природна ограничења људских когнитивних капацитета. Ментално оптерећење је индикатор притиска на радну меморију и повезано је са размишљањем и резонувањем током извршавања радних задатка. У литератури се може наћи и термин психолошко оптерећење који се дефинише као количина мождане активности у јединици времена, односно као интензитет искоришћења можданих ресурса, стопа заузетости можданих ресурса или капацитет обраде информација.

Многи експерименти дизајнирани су у циљу процене менталног оптерећења током извођења радних задатака различите сложености (*Van* и други, 2020; *Brookings* и други, 1996) при чему је посебан фокус био на памћењу, пажњи и концентрацији, решавању проблемских ситуација итд. Истраживања су показала да високо когнитивно оптерећење може довести до убрзања темпа обављања активности, смањења флексибилности, повећања учесталости грешака, фрустрација и негативно утицати на процес доношења одлука. Такође, ментално оптерећење у великој мери утиче на безбедност и здравље радника (*Chen* и други, 2015). Стога, правовремено откривање пада пажње и концентрације и појаве замора доприноси смањењу повреда на раду и незгода.

Различити фактори утичу на когнитивно оптерећење радника. Фактори се могу поделити на спољне и унутрашње. Спољни фактори укључују комплексност радног задатка, расположиво време, као и факторе из спољне средине као што су температура, ниво буке и осветљење. Унутрашњи фактори су повезани са психофизиолошким стањем радника током извршења задатка односно са њиховим менталним и физичким капацитетима, индивидуалне карактеристике (когнитивне способности, обука, стручност, радно искуство итд.) (*Galy* и други, 2012). Аутори (*Scafà* и други, 2019) као најчешће разлоге за појаву психичког напора код радника наводе: извођење прецизних и финих покрета у току дужег временског периода, разноврсност задатака и операција, репетитивност активности, ритам рада, недостатак или сложеност инструкција за рад. Аутори (*Katmah*, 2021) као најзначајније факторе који утичу на ментално оптерећење истичу буку из спољашњег окружења, емоционалне стимулансе и менталне способности појединаца.

Посебно се као значајни фактори истичу сложеност производа који се склапа, количина посла и број ствари које треба урадити, комбинација сложених активности са временским притиском, упутства за рад, функционалност и прикладност алата који се користе, фактори из спољашњег окружења (бука, осветљење итд.) који могу добринети смањењу пажње, физиолошки фактори (умор, стрес, итд.) итд. (*Zaeh* и други, 2009). Аутори (*Hanson* и *Brolin*, 2011) су истакли да уколико постоје различите варијације компоненти и делова (који се комбинују у финални производ), сложеност се у великој мери повећава, а то има значајан негативан утицај на ментално стање радника (*Lindblom* и *Thorvald*, 2014). Према ауторима (*De La Torre* и други, 2018) истовремено обављање више активности и преоптерећеност информацијама додатно доприносе повећању

когнитивног оптерећења. Когнитивно оптерећење се може додатно повећати услед неадекватних услова рада. У истраживачком раду чији су аутори (*Jahncke* и други, 2011) је указано да неадекватни радни услови могу негативно утицати на когнитивни статус радника.

Варијације у таласима су у корелацији са менталним оптерећењем. Алфа варијације су везане за паријетални и окципитални регион мозга односно за електроде P7, P3, P4, P8, Pz, O1, O2. Приликом извођења аритметичких задатака долази до смањења варијација у алфа спектру а приликом креативног размишљања повећава се варијација у алфа спектру. Варијације у тета опсегу су везане за фронтални и темпорални регион односно електроде F7, F3, F4, F8, Fz, T7, T8. Повећање менталног оптерећења је повезано са смањењем алфа активности у паријеталној области мозга и повећањем тета активности у фронталној области (*Stipacek* и други, 2003). Повећање тета активности у фронталном режњу мозга указује на когнитивне напоре и појачан фокус, посебно током решавања проблема и обраде информација. Са друге стране, смањење алфа активности у паријеталном делу мозга обично указује на повећану пажњу, што је често повезано са већим когнитивним оптерећењем и захтевима који се постављају пред радника током обављања сложених радних задатака.

Различити мождани таласи (делта, тета, алфа и гама) остварују утицај на ментално оптерећење. Алфа и тета таласи могу указати на ментално оптерећење (*Ryu* и *Myung*, 2005). Такође, утврђено је да фронтална тета (4-7 Hz) снага расте, док паријетална алфа (8-12 Hz) снага опада како се захтеви радних задатака интензивирају. Аутори (*Cole* и *Ray*, 1985) су установили да бета и алфа таласи различито реагују на различите типове радних задатка које радници обављају.

Варијације у бета опсегу су повезане са пажњом и краткорочним памћењем и односе се на фронтални регион тј. на електроде F7, F3, F4, F8, Fz. Како истичу аутори (*Gruber* и други, 1999) повећање гама таласа одражава промене у пажњи и концентрацији. Такође, ови аутори су установили да повећање гама фреквенције у паријеталном кортексу, одражава промене у пажњи.

За процену менталног оптерећења примењују се различите методе (*Ryu* и *Myung*, 2005). ЕЕГ метода је једна од најзначајнијих метода за праћење нивоа менталног оптерећења код радника у реалном времену (*Fernández*, 1995). За разлику од субјективних метода ову методу карактерише објективност. Како се наводи у раду чији су аутори (*Pušica* и други, 2023) код субјективних метода проценитељи су били обучени да изврше процену менталног оптерећења приликом обављања одређених радних задатака, а затим су вршили процену тежине неких других радних задатака, тако да резултати процене менталног оптерећења нису били задовољавајући, чак и када су резултати процене у оквиру истог задатка били веома добри.

Најраспрострањенија метода ЕЕГ анализе за процену менталног оптерећења је анализа фреквенцијског опсега, која укључује разлагање електричне активности мозга на различите фреквентне компоненте (*Borghini* и други, 2014). Сваки фреквентни опсег је повезан са специфичним когнитивним стањима, нудећи увид у когнитивне процесе и ментална стања на основу релативне снаге унутар ових фреквенцијских опсега (*Başar* и други, 2001). У већем броју истраживања су израчунати фреквенцијски опсеги алфа, бета, тета (изражени у $\mu\text{V}/\text{Hz}$) (*Raufi* и *Longo*, 2022).

У научно-истраживачким радовима разматрани су различити односи снага можданих таласа за процену когнитивног стања особе у фази ангажовања или опуштања (*Ryu* и *Myung*, 2005; *Fernández* и други, 1995). Често коришћена метрика за квантификацију менталног оптерећења у научно-истраживачким радовима је однос тета-

алфа, који се израчунава дељењем снаге тета опсега преко ЕЕГ средњег фронталног канала (Fz) и снаге алфа опсега преко паријеталног канала (Pz) (Holm и други, 2009; Gevins и Smith, 2003; Kartali и други, 2019). Научна истраживања су показала да су ове метрике у корелацији са неким објективним метрикама које процењују тежину радних задатка (Smith и други, 2001; Kartali и други, 2019) и техникама за самопроцену (Berka и други, 2007).

Најчешће примењивана метрика за процену менталног умора у научно-истраживачким радовима је индекс менталног оптерећења (енгл. *Mental Workload Index*). У литератури се може наћи и под термином индекс когнитивног оптерећења (енгл. *Cognitive Load Index*). Овај индекс омогућава квантитативну процену менталног напора радника током обављања радних задатака. Преко индекса могу се пратити варијације у когнитивном оптерећењу у зависности од комплексности различитих радних задатака или услова у којима се обављају радне активности и идентификовати када долази до менталне преоптерећености или смањења ангажованости.

Овај индекс се израчунава као однос фронталне тете и паријеталне алфе (енгл. *frontal theta divided by parietal alpha*) (Pope и други, 1995). Како истичу аутори (Zhang и други 2018; Andreessen и други, 2021) услед видљивих промена у фронталном тета опсегу (4-7 Hz) и паријеталном алфа опсегу (8-12 Hz), њихов однос се може користити за процену менталног оптерећења.

Овај индекс се приказује следећом формулом:

$$MWLi = \frac{\theta \text{ frontal}}{\alpha \text{ parietal}}$$

Утврђено је да се током решавања комплексних проблема и аналитичког размишљања повећава вредност овог индекса (Berka и други, 2007). Повећана вредност овог индекса указује на повећано ментално оптерећење.

Индекс ангажовања (енгл. *Engagement Index - Ei*) је други веома често примењиван индекс у научним радовима који се користи за процену нивоа когнитивне укључености радника током обављања радних задатака. Овај индекс пружа увид у когнитивни статус радника, могућност да одржи фокус и концентрацију. Преко овог индекса прате се промене у ангажовању током различитих фаза обављања активности или у зависности од сложености радних активности.

Овај индекс се израчунава као однос бета снаге и збира алфа и тета снаге (енгл. *beta power divided by the sum of alpha and theta power*).

$$Ei = \frac{\beta}{\alpha}$$

Трећи индекс такође указује на ангажовање особе током обављања радних активности и израчунава се као количник бета снаге и алфа снаге (енгл. *beta divided by alpha power*).

$$E_i + \theta = \frac{\beta}{\alpha + \theta}$$

Како је истакнуто у студијама које су спровели аутори (*Coelli* и други, 2015) овај индекс најбоље одражава ангажовање особе. Ови индекси спадају у групу најчешће коришћених индекса у научно-истраживачким радовима.

Такође, показатељ праћења активности мозга (енгл. *Brain Activity Tracker - BAT*) се користи за одређивање степена укључености у радне задатке који захтевају ментални напор. Показатељ активност на задатку (енгл. *Task Activity - TA*) је такође повезан са менталним оптерећењем. Са повећањем вредности овог параметра повећава се ментално оптерећење.

Поред ЕЕГ метрике значајне су и следеће метрике: стопа грешке тј. утврђивање да ли је монтажа обављена тачно у складу са датим упутствима или су у току процеса монтаже направљене грешке односно да ли је састављање компоненти извршено на исправан или погрешан начин, време потребно за склапање једног производа или дела производа), самооцењивање кроз примену упитника итд.

Стопа грешке представља важан показатељ који открива да ли је монтажа обављена у складу са задатим упутствима или су током процеса начињене грешке. Ова метрика се широко користи у студијама које процењују ментално оптерећење. Дефекти направљени при склапању предмета и компоненти могу указати на виши ниво когнитивног оптерећења, да је задатак био превише тежак или да је радник у току обављања активности монтаже изгубио фокус (*Pankok* и други, 2017). У радовима аутора (*Pankok* и други, 2017; *Kosch* и други, 2018; *Li* и други, 2018) метрике за процену менталног оптерећења су комбиноване са праћењем стопе дефеката.

Време састављања је један од значајнијих показатеља менталног оптерећења током обављања радних задатака. Веће време монтаже може указати на то да је радни задатак био захтевнији, или да је радник функционисао на нижем нивоу когнитивног оптерећења. Са друге стране уколико је сложеност радног задатка константна, дуже време састављања може бити показатељ да је радник уложио мање менталног напора у извођење радног задатка.

За боље разумевање менталног оптерећења из перспективе самих радника често се користи метода упитника која омогућава прикупљање информација о менталном оптерећењу и сложености радних задатака на основу субјективних искуства током извршавања задатака. У многим студијама ментално оптерећење је процењено комбинацијом технике самопроцене и спровођењем физиолошких мерења која укључују ЕЕГ, варијабилност откуцаја срца, галвански одговор коже, праћење покрета ока, итд (*Pušica* и други, 2023).

3.10 ЕЛЕКТРОЕНЦЕФАЛОГРАФИЈА

Напредне технологије, попут електроенцефалографије (ЕЕГ), функционалне магнетне резонанце (енгл. functional magnetic resonance - *fMRI*), и магнетоенцефалографије (енгл. magnetoencephalography - *MEG*), омогућавају прецизно праћење мождане активности и мапирање когнитивних процеса на различитим регијама мозга.

Електроенцефалографија је једна од најчешће примењиваних метода за мерење електричне активности мозга у реалном времену (*Gramann* и други, 2011; *Hogervorst* и други, 2014). Ову методу одликују прецизност, поузданост и лакоћа примене. Континуираним праћењем ЕЕГ сигнала субјеката утврђује се потреба за увођењем додатних пауза или реорганизацијом радних активности како би се побољшала продуктивност радника и квалитет производа.

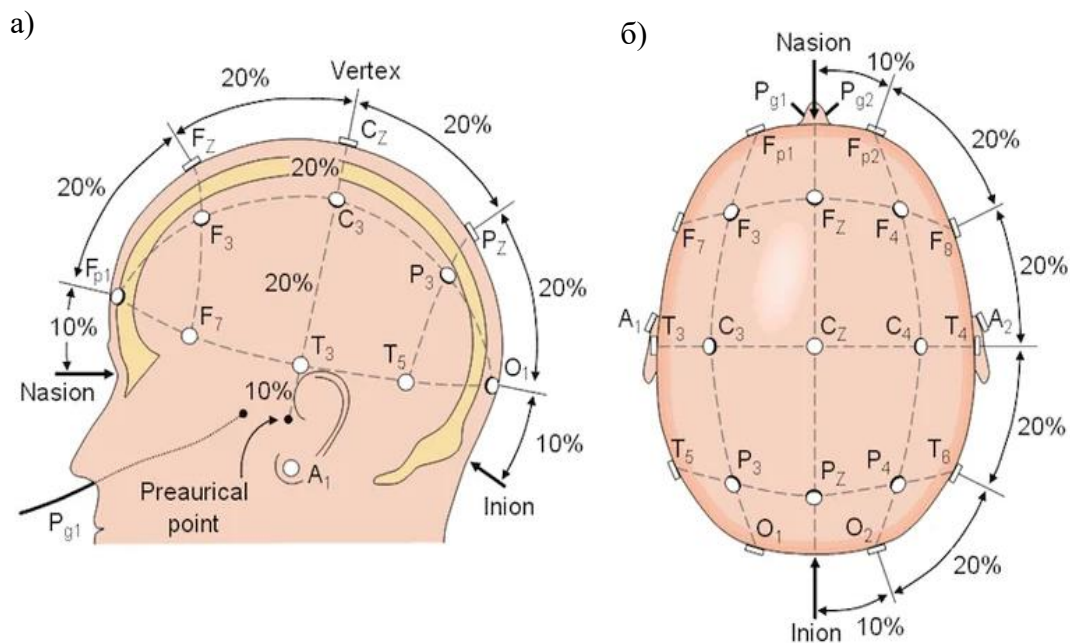
Основна предност ЕЕГ-а је могућност објективног мерења когнитивног оптерећења (за разлику од класичних субјективних метода самопроцене) мождане активности радника у реалном времену (*Mijović* и други, 2016а,б). Ранија истраживања когнитивних аспеката базирала су се на субјективним претпоставкама (*Parasuraman*, 2003). Стога, резултати добијени применом ових метода су непоздани и пристрасни (*Parasuraman* и *Rizzo*, 2006).

ЕЕГ метода налази све већу примену у медицини у дијагностици и лечењу неуролошких болести и поремећаја (као што су епилепсија, поремећај спавања, деменција) и праћење јачине анестезије током операције итд. Процену ЕЕГ записа раније су обично спроводили искусни процењивачи који су визуелно скенирали ЕЕГ записе. Међутим, визуелна инспекција је дуготрајан процес у току кога се могу јавити грешке, изискује финансијска улагања и не пружа поуздане информације. Стога је развој напредних ЕЕГ уређаја од кључног значаја како би се обезбедила правилна евалуација и лечење неуролошких болести.

У индустријским окружењима, ЕЕГ метода има све већу примену у ергономији у праћењу мождане активности, процени когнитивног стања и менталног оптерећења радника и утврђивања да ли радник може да задржи пажњу током дужег временског периода (*Infantolino* и *Miller*, 2014; *Zheng* и *Lu*, 2017; *Fasth-Berglund* и *Stahre*, 2013; *Scalera* и други, 2020; *Savković* и други, 2022в). Аутори (*Gevins* и други, 1995) сматрају да је ова метода посебно корисна у мерењу мождане активности на радним местима која захтевају велику концентрацију радника.

Ова метода је примењена у различитим студијама у циљу праћења стреса којем су радници изложени (*Liao* и други, 2018). Аутори (*Chen* и други, 2017) су применили ЕЕГ методу за праћење менталног оптерећења испитаника при чему су се посебно фокусирали на гама таласе. Аутори (*Foong* и други, 2019) користили су ЕЕГ методу да идентификују када наступа поспаност. У студији је учествовало 29 испитаника.

Пошто је архитектура мозга неуједначена, ЕЕГ сигнали варирају у зависности од локације електрода за снимање. Веома је важно посвећивање пажње постављању електрода, јер су различити режњеви мождане коре одговорни за обраду различитих врста активности. Стандардна метода за локализацију електрода је међународни систем од 10-20 електрода (*Homan*, 1988). Слика 3.13 (а,б) приказује положај електрода према међународном систему 10-20.



Слика 3.13 Графички приказ међународног 10-20 система за позиционирање електрода током ЕЕГ снимања, са погледом одозго (а) и погледом са стране (б) (преузето са: <https://info.tmsi.com/blog/the-10-20-system-for-eeeg>)

Према систему 10-20 поставка електрода се базира на пресецима 10 или 20% интервала раздаљине од специфичних анатомских положаја на глави. Ознаке „10“ и „20“ представљају стварна растојања између суседних електрода и износе 10% или 20% укупног растојања на лобањи.

У овом систему се позиције електрода одређују помоћу комбинације једног или два латинична слова и/или бројевима. Свака локација се означава словом за идентификацију режња и бројем за идентификацију локације хемисфере. Прво слово у називу положаја електроде се односи на одређени регион лобање на којем је електрода позиционирана - тако слово F означава фронталну регију, слово T представља темпорални регион, слово O се односи на оксипиталну регију, слово P се везује за паријателну регију, док се слово C односи на електроде које се налазе на централној линији главе. Латинично слово „z“ се односи на электроду постављену на централној линији. Непарни бројеви указују да се електрода налази на левој, а парни бројеви на десној хемисфери. На овај начин задржава се правило за именовање електрода (Vanderperren, 2011).

3.11 ПРАЋЕЊЕ ПОКРЕТА ОЧИЈУ

Око је најважнији орган одговоран за вид код људи који има виталну улогу у перцепцији околине. Анатомија ока обухвата рожњачу, ирис, зеницу, сочиво, мрежњачу и оптички нерв, који заједно омогућавају преношење визуелних информација до мозга ради даље обраде.

Покрети очију се односе на кретања очију током скенирања, фокусирања пажње и праћења објеката у видном пољу. Праћење покрета очију омогућава разумевање на шта особа усмерава поглед, на шта обраћа посебну пажњу и како се њене очи крећу док посматрају одређени објекат или окружење. Праћење покрета очију, трајања фиксације,

сакадичних образаца пружа јединствен увид у когнитивне процесе радника током извршавања радних задатака и омогућава дубље разумевање менталног оптерећења којем су радници изложени. У циљу праћења покрета очију и фокусирања погледа најчешће се примењују уређаји за праћење очију или камере.

Покрети се могу класификовати у следеће категорије:

- **Фиксације:** Током фиксације, поглед је релативно стабилан јер особа прикупља детаљне визуелне информације
- **Сакаде,** укључују брзе, балистичке покрете очију који омогућавају пребацивање погледа са једне тачке интересовања на другу током визуелног скенирања окружења
- **Вергенцијски покрети,** подразумевају покрете очију у супротним смеровима у циљу фокусирања на објекте који се налазе на различитим удаљеностима
- **Глатке потраге,** подразумевају покрете очију који омогућавају праћење објеката који су у покрету при чему је поглед фиксиран
- **Вестибуларни очни рефлекс,** се односи на покрете очију који компензују кретање главе или тела, омогућавајући очима да се крећу у супротном смеру од главе како би задржале фокус на тачки интересовања.

Праћење очију има значајну улогу у области ергономије и људских фактора, јер помаже у идентификацији пада концентрације и пажње радника и откривање првих знакова умора или расејаности. На овај начин се указује на ментални напор или нелагодност коју радници доживљавају током обављања различитих радних задатака, што негативно утиче на продуктивност (*Gervasi* и други, 2024).

Когнитивно оптерећење радника се може проценити преко праћења брзине трептања очију. Услед повећања захтева радних задатака, долази до појачаног напрезања очију и самим тим повећања концентрације и пажње. Радници су приморани да одржавају фокус дужи временски период, што може довести до замора очију, смањене ефикасности у обради информација и смањења продуктивности (*Hockey*, 1997). У студији коју су спровели аутори (*Wascher* и други, 2014) праћени су трептаји током обављања активности у складишту како би се стекао увид у когнитивно стање радника. Утврђено је да се учесталост трептања очију смањује са повећањем оптерећења услед обраде визуелних стимуланса (*Fogarty* и *Stern*, 1989). То указује на повећану концентрацију и већу усмереност на радне активности. Такође, постоји корелација између повећане учесталости трептања и повећања когнитивног оптерећења (*Wilson* и други, 2004). Са друге стране, аутор (*Castor*, 2003) сматра да је корелација између брзине трептања очију и когнитивног оптерећења је слаба. Овај аутор истиче да се трајање затварања очију смањује са повећањем оптерећења услед обраде визуелних стимуланса или прикупљања више информација.

4. УНАПРЕЂЕНА LEAN ИНДУСТРИЈСКА РАДНА СТАНИЦА

Како истичу аутори (*Loch* и други, 2016) радне станице на којима се обављају прецизне и сложене операције склапања делова и компоненти привлаче све већу пажњу како истраживача тако и људи из привреде. Прегледом литературних извора утврђено је да је већина научно-истраживачких радова из ове области усмерена на истраживање могућности за побољшање алата и опреме са ергономског аспекта. Мали број радова је фокусиран на разматрање радног окружења у целини, укључујући радника и радни простор на коме се обављају активности. Стога постоји простор за спровођење даљих истраживања у овој области.

4.1 ТРАДИЦИОНАЛНА РАДНА СТАНИЦА

Неадекватно дизајниране радне станице су уобичајена пракса у традиционалним индустријским окружењима. Традиционална радна станица на којој радници обављају ручне, понављајуће и физички захтевне активности у стварном индустријском окружењу је фиксна и није прилагођена индивидуалним антропометријским карактеристикама и могућностима радника. Такође, традиционалне радне станице карактерише лоша организација опреме, делова, компоненти и алата што отежава извођење монтажних активности, захтева напор и истезање које превазилази могућности радника што даље проузрокује бројне професионалне болести.

Типичне традиционалне радне станице у индустријском окружењу нису пројектоване у складу са ергономским принципима. Према ауторима (*Choobineh* и други, 2004; *Choobineh* и други, 2007a,b) обављање активности у неергономском положају тела током дужег временског периода доводи до професионалних болести, најчешће мишићно-коштаних поремећаја. Аутори (*Corlett* и *Eklund*, 1983) су такође показали да се на неергономски дизајнираном радном месту повећава ризик од настанка мишићно-коштаних поремећаја, као што су карпални тунел, тендонитис зглоба и латерални епикондилитис и других здравствених проблема. Аутори (*Mossa* и други, 2016; *Bernal* и други, 2015) су указали на ергономске ризике током извођења ручних операција ниског оптерећења са великом учесталости понављања. Као методе за елиминисање ризика предложили су оптимизацију распореда и чешћу ротацију послова.

Учестало извођење покрета који се понављају и извођење покрета великом брзином у нефизиолошким положајима тела током дужег временског периода повећава оптерећење тетива, мишића и нерава шака, зглобова мишића подлактице и мишића врата што даље проузрокује напрезање и болове у мишићима горњих екстремитета. Висока учесталост понављања задатака у комбинацији са другим факторима ризика као што су нефизиолошки положаји тела доводе до повећаног напрезања и успоравања процеса производње. Монтажне активности се у традиционалном радном окружењу најчешће обављају у вертикалном положају тела што додатно погоршава здравствено стање

радника. Радници који имају симптоме мишићно-коштаних поремећаја често одсуствују са посла ради лечења или опоравка, што може довести до смањења продуктивности и повећања трошкова у организацијама (*Das и Sengupta, 1996*).

Небезбедно и неадекватно дизајнирано радно окружење негативно утиче на перформансе радника. У студији коју су спровели (*Resnick и Zanotti, 1997*) учествовало је петнаест субјеката који су обављали различите радне задатке. Истраживан је утицај висине радног стола, удаљеност и распоред алата и компоненти на време извршења активности. Резултати спроведеног истраживања су показали да је на радним станицама потребно увођење промена у циљу максимизирања перформанси и побољшања продуктивности радника. Слично, у раду чији је аутор (*Das, 1987*) је истакнуто да у традиционалним индустријским системима није придавано довољно пажње дизајну радних станица, што је довело до значајног смањења продуктивности.

Студије које су спровели аутори (*Das и Sengupta, 1996*) су показале да неправилан нефилошки положај тела директно утиче на смањење перформанси услед повећања физичког замора мишића. Ови радови указују на важност правилног ергономског дизајна радних места како би се спречио физички и ментални замор и побољшале перформансе радника. На основу свега наведеног, може се закључити да постоји простор за редизајнирање традиционалних индустријских радних станица како би се унапредили физички, когнитивни и организациони аспекти ергономије. Посебан акценат је на идентификацији, смањењу и елиминацији небезбедних поступака и примени превентивних мера.

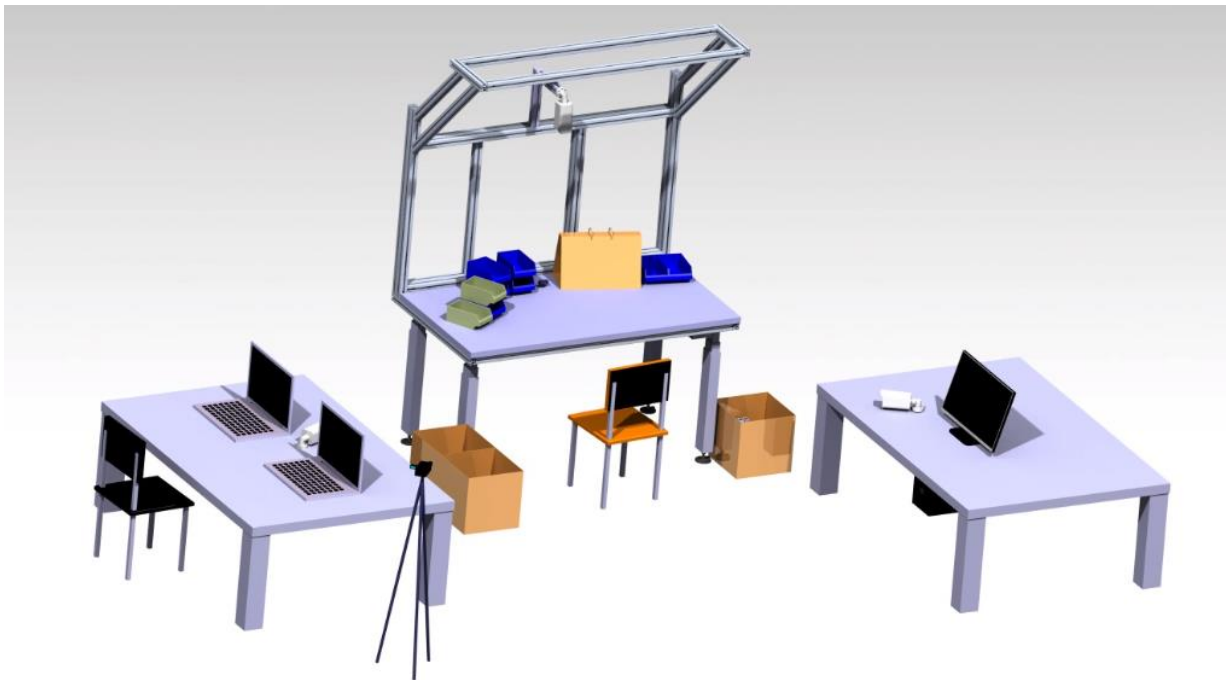
На сликама 4.1 и 4.2 је приказан модел традиционалне радне станице.



Слика 4.1 Традиционална радна станица (поглед 1)

Представљени модел традиционалне радне станице представља базу за спровођење експерименталних истраживања током извођења монтажних активности у неергономском сценарију, у окружењу сличном реалном индустријском окружењу (*Savković и други, 2022a; Savković и други, 2022б; Savković и други, 2022в*) поглавље број 5 у дисертацији).

Постојећа радна станица је детаљно анализирана како би се идентификовали недостаци који утичу на ефикасност обављања активности. Уочени су бројни проблеми везани за висину радне станице, распоред и организацију потребних компоненти, делова и алата. Радна станица је имала фиксну висину и била је прениска, што је додатно отежавало обављање активности, Као што се види на сликама 4.1 и 4.2 радна површина је претрпана непотребним класери са компонентама и алатима што је отежавало одржавање континуираног ритма рада. Распоред класера са деловима и компонентама неопходним за монтажу као и упутства за спровођење радних активности нису усклађени са принципима златне зоне већ су класери распоређени у простору изван максималног дохвата радника тако да су они принуђени да се напрежу, савијају и истежу тело како би преузели потребне компоненте и делове што негативно утиче на њихово здравље.



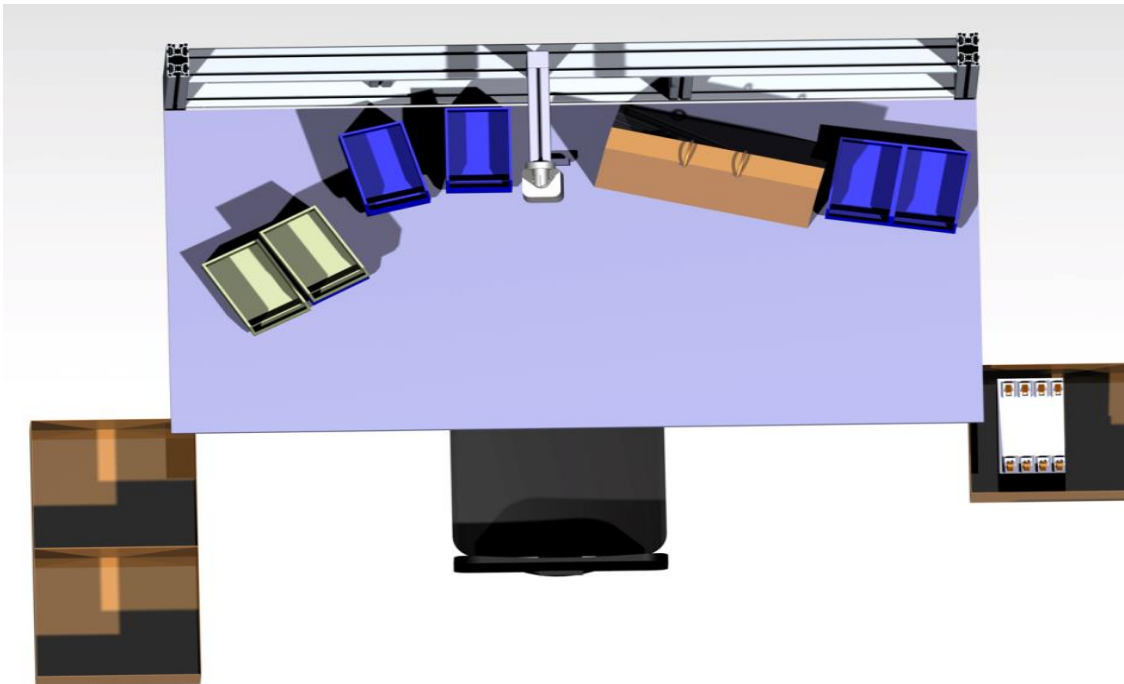
Слика 4.2 Традиционална радна станица (поглед 2)

Праћењем и анализом покрета радника може се закључити да традиционална радна станица није усклађена са ергономским и *lean* принципима. *Lean* концепт се заснива на елиминацији свих облика губитака и расипања из производних токова у циљу скраћивања времена које протекне од поручивања до испоруке. Овај приступ посебан нагласак ставља на активности које додају вредност финалним производима и елиминисање непотребних активности и ресурса. Под губицима и расипањима у *lean* филозофији пословања подразумевају се све оне активности које не додају вредност финалном производу као што су непотребно кретање материјала, прекомерна производња, чекање, додатне поправке и модификације. Елиминисањем губитака повећава се продуктивност и смањују се трошкови.

Имајући у виду *lean* принципе и дефинисану терминологију, под термином отпад у ергономији подразумева се извођење непотребних покрета, истежање и савијање тела, заузимање неприродних и нефизиолошких положаја тела што даље негативно утиче на безбедност и здравље радника (Yusuff, 2016). Елиминисање већине или свих непотребних покрета линеарно доводи до унапређења ергономије радног места.

У традиционалном сценарију испитаници су савијали врат и тело на десну страну како би преузели припремљене елементе од плесигласа које су им неопходни за монтажу, а како би спустили завршен финални производ у кутију поред радне станице били су принуђени да савијају тело на леву страну. Испитаници су радне задатке обављали у седећем положају, седећи на столици која није била ергономски дизајнирана, није имала подесиви ослонац за ноге, што је узроковало неугодност и замор код испитаника.

На слици 4.3 представљен је изометријски приказ радног простора који није усклађен са стандардима златне зоне и 5С принципима.



Слика 4.3 Изометријски приказ радне површине на традиционалној радној станици

Као што се може видети са слике 4.3 потребне компоненте, делови и алати нису постављени и распоређени у складу са принципима златне зоне, *lean* и 5С принципима слично као у реалном индустријском окружењу. Овакав распоред и организација радног места могу условити замор мишића, пад концентрације и ометати извођење монтажних активности, што за последицу најчешће има смањење продуктивности и низак ниво квалитета финалног производа. Све ово указује на потребу за побољшањима постојеће радне станице.

4.2 ПРЕДЛОЖЕНА РАДНА СТАНИЦА

Стручњаци из индустрије све више инсистирају на сарадњи са академским институцијама како би се решили проблеми са којима се суочавају савремени производни системи као што су радни учинак, благостање, задовољство послом и безбедност и здравље радника.

Да би се превазишли недостаци традиционалне радне станице, у дисертацији је развијена и дизајнирана нова радна станица која је усклађена са ергономским и *lean* принципима и стандардима златне зоне. Предложена радна станица превазилази недостатке традиционалне радне станице. За разлику од традиционалне радне станице која је фиксна предложена радна станица је флексибилна и прилагођена индивидуалним карактеристикама и могућностима радника (Savković и други, 2022a).

На слици 4.4 је приказан PDCA циклус (енгл. *Plan-Do-Check-Act*). Ова методологија подразумева систематски приступ побољшању радних станица за монтажу и радних услова кроз следеће фазе: планирање, примена, провера и деловање. Прва фаза подразумева анализу стања традиционалне монтажне радне станице и идентификацију области које захтевају побољшање. Ово укључује ергономску процену, анализу распореда материјала и алата, и радних задатака, анализу тока материјала, прикупљање података о физичком и менталном замору радника, времену трајања активности, дефектима итд. У овој фази планирају се конкретне промене које имају за циљ побољшање радних услова, унапређење безбедности, продуктивности и задовољства радника.



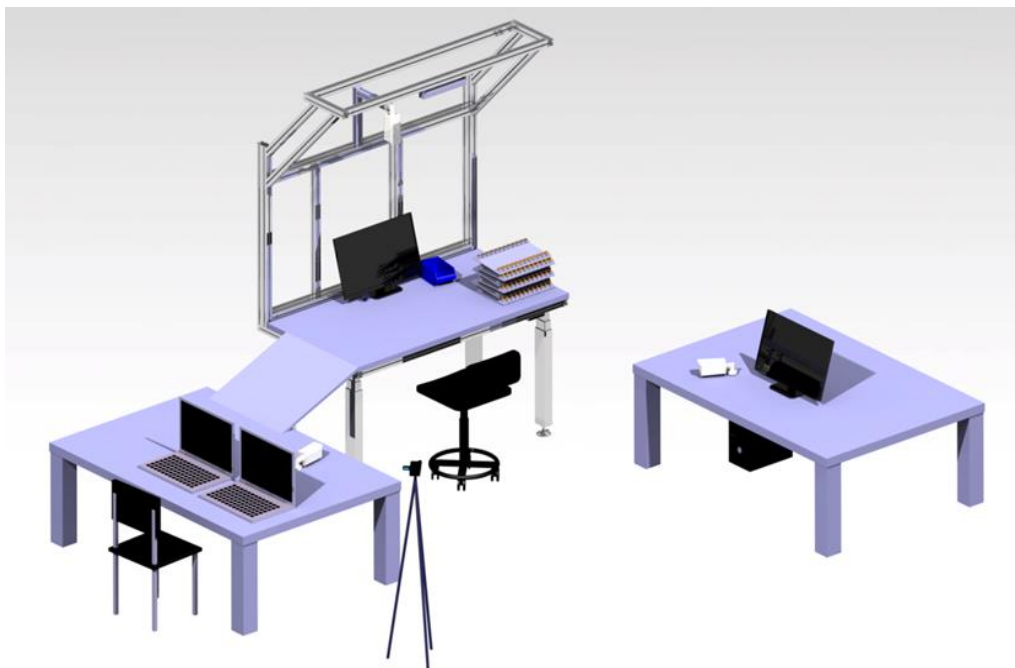
Слика 4.4 PDCA циклус примењен на монтажну радну станицу

У другој фази се имплементирају планиране промене на традиционалној монтажној радној станици како би се осигурало да радна станица буде прилагођена физичким и когнитивним карактеристикама радника. То подразумева редизајнирање

радне станице, имплементацију ергономских мера, реорганизацију распореда неопходних делова и компоненти, оптимизацију секвенци рада и постављање визуелних ознака ради боље организације. Посебан нагласак је на минимизирању и елиминацији неергономских покрета и неправилних положаја тела.

У трећој фази се примењују квантитативне методе у циљу анализе перформанси на предложеној новој радној станици како би се утврдило да ли су примењена побољшања достигла унапред постављене циљеве. Ово укључује мерење кључних параметара као што су продуктивност, време потребно за извршење монтажних радних задатака, број грешака, физичко и ментално оптерећење радника и задовољство новом радном станицом. Идентификација побољшања се врши упоредном анализом података добијених у традиционалном и ергономском сценарију. У последњој фази на основу добијених резултата из треће фазе се доносе одлуке. Ако се покаже да су предложене промене унапредиле ефикасност монтажне радне станице, нови стандарди се формализују. Са друге стране, уколико се покаже да постоје могућности за додатно побољшање монтажне радне станице, циклус почиње поново, са новим планом и корацима ка даљој оптимизацији монтажне радне станице.

На слици 4.5 је представљен модел ново дизајниране радне станице. Предложена радна станица ће бити коришћена за спровођење експерименталних истраживања у ергономском сценарију (Savković и други, 2022a; Savković и други, 2022b).



Слика 4.5 Модел предложене ергономске радне станице

На слици 4.6 је приказана нова *lean* радна станица. Конструкција предложене радне станице је израђена од лаганих елоксираних алуминијумских профила (рамови $40 \times 40 \text{ mm}$ и $40 \times 80 \text{ mm}$), који се првенствено имају примену у индустрији. Алуминијумски профили су затегнути са припадајућим елементима за затезање како би се обезбедила чврстоћа и стабилност. Ови профили се лако повезују помоћу специјализованих спојева. Подесиви елементи су такође израђени од алуминијума због његове отпорности на хабање. Радна површина је израђена од иверице сиве боје, у мат варијанти, да би се смањила рефлексија на што је могуће нижи ниво и њен утицај на испитанике у истраживањима. Ивице радне површине су благо заобљене имајући у виду штетан утицај силе притиска подлактице о површину током спровођења радних активности. Такође,

прекривена је силиконском подлогом која има улогу да елиминише клизање предмета приликом обављања монтажних активности.



Слика 4.6 Предложена *lean* радна станица

Предност предложене радне станице у односу на традиционалне радне станице огледа се у аутоматском подешавању висине радне станице за сваког испитаника понаособ притиском на тастер. Након прегледа научно-истраживачких радова, закључено је да је најбоља опција да радници обављају активности на флексибилним радним станицама које имају могућност подешавања по висини (Wilks и други, 2006). Како наводе (Shikdar и Al-Hadhrami, 2007) пожељно је да радни сто буде подесив. На предложеној радној станици, испитаници имају могућност да подесе висину радног стола и столице у складу са антрополошким карактеристикама. Висина предложене радне станице се може подесити у опсегу 740 cm - 1200 mm помоћу телескопских стубова са двоструким дизањем. У раду чији је аутор (Grandjean, 1988) су анализирани оптималне висине радне површине за различите врсте послова, с циљем да се побољшају ергономски услови и смањи физичко оптерећење радника. Овај аутор је предложио да висина радне површине за прецизне активности (као што су активности монтаже делова и компоненти) за мушкарце буде између 100 и 110 cm. Према овом аутору, оптимална висина радне станице током обављања лакших активности је око 90-95 cm, док је за теже активности препоручио да висина радне станице буде у опсегу од 75 до 90 cm. Такође, радна столица је подесива по висини и направљена је од робусног материјала који обезбеђује стабилност независно од тежине испитаника у истраживању.

На ергономској радној станици пажња је посвећена и осветљењу. Осветљење је веома важан фактор јер је веома важно да се обезбеди адекватно осветљење како испитаници у истраживању не би напрезали очи приликом обављања монтажних активности. Појединачни рефлектори постављени на традиционалној радној станици стварају суперпониране чврсте сенке и могу изазвати напрезање очију, што проузрокује замор и пад концентрације. На новој ергономској радној станици уграђено је хомогено LED осветљење, које производи само меке сенке, које мање оптерећују очи, са могућношћу подешавања беле светлости (топло бела, бела и хладно бела). Такође,

постављен је и аудио систем 5.0 како би се у довољној мери квалитетно репродуковала бука из реалног индустријског окружења.

Предложена ергономска радна станица за спровођење активности монтаже је дизајнирана у складу са 5С принципима и стандардима златне зоне. Сви делови и компоненте неопходни за извођење монтажних активности су распоређени унутар златне зоне тако да није било потребе за додатним истезањем и савијањем тела и извођењем непотребних и неергономских покрета. 5С приступ има за циљ стварање функционалног, ефикасног и организованог радног окружења које је прилагођено физичким и когнитивним способностима радника. Овај приступ се базира на организовању и уређивању радних станица за монтажу, елиминацији непотребних предмета који могу ометати радника током обављања радних активности или успоравати процес монтаже. 5С подразумева јасно обележавање елемената у оквиру радног простора, дефинисање позиције свих компоненти и делова потребних за обављање монтаже и стандардизовано означавање.

Обављање монтажних активности у стојећем положају током дужег временског периода негативно утиче на здравствено стање радника. Бројна истраживања су показала да се бол у леђима јавља код радника који обављају активности у стојећем положају током дужег периода времена (*Andersen* и други, 2007; *Roelen* и други, 2008). Са друге стране, у научно-истраживачким радовима (*Fenety* и *Walker*, 2002; *McLean* и други, 2001; *Callaghan* и други, 2010) је установљено да обављање активности у седећем положају током дужег времена резултира повећањем нелагодности и непријатности и појаве мишићно-коштаних поремећаја. Током спровођења истраживања у компанијама у Шведској (*Wilks* и други, 2006), су установили да сваки десети радник обавља активности на радној станици у седећем положају. Иако су аутори сматрали да радници који обављају активности на радним местима у седећем положају имају смањен осећај нелагодности, резултати истраживања су показали да радници који обављају активности у седећем положају имају посебно изражен осећај нелагодности у горњим екстремитетима. Стога, када год радне активности дозволе, радници би требали да пређу из седећег у стојећи положај. Аутори студије случаја (*Hedge* и *Ray*, 2004) указали су да иако је радницима понуђено да обављају радне задатке у седећем положају на радној станици они су 21.2% радног времена провели у стојећем положају, што је резултирало смањењем мишићно-коштаних поремећаја за 27.5 %.

На предложеној ергономској радној станици испитаници могу да изводе монтажне активности у комбинованом (седећем и стојећем) положају, без умора и физичког напрезања. Аутори (*McLean* и други, 2001) истичу да честе промене положаја тела и извођење активности у комбинацији седећег и стојећег положаја и повећање броја и трајања пауза доприноси смањењу нелагодности. Дизајном и контрукцијом ергономске радне станице елиминисани су сви уочени проблеми који карактеришу фиксну традиционалну радну станицу. Она је пројектована тако да буде флексибилна односно прилагођена индивидуалним карактеристикама и способностима радника, специфичним карактеристикама производа и радним операцијама. Модуларна структура предложене ергономске радне станице за монтажне активности омогућава прилагођавање постојећих стандардизованих модула радне станице захтевима радника (*Savković* и други, 2022a).

Приликом дизајнирања нове ергономске радне станице посебна пажња је посвећена антропометријским својствима радника, осигуравајући да радна станица буде прилагођена и мушким и женским корисницима. Антропометрија је научна дисциплина која се фокусира на мере и пропорције људског тела, и игра кључну улогу у пројектовању радних станица које су ергономске и безбедне за раднике (*Jarosz*, 1996). Да би

дизајнирали радну станицу која је погодна за најмање 90 процената мушких и женских особа, дизајнери морају узети у обзир различите антропометријске факторе, као што су висина тела, тежина, дужина руке и дужина ногу. Аутори (*Das и Grady, 1983*) су указали на важност узимања у обзир антропометријских података приликом дизајнирања радног простора. Штавише, стандардна висина радног стола не може се дефинисати без узимања у обзир антропометријских података радника. Такође, аутори (*Deros и други, 2009*) су указали на значај антропометријских података у дизајну радних станица, наглашавајући да неусклађеност између антропометријских карактеристика радника и карактеристика радне станице може довести до смањене ефикасности.

Аутори (*Lasota и Hankiewicz, 2016; Konz, 1995*) истичу да посебна пажња мора бити посвећена ергономској процени и дизајнирању радних места. Редизајнирање индустријских радних станица уз поштовање ергономских принципа представља корак напред ка Индустрији 5.0 и приступу усредсређеном на човека. Ергономија се фокусира на то да радно место буде што ефикасније, безбедније и удобније. На овај начин побољшава се безбедност, физичко и ментално благостање, продуктивност и задовољство радника.

Бројни научно-истраживачки радови указују на важност дизајнирања радног окружења у коме се обављају задаци који захтевају монтажне активности у складу са основним принципима ергономије (*Couri и други, 2000; Neumann и други, 2002; Bossomaier, 2010*). Како истичу (*Cimino и други, 2009*) ергономски дизајн представља један од најважнијих предуслова за унапређење производних процеса и стварање ефикаснијег, безбеднијег и удобнијег радног окружења.

Аутори истраживања (*Botti и други, 2015*) су предложили математички модел за дизајнирање ергономске монтажне линије прилагођене индивидуалним карактеристикама радника и захтевима посла (односно задацима који се обављају на овој радној станици) у циљу побољшања ефикасности. Обављање активности на ергономски редизајнираној новој радној станици смањило је ризик од појаве мишићно-коштаних поремећаја код радника који су производили полупроводнике (*Lin и Chan, 2007*) будући да је радно место дизајнирано тако да су покрети радника минимизирани. Фокус рада аутора (*Gonçalves и Salonitis, 2017*) је на пројектовању монтажне радне станице узимајући у обзир следеће критеријуме: функционалност, ефикасност, ефикасност и задовољство радника.

Индустријска пракса у овој области подсећа организације на важност увођења мера из области ергономије приликом пројектовања радних станица за монтажу (*Otto и Scholl, 2011; Anghel и други, 2019*). Посвећивање пажње ергономским аспектима је посебно важно за радне средине које подразумевају извођење ручних монтажних активности од стране радника (*Hägg, 2003; Al Zuheri и други, 2016*). У студијама које су спровели аутори (*Roelofs и Straker, 2002; Davis и други, 2009*) је указано на предности обављања активности на радним станицама у адекватном ергономском положају. Основни циљ примене ергономских мера је да обезбеде да радно место буде безбедније и удобније јер се на тај начин побољшава продуктивност и квалитет производа, повећава физичко и ментално благостање и задовољство послом. У већем броју научно-истраживачких радова је указано на позитивне ефекте примене ергономских принципа приликом дизајнирања радних места, опреме и алата, радног окружења (*Hasselquist, 1981; Das, 1987*).

Посебну пажњу приликом пројектовања радних места треба усмерити на ергономске стандарде како би се смањили здравствени проблеми - болови у леђима, мишићно-коштани поремећаји и др. Према истраживању које су спровели (*Botti и други,*

2014), адекватан ергономски дизајн радних места позитивно утиче на безбедност и здравље радника кроз смањење стопе повреда и смањење изостанака са посла, а истовремено доприноси побољшању продуктивности, квалитета и поузданости.

Научна литература је показала да је имплементација ергономских принципа најбоља стратегија за превенцију мишићно-коштаних обољења, смањење повреда на раду, нелагодности, изостанака са посла (*Burdorf*, 2010; *Takala* и други, 2010; *Botti* и други, 2014), и побољшање продуктивности, ефикасности, квалитета производа и поузданости (*Hendrick*, 2003; *Dul* и други, 2004; *Roper* и *Yeh*, 2007; *Vayvay* и *Erdinc*, 2008; *Neumann* и *Dul*, 2010). Аутори (*Jorgen* и *Eklund*, 1995; *Hamrol* и други, 2011; *Thun* и други, 2011; *Falck* и *Rosenqvist*, 2012) су доказали да примена ергономских принципа на радном месту директно утиче на смањење грешака и повећање квалитета производа.

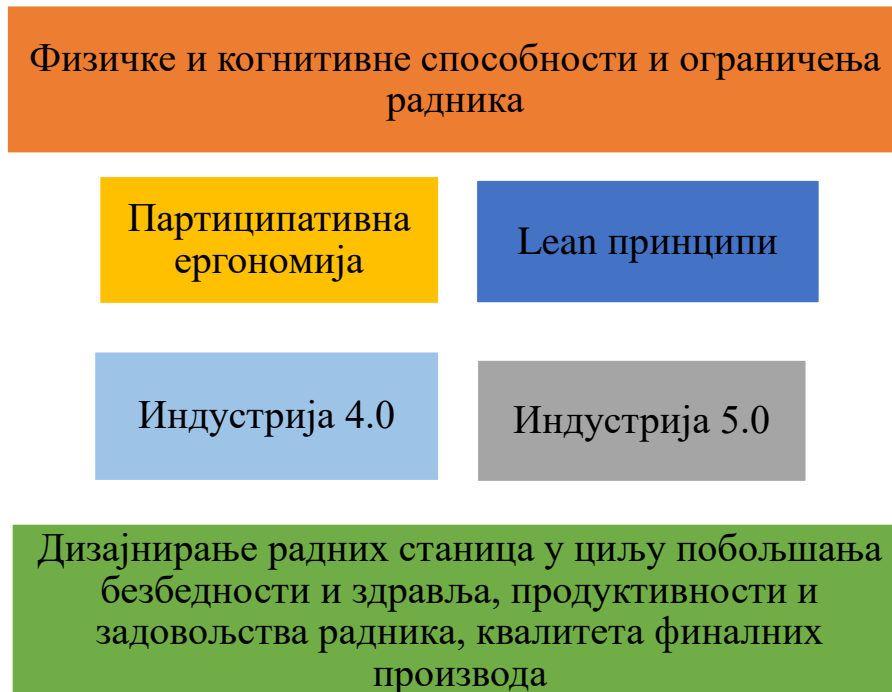
Аутори рада (*Yeow* и *Sen*, 2006) сматрају да чак и најјефтинија ергономска решења могу значајно позитивно утицати на квалитет производа. У истраживању које су спровели (*González* и други, 2003) је показано да се квалитет производа повећао за 2% и да је додатна обрада готовог производа значајно смањена након побољшања физичке ергономије. Претходне студије о побољшању перформанси углавном су се фокусирале на оптималну дистрибуцију активности (*Arnold* и други, 2004). Конкретно, неки аутори су истакли предности прилагодљивих и иновативних радних станица у поређењу са фиксним традиционалним радним станицама (*Eswaramoorthi* и други, 2010) за обављање понављајућих задатака монтаже (*Shikdar* и *Hadhrami*, 2007).

Аутори (*Temple* и *Adams*, 2000, и *Russell* и други, 2007) су се фокусирали на ергономски редизајн традиционалних индустријских радних станица с циљем смањења физичког оптерећења радника. Аутори су анализирали постојеће радне услове и извршили идентификацију фактора који могу довести до прекомерног напрезања мишићно-коштано система радника. Други аутори су указивали на предности обављања активности монтаже у адекватном ергономском положају и минимизирању кретања радника током радних активности (*Roelofs* и *Straker*, 2002; *Davis* и други, 2009). Примена ергономских принципа на радним местима на којима се обавља монтажа доприноси смањењу повреда на раду и унапређењу здравља радника (*Gerr* и други, 2014). Према ауторима (*Nielsen* и други, 2017) дизајнирање радних станица у складу са ергономским принципима доприноси повећању задовољства и продуктивности.

Нова радна станица је пројектована у складу са принципима физичке, организационе и когнитивне ергономије (*Savković* и други, 2022a). Акцент физичке ергономије је на анализи и оптимизацији положаја тела радника током извођења монотоних, понављајућих активности манипулације материјалима и деловима, минимизирању ризика од повреда на раду, превенцији настанка мишићно-коштаних поремећаја, побољшању дизајна радних станица у циљу унапређења безбедности и здравља радника. Кључни аспекти физичке ергономије су анатомија, антропометрија, физиолошке карактеристике радника (*Cardoso* и други, 2021; *Cañas* и други, 2011).

Когнитивна ергономија се базира на разумевању и оптимизацији менталних процеса радника који изводе монтажне активности у циљу унапређења когнитивних аспеката, побољшања ефикасности, безбедности и задовољства радника. Организациона ергономија се фокусира на оптимизацију производних процеса и радног окружења како би се смањило физичко и ментално оптерећење радника и повећала продуктивност. У контексту радних станица за монтажу, кључни аспекти организационе ергономије се односе на правилно распоређивање радних елемената и оптимизацију радних активности у циљу побољшања задовољства и продуктивности радника.

На слици 4.7 је приказан свеобухватни приступ пројектовања радне станице у складу са ергономским и *lean* принципима. На слици је показана узрочно-последична веза између примене *lean* и ергономских принципа и повећања продуктивности и благостања радника, и побољшања квалитета финалних производа у контексту Индустије 4.0 и Индустије 5.0. Посебан нагласак је на партиципативној ергономији.



Слика 4.7 Свеобухватни приступ пројектовању радне станице у складу са ергономским и *lean* принципима

Дизајнирање радних станица за монтажу захтева пажљиво разматрање физичких и когнитивних способности радника, као и њихових ограничења. Посебан фокус је на анализи антропометријских карактеристика, дмета руке и положаја тела како би се смањило физичко оптерећење и минимизирала могућност повреда на раду.

Ергономски аспекти остварују значајан утицај на побољшање квалитета финалних производа. Уколико су радне станице дизајниране у складу са ергономским принципима тако да се минимизира физички и ментални напор, радници обављају активности са већом концентрацијом и праве мање грешака, што даље побољшава квалитет финалних производа.

У контексту Индустије 4.0, ергономија има посебан значај. Нагласак је на прилагођавању напредних технологија потребама и способностима људи и оптимизацији интеракције између људи и осталих елемената радног система.

Индустрија 5.0 ставља раднике у центар пажње, а иновативне технологије имају улогу да олакшају обављање радних активности и побољшају услове рада. Посебан фокус је на стварању хуманизованог и персонализованог радног окружења и унапређењу обављања активности.

Lean филозофија се заснива на елиминацији губитака у свим аспектима производног процеса с циљем максимизирања ефикасности производних процеса. Посебан нагласак је на стварању вредности за купце и минимизирању активности које

не додају вредност, континуираном побољшању (*kaizen*), стандардизованом раду и 5S приступу.

Стандардизован рад (енгл. *standardized work*) подразумева тачно организован редослед радних операција. Овај приступ омогућава оптимално балансирање производног процеса, минимизирајући залихе и недовршену производњу и елиминисање активности које не додају вредност финалном производу.

Визуелни менаџмент у комбинацији са 5S системом има кључну улогу у организовању радних станица за монтажу. Коришћење различитих боја и ознака за обележавање потребних материјала, компоненти и алата омогућава бољу организацију радног простора, лакшу доступност алата и опреме односно смањење времена за тражење што даље доприноси повећању ефикасности.

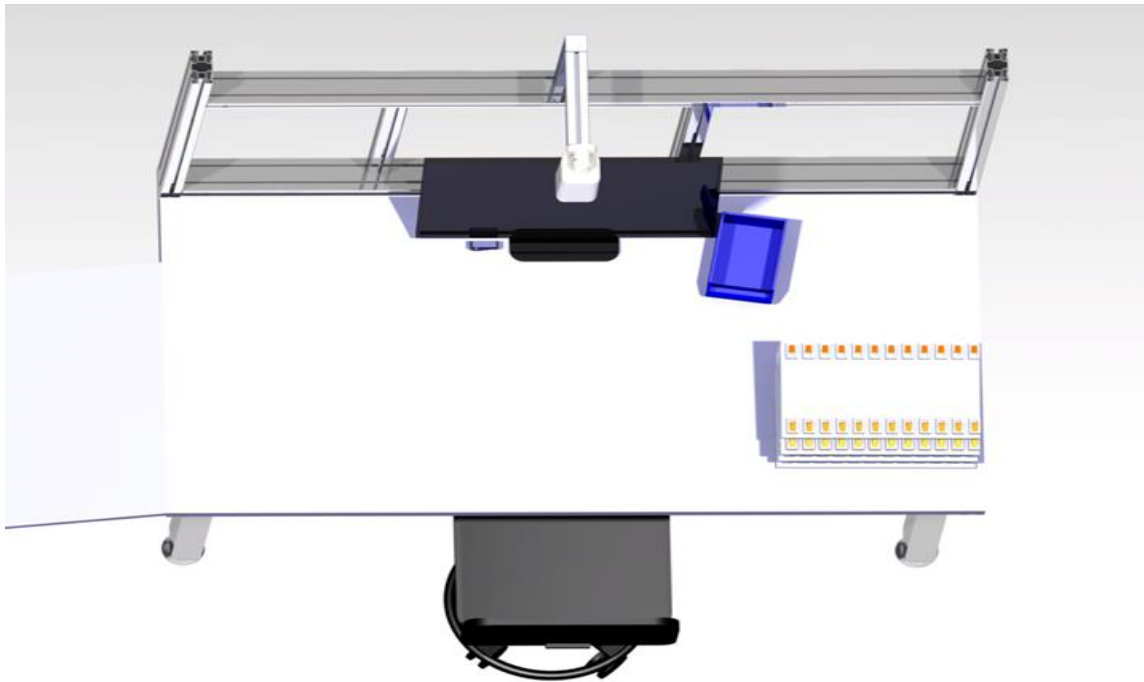
Холистички приступ у ергономији подразумева целовито сагледавање радног окружења, узимајући у обзир све аспекте (физичке, психолошке, социјалне и организационе факторе) који остварују утицај на добробит радника, продуктивност и ефикасност радних станица за монтажу (*Botti* и други, 2022).

Партиципативна ергономија подразумева укључивање радника у процес дизајнирања и побољшања радног окружења. Радници, у складу са индивидуалним захтевима и потребама, дају директне информације везане за побољшање радног места, алата и опреме што доприноси повећању ефикасности, смањењу оптерећења и повећању безбедности. У студијама које су спровели (*Colim* и други, 2020; *De Guimarães* и други, 2015) је показано да је партиципативна ергономија ефикасан приступ за реализацију модификација на радним станицама. Радници су активно укључени у дизајнирање радне станице, што је резултирало повећањем мотивације и задовољства. Њихове перцепције биле су позитивне и у складу са резултатима спроведене ергономске процене.

Прилагођавање радног места захтевима радника, њиховим физичким карактеристикама, способностима и вештинама је фокус већег броја научно-истраживачких радова (*Heilala* и *Voho*, 2001). У овом контексту, многе студије су предложили основна правила дизајнирања радних простора како би били прилагођени физичким и когнитивним способностима радника и на овај начин се минимизирао ризик од настанка мишићно-коштаних поремећаја и других обољења. Посебан нагласак је на смањењу и елиминисању активности које не додају вредност. Активности које додају вредност укључују активности монтаже делова и компоненти и приступ компонентама и алату без потребе да се радници удаљавају од својих радних позиција. С друге стране, активности које не додају вредност се односе на активности прибављања неопходних компоненти, материјала и алата које захтевају кретање радника ван радне станице или извођење неергономских покрета како би се дохватили предмети који су постављени ван зоне максималног дохвата радника.

На слици 4.8 је представљен изометријски приказ радне површине. Као што се може видети са слика, за разлику од традиционалне радне станице нова радна станица је усклађена са ергономским и *lean* принципима и стандардима златне зоне у циљу смањења времена такта и рада у току (енгл. *work in progress*). Аутори (*Alves* и други, 2019) истичу да су ергономија и *lean* веома уско повезани. Бенефити увођења *lean* принципа се огледају у скраћивању времена испоруке производа купцима и смањењу трошкова (*Shah* и *Ward*, 2003) и повећању профитабилности (*Malavasi* и *Schenetti*, 2017).

Радна станица је дизајнирана узимајући у обзир чињеницу да су зоне руковања различите за сваку особу, тако да сваки радник може да прилагоди распоред материјала, делова и компоненти на особним потребама и могућностима.



Слика 4.8 Изометријски приказ предложене унапређене радне станице

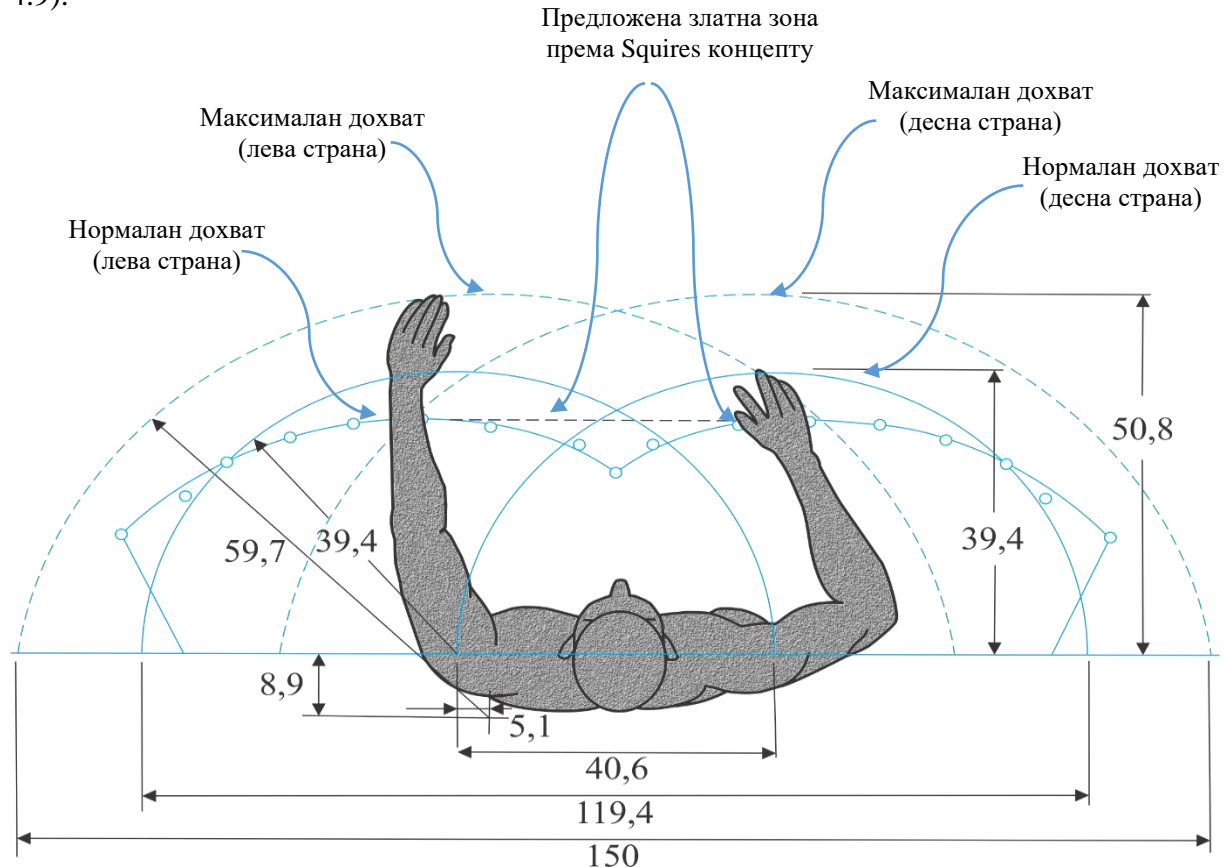
На радној површини предложене ергономске радне станице су постављене само неопходне компоненте и алати како се не би одвлачила пажња и ометало обављање монтажних активности. Све компоненте и делови који су потребни за процес монтаже су распоређени у оквиру зелене (златне) зоне како би се смањило извођење неергономских покрета. Златна зона је подручје у облику цилиндричног сегмента које се протеже од струка радника до висине рамена и са дужином подлактице као радијусом (слика 4.8). Ова зона представља идеалан радни простор, у којем су неергономски покрети, истезање и савијање сведени на минимум, а радници постижу највећу ефикасност и продуктивност. Како је златна зона различита за сваког радника, радна станица осигурава да се радни простор и распоред материјала, компоненти и позиција алата могу прилагодити индивидуалним потребама.

Класери за складиштење свих делова и компоненти су распоређени у складу са принципима *lean* производње и узимајући у обзир индивидуални домет и видно поље за сваког испитаника у истраживању појединачно. Према (*Sørensen* и *Holman*, 2014) посебан нагласак је на оптимизацији радног окружења за сваког радника понаособ у циљу побољшања услова рада и смањења потенцијалних здравствених ризика. Оптимални распоред класера омогућава лако преузимање и враћање непотребних делова и компоненти. Флексибилан распоред класера за складиштење делова и компоненти на новодизајнираној радној станици пружа могућност промене распореда и организације радног окружења у складу са индивидуалним карактеристикама испитаника.

Поред златне зоне, додатна пажња је усмерена на прављење разлике између спољашњег простора за руковање (простор доступан раднику са испруженом руком) и унутрашњег простора за руковање (простор који радник може да досегне са савијеном руком). Простор за руковање се може поделити у три различите зоне. Дворучна зона се налази директно испред радника (где радници заправо обављају монтажне радне активности са обе руке). У овој зони су смештени материјали, делови, компоненте и алати који се највише користе током обављања радних активности, како би радници били ослобођени извођења непотребних и неергономских покрета. На овај начин је омогућено да радници обављају радне задатке без савијања, истезања и напрезања тела а то додатно

доприноси повећању ефикасности и продуктивности радника и смањењу умора. Друга зона у којој радници обављају активности је једноручна и у овој зони се позиционирају материјали, делови и компоненте које треба да буду на дохват једне руке. Трећа зона подразумева најудаљенији део радног простора. У овој зони се постављају делови и компоненте који се ретко користе.

Аутор (*Sanders* и *Mc Cormick*, 1993) указују на важност узимања у обзир нормалног и максималног домета радника приликом дизајнирања радних места (слика 4.9).



Слика 4.9 Предложене дистанце на радној површини (прилагођено према ауторима *Sanders* и *McCormick*, 1993)

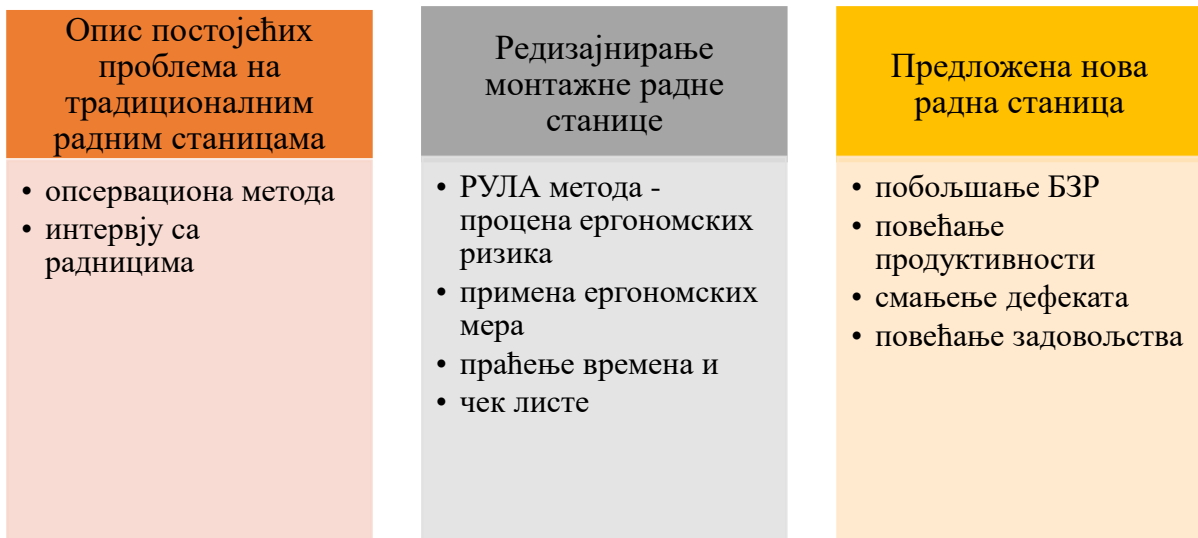
Постављањем неопходних материјала, делова и алата на дохват руке радника смањује се замор радника (*Muhundhan*, 2013). *Squires*-ов концепт представља побољшану верзију *Farley*-овог концепта приказивања једноручних и дворучних радних простора прилагодљивих радницима који се базира на обављању активности претежно у нормалном опсегу и смањењу извођења покрета ван максималног домета радника.

5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

Услед дуготрајног обављања послова у ергономски неадекватном положају тела код радника који обављају понављајуће и заморне монтажне активности на традиционалним радним станицама током дужег временског периода долази до прекомерног оптерећења мишића што проузрокује настанак мишићно-коштаних поремећаја и других професионалних болести. Поремећаји мишићно-коштаног система (нпр. синдром карпалног тунела, тендонитис зглоба, итд.) настају као последица дуготрајног понављања истих покрета, као и напрезања и савијања тела. Ова стања могу изазвати физичку нелагодност и бол код радника, а дугорочно могу довести до погоршања здравственог стања и инвалидитета, и допринети смањењу продуктивности. Такође, мишићно-коштани поремећаји проузрокују чешће изостајање радника са посла, повећање трошкова услед замене радника и трошкова здравствене неге.

У овој докторској дисертацији спроведена су експериментална истраживања из области физичке ергономије, организационе ергономије и неуроергономије. Применом напредних електропсихофизиолошких метода за праћење мишићне и мождане активности испитаника идентификовани су ергономски ризици који се јављају током извршења мануелних радних задатака монтаже и утврђена је потреба за спровођењем превентивних мера у циљу побољшања здравственог стања радника који обављају монтажне активности на традиционалним радним станицама. Посебан фокус је на идентификацији фактора који проузрокују физички и ментални замор код испитаника током спровођења монтажних активности.

На слици 5.1 представљена је структура експерименталног истраживања.



Слика 5.1 Структура експерименталног истраживања

Извршена је анализа радних услова на традиционалним радним станицама у циљу идентификације главних ергономских изазова (као што су нефизиолошки положаји тела,

извођење понављајућих покрета, претерано физичко и когнитивно оптерећење) који у великој мери утичу на ефективност производних процеса. На реплицираном радном месту симулиран је процес монтаже финалног производа током кога су праћене реакције и понашање испитаника на софистициране услове у радном окружењу. Како истичу аутори (*Mijović* и други, 2016 а,б) истраживања спроведена на реплицираним радним окружењима, у којима се симулира реални процес могу бити корисна у дизајнирању конкретних послова.

У овом контексту, ова дисертација је фокусирана на пројектовање радне станице из перспективе усредсређене на човека, полазећи од анализе основних проблема са којима се суочавају радници који обављају монтажне активности. Постојећи приступи не укључују процену радног окружења са квалитативног и квантитативног аспекта. Ова дисертација настоји да превазиђе ове недостатке предлагањем методологије која подржава идентификацију и разумевање проблема у циљу дизајнирања решења која омогућавају ефикасно обављање радних активности и побољшање безбедности и здравља радника.

Како би се описали постојећи проблеми са којима се суочавају радници који обављају монтажне активности на традиционалној радној станици примењене су метода посматрања камером и компјутерско моделирање и симулација. Методе посматрања подразумевају директно посматрање и праћење покрета и положаја тела током извођења радних активности. Положај тела испитаника и покрети руку током обављања активности су анализирани преко стандардне камере. Техником посматрања су проучавани и анализирани покрети испитаника током обављања монтажних активности како би се установило који покрети одузимају највише времена и који покрети не додају вредност и са становишта *lean* филозофије би могли бити елиминисани.

Опсервација је спроведена током извођења задатих радних активности у циљу праћења понављања истих покрета, идентификовања примене силе, напрезања, рада у неправилном положају или дуготрајног задржавања истог положаја тела итд. Посебна пажња је посвећена праћењу учесталости извођења одређених покрета, трајању радних активности и физичком оптерећењу којем су радници изложени. Бенефити технике посматрања се огледају у томе да не захтева улагање финансијских средстава и може се применити на великом броју испитаника.

Рачунарско моделирање подразумева компјутерске симулације како би се идентификовали ризици који доводе до појаве мишићно-коштаних поремећаја и других професионалних обољења код радника који обављају монтажне активности. Акцент је на идентификацији високоризичних радних задатака и примени ергономских мера у циљу смањења напрезања мишића (*Binoosh* и други, 2017; *Bortolini* и други, 2020). Комбинацијом RULA методе и компјутерског моделирања анализирани су радно место, радне активности и процењени покрети и положаји тела, примена силе како би се установило који фактори доприносе напрезању мишића односно који су фактори ризика доприносе настанку мишићно-коштаних поремећаја.

Резултати процене добијене RULA методом омогућавају објективну анализу постуралног оптерећења радника, при чему се оцене крећу у распону од 1 до 7. Оцене указују на:

- Оцене 1 и 2 (зелена боја): држање тела се сматра прихватљивим ако се не одржава или не понавља током дужег временског периода. Ове оцене указују на то да нема значајног ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја.

- Оцене 3 и 4 (жута боја): ове оцене указују да је потребно спровођење даљих истраживања. Могуће је да је у наредном периоду потребно увођење промена у начину обављања радних задатака или у радном окружењу како би се смањили ергономски ризици.
- Оцене 5 и 6 (наранџаста боја) указују на повећан ризик од професионалних болести, што значи да је потребно увођење промена у блиској будућности. Постојећи услови рада у којима се обављају монтажне активности могу довести до озбиљних здравствених проблема уколико се не уведу промене.
- Оцена 7 (црвена боја) указује на хитност предузимања ергономских мера у циљу промене услова рада како би се спречили мишићно-коштани поремећаји и друга професионална обољења.

На слици 5.2 представљена је методологија. Као што се може видети са слике, експериментална истраживања су се изводила у два сценарија - неергономском сценарију (на традиционалној радној станици) и ергономском сценарију (на предложеној новој радној станици). Основни циљ је показивање да је на предложеној радној станици за монтажу прилагођеној антрополошким карактеристикама, способностима и ограничењима радника елиминисано неадекватно држање тела и извођење неергономских покрета. У оквиру студије случаја истовремено су праћени физичко и ментално оптерећење, покрети тела и очију, продуктивност, дефекти и задовољство испитаника како би се показало да постоји значајна корелација између свих наведених параметара.



Слика 5.2 *Методологија*

У експерименталном истраживању активност мишића је праћена током извођења понављајућих и монотоних активности склапања у оба сценарија у реалном времену.

Мишићна активност је праћена постављањем ЕМГ сензора на трапезне мишиће на врату испитаника са леве и десне стране (*Savković* и други, 2022в, *Savković* и други, 2023б). Основни циљ праћења активности трапезних мишића на врату је утврђивање оптерећења и напрезања мишића како би се испитала учесталост болова у врату и установило када се појављују први симптоми мишићно-коштаних поремећаја.

Мождана активност испитаника је такође праћена у неергономском и ергономском сценарију преко ЕЕГ капе како би се установило када долази до пада пажње и менталног замора код испитаника који обављају активности монтаже делова и компоненти. ЕЕГ метода спада у једну од најчешће коришћених метода за процену менталног замора у научно-истраживачким радовима јер за разлику од субјективних метода ЕЕГ метода омогућава објективни приступ у анализи когнитивних процеса радника (*Mijović* и други, 2016 а, б; *Murata* и други, 2005).

Постављањем фронталне камере директно испред субјекта праћени су покрети очију. Такође, праћени су време потребно за извођење активности и дефекти. Продуктивност је праћена преко времена потребног за састављање производа а дефекти преко чек листе.

Након експеримента са испитаницима је обављен усмени интервју како би се добиле повратне информације од испитаника о њиховим утисцима. Испитаници су питани да ли су осећали физички и ментални замор током обављања монтажних активности у оба сценарија, да ли је долазило до пада концентрације и колико често се то дешавало.

Неколико дана након експеримента, испитаницима је на мејл послат упитник како би се проценило задовољство током обављања активности на новој радној станици. Анкета је укључивала питања о различитим аспектима њиховог искуства током обављања активности на новој радној станици - дизајн радне станице, обављање радних активности, радно окружење. Посебна пажња је посвећена питањима везаним за задовољство предложеном новом радном станицом и задовољство у погледу метода рада. Упитник о задовољству се показао као корисно средство за прикупљање информација од радника (*Carlopio*, 1991). Упитници су често примењивана метода у научним радовима за прикупљање информација о ставовима и перцепцијама радника (*Kuorinka* и други, 1987; *Crawford*, 2007). У оквиру анкете остављен је простор и за субјективне/објективне сугестије од стране испитаника у смислу могућих унапређења радног процеса и радне станице.

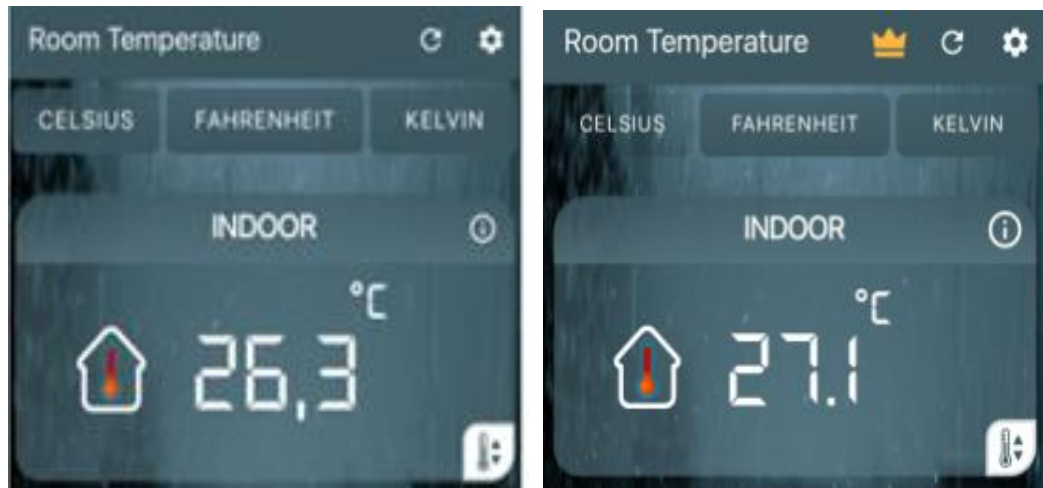
5.1 ПОСТАВКА ЕКСПЕРИМЕНТА

5.1.1 Лабораторија

Експериментално истраживање је спроведено у периоду од марта 2022. до марта 2023. године у лабораторији на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу.

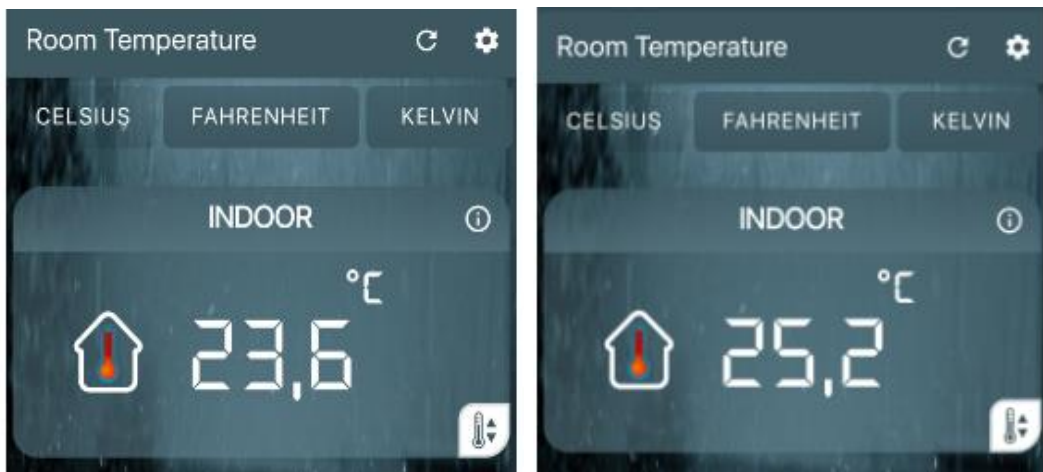
У традиционалном сценарију испитаници су обављали монтажне активности у условима аналогним реалном индустријском окружењу. Постављено осветљење није било адекватно тако да су испитаници морали да напрежу очи што је проузроковало замор и пад концентрације. Такође, испитаници су били изложени буци као у реалном индустријском окружењу. Током извођења експеримента у традиционалном сценарију просторија није била климатизована и температура није била оптимална (слика 5.3).

У ергономском сценарију експеримент је изведен у идеалним лабораторијским условима. Лабораторија у којој су вршена експериментална истраживања је климатизована, а микроклиматски услови су били под контролом. Температура је одржавана на 24 ± 1 °C (слика 5.4), док је вредност релативне влажности ваздуха износила између 40% и 60%.



Слика 5.3 Температуре у лабораторији током извођења експеримента у традиционалном сценарију

На слици 5.4 су приказане температуре у лабораторији током извођења експеримента у ергономском сценарију.



Слика 5.4 Температура у лабораторији током извођења експеримента у ергономском сценарију

На предложеној радној станици уграђено је хомогено LED осветљење, које производи само меке сенке, које мање оптерећују очи, са могућношћу подешавања беле светлости (топло бела, бела и хладно бела). У овом сценарију испитаници нису били изложени буци. На вратима лабораторије је био постављен натпис да није дозвољен улазак у лабораторију за време трајања експеримента.

5.1.2 Опрема

Опрема за праћење мишићне активности

Електромиографија подразумева снимање и анализу електричних сигнала изведених из мишића и њихових моторичких јединица, у мировању и током добровољне контракције. Електромиографијом је праћена активност трапезних мишића током склапања делова и компоненти у реалном времену током оба сценарија појединачно преко ЕМГ сензора типа *MuscleBAN* компаније *PLUX Biosignals* из Португалије како би се утврдило оптерећење и напрезање ових мишића током обављања монтажних активности (*Savković* и други, 2022в).

На слици 5.5 су приказане обе стране ЕМГ уређаја који је коришћен у експерименту.



Слика 5.5 *MuscleBAN BE* уређај (преузето са *Plux Biosignals, MuscleBAN BE*)

Овај бежични уређај са дометом до 10 m комбинује једноканални ЕМГ сензор, триаксијални акцелерометар и магнетометар и на тај начин омогућава аквизицију података у реалном времену са резолуцијом до 16 bit-а и брзином узорковања до 1,000 Hz. Као главне карактеристике овог уређаја могу се навести да је лаган и мали, тако да се може носити без изазивања било какве непријатности код испитаника или ометања обављања активности током трајања експеримента. Домет до 10 m указује да нема потребе за жицама, које би ометале испитанике током експеримента и проузроковале шуме. У табели 5.1 су приказане основне карактеристике ЕМГ сензора преузете из упутства за употребу (*PluxBiosignals, MuscleBAN BE*).

Табела 5.1 Основне карактеристике *MuscleBAN BE* уређаја

Основне карактеристике ЕМГ сензора	
Димензије	28x70x12mm
Тежина	25g
Домет	до ~10 m
АСС резолуција	14-bit
МАГ резолуција	16-bit
ЕМГ резолуција	12-bit
Шум ЕМГ сигнала	3 μ V
Батерија	155mA 3.7 LiPo пуњива (омогућава до 8 h непрекидног функционисања)

ЕМГ сензори су постављени на површини коже изнад трапезних мишића са леве и десне стране врата испитаника како би се пратила активност мишића током обављања монтажних задатака. Површинска електромиографија има велику примену у истраживањима у индустрији јер за разлику од електромиографије иглом ова метода не изазива болове код испитаника и не захтева присуство медицинског особља.

Током експеримента коришћена је специјално формулисана гел паста са електролитима, под називом GEL 101. 0,5% физиолошки раствор је додат у неутралну базу како би се створила изотонична, 0,05 моларна NaCl паста. Овај гел има неограничен рок трајања, што га чини погодним за примену у експериментима који дуго трају (*ELECTRODE GEL, ISOTONIC*). На слици 5.6 је приказан гел који је коришћен у истраживању.



Слика 5.6 Гел са електролитима (преузето са <https://www.biopac.com/product/electrode-gel-isotonic-114-g>)

Пре постављања сензора кожа око горњих трапезних мишића испитаника је очишћена и дезинфикована туферима натопљеним алкохолом. На ЕМГ сензоре је нанесена мала количина гела са електролитима и након тога сензори су постављени на трапезне мишиће са леве и десне стране испитаника и причвршћени медицинским фластером (слика 5.7).



Слика 5.7 Постављање ЕМГ сензора на горње трапезне мишиће

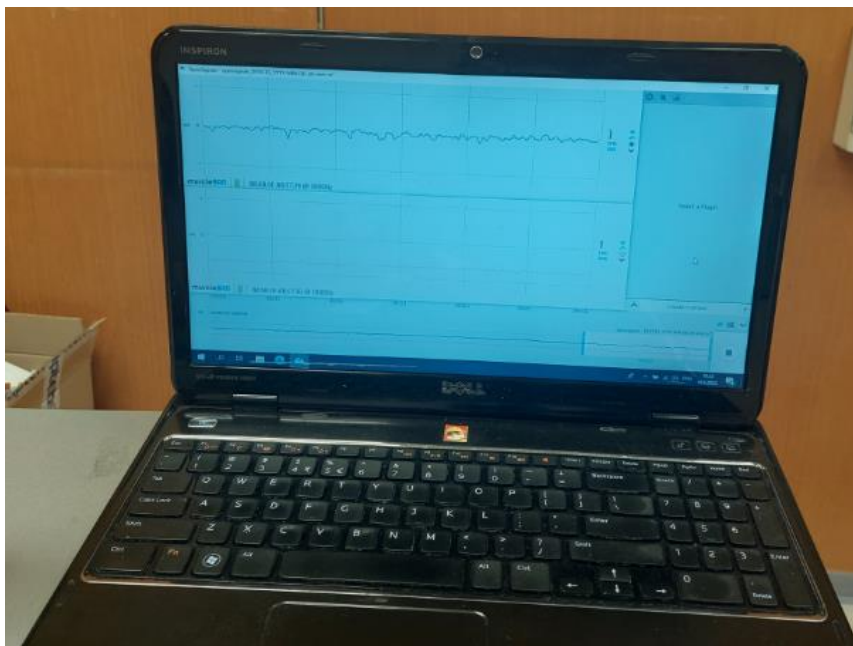
ЕМГ уређај је повезан преко *bluetooth*-а са *Open Signals* софтвером инсталираним на лаптопу. Од испитаника је затражено да пре почетка експеримента изведу неке основне покрете као што је подизање руке на горе и у страну како би потврдио да ЕМГ уређај функционише како је предвиђено. ЕМГ протокол је дат у прилогу дисертације.

Open Signals је софтверско решење које има улогу у снимању, обради и анализи биосигнала. Овај софтвер омогућава интеграцију и визуелизацију података у реалном времену и има примену у научним истраживањима посебно у биомедицинском инжењерингу, неуроергономији и спорту.

Главне функције *OpenSignals* софтвера укључују:

- Прикупљање ЕМГ података у реалном времену у циљу праћења физиолошких реакција испитаника.
- Визуелизацију ЕМГ сигнала - софтвер омогућава визуелизацију података у облику таласа или кривих линија у временској скали у реалном времену. Визуелни приказ омогућава посматрање како се мишић активира и опушта током извођења различитих покрета, што је приказано кроз пораст и пад амплитуде сигнала и идентификацију варијација у сигналу. На овај начин могуће је пратити промене у активности мишића у различитим временским периодима- на почетку, на средини и на крају експеримента.
- Филтрирање и обраду података, уклањање шума, чиме се омогућава добијање поузданијих података за даљу анализу.

На слици 5.8 је приказана визуелизација ЕМГ сигнала у реалном времену. Плава линија представља графички приказ сировог ЕМГ сигнала односно приказује мишићну активност у реалном времену. Пикови указују на појачану мишићну активност, односно повећане мишићне контракције. Што је пик виши, то је електрична активност у мишићу интензивнија, што даље указује на јачу контракцију мишића. Високи пикови могу указивати на замор мишића, до којег долази услед извођења физички захтевних активности као што је подизање терета или извођење наглих покрета. Већа учесталост пикова значи да мишић није имао довољно времена за опуштање између контракција.



Слика 5.8 Визуелизација ЕМГ сигнала у реалном времену

Процесирање ЕМГ података

Површинском електромиографијом је праћена мишићна активност током контракције и релаксације како би се стекао увид у напрезање мишића и физички замор. Добијене вредности електричне активности су затим анализирани и израчунати су значајни параметри као што су максимална, минимална и средња вредност сигнала, максимална, средња и средња вредност исправљеног сигнала и средњи квадратни корен. Анализом ЕМГ сигнала може се установити да ли су мишићи преоптерећени.

Процес обраде ЕМГ сигнала укључује неколико корака. Први корак је примена филтера за уклањање артефаката, односно нежељених сметњи које могу настати услед покрета тела или спољашњих утицаја и побољшање квалитета сигнала. Ово подразумева примену нископропусних и високопропусних филтера, како би се сигнал прочистио од шума које могу утицати на даљу анализу.

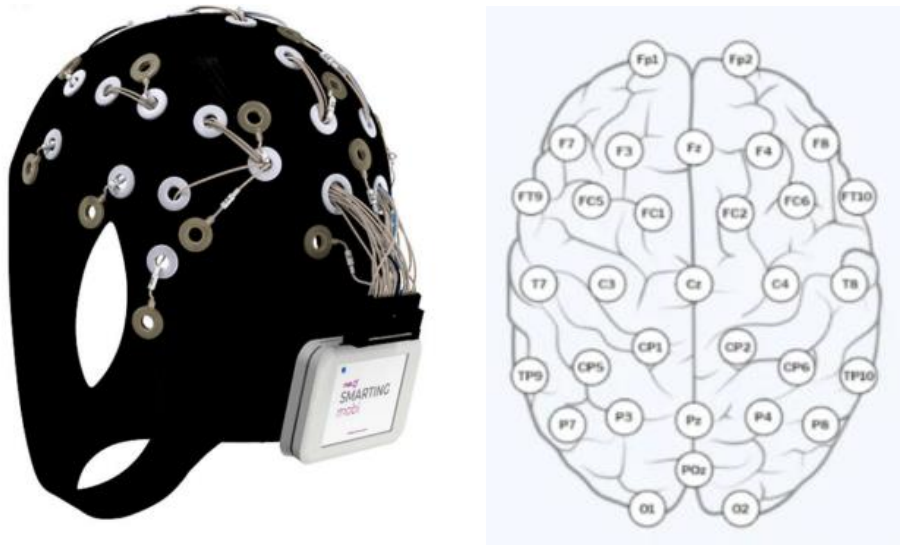
Сирови електрични подаци који се добијају током снимања ЕМГ сензорима често садрже нежељене компоненте као што су артефакти који настају услед покрета и других сметњи из спољне средине, па је неопходно применити филтрирање како би се изоловао користан сигнал. Већина ЕМГ сигнала се налази у фреквенцијском опсегу од 0 до 500 Hz, при чему се доминантна енергија код већине људи јавља у интервалу од 10 до 250 Hz.

За ефикасно филтрирање ЕМГ сигнала, препоручује се постављање високопропусног филтера на око 10 Hz како би се елиминисали артефакти. Овај корак омогућава добијање чистијих података који су погодни за даљу обраду и анализу. Из филтрираних ЕМГ података могу се извући различите карактеристике које су корисне за процену активности мишића и замора. Ове карактеристике могу бити анализирани у три различита домена: временском, фреквенцијском и временско-фреквентном домену.

У наредној фази, сигнали су нормализовани према референтној вредности, што омогућава поређење података између различитих испитаника. Анализирани су различити параметри како би се боље разумела динамика мишићне активности. Анализом су утврђене максималне, минималне и средње вредности сигнала, као и максимална и средња вредност исправљеног сигнала. Поред тога, израчунат је и средњи квадратни корен, који представља један од најпоузданијих индикатора напрезања мишића. Фреквенцијски параметри као што су медијана и средња фреквенција такође су анализирани како би се утврдио замор мишића.

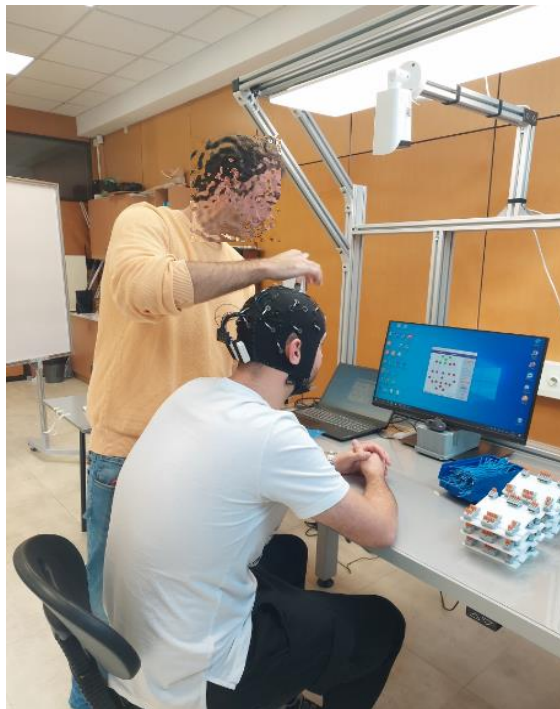
Опрема за праћење мождане активности

На главу испитаника је постављена ЕЕГ капа са 24 електроде, како би се измерио акциони потенцијал неурона (слика 5.9 (а)). Праћена је мождана активност у фронталној (AFz, Fz, Fp1, Fp2, F3, F4, F7 и F8), централној (Cz, CPz, C3 и C4), темпоралној (T7, T8), паријеталној (CPz, Pz, P3, P4, P7, P8) и окципиталној (O1 и O2) регији и регији средњег мозга (M1 и M2). Електроде су локацијски постављене на капи у складу са међународно признатим системом за позиционирање електрода 10-20. FCz је била референтна електрода, а уземљена електрода је била постављена на позицију Fpz. За снимање ЕЕГ сигнала коришћен је SMARTING бежични 24-канални ЕЕГ систем са фреквенцијом узроковања 250 Hz. ЕЕГ капа је повезана са мобилним Smarting појачивачем компаније *mBrainTrain LLC* (Београд, Србија) чије су димензије 85 × 51 × 12 mm а тежина 60 g (слика 5.9 (б)). ЕЕГ протокол је представљен у прилогу дисертације.



Слика 5.9 (а) ЕЕГ капа, (б) локализација електрода на ЕЕГ капи

На слици 5.10 приказано је постављање ЕЕГ опреме на главу испитаника.



Слика 5.10 Постављање ЕЕГ опреме

Комуникација између SMARTING система и рачунара је успостављена преко *bluetooth* везе. Предности коришћења ЕЕГ система се огледају у томе да се аквизиција података обавља у реалном времену, без ометања испитаника током обављања монтажних активности. Како би се обезбедио оптималан квалитет ЕЕГ сигнала током снимања, процедура је налагала да импедансе електрода у софтверу за аквизицију ЕЕГ података морају бити подешене на вредност испод 10 k Ω .

Један од већих изазова је била синхронизација свих елемената у експерименталној поставци, како би се обезбедила прецизност снимљених података. За синхронизацију је коришћен посебан софтвер/API пакет, под називом Streamer software - *Lab Streaming*

Layer (LSL), који омогућава континуирану синхронизацију прикупљених података са више уређаја.

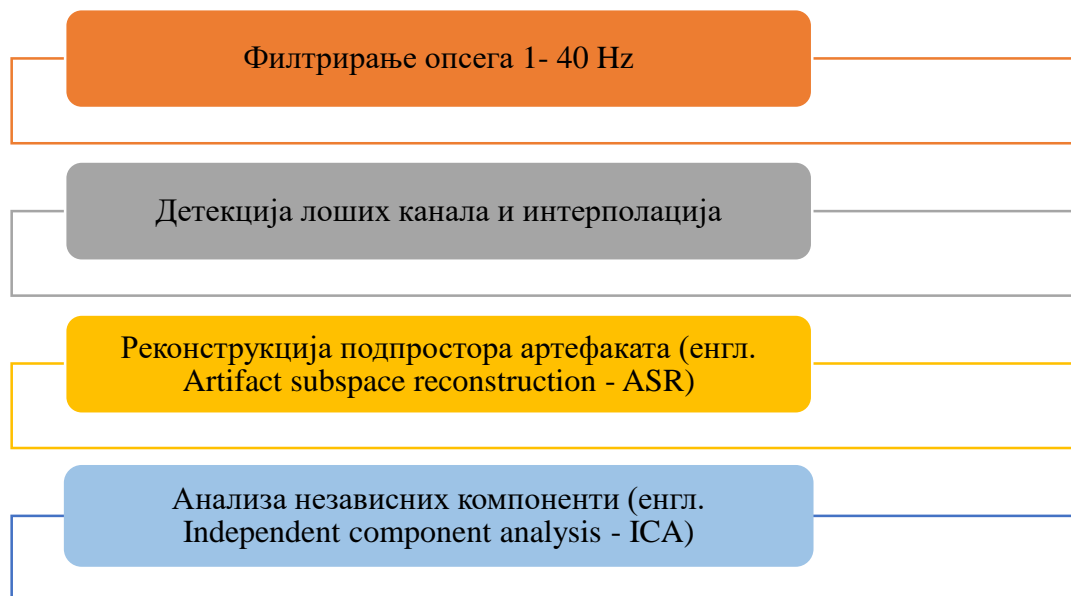
Претпроцесирање ЕЕГ података

ЕЕГ сигнали су претходно обрађени и анализирани помоћу *EEGLAB*-а (*MATLAB*-а) (*Delorme* и *Scott*, 2004). Предпроцесирање ЕЕГ сигнала представља кључни корак у обради, који обезбеђује прецизност и поузданост података за даљу анализу.

ЕЕГ сигнали су веома осетљиви на артефакте и буку. Артефакати у ЕЕГ сигналима могу значајно утицати на резултате експеримента, због чега је важно њихово елиминисање. Они настају из техничких разлога или услед понашања и активности субјекта. Циљ предпроцесирања је уклањање нежељених артефаката и шума и побољшање квалитета сигнала.

Основни кораци у предпроцесирању ЕЕГ сигнала укључују (слика 5.11):

- пропусно филтрирање
- интерполацију лоших канала
- уклањање артефаката коришћењем алгорита реконструкције подпростора артефакта
- уклањање артефаката кроз анализу независних компоненти.

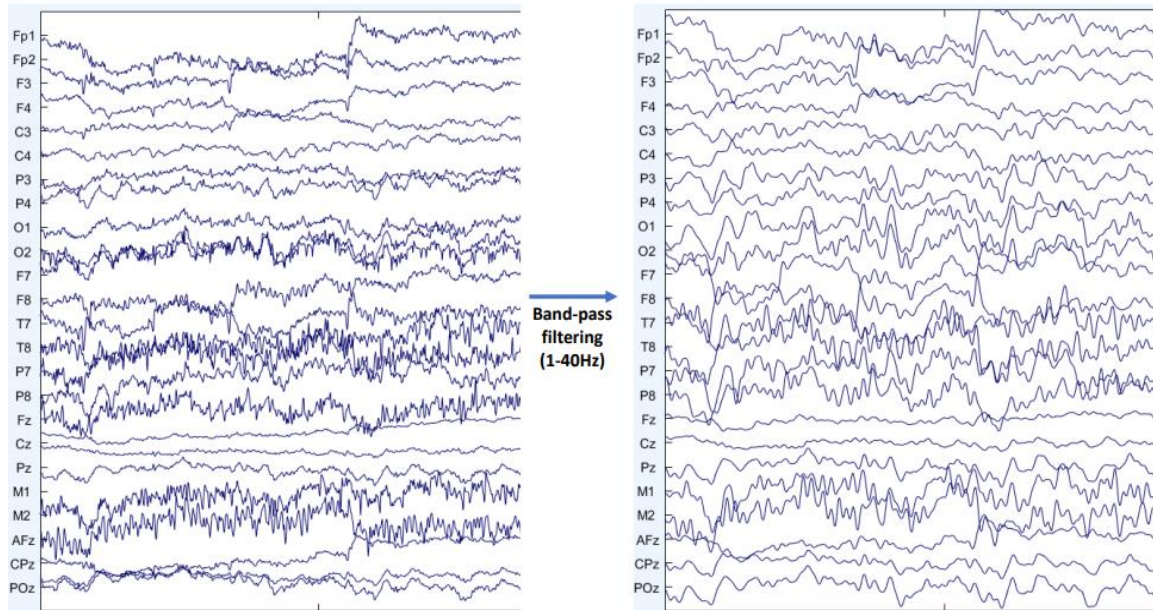


Слика 5.11 Дијаграм тока фазе обраде ЕЕГ-а

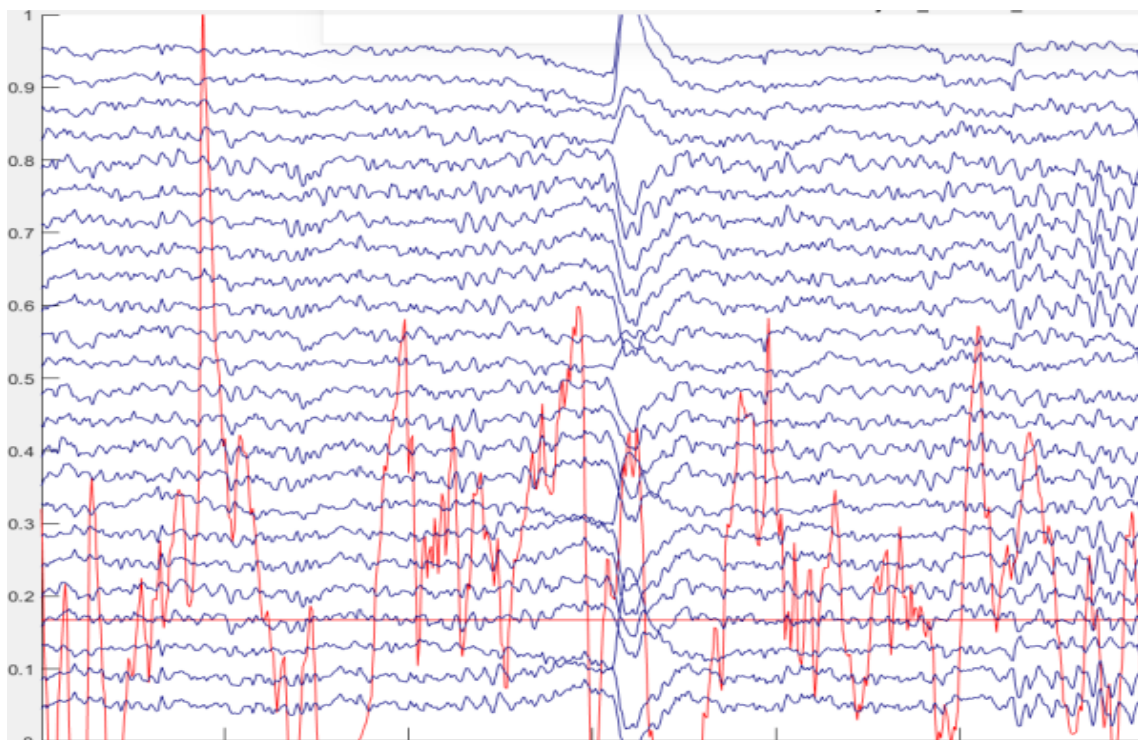
ЕЕГ сигнали су прво филтрирани у опсегу 1 - 40 Hz (слика 5.12). Филтрирање сигнала се спроводи како би се смањио утицај артефаката као што су покрети очију и бука. За уклањање артефаката примењују се различите методе. Ови артефакти се могу ручно идентификовати, али у последње време се практикује аутоматско откривање артефаката (применом нископропусних, високопропусних и опсежних филтера).

Уколико је неки од ЕЕГ канала оштећен или садржи шум, могуће га је детектовати и заменити интерполацијом на основу суседних канала, чиме се обезбеђује конзистентност сигнала. Интерполација лоших канала је урађена помоћу функције

`pop_interp()` што је приказано на сликама 5.13 и 5.14. Црвене линије представљају оригиналне лоше канале.

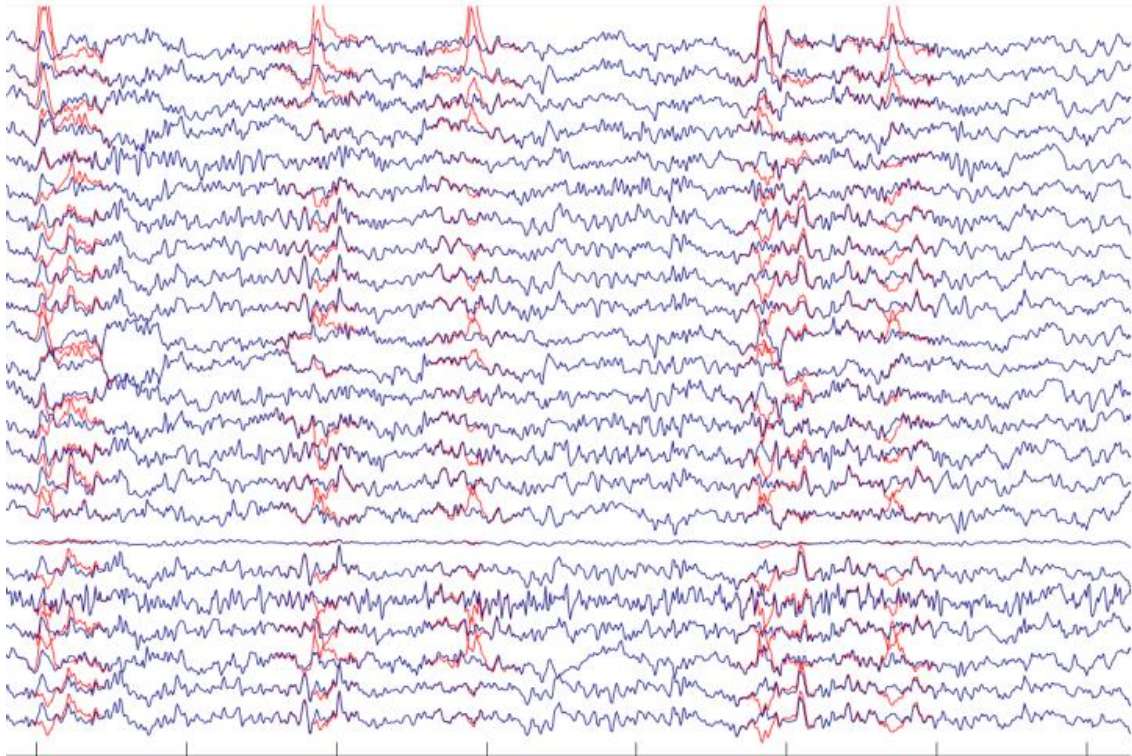


Слика 5.12 Филтрирање опсега 1- 40 Hz



Слика 5.13 Интерполација лоших канала

Артефакти су аутоматски уклоњени коришћењем алгоритма реконструкције подпростора артефакта (енгл. *Artifact Subspace Reconstruction - ASR*), имплементираниог у функцију `pop_clean_rawdata()`. Даље уклањање артефаката је урађено ручно кроз анализу независних компоненти (енгл. *Independent Component Analysis - ICA*), одабиром нежељених компоненти артефаката. Сви кораци су изведени уз помоћ уграђених функција у *EEGLAB* - у.



Слика 5.14 Интерполација лоших канала

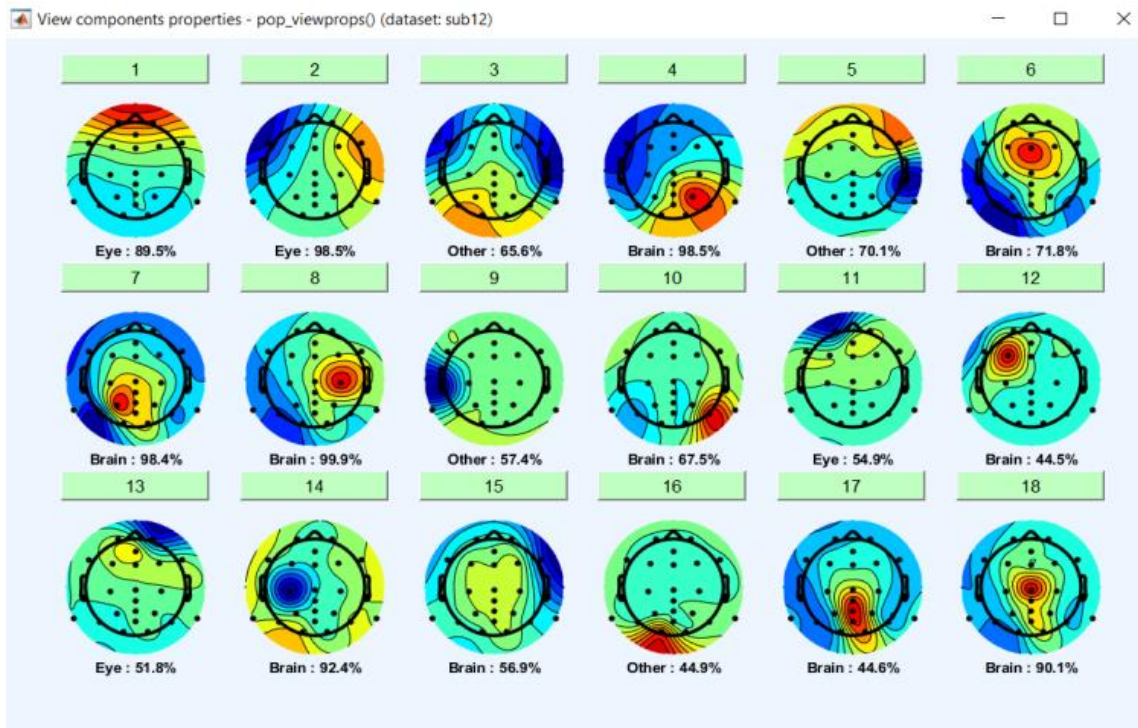
ЕЕГ подаци су груписани у различите фреквентне опсеге:

- Делта (0.5-4 Hz)
- Тета (4-8 Hz)
- Алфа (8-12 Hz)
- Бета (13-29 Hz)
- Гама (25-45 Hz).

ЕЕГ сигнали су референцирани на њихову просечну вредност. Екстракција карактеристика је даљи корак након фазе пре-процесирања ЕЕГ сигнала.

Квантификација менталног оптерећења испитаника током извођења ментално захтевних, понављајућих активности склапања у оба сценарија је извршена коришћењем три индекса. За сваку сесију, израчуната су три различита ЕЕГ индекса на основу различитих комбинација снага фреквенцијског опсега ЕЕГ-а.

На слици 5.15 дат је топографски приказ дистрибуције електричне активности по површини мозга. Топографија представља технику визуелизације можданих активности у различитим фреквенцијским опсезима (делта, тета, алфа, бета и гама таласи) у различитим деловима мозга. Ова метода пружа детаљан увид у просторну расподелу можданих таласа и омогућава идентификацију области повећане или смањене активности у зависности од когнитивног стања испитаника.



Слика 5.15 Топографски приказ дистрибуције електричне активности по површини мозга

Праћењем промена у можданој активности током обављања задатка монтаже утврђује се када долази до менталног замора и пажње и које активности посебно захтевају фокус и концентрацију (Biondi и други, 2021). Топографске мапе приказују промене у ЕЕГ сигналу током времена, што је посебно значајно за праћење менталног замора или реакција на различите стимулусе. Промене у амплитуди и фреквенцији сигнала могу се визуализовати као промене боја у топографским мапама. Различите боје омогућавају лакше разумевање дистрибуције и интензитета активности у различитим деловима мозга јер су различите боје повезане са различитим нивоима активности. Светло плава боја означава нижу активност у одређеним деловима мозга, што може указати на смањену ангажованост или опуштеност. Тамно плава боја означава најнижу активност у мозгу. Наранџаста боја представља умерени ниво активности, док зелена боја указује на висок степен ангажованости односно вишу менталну активност у тим регионима.

Црвена боја указује на највиши ниво активности мозга у топографским приказима. Ова боја означава области са веома високом активношћу мозга, што може указати на висок ниво когнитивног оптерећења у тим регионима. Жута боја означава повећану активност мозга тј. зону интензивне мождане активности, али са нешто нижим интензитетом у поређењу са црвеном бојом. Ова боја указује на активност која се јавља при умереној концентрацији и когнитивном оптерећењу.

Покрети очију и мождана активност су у корелацији, а то се посебно може уочити током обављања радних задатака који захтевају пажњу и концентрацију као што су монтажне активности. Када се очи фокусирају на одређену тачку, повећава се активност у окципиталној регији, која је задужена за обраду визуелних информација. Покрети очију често проузрокују артефакте у ЕЕГ сигналу, нарочито у фронталним и темпоралним регионима. Топографија омогућава лакше препознавање ових артефаката, што је од посебне важности за њихово елиминисање.

5.1.3 Испитаници

У оба сценарија учествовало је 15 испитаника. Испитаници су били студенти основних, мастер и докторских студија на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, мушког пола, дешњаци, старости између 18 и 30 година, који не болују од мишићно-коштаних поремећаја и немају здравствених проблема са кичмом. Пре извођења експеримента испитаници су били упознати са процедуром експеримента и прикупљени су њихови основни подаци (старост, година рођења, висина и тежина). У табели су приказани подаци за свих 15 испитаника (висина, тежина, године).

Табела 5.2 Антропометријски подаци за свих 15 испитаника у испитивању

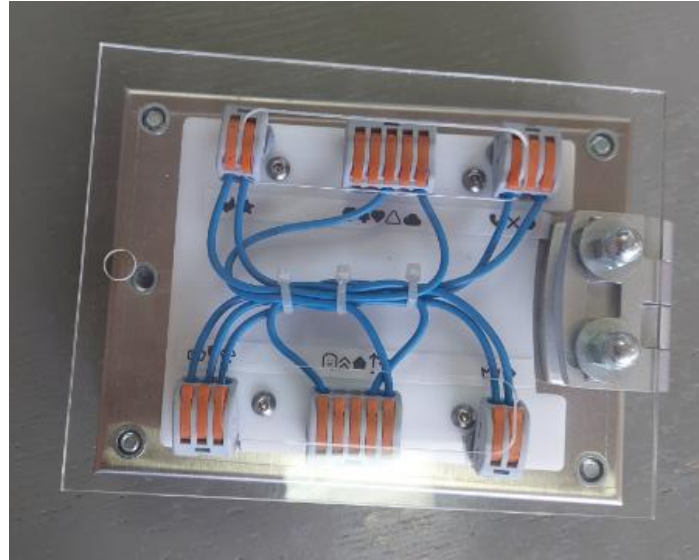
	Године	Висина (cm)	Тежина (kg)
Испитаник 1	26	188	94
Испитаник 2	24	195	100
Испитаник 3	24	190	105
Испитаник 4	26	188	80
Испитаник 5	29	180	90
Испитаник 6	22	187	88
Испитаник 7	21	195	95
Испитаник 8	20	189	78
Испитаник 9	22	194	82
Испитаник 10	23	175	83
Испитаник 11	22	178	83
Испитаник 12	23	177	78
Испитаник 13	23	185	95
Испитаник 14	24	182	78
Испитаник 15	21	178	63

Сви испитаници су добровољно пристали да учествују у експерименту и потписали сагласност да дозвољавају да се подаци користе за даљу анализу. Спровођење истраживања је одобрено од стране Факултета медицинских наука Универзитета у Крагујевцу.

Испитаницима је речено да не смеју да конзумирају алкохолна пића дан пре и на дан учешћа у експерименталном истраживању, као и да не пију кафу и напитке на бази кофеина најмање три сата пре почетка експеримента. Такође, испитаницима је речено да не смеју пити лекове који би могли да утичу на праћење можданих активности. Испитаници су потврдили да су ноћ пре експеримента добро спавали. Сви испитаници су имали нормалан вид или су носили корекциона стакла.

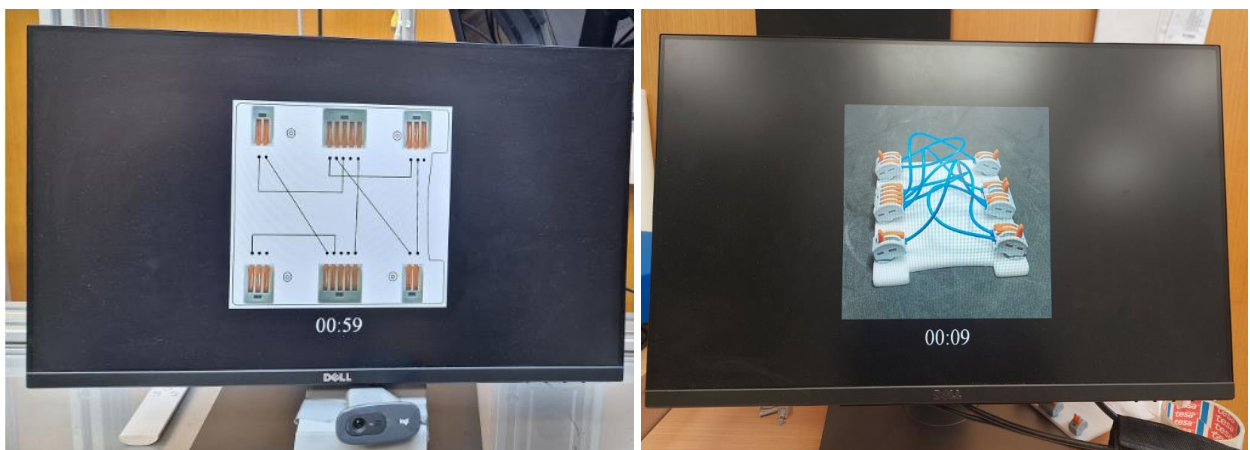
5.1.4 Производ

Производ који су склапали испитаници је представљао апстракцију спојне плоче која се састоји од металне основе израђене од челичног лима са уграђеним елементима са навојем и прозирног акрилног поклопца спојеног алуминијумским шаркама (комбинација три материјала) (слика 5.16). Специфичност производа се огледа у томе да се може потпуно раставити, што је битан фактор за коришћење у више експеримената.



Слика 5.16 Финални производ

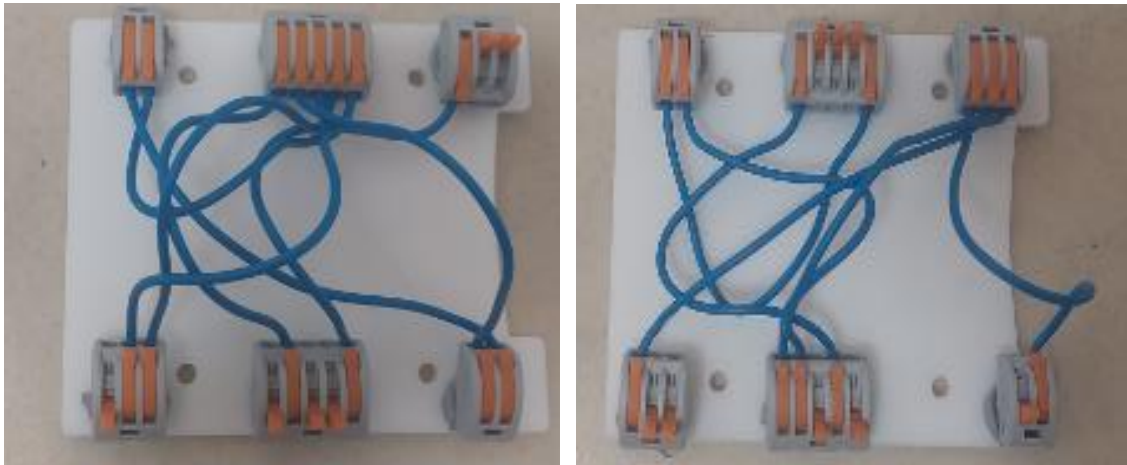
У оба сценарија у току експеримента испитаници су састављали по 75 производа (укупно 150 шема) по узору на индустријске производе. Експеримент је програмиран у софтверу за контролу експеримента под називом *Presentation*, који је развио (*Neurobehavioral Systems, Inc., Berkeley, CA*, доступно на www.neurobs.com). Испитаници су финални производ склапали у две варијанте - шеме (слика 5.17 а) и 3Д слике (слика 5.17 б), при чему су 3Д слике биле значајно сложеније за склапање пре свега због тога што су биле ротиране под различитим угловима (*Savković* и други, 2022б).



Слика 5.17 Пример лаке (а) и тешке шеме (б)

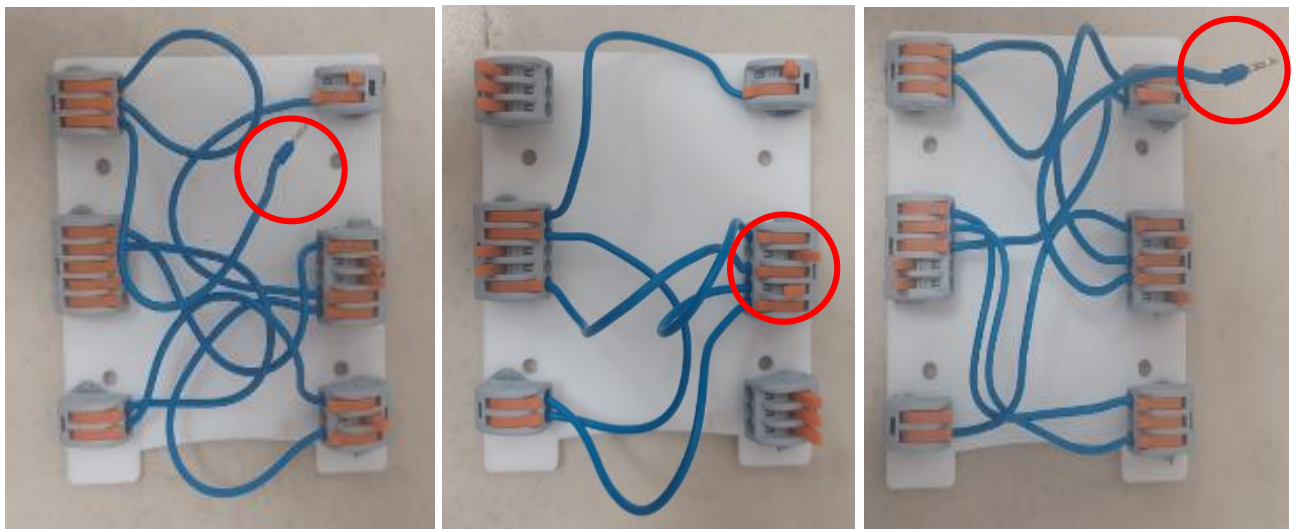
Шеме су се смењивале насумично. Испитаници су склапали 90 лаких и 60 тешких шема по принципу тешка шема, лака шема, тешка шема, две лакше шеме и ниједна шема се није понављала током експеримента.

Током спровођења експеримента све време је био присутан сарадник, који је имао улогу да сакупља и уклања производе које су испитаници постављали са леве стране на помоћном столу. Такође, сарадник је током трајања експеримента пратио време извођења радних операција и вршио инспекцију финалних производа тј. за сваки производ бележио да ли је исправно састављен или не. На крају експеримента, извршена је демонтажа производа и компоненте су враћене у класере у којима су се налазиле како би се користиле у наредном експерименту. На слици 5.18 су приказани исправно састављени производи. Како се може видети са слике све жичице су убачене на одговарајућу позицију, исправно су спуштени сви преклопници итд.



Слика 5.18 Исправно састављени производи

На слици 5.19 су приказани дефектни производи. Дефектним производима су сматрани сви производи код којих су уочене неправилности. Неправилности се огледају у томе да или се жичица извукла из преклопника, или није спуштен преклопник или су грешком спуштена два преклопника истовремено.



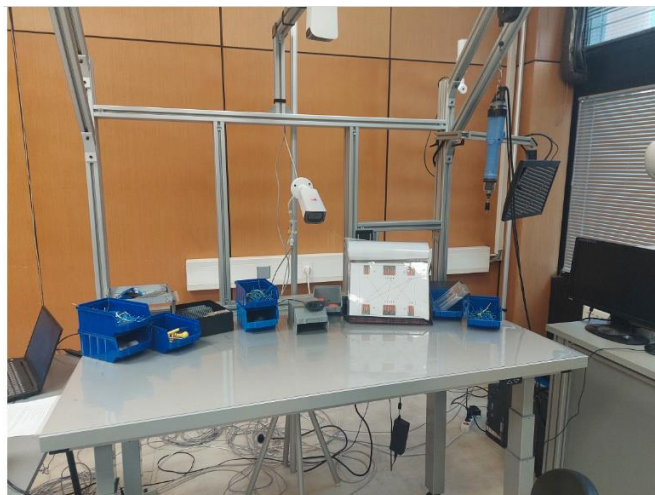
Слика 5.19 Дефектни производи

5.2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ПРОЦЕДУРА

Експеримент је почињао у 10 часова сваког дана. У оба сценарија, експеримент је укључивао две сесије у трајању од по 1,5 сата (90 минута), током којих су испитаници обављали активности склапања компоненти и делова према унапред одређеним правилима. Између сесија испитаници су имали кратку паузу у трајању од 15 минута током које су могли да устану и прошетају по лабораторији пре него што започну другу сесију. Дакле, укључујући време потребно за припрему експеримента, постављање опреме, припрему испитаника и извођење монтажних активности експеримент је трајао око четири сата.

Пре почетка експеримента испитаници су добили детаљна упутства о томе на који начин треба да обављају монтажне активности и имали су 15 минута на располагању да увежбају извођење ових активности. Пре прве сесије експеримента, испитаници су слушали опуштајућу музику у трајању од 5 минута. Након звучног сигнала испитаници су започињали обављање монтажне активности преузимајући жице и делове од акрила (*Savković* и други, 2022б).

Експериментална истраживања су се изводила у два сценарија - неергономском и ергономском. У неергономском сценарију, испитаници су обављали монтажне активности на традиционалној радној станици аналогно условима у реалном индустријском окружењу (слика 5.20). У овом сценарију испитаници су обављали активности ван зоне максималног дохвата у неергономском положају тела и били су принуђени да се истежу и савијају тело како би дохватили потребне компонентне и делове.



Слика 5.20 *Распоред класера ван зоне максималног дохвата испитаника у истраживању*

На слици 5.21 је приказан испитаник како изводи активности монтаже у неергономском сценарију на традиционалној радној станици (*Savković* и други, 2022в). Као што се види са слике активности се обављају у нефизиолошком положају тела. Испитаник је морао да се савија на десну страну да би преузео део од акрила који се налазио у кутији са десне стране испитаника. Након тога тај део је постављао на радну површину монтажне радне станице и монтирао жичице у складу са шемама које су приказане у папирном формату. Регистратор са шемама је постављен ван зоне максималног дохвата испитаника тако да су морали да истежу тело како би окретали листове папира када заврше претходну и пређу на следећу шему. Испитаници нису знали

која ће се шема следећа појавити. Комбинације су се смењивале насумично како не би утицале на резултате.

У класерима за складиштење делова су биле помешане жичице плаве, беле и жуте боје што је испитаницима додатно отежавало монтажу. Након завршетка процеса монтаже испитаници су финалне производе спуштали у кутије које су се налазиле са њихове леве стране због чега су били принуђени да савијају тело на леву страну.



Слика 5.21 Испитаник изводи експеримент на традиционалној радној станици у неергономском сценарију

У ергономском сценарију, испитаници су обављали монтажне активности на предложеној ергономски дизајнираној радној станици, у оквиру златне зоне (Savković и други, 2022в). Предложена модулarna индустријска радна станица за монтажу је дизајнирана у лабораторији Факултета инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу (Savković и други, 2022а,б) и детаљно објашњена у поглављу 4. За разлику од традиционалне радне станице, нова станица је усклађена са *lean* и ергономским принципима и прилагођена потребама, захтевима и индивидуалним карактеристикама испитаника. Испитаницима је омогућено да преузму све неопходне компоненте и алате и да их лако врате у позицију за одлагање када им више нису потребни или да их преместе у други део радног простора (Savković и други, 2023б) С обзиром да су сви потребни предмети, материјали, компоненте и алати на новој радној станици за монтажу распоређени у оквиру „зелене зоне“, у складу са индивидуалним карактеристикама испитаника и узимајући у обзир да су зоне простора за руковање различите за сваку особу елиминисано је савијање, напрезање и истезање тела (Слика 5.22). Елиминисање непотребних покрета, савијања и истезања тела даље доприноси смањењу могућности за појаву професионалних болести.

Флексибилан распоред класера за складиштење делова и компоненти потребних за обављање активности монтаже на новој радној станици је омогућио увођење накнадних промена у организацији радног окружења у циљу прилагођавања индивидуалном домету и индивидуалним преференцијама сваког испитаника понаособ. У класеру су се налазиле само плаве жичице које су се користиле током експеримента а класер је постављен је у складу са стандардима „зелене зоне“ тако да се избегло непотребно истезање тела.

Делови од акрила су били постављени са десне стране испитаника унутар златне зоне у групама по 6 комада (укупно 18 комада) и стога није било потребе за савијањем тела на десну страну као у традиционалном сценарију. У овом сценарију испитаници су састављали финални производ тако што су повезивали плаве жице из класера на делу од

акрила и затварали прекидач. Испитаници су пратили упутства (2Д или 3Д шеме) која су била приказана на монитору осетљивим на додир који је био постављен у висини њихових очију, као што је приказано на слици 5.22. Након обављања радног задатка испитаници су постављали део на клизач који се налази на левој страни радне станице и додиривали екран осетљив на додир како би прешли на следећу шему.



Слика 5.22 Испитаник изводи експеримент на предложеној модуларној радној станици за монтажу у ергономском сценарију

Сваки испитаник је био ангажован на радном задатку исто време пошто је време доступно по шеми било временски ограничено. Следећа шема би се аутоматски појавила након истека времена за тренутну шему. За склапање лакших шема (2Д) испитаници су имали на располагању 60 секунди, а за теже шеме (3Д) 90 секунди што је резултирало једнаким максималним временом утрошеним на оба типа шема. Више времена је дато испитаницима за склапање тежих шема јер се очекивало да ће бити захтевније. Укупно време трајања сесија је такође било ограничено. Експеримент у ергономском сценарију и неергономском сценарију нису изведени истог дана.

Испитаницима је речено да након звучног сигнала прелазе на следећу шему. То би значило да уколико не заврше монтажу у предвиђеном времену или уколико направе грешку приликом склапања жица, треба да одложе производ са леве стране и да наставе са склапањем наредне шеме према листи шема у регистратору или која се појави на екрану да се не би прекидало обављање монтажних активности. У супротном, уколико испитаници заврше шему за мање времена од понуђеног, односно пре звучног сигнала, они су додиривали монитор као знак да су завршили радну операцију и прелазили на следећу радну операцију.

Током експеримента у оба сценарија, паметни телефони и остали електрични уређаји су били искључени. Лаптоп повезан са ЕЕГ системом преко *bluetooth*-а је постављен на максимално могуће растојање како би се уклониле могуће техничке сметње. Ови услови су били идентични у оба сценарија како не би утицали на резултате истраживања.

У експерименталном истраживању праћен је утицај свих релевантних фактора из радног окружења који остварују утицај на процес монтаже. Праћење параметара из радног окружења је од посебне важности јер неадекватни услови рада могу довести до повећања незадовољства радника (Böckerman и Ilmakunnas, 2010) што даље може негативно утицати на перформансе (Böckerman и Ilmakunnas, 2009). На слици 5.23 приказани су елементи радног система који директно утичу на обављање монтажних активности са ергономске тачке гледишта.



Слика 5.23 Фактори који утичу на процес монтаже (прилагођено према Szombathyová и Kováč, 2010)

Кључни аспекти везани за радну станицу су: висина радне станице, распоред и организација радног простора и распоред алата и компоненти неопходних за монтажу. Фактори из радног окружења који остварују утицај на процес монтаже су: осветљење, бука, микроклиматски услови. Такође, важно је узети у обзир и карактеристике радника: физичке, психолошке (ментални капацитет радника, мотивација, стрес, задовољство).

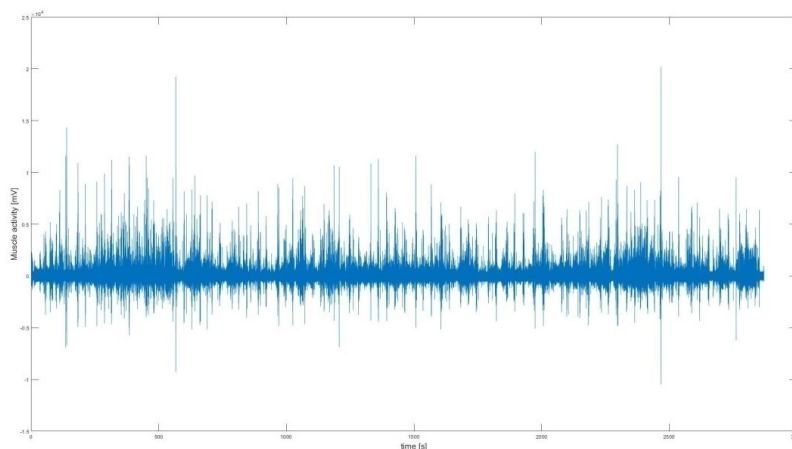
6. РЕЗУЛТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ИСПИТИВАЊА

У четвртом поглављу дисертације је представљена предложена радна станица за монтажу и указано је на бенефити те станице у поређењу са традиционалном радном станицом. У петом поглављу докторске дисертације је детаљно објашњена поставка експеримента и описан ток експерименталних истраживања из области физичке ергономије, организационе ергономије и неуроергономије. У овом поглављу су прикупљени сви неопходни подаци који омогућавају извођење закључака на основу резултата експерименталних истраживања. У оквиру студије случаја истовремено су праћени и анализирани мишићна активност и мождана активност испитаника, продуктивност и дефекти.

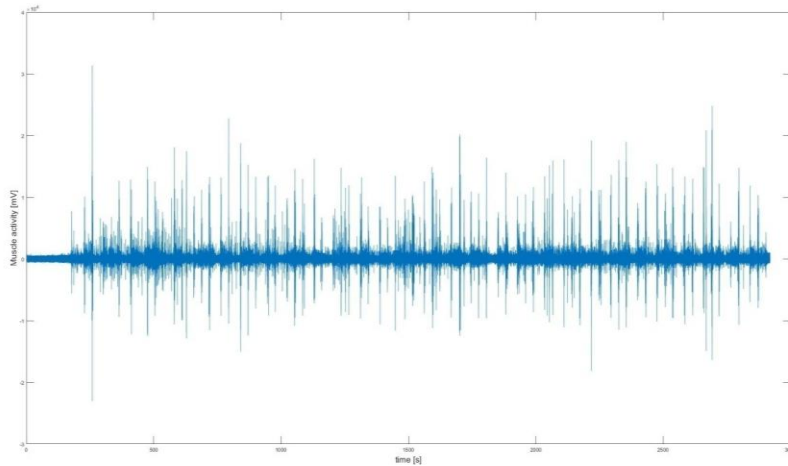
У шестом поглављу дисертације представљени су резултати праћења мишићне активности, мождане активности и менталног оптерећења, и продуктивности и дефеката за сваког испитаника у оба сценарија. У овом поглављу извршена је упоредна анализа резултата између ергономског и неергономског сценарија. Добијени резултати пружају увид у корелацију између физичког и когнитивног оптерећења радника, продуктивности и дефеката, са посебним фокусом на факторе који имају значајан утицај на ове параметре. Добијени резултати су потврдили хипотезе које су формулисане у поглављу 1, чиме се потврђују унапред постављени циљеви.

6.1 РЕЗУЛТАТИ ПРАЋЕЊА МИШИЋНЕ АКТИВНОСТИ

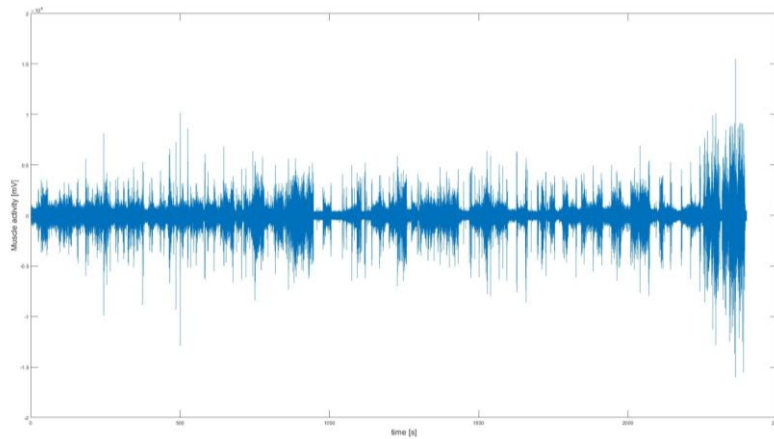
На сликама 6.1 - 6.4 приказани су сирови сигнали праћења активности трапезних мишића на врату са леве и десне стране једног субјекта помоћу уређаја Muscle BAN BE.



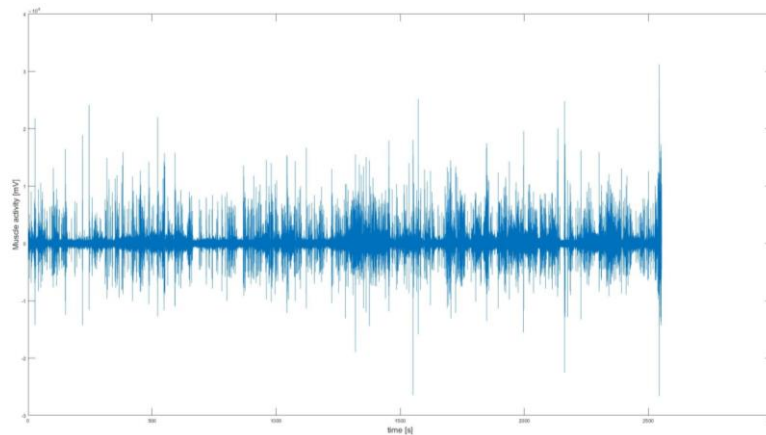
Слика 6.1 Сирови ЕМГ сигнал снимљен помоћу Muscle BAN BE уређаја у неергономском сценарију (лева страна)



Слика 6.2 Сирови ЕМГ сигнал помоћу Muscle BAN ВЕ уређаја у неергономском сценарију (десна страна)



Слика 6.3 Сирови ЕМГ сигнал помоћу Muscle BAN ВЕ уређаја у ергономском сценарију (лева страна)



Слика 6.4 Сирови ЕМГ сигнал помоћу Muscle BAN ВЕ уређаја у ергономском сценарију (десна страна)

Као што се може видети са слика 6.1 - 6.4 активност трапезних мишића је значајно већа у неергономском сценарију у поређењу са ергономским. Амплитуда је директно повезана са напрезањем мишића. Са слика се јасно уочава да већи напор или интензивнија контракција мишића проузрокује повећање амплитуде сигнала тј.

повећање амплитуде сигнала указује на интензивнију контракцију мишића. Током протока времена варијације у сигналима постају неправилније, са повременим падовима или смањењем амплитуде, што указује на опадање снаге мишића и почетак замора. Пикови представљају нагле скокове у амплитуди ЕМГ сигнала и указују на тренутке када мишићна активност достиже свој врхунац тј. када је мишић под највећим оптерећењем. Скокови у сигналу се јављају током краткотрајних а снажних мишићних контракција, као током наглог покрета руке.

ЕМГ сигнали су погодни за класификацију између обе сесије у оба сценарија експеримента. Као што се може видети са слике у неергономском сценарију амплитуда варира и пикови постају чешћи и виши, што указује да је мишић под већим оптерећењем. Сирови ЕМГ сигнали јасно указују на повећање амплитуда у неергономском сценарију, што заправо указује на замор мишића. У ергономском сценарију, варијације нису толико нагле, а пикови су мањи, што значи да трапезни мишић није преоптерећен. У ергономском сценарију, амплитуде ЕМГ сигнала су стабилније, са мањим осцилацијама, што указује да ергономска оптимизација доприноси смањењу оптерећења мишића. Сирови ЕМГ сигнали су основа за спровођење даљих анализа и изношење закључака.

Преко ЕМГ сигнала су праћене промене мишићне активности у различитим фазама - на почетку, средини и крају експеримента како би се стекао увид у ниво замора и оптерећења трапезног мишића током трајања експеримента. На почетку експеримента, ЕМГ сигнал показује ниску амплитуду, што указује на релативно ниску мишићну активност. Испитаник је одморан, а мишић се није значајно активирао. Током овог периода уочавају се мали пикови а таласи су стабилни, са периодима ниске мишићне активности између контракција. Ово указује да испитаник обавља монтажне активности са минималним напрезањем мишића.

Како се експеримент одвија, на средини прве сесије може се уочити повећање амплитуде, што указује на повећану мишићну активност. Током времена може се приметити већи број виших пикова, што указује на постепено повећање оптерећења мишића. Фреквенција ових пикова може такође указивати на умор мишића, јер је мишић ангажован дуже време без одмора. На средини друге сесије експеримента уочавају се виши пикови што може бити последица кумулативног оптерећења мишића. Виша амплитуда и учесталост пикова на средини експеримента указују на појачано напрезање мишића и физички замор. На крају друге сесије експеримента, ЕМГ сигнал показује значајно вишу амплитуду у поређењу са првом сесијом експеримента, што је показатељ умора мишића, јер се мишић напреже како би одржао потребан ниво силе.

Резултати праћења мишићне активности преко основних параметара су приказани у табелама П1 и П2 које се налазе у прилогу.

Резултати показују да су трапезни мишићи током спровођења монтажних активности у неергономском сценарију подложни значајном напрезању. Уочено је да долази до повећања активности трапезних мишића, што указује на потребу за већим напором ради одржавања положаја тела. Напрезање даље доводи до физичког замора и већег ризика од појаве мишићно-коштаних поремећаја. Добијени резултати се поклапају са резултатима студија које су спровели аутори (*Schaub* и други, 2013; *Petreanu* и *Seracin*, 2017), које су такође указале на значајно повећање напрезања трапезних мишића код радника који обављају монтажне активности.

Као што се може закључити на основу основних параметара праћења активности мишића у ергономском сценарију код свих испитаника је уочен мањи замор трапезних мишића у односу на неергономски сценарио. Након увођења ергономских мера напрезање трапезних мишића је значајно смањено, што позитивно утиче на безбедност

и здравље радника и повећава радну способност. Ови резултати су у складу са претходним истраживањима спроведеним у овој области која наглашавају важност примене ергономских принципа у радном окружењу у циљу смањења напрезања мишића и смањења ризика од појаве мишићно-коштаних поремећаја и других професионалних обољења (Suarjana и други, 2022).

Ови резултати се поклапају са резултатима усменог интервјуа према којима је у неергономском сценарију код свих испитаника дошло до замора трапезних мишића поготову у току друге сесије односно 2 сата након почетка експеримента. Разлог томе се може наћи у чињеници да је овај сценарио подразумевао обављање активности монтаже производа на традиционалној радној станици која није усклађена са ергономским принципима и стандардима „златне зоне“. Приликом обављања активности у овом сценарију радници су били принуђени да се напрежу, истежу, савијају тело како би дохватили потребне делове и компоненте што је утицало на повећање замора мишића.

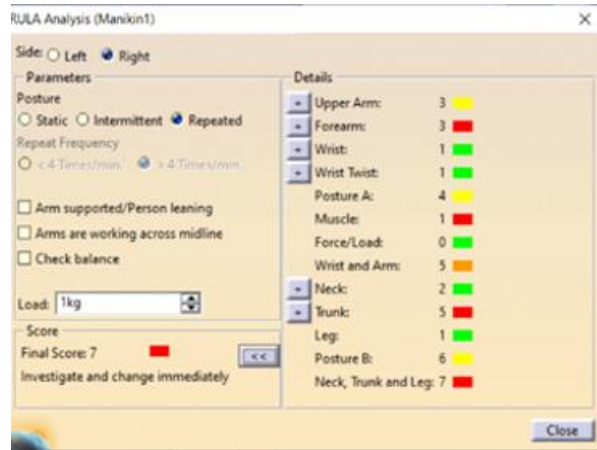
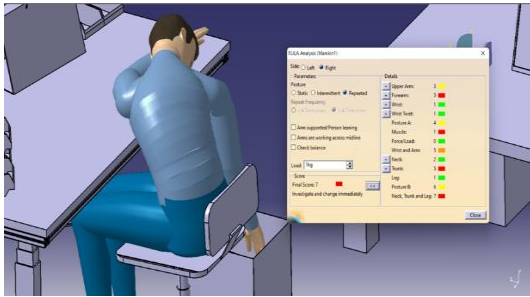
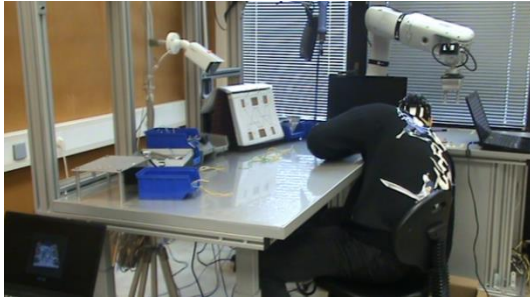
Са друге стране ергономски сценарио је укључивао обављање задатака ручног склапања на предложеној радној станици која је усклађена са *lean* и ергономским принципима и подесива по висини. Сваки испитаник је имао могућност да прилагоди радни простор индивидуалним карактеристикама, захтевима и потребама. Класери са компонентама и потребним за процес монтаже су организовани у складу са принципима „златне зоне“ тако да су испитаници су обављали активности уз минимално савијање и истезање тела, смањење извођења непотребних покрета и мању примену силе што је значајно смањило напрезање мишића и ризик од појаве мишићно-коштаних поремећаја.

Резултати праћења мишићне активности су усклађени са резултатима добијеним РУЛА методом и дигиталним људским моделирањем. Примена РУЛА методе омогућила је квантитативну процену постуралних ризика. Резултати РУЛА анализе су показали високе скорове ризика у неергономском сценарију, што додатно потврђује резултате добијене применом ЕМГ методе. Коришћењем дигиталног људског моделирања симулирани су и визуализовани различити положаји тела, што је пружило дубље увиде у ергономске ризике са којима се суочавају радници који обављају монтажне активности на традиционалним радним станицама. Укупни резултати процене ризика РУЛА методом су представљени у табели 6.1.

Табела 6.1 Резултати процене ергономског ризика РУЛА методом

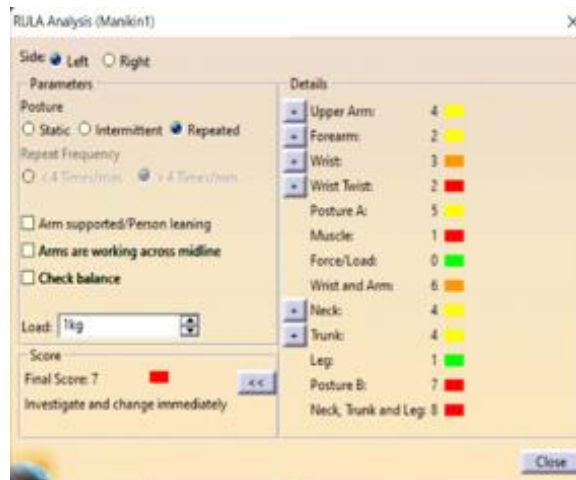
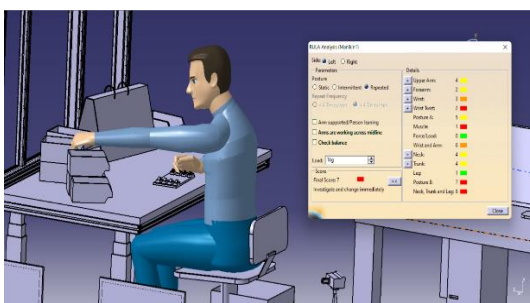
Резултат	Захтеви за акцију
1 или 2	Указује да је држање тела прихватљиво ако се не одржава или не понавља током дужег периода
3 или 4	Указује да су потребна даља истраживања и да може бити потребно увођење промена
5 или 6	Указује да је потребно спровести додатна истраживања и промене у скорије време
7	Указује да је неопходно одмах спровести додатна истраживања и промене

Ергономска процена положаја тела које заузимају испитаници и покрета које изводе током обављања монтажних активности на традиционалној радној станици је приказана на сликама 6.5, 6.6, 6.7 и 6.8. На овим сликама су представљени усвојени положаји тела током обављања монтажних активности у неергономском сценарију.



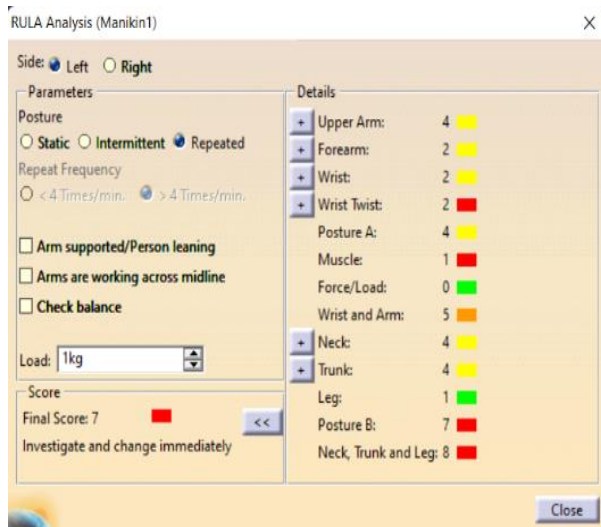
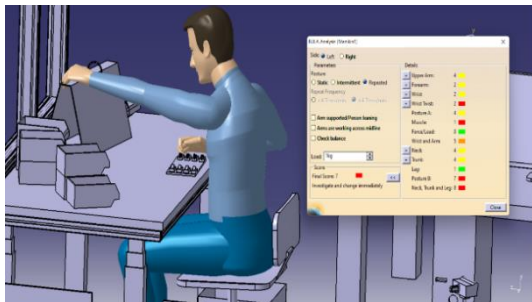
Слика 6.5 Резултати РУЛА анализе - положај Н1

Као што се види са слике 6.5 резултат за положај 1 износи 7 а то указује на црвену зону. Испитаници су заузимали неергономски положај тела јер су савијали врат и тело на десну страну како би преузели припремљене делове израђене од акрила који су им били неопходни за обављање монтаже.



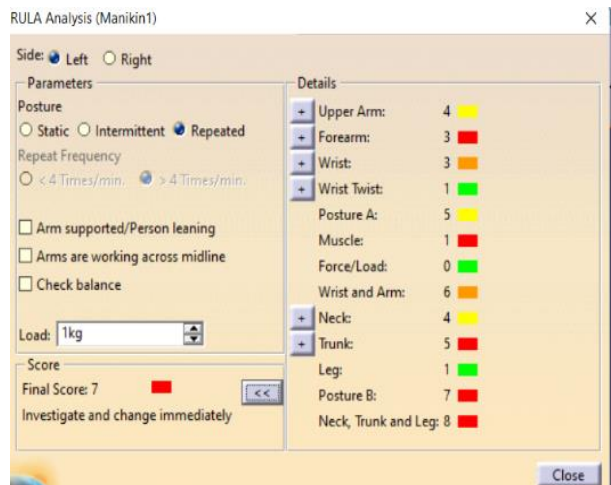
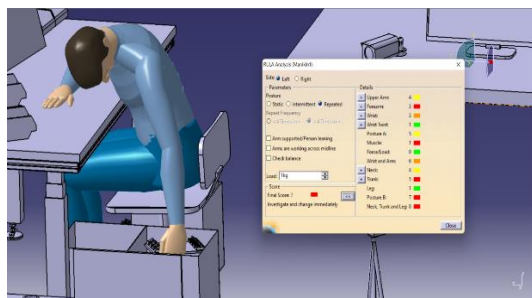
Слика 6.6 Резултати РУЛА анализе - положај Н2

С обзиром да на традиционалној радној станици потребне компоненте, делови и алати нису постављени и распоређени у складу са принципима златне зоне, *lean* и 5С принципима испитаници су били принуђени да савијају и истежу тело како би дохватили неопходне компоненте. Као што се види на слици 6.6 укупан резултат анализе за положај 2 износи 7 што указује да је неопходно одмах спровести додатна истраживања и промене.



Слика 6.7 Резултати РУЛА анализе - положај НЗ

Као што се може видети са слике 6.7 трећи положај тела је такође неергономски јер је регистратор на којем су представљене инструкције за склапање постављен у подручју ван максималног дохвата испитаника и стога су испитаници морали да истежу тело како би окренули лист папира. Укупна вредност резултата након РУЛА анализе је такође 7.



Слика 6.8 Резултати РУЛА анализе - положај Н4

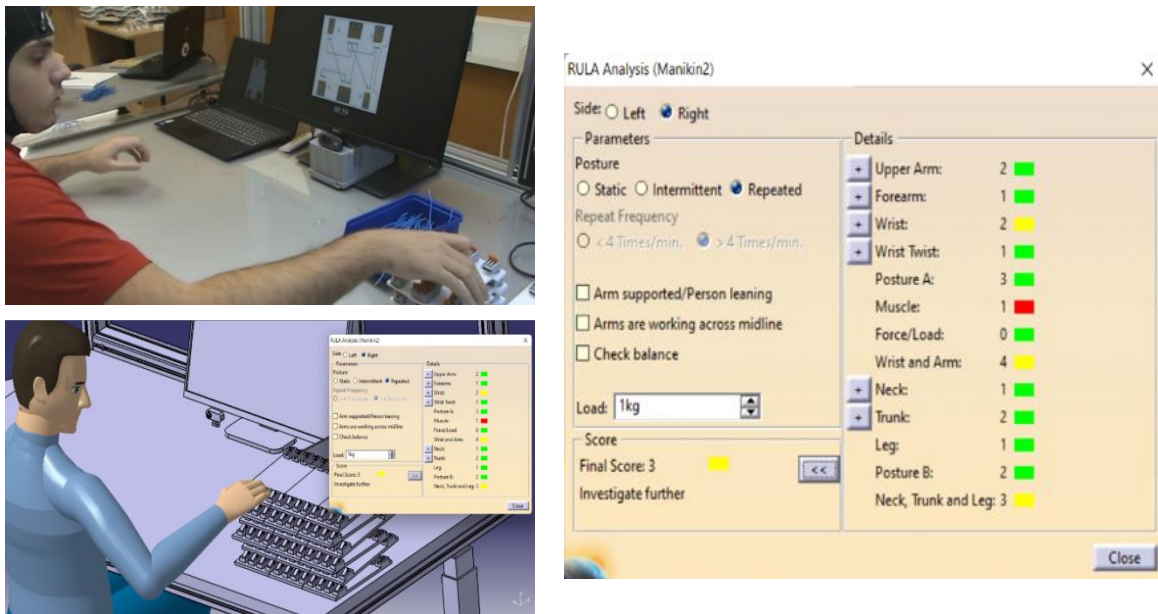
Како би одложили завршен финални производ у кутију поред радне станице испитаници су били принуђени да савијају тело на леву страну (слика 6.8) што је такође проузроковало да укупан резултат РУЛА анализе буде 7 и указало да је неопходно одмах спровести побољшање.

Резултати добијени РУЛА методом у традиционалном сценарију показују да су испитаници због заузимања неергономских положаја тела током дужег временског периода и извођења неергономских покрета изложени већем ризику од појаве мишићно-

коштаних поремећаја и других професионалних болести, што указује да је потребно спровођење додатних модификација. Као што се може видети са слика код сва четири положаја добијена је оцена 7 што указује да је спровођење додатних истраживања и увођење промена потребно одмах јер заузимање ових положаја може довести до здравствених ризика за горње екстремитете. Највише су оптерећени делови тела који су у црвеној зони, а такође посебна пажња треба бити усмерена на делове тела који су у жутој зони.

Испитаници су изводили монтажне активности на столици која није била ергономски дизајнирана, није имала подесиви ослонац за ноге, што је додатно проузроковало неугодност код испитаника. Све ово указује на потребу за побољшањима постојеће радне станице.

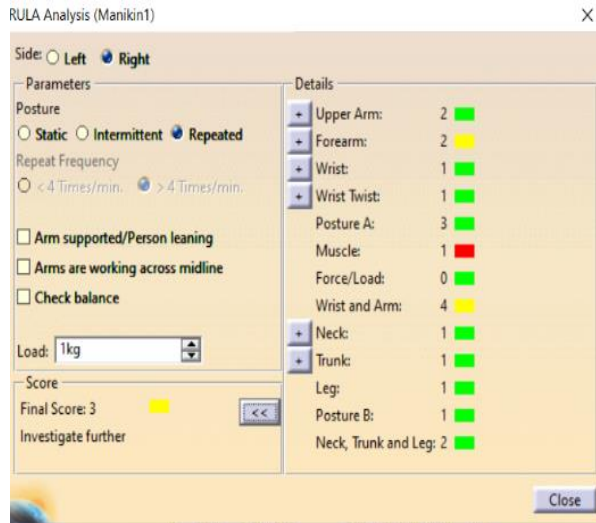
Резултати ергономске процене приликом извођења монтажних активности у ергономском сценарију су приказани на сликама 6.9-6.12. Сlike приказују положаје тела које заузимају испитаници током извођења активности монтаже након имплементације ергономских мера.



Слика 6.9 Резултати РУЛА анализе - положај Е1

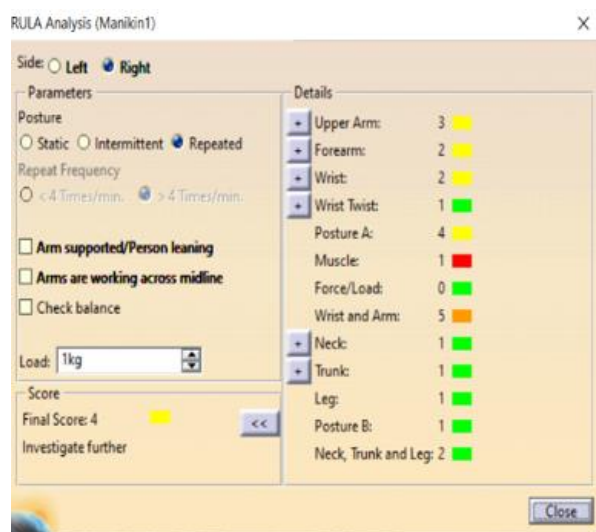
Као што се види са слике 6.9 у ергономском сценарију, испитаници се нису савијали на десну страну јер су делови од акрила били постављени на радну површину са десне стране испитаника у оквиру златне зоне тако да није било потребе за савијањем тела на десну страну. Укупан резултат након РУЛА анализе је 3 што указује да је положај са ергономског аспекта повољан за испитаника.

На новој радној станици сви потребни предмети, материјали и компоненте су распоређени и прилагођени потребама, захтевима и индивидуалним карактеристикама испитаника (слика 6.10) што је допринело да резултат након РУЛА анализе за овај положај буде 3. Испитаници нису истезали тело како би дохватили потребне жичице као у неергономском сценарију јер је класер са жичицама постављен у оквиру златне зоне.



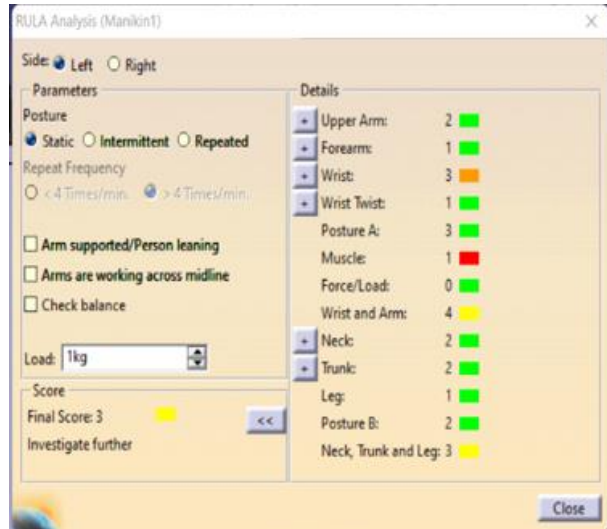
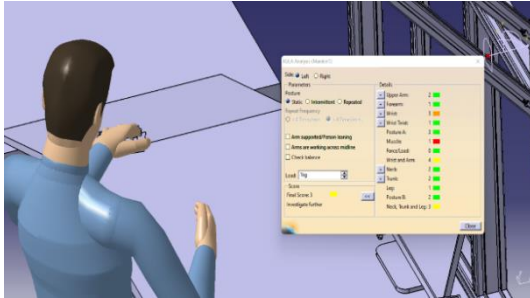
Слика 6.10 Резултати РУЛА анализе - положај Е2

На основу слика 6.9 и 6.10 може се закључити да су у ергономском сценарију елиминисане активности које укључују највеће ергономске ризике од настанка мишићно-коштаних поремећаја. Укупна оцена и за положај 1 и за положај 2 је 3 што је значајно нижа вредност у поређењу са оценама добијеним у неергономском сценарију за ове положаје тела.



Слика 6.11 Резултати РУЛА анализе - положај Е3

Резултати RULA анализе у ергономском сценарију за положај 3 показују да је коначна оцена 4 (слика 6.11), што представља значајно побољшање у односу на традиционални сценарио (када је оцена била 7). Закључак за даље истраживање је да је потребно максимално приближити монитор а да се не поремети „златна зона“.

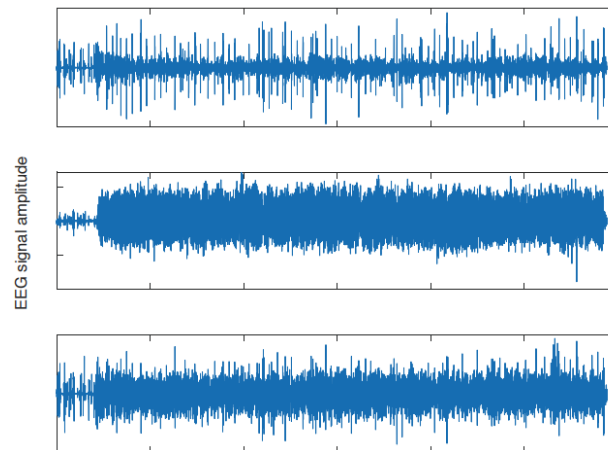


Слика 6.12 Резултати РУЛА анализе - положај Е4

У ергономском сценарију финални производи су постављани на клизач тако да није било потребе за савијањем тела на леву страну. Резултати РУЛА анализе у ергономском сценарију за овај положај су показали вредност 4 што је значајно ниже него у неергономском сценарију (слика 6.12). Према укупним резултатима РУЛА анализе може се закључити да су у ергономском сценарију испитаници изложени нижем ризику од појаве мишићно-коштаних обољења и других професионалних болести.

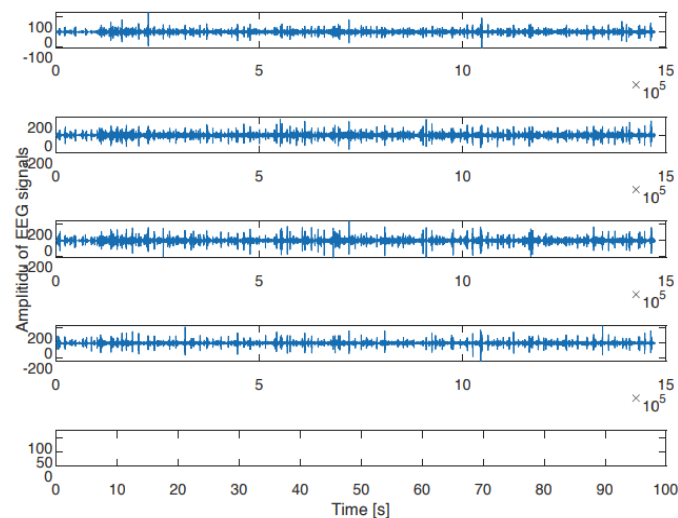
6.2 РЕЗУЛТАТИ ПРАЋЕЊА МОЖДАНЕ АКТИВНОСТИ

На слици 6.13 је приказана амплитуда ЕЕГ сигнала током времена. На слици се могу уочити флукуације у можданој активности током обављања монтажних активности. Промене у амплитуди указују на разлике у нивоу менталног оптерећења. Током склапања когнитивно захтевнијих шема повећавало се ментално оптерећење услед процесирања информација и фокусирања пажње на радни задатак. Као што се види са слике интензивније менталне активности доводе до повећања амплитуде ЕЕГ сигнала.



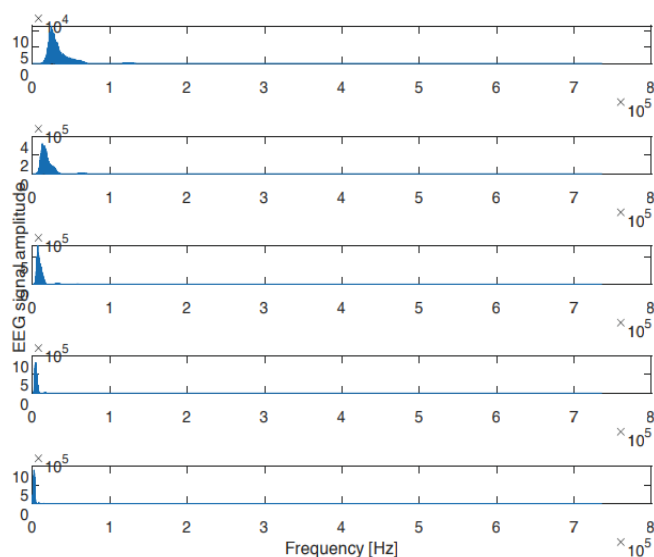
Слика 6.13 Амплитуда ЕЕГ сигнала током времена

На слици 6.14 су приказани одговарајући фреквентни опсези - делта (0-4 Hz), тета (4-8 Hz), алфа (8-13 Hz), бета (13-30 Hz) и гама (>30 Hz).



Слика 6.14 ЕЕГ сигнали за различите опсезе (Savković и други, 2022в)

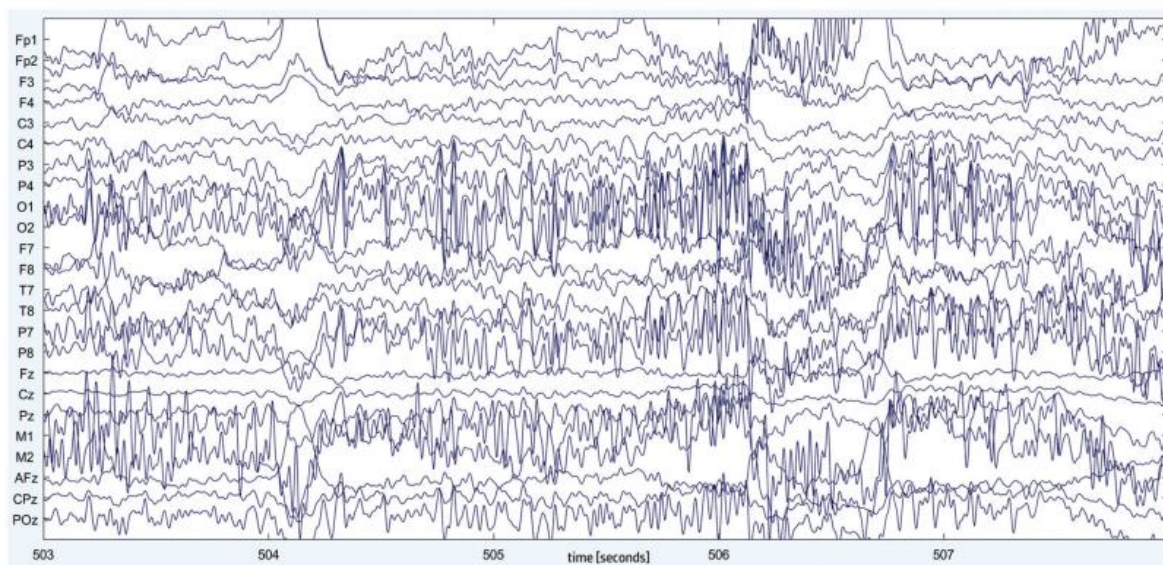
Следећи корак у обради ЕЕГ сигнала је израчунавање спектра у фреквенцијском домену коришћењем Фуријеове трансформације (слика 6.15). Овај поступак омогућава конверзију временских серија сигнала у фреквенцијски домен, чиме се идентификују доминантне фреквенције и модулације у сигналу које су повезане са различитим когнитивним стањима.



Слика 6.15 Спектри једног ЕЕГ канала за различите опсеге (Savković и други, 2022в)

Филтрирање сигнала је извршено ради уклањања артефаката и шума који настају услед трептаја, покрета главе или спољашњих електромагнетних сметњи, како би се добили поузданији подаци за даљу анализу.

На слици 6.16 је приказан филтриран 24-канални ЕЕГ сигнал снимљен током трајања задатка склапања у трајању од 5 секунди. На у-оси су представљене 24 електроде, распоређене према њиховим називима у складу са 10-20 међународним системом позиционирања електрода. Сигнали приказују активност мозга у одређеним регионима, што омогућава праћење когнитивних аспеката испитаника током обављања монтажних задатака.

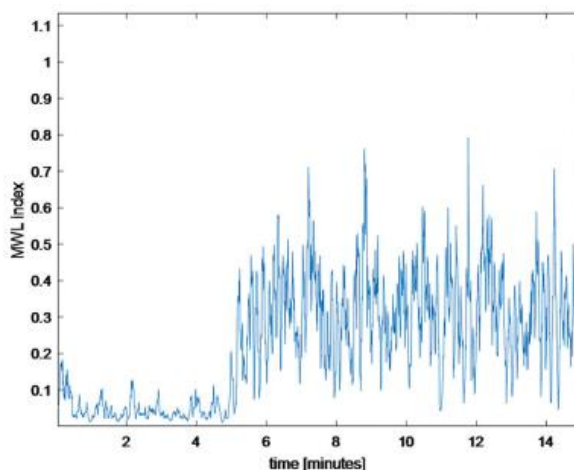


Слика 6.16 Филтриран 24-канални ЕЕГ сигнал снимљен током извођења задатка склапања у трајању од 5 секунди (Savković и други, 2022а)

Праћењем можданих активности преко ЕЕГ сигнала током обављања монтажних активности пружа се дубљи увид у динамику можданих таласа, утврђује се ниво менталног оптерећења и утврђује када ће доћи до пада пажње и концентрације.

6.2.1 Ментално оптерећење

Ментално оптерећење је праћено преко индекса менталног оптерећења. На слици 6.17 је приказана зависност индекса менталног оптерећења од времена за једног испитаника у првих 15 минута експеримента. Као што се може видети са слике у првих 5 минута када су испитаници одмарали и слушали опуштајућу музику вредности овог индекса су биле испод 0.2. Након тога отпочели су обављање монтажних активности и у наредних 10 минута дошло је до повећања вредности индекса менталног оптерећења.



Слика 6.17 Индекс менталног оптерећења у првих 15 минута експеримента (Savković и други, 2022a)

У табели 6.2 су дате просечне вредности индекса менталног оптерећења (MWLi) за испитанике број 1. и 2. у току одмора односно слушања релаксирајуће музике и у току обављања монтажних активности.

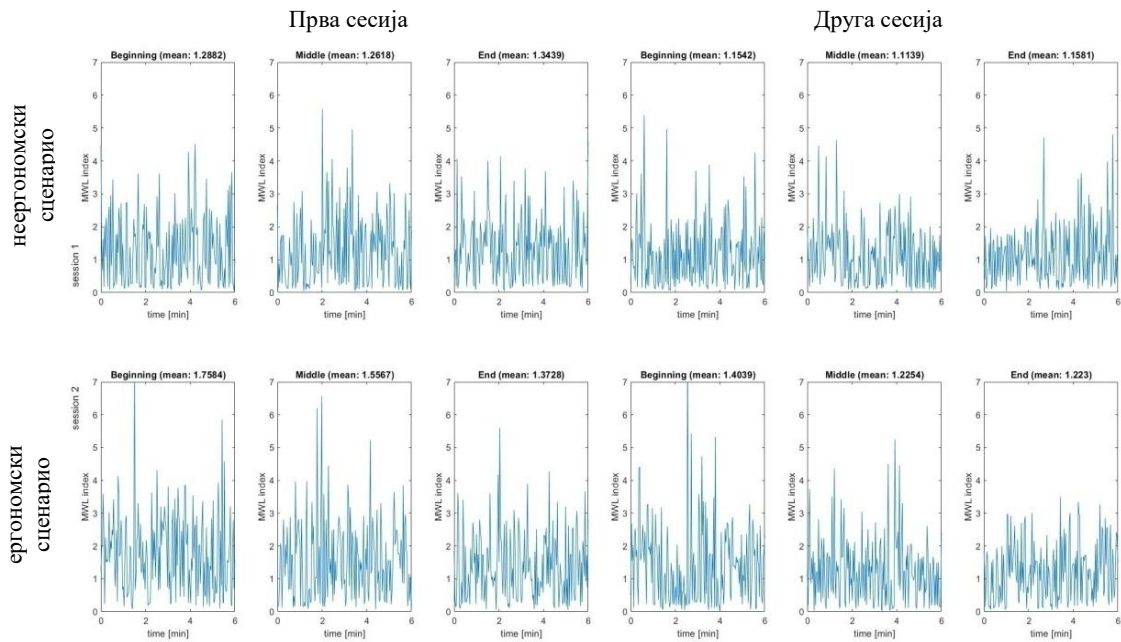
Табела 6.2 Просечна вредност индекса менталног оптерећења (MWLi) за испитанике бр.1 и бр.2 у току одмора и обављања монтажних активности

	Испитаник бр.1	Испитаник бр.2
MWLi индекс у току одмора	0.0472	0.1737
MWLi индекс у току обављања монтажних активности	0.3013	0.9187

Из табеле 6.2 се види да просечне вредности индекса менталног оптерећења имају већу вредност у току обављања монтажних активности код оба испитаника. Разлог томе се налази у чињеници да су испитаници максимално фокусирани на шеме по којима обављају склапање компоненти у финални производ и зато долази до повећања менталног оптерећења.

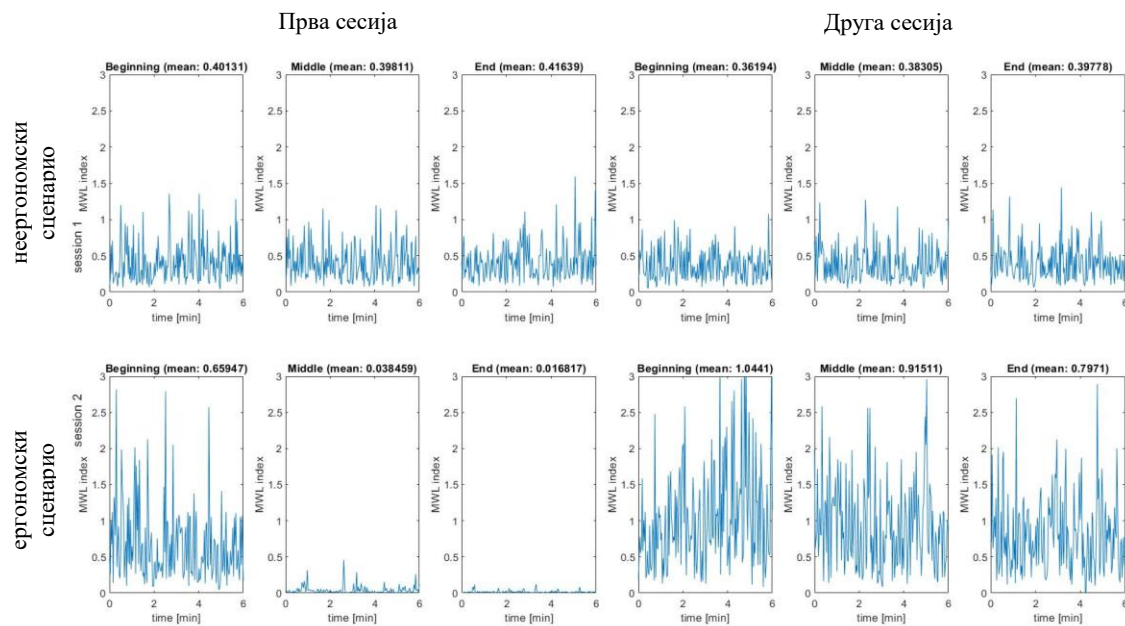
На сликама 6.18-6.21 приказана је зависност индекса менталног оптерећења од времена за испитанике бр. 1, 5, 11 и 13 у оба сценарија (традиционални и ергономски) у обе сесије на почетку, средини и крају сваке сесије. У питању су 6-минутни сегменти на почетку, средини и крају сваке сесије. У првом реду је приказан ергономски сценарио а у другом реду неергономски. Прва три графика се односе на прву сесију а друга три су везана за другу сесију. Израчунате средње вредности су додате насловима графика.

Испитаник бр.1



Слика 6.18 ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 1 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију

Испитаник бр. 5

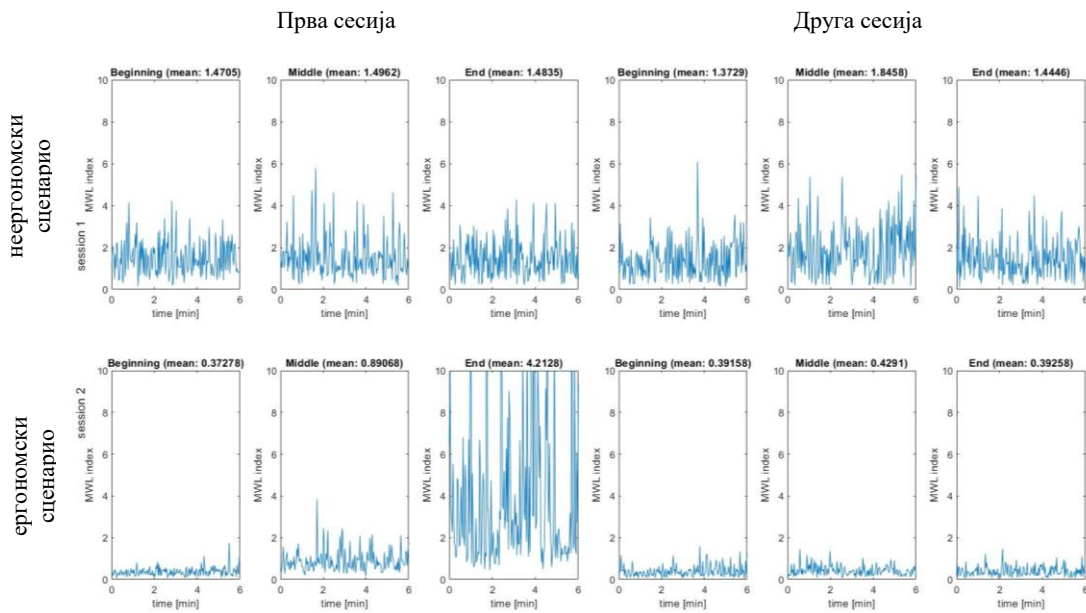


Слика 6.19 ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 5 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију

Из посматрања сигнала може се закључити да код оба испитаника у неергономском сценарију постоји већа разлика између максималне и минималне вредности сигнала у односу на ергономски сценарио, што је у складу са претпоставком да је ергономски сценарио повољнији за обављање радних активности и подразумева мање ментално оптерећење. Већа фреквенција пикова у сигналу је примећена у

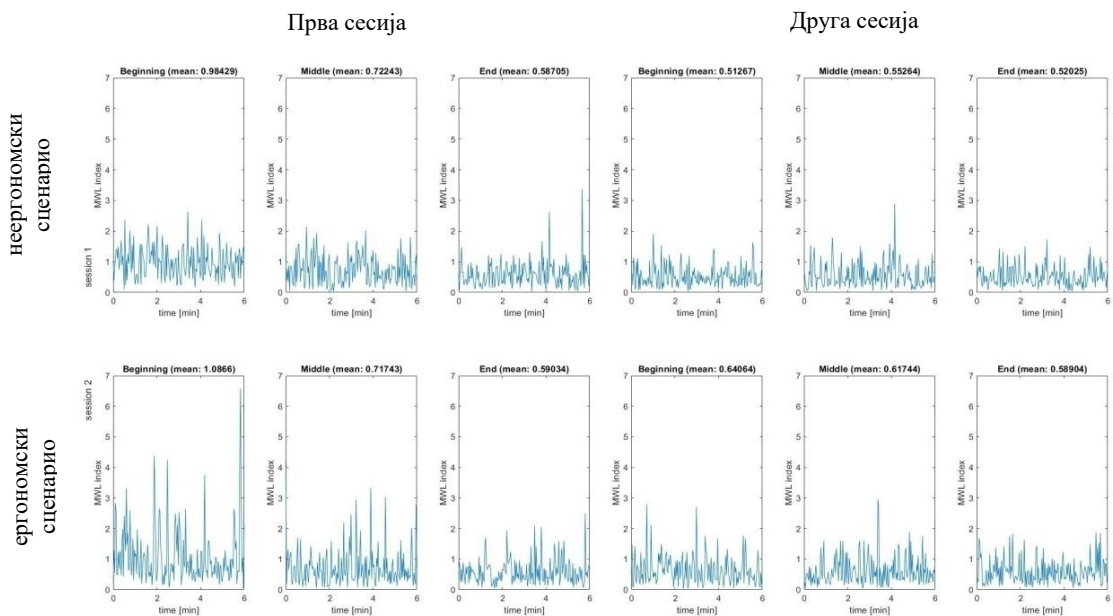
неергономском сценарију, што заправо значи да постоји нижи степен континуитета. Такође треба нагласити да је у оба сценарија индекс менталног оптерећења нижи током друге сесије када је испитаник постигао извесну удобност и прилагођавање у извођењу радних операција.

Испитаник бр.11



Слика 6.20 ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 11 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију

Испитаник бр.13



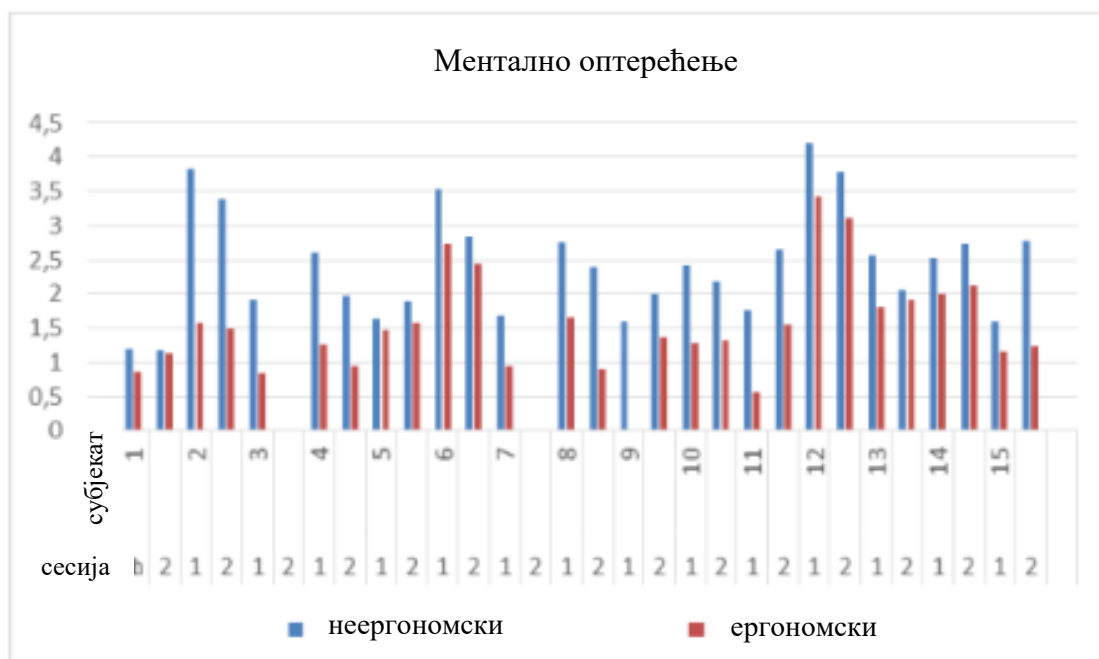
Слика 6.21 ЕЕГ сигнали за испитаника бр. 13 у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију

Поред праћења менталног оптерећења преко индекса менталног оптерећења у дисертацији је урађена квантификација ангажовања испитаника тј. утврђено је када се повећава а када смањује ангажовање преко два индекса ангажовања. У табели 6.3 су представљени резултати праћења менталног оптерећења и ангажовања испитаника преко индекса MWLi, Ei+theta и Ei.

Табела 6.3 Квантификација менталног оптерећења и ангажовања испитаника преко индекса MWLi, Ei+theta и Ei

испитан ик	сесија	MWLi		Ei+theta		Ei	
		неергономски сценарио	ергономски сценарио	неергономски сценарио	ергономски сценарио	неергономски сценарио	ергономски сценарио
1	1	1.202975452	0.869358371	0.409551398	0.335024257	1.066987098	0.764321183
	2	1.184745816	1.1442342	0.465999942	0.307724941	1.19457226	0.69485703
2	1	3.834577742	1.572440969	0.326846714	0.297532035	0.843050084	0.81988879
	2	3.392328558	1.499758196	0.324158794	0.309735075	0.879947788	0.798147034
3	1	1.916025308	0.848509454	0.340438023	0.289769053	0.721702603	0.672061205
	2	/	/	/	/	/	/
4	1	2.606855525	1.268157486	0.30569518	0.302220335	0.850224175	0.698942354
	2	1.973660998	0.946495205	0.289188962	0.279276221	0.800147623	0.700316425
5	1	1.639100945	1.481027463	0.423085164	0.242906401	1.003352922	0.609679296
	2	1.882740048	1.568310361	0.41714091	0.259944516	0.96767345	0.631245233
6	1	3.523785071	2.730213701	0.510256325	0.484237755	1.1030752	1.019507424
	2	2.839269252	2.443091295	0.515407696	0.505165327	1.062772843	1.045044015
7	1	1.672983046	0.935842681	0.486723806	0.43625893	/	0.869453276
	2	/	/	/	/	/	/
8	1	2.751101451	1.66301029	0.630159117	0.379861007	1.341356487	0.932029782
	2	2.392111945	0.897112669	0.534337237	0.42538039	1.228302513	0.964593332
9	1	1.58879915	/	/	0.425638801	0.997982491	/
	2	1.987037839	1.368431751	0.409607439	0.365513397	0.970310554	0.906063832
10	1	2.418083552	1.282762207	0.493892404	0.21354881	0.97021643	0.488046145
	2	2.178013279	1.32650804	0.506378173	0.176573042	0.961603986	0.404485608
11	1	1.772698158	0.565940856	0.453613888	0.441986051	1.143828191	1.068283952
	2	2.648516409	1.557023639	0.477555252	0.415459628	1.151352679	1.008163654
12	1	4.204476802	3.436045057	0.518731212	0.358006802	1.13799092	0.85485315
	2	3.786733722	3.102242036	0.487362143	0.36735932	1.149817251	0.8353565
13	1	2.570104587	1.809149979	0.285197784	0.264297633	0.500154461	0.460977798
	2	2.062778793	1.913274412	0.253312968	0.245730156	0.415699135	0.40695807
14	1	2.525534689	1.990934818	0.399094162	0.382388512	0.996663394	0.938268281
	2	2.74077537	2.113975803	0.397745084	0.389467351	1.023312111	0.936976312
15	1	1.598036122	1.147643338	0.394411036	0.341955344	0.974195488	0.775325236
	2	2.780535421	1.230584029	0.360356212	0.34945058	0.875084066	0.758222185

Резултати праћења менталног оптерећења за свих 15 испитаника преко вредности индекса менталног оптерећења (MWLi) приказани су на слици 6.22.



Слика 6.22 Индекс менталног оптерећења за свих 15 испитаника у неергономском и ергономском сценарију

Део резултата је објављен у (Savković и други, 2023а). У табели и на хистограму нису приказане вредности за испитаника бр. 3 у другој сесији и испитаника бр. 7 у другој сесији због техничких проблема насталих током извођења експерименталних истраживања.

На основу резултата праћења менталног оптерећења преко индекса менталног оптерећења, може се закључити да су забележени виши нивои вредности индекса менталног оптерећења код већине испитаника у неергономском сценарију, што указује на повећано ментално оптерећење услед неадекватних услова рада. Неадекватни радни услови доводе до улагања већег напора како би се задатак извршио на време, што је повећало ментално оптерећење и стрес код испитаника. Због неадекватне поставке радног окружења и неефикасне организације радног простора, испитаници су морали да улажу додатни ментални напор како би на време извршили радни задатак. Код већине испитаника ментално оптерећење је повећано у другој сесији, што је последица акумулације замора и смањења способности фокусирања на радне активности.

Резултати показују да је у традиционалном сценарију дошло до менталног замора и пада концентрације код већине испитаника током друге сесије, што се поклапа са резултатима добијеним из усменог интервјуа, који је обављен непосредно након експеримента. Испитаници су изјавили да су осећали већи ментални напор и пад концентрације током обављања активности у неергономском сценарију посебно током друге сесије, тачније на средини и на крају друге сесије.

Као што се може видети на основу табеле забележен је нижи ниво вредности индекса менталног оптерећења код већине испитаника у ергономском сценарију у односу на традиционални сценарио. Ергономска оптимизација допринела је смањењу менталног оптерећења, јер је пажња испитаника могла бити усмерена на сам процес

монтаже, без потребе за константним настојањем да се прилагоде неадекватном радном окружењу.

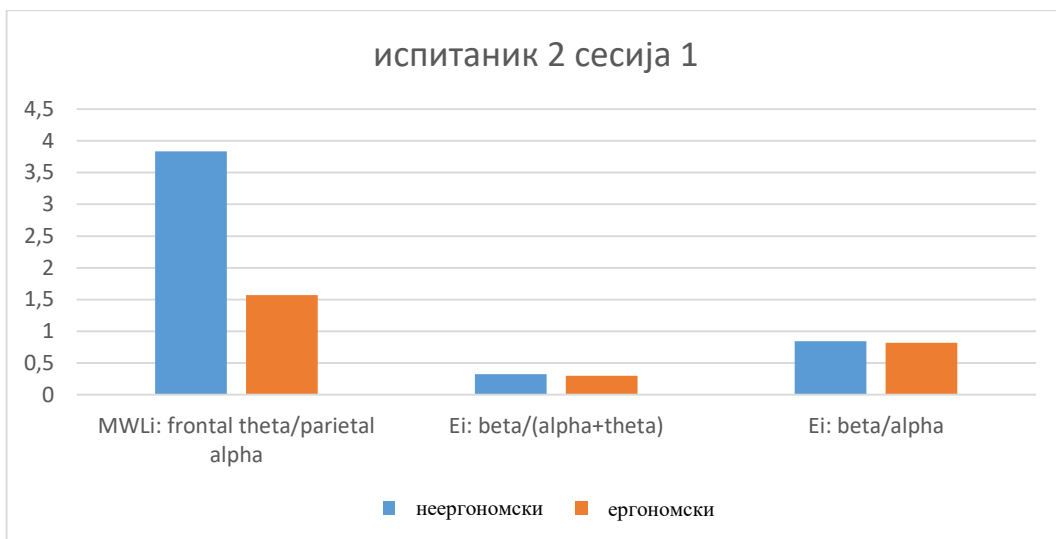
У фази монтаже делова и компоненти дошло је до повећања менталног оптерећења код испитаника. Ово се може оправдати чињеницом да је у тој фази испитаник у потпуности био фокусиран на шему или 3Д слику према којој је требао да повеже жице. Он је детаљно анализирао шеме, посматрао распоред жица и размишљао како би требало да их повеже. Такође, веће ментално оптерећење је било присутно при склапању тежих шема у виду 3Д слика у односу на 2Д шеме. Према резултатима анализе ЕЕГ података, уочене су промене у фронталном и паријеталном региону мозга, углавном у тета и алфа опсегу, са повећањем тежине задатака. Штавише, током састављања тежих шема долази до повећања алфа ритма у паријеталном и окципиталном региону, што је проузроковано креативним размишљањем јер је испитаник проналазио алтернативна решења за решавање проблема.

На основу праћења покрета очију, уочено је да је трептање смањено и повећано је ширење зеница током склапања когнитивно захтевнијих шема. Ово се може оправдати чињеницом да је у тим тренуцима испитаник био максимално концентрисан на задатак и да му је стога пажња повећана. Такође, како се ментално оптерећење током времена повећавало, покрети очију су се убрзавали.

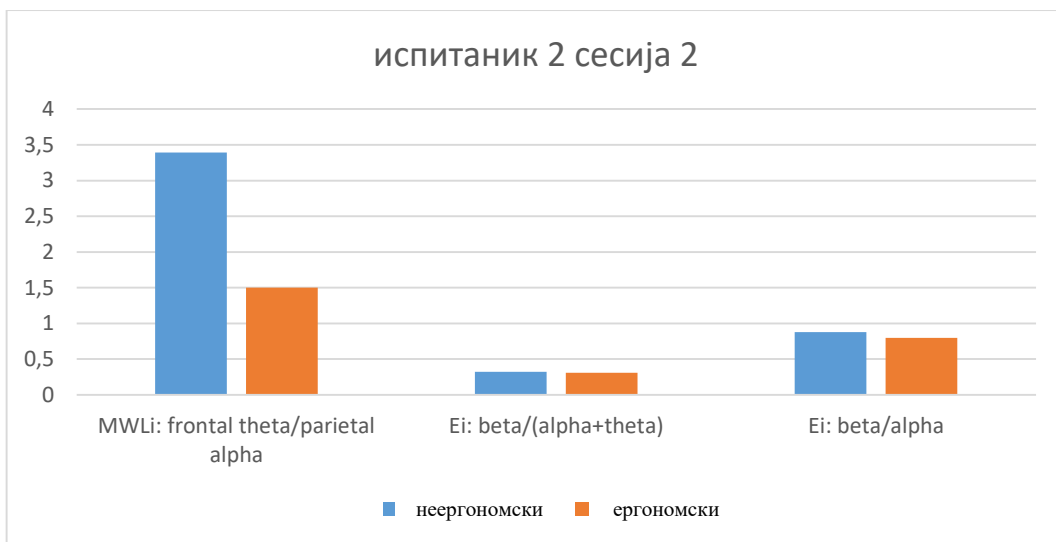
Испитаници су били изложени нижем нивоу менталног оптерећења током фазе одмора и фазе преузимања делова од акрила из кутије и жица из класера. Пре почетка прве сесије експеримента након слушања опуштајуће музике и на почетку друге сесије после паузе од 15 минута, код испитаника није примећено ментално оптерећење. И ово се поклапа са резултатима интервјуа јер су испитаници изјавили да на почетку експеримента, након слушања опуштајуће музике нису осећали умор. Испитаници су изјавили да су осећали веће ментално оптерећење и пад концентрације током обављања активности у неергономском сценарију. Такође, према њиховим изјавама, ментални замор су у највећој мери осећали од средине до краја прве сесије и на крају друге сесије.

Резултати су показали да фактори из спољашњег окружења (температура, влажност ваздуха, осветљење, бука итд.) у великој мери утичу на ментално оптерећење испитаника, а тиме и на њихову продуктивност. Установљена је јака корелација између неповољних услова из спољашњег окружења и повећања менталног напрезања. У традиционалном сценарију када су испитаници били изложени високим нивоима буке и када је осветљење било неадекватно дошло је до повећања менталног оптерећења код сваког испитаника у односу на ергономски сценарио. Ово је у великој мери утицало на способност испитаника да се фокусирају на задатке, повећало учесталост дефеката и резултирало дужим временом потребним за обављање активности, односно смањењем продуктивности. С друге стране, у ергономском сценарију када је осветљење било адекватно и када испитаници нису били изложени буци, ментално оптерећење је било знатно ниже.

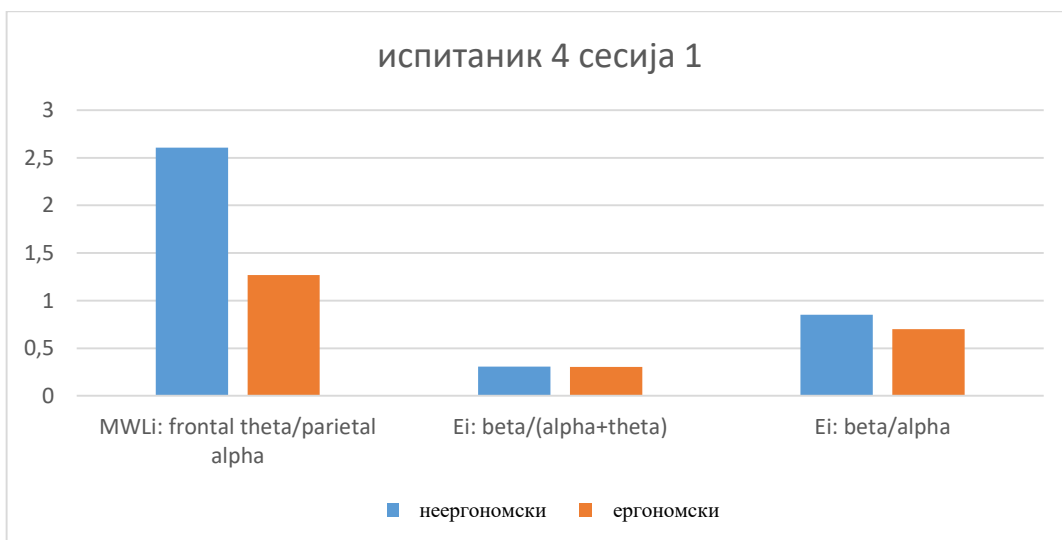
Као што се може видети са слика 6.23-6.28 код испитаника бр.2, бр.4 и бр.15 је дошло до значајног смањења менталног оптерећења и у првој сесији и у другој сесији у ергономском сценарију у односу на неергономски сценарио. Прегледом слика може се установити корелација између менталног оптерећења и ангажовања испитаника. Са смањењем менталног оптерећења повећава се ангажовање и обрнуто.



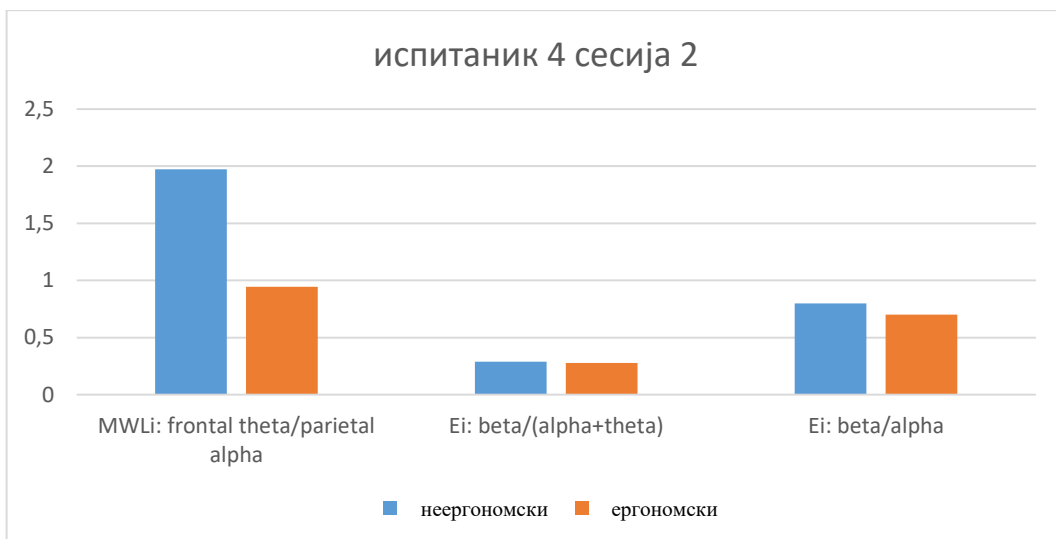
Слика 6.23 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 2 у првој сесији



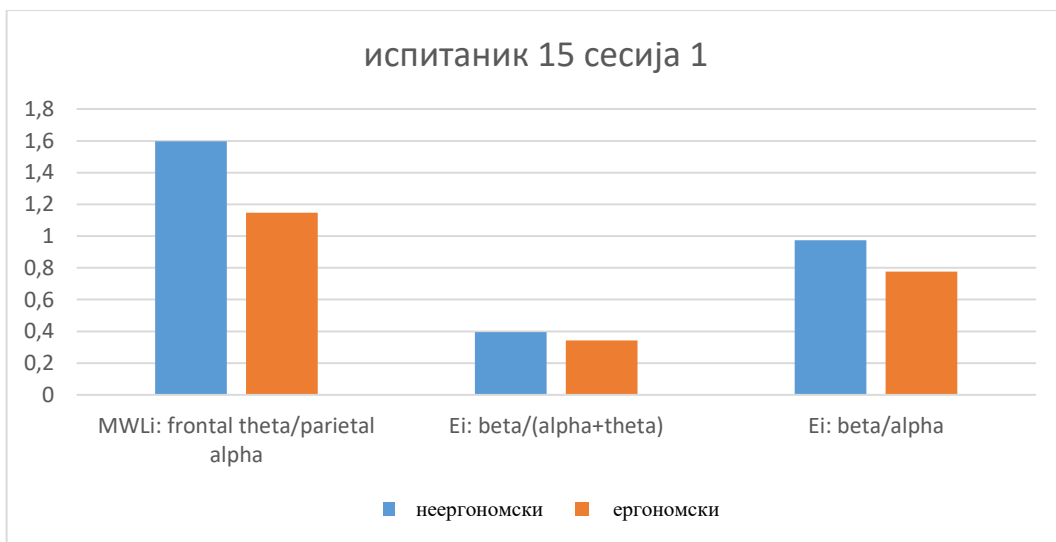
Слика 6.24 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 2 у другој сесији



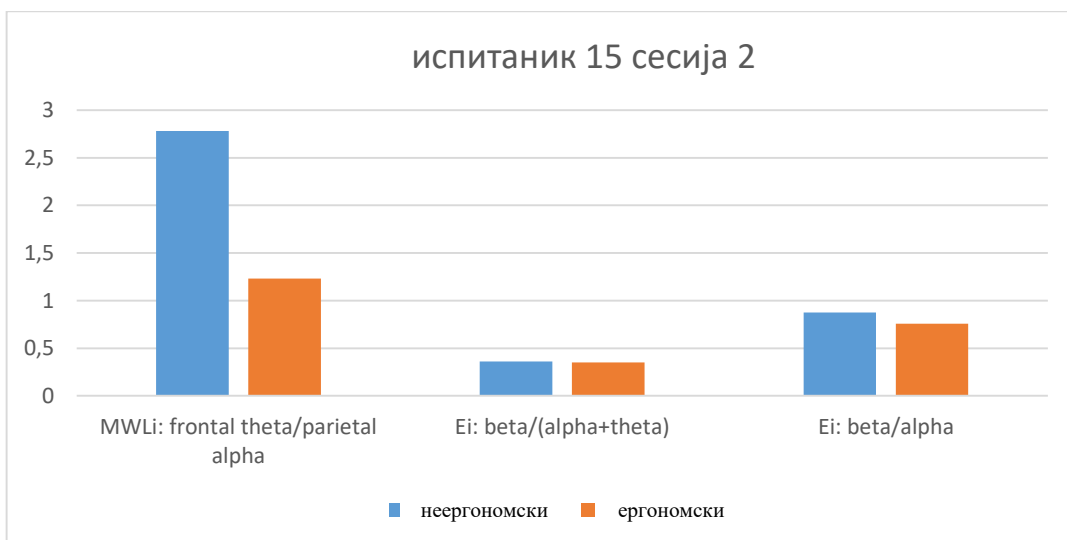
Слика 6.25 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 4 у првој сесији



Слика 6.26 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 4 у другој сесији

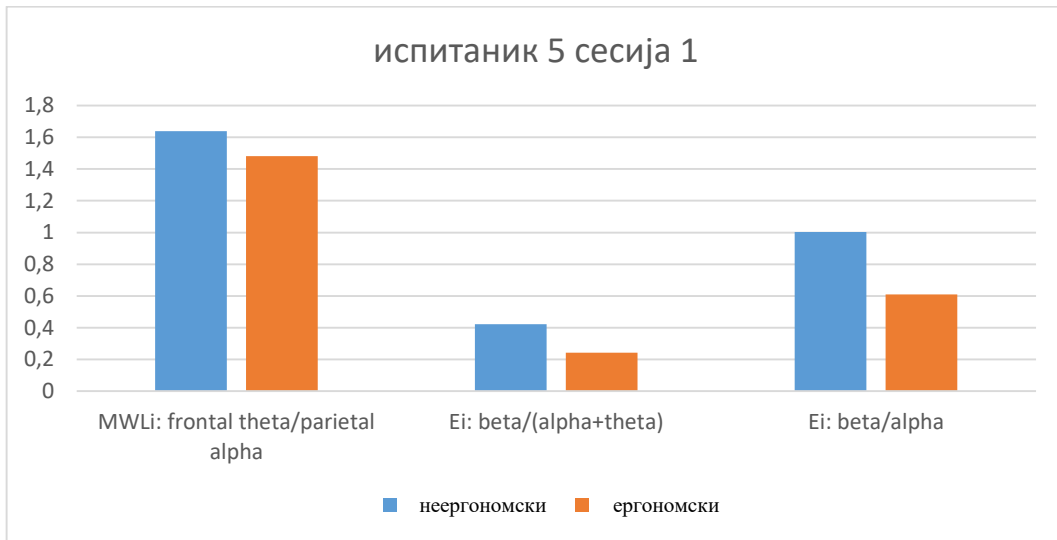


Слика 6.27 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 15 у првој сесији

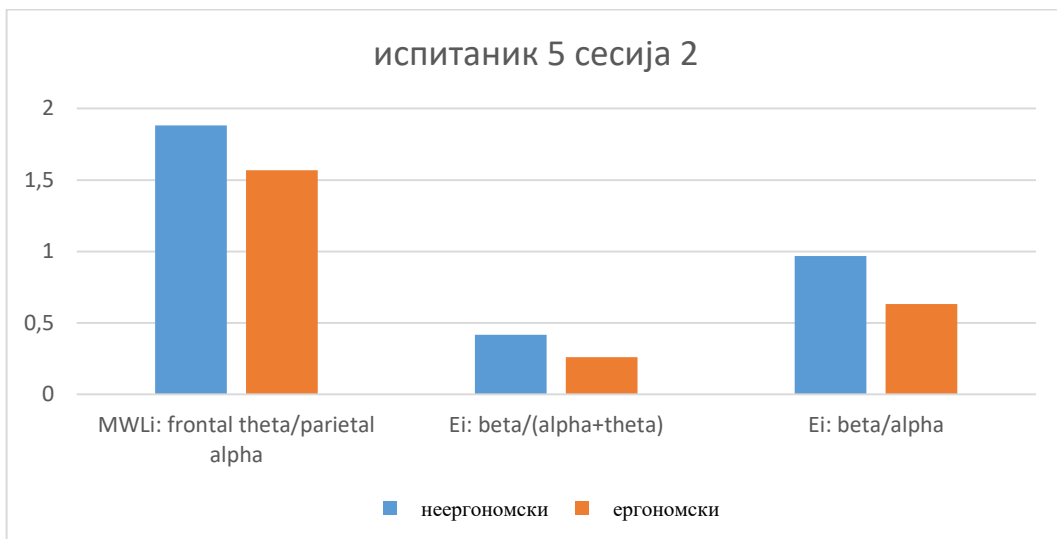


Слика 6.28 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 15 у другој сесији

Код испитаника бр. 5 и бр. 9 примећена је висока вредност индекса менталног оптерећења и ниско ангажовање и у првој и у другој сесији у оба сценарија (слике 6.29-6.32).



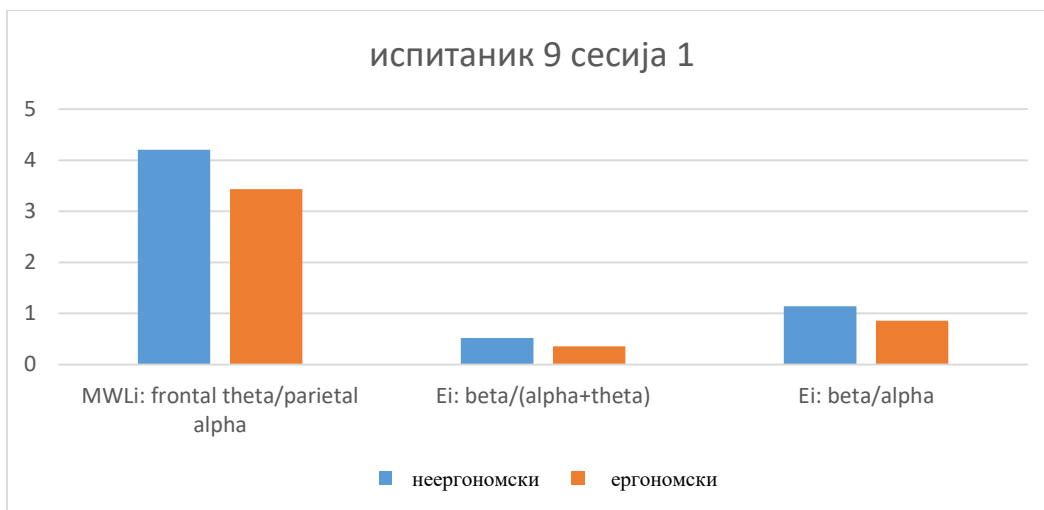
Слика 6.29 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 5 у првој сесији



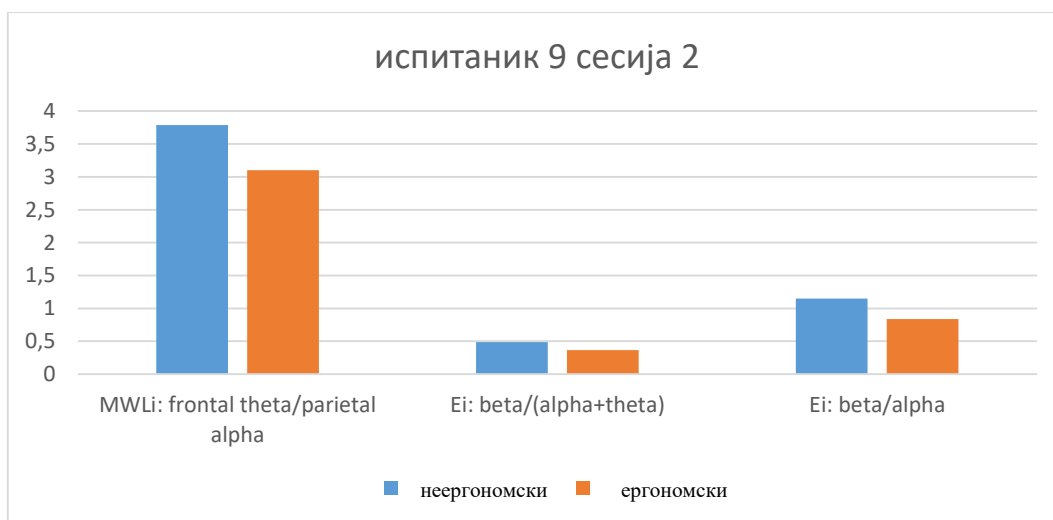
Слика 6.30 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 5 у другој сесији

Такође, приказани резултати указују на корелацију између нивоа менталног оптерећења и ангажовања са једне стране и ефикасности извршавања задатака са друге стране. Како се ментално оптерећење повећава, долази до смањења когнитивних ресурса који су доступни за правовремену реализацију монтажних активности. Као последица тога, смањује се ефикасност.

Мултиваријантном анализом резултата праћења мождане активности, менталног оптерећења и покрета очију, показано је да постоји значајна корелација између специфичних покрета очију и нивоа менталног оптерећења.

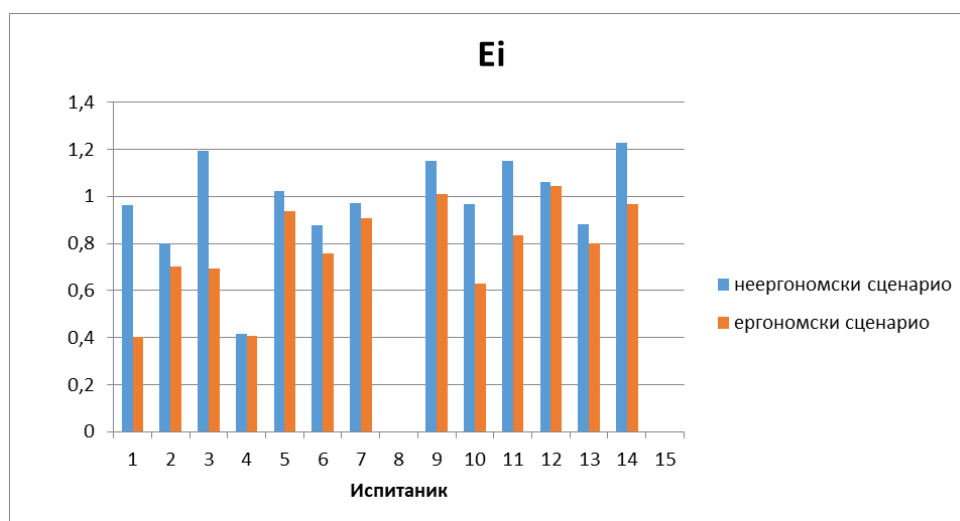


Слика 6.31 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 9 у првој сесији



Слика 6.32 Упоредни преглед сва три индекса за испитаника бр. 9 у другој сесији

На слици 6.33 су приказани обједињени резултати праћења ангажовања испитаника преко индекса ангажовања E_i .

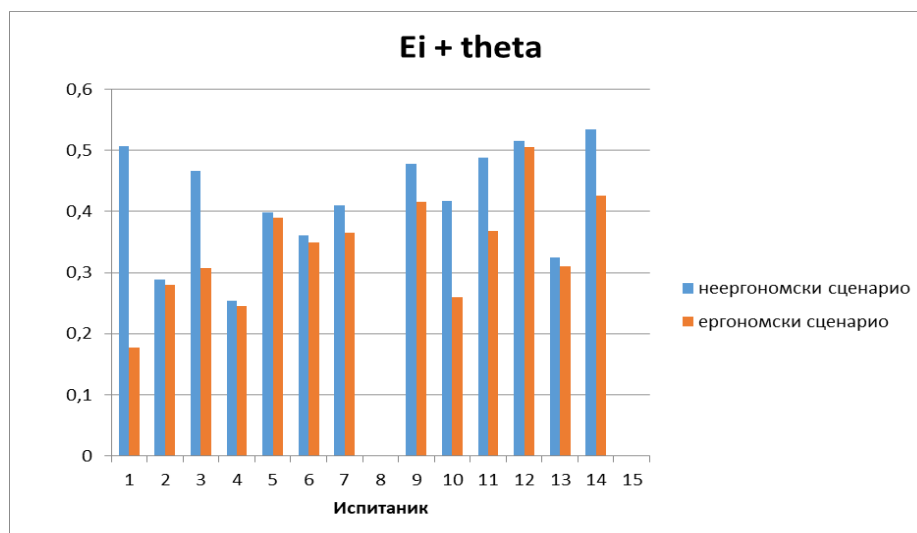


Слика 6.33 Резултати праћења ангажовања свих 15 испитаника преко индекса ангажовања E_i

Као што се може видети на основу слике 6.33 у неергономском сценарију, вредност индекса ангажовања је генерално нижа код свих испитаника, што указује на смањење ангажованости испитаника услед повећаног физичког и менталног оптерећења. У неергономском сценарију испитаници су извршавали активности на радној станици која није дизајнирана у складу са ергономским принципима и били су изложени буци и неадекватном осветљењу што је ометало обављање монтажних активности. Високо ментално оптерећење често доводи до губитка фокуса и смањења мотивације да се задатак ефикасно обави. Насупрот томе, у ергономском сценарију, код већине испитаника је забележен виши ниво индекса ангажовања, што указује на већу усмереност и посвећеност радним активностима.

Слична ситуација је и са трећим индексом. У неергономском сценарију, вредности овог индекса су биле ниже код свих испитаника што је директно повезано са повећаним когнитивним оптерећењем и смањењем ефикасности. С друге стране, у ергономском сценарију, код свих испитаника вредности овог индекса су биле више.

На слици 6.34 су приказани обједињени резултати праћења ангажовања свих 15 испитаника преко индекса ангажовања $Ei+theta$.



Слика 6.34 Резултати праћења ангажовања свих 15 испитаника преко индекса ангажовања $Ei+theta$

Када се упореде резултати за сва три индекса у ергономском и неергономском сценарију, може се извући генерални закључак да ергономска оптимизација доприноси смањењу менталног оптерећења и повећању ангажовања код свих испитаника. Овиме је доказана четврта хипотеза по којој је могуће смањити напрезање, нефизиолошки положај радника и ергономске ризике свеобухватно приликом симулирања извођења радних активности које укључују понављајуће операције монтаже мерењем психофизиолошких и неуроергономских показатеља применом ЕМГ-а и ЕЕГ-а. Посматрањем резултата праћења мишиће и моздане активности може се утврдити да постоји јака корелација између физичког и менталног оптерећења. У ергономском сценарију, ергономска оптимизација је смањила физичко оптерећење код испитаника, што је директно допринело смањењу менталног оптерећења. У неергономском сценарију, забележени су виши нивои оптерећења трапезних мишића код већине испитаника, што је посебно изражено у другој сесији. Истовремено, у неергономском сценарију испитаници су били изложени већем менталном оптерећењу у односу на ергономски сценарио.

6.2.2 Корелација између индекса MWLi, Ei theta и Ei

Да би се испитао утицај повезаности између индекса MWLi, Ei (beta/(alpha+theta)) и Ei (beta/alpha) коришћен је Пирсонов коефицијент корелације. Индикатори (MWLi, EiTheta) и Ei су рачунати као просек прве и друге сесије за оба сценарија (ергономски и неергономски) посебно. У табели 6.4 су приказани коефицијенти корелације.

Табела 6.4 Коефицијенти корелације

	MWLi	EiTheta	EiTheta	Ei	Ei
	Ергономски сценарио	Неергономски сценарио	Ергономски сценарио	Неергономски сценарио	Ергономски сценарио
MWLi					
Неергономски сценарио	0,853(0,000)	0,673(0,006)	0,733 (0,002)	0,671 (0,006)	0,719 (0,003)
MWLi					
Ергономски сценарио		0,748 (0,001)	0,624 (0,013)	0,567 (0,027)	0,725 (0,002)
EiTheta					
Неергономски сценарио			0,717 (0,003)	0,748 (0,001)	0,915 (0,000)
EiTheta					
Ергономски сценарио				0,901 (0,000)	0,784 (0,001)
Ei					
Неергономски сценарио					0,741 (0,002)

На основу табеле може се закључити да постоји значајна, позитивна и јака повезаност (сви коефицијенти корелације су позитивни и значајни):

- MWLi у неергономском сценарију и MWLi у ергономском сценарију, $r(15)=0,85$; $p=0,00$
- MWLi у неергономском сценарију и Ei Theta у неергономском сценарију, $r(15)=0,67$; $p=0,01$
- MWLi у неергономском сценарију и Ei Teta у ергономском сценарију, $r(15)=0,73$; $p=0,00$
- MWLi у неергономском сценарију и Ei у неергономском сценарију, $r(15)=0,67$; $p=0,01$

- MWLi у неергономском сценарију и Ei у ергономском сценарију, $r(15)=0,72$; $p=0,00$
- MWLi у ергономском сценарију и Ei Theta у неергономском сценарију, $r(15)=0,75$; $p=0,00$
- MWLi у ергономском сценарију и Ei Teta у ергономском сценарију, $r(15)=0,62$; $p=0,01$
- MWLi у ергономском сценарију и Ei у неергономском сценарију, $r(15)=0,57$; $p=0,03$
- MWLi у ергономском сценарију и Ei у ергономском сценарију, $r(15)=0,73$; $p=0,00$
- Ei Theta у неергономском сценарију и Ei Theta у ергономском сценарију, $r(15)=0,72$; $p=0,00$
- Ei Theta у неергономском сценарију и Ei у неергономском сценарију, $r(15)=0,75$; $p=0,00$
- Ei Theta у неергономском сценарију и Ei у ергономском сценарију, $r(15)=0,92$; $p=0,00$
- Ei Theta у ергономском сценарију и Ei у неергономском сценарију, $r(15)=0,90$; $p=0,00$
- Ei Theta у неергономском сценарију и Ei у ергономском сценарију, $r(15)=0,78$; $p=0,00$
- Ei у неергономском сценарију и Ei у ергономском сценарију, $r(15)=0,74$; $p=0,00$

Табела 6.5 приказује коефицијенте корелације.

Табела 6.5 Коефицијенти корелације

	EiTheta	Ei
MWLi	0,780 (0,001)	0,735 (0,002)
EiTheta		0,959 (0,000)

На основу табеле може се закључити да постоји значајна, позитивна и јака повезаност свих индикатора.

- MWLi i Ei Theta, $r(15)=0,78$; $p=0,00$
- MWLi i Ei, $r(15)=0,74$; $p=0,00$ i
- Ei Theta i Ei, $r(15)=0,96$; $p=0,00$

Разлике по индикаторима између сценарија

Да би се испитале разлике по индикаторима између сценарија (ергономски и неергономски) коришћен је *t* тест за зависне узорке. Индикатори (MWLi, Ei Theta и Ei) су рачунати као просек прве и друге сесије за оба сценарија (ергономски и неергономски) посебно. У табели 6.6 су приказане разлике по сценарију.

Табела 6.6 Разлике по сценарију

	N	M	SD	t	p
NonergonomicMWLi	30	2,189	1,156	7,401	0,000
ErgonomicMWLi	30	1,324	1,027		
NonergonomicEiTheta	30	0,281	0,443	0,521	0,606
ErgonomicEiTheta	30	0,253	0,350		
NonergonomicEi	30	0,778	0,633	1,801	0,082
ErgonomicEi	30	0,602	0,573		

MWLi у неергономском сценарију (M=2,19; SD=1,16) је значајно виши од MWLi у ергономском положају (M=1,32; SD=1,03); $t(29)=7,40$; $p=0,00$ што се може правдати чињеницом да су испитаници у неергономском сценарију изложени већем менталном оптерећењу.

Разлика између EiTheta у неергономском сценарију и EiTheta у ергономском положају није значајна, као и разлика између Ei у неергономском положају и Ei у ергономском положају; $p>0,05$.

Да би се испитале разлике по индикаторима између сесија коришћен је *t* тест за зависне узорке. У табели 6.7 су приказане разлике између сесија. Разлика између сесија није значајна ни по једном индикатору; $p>0,05$.

Табела 6.7 Разлике између сесија

	N	M	SD	t	p
NonergonomicMWLi_1	15	2,388	0,897	1,385	0,188
NonergonomicMWLi_2	15	1,990	1,370		
ErgonomicMWLi_1	15	1,373	0,996	0,377	0,712
ErgonomicMWLi_2	15	1,274	1,091		
NonergonomicEiTheta_1	15	0,332	0,380	0,615	0,549
NonergonomicEiTheta_2	15	0,229	0,506		
ErgonomicEiTheta_1	15	0,346	0,079	1,508	0,154
ErgonomicEiTheta_2	15	0,160	0,478		
NonergonomicEi_1	15	0,843	0,546	1,146	0,271
NonergonomicEi_2	15	0,712	0,723		
ErgonomicEi_1	15	0,665	0,493	0,583	0,569
ErgonomicEi_2	15	0,539	0,654		
MWLi_1	15	1,881	0,887	0,952	0,357
MWLi_2	15	1,632	1,202		
EiTheta_2	15	0,195	0,490	-1,046	0,313
EiTheta_1	15	0,339	0,188		
Ei_1	15	0,754	0,362	0,887	0,390
Ei_2	15	0,626	0,683		

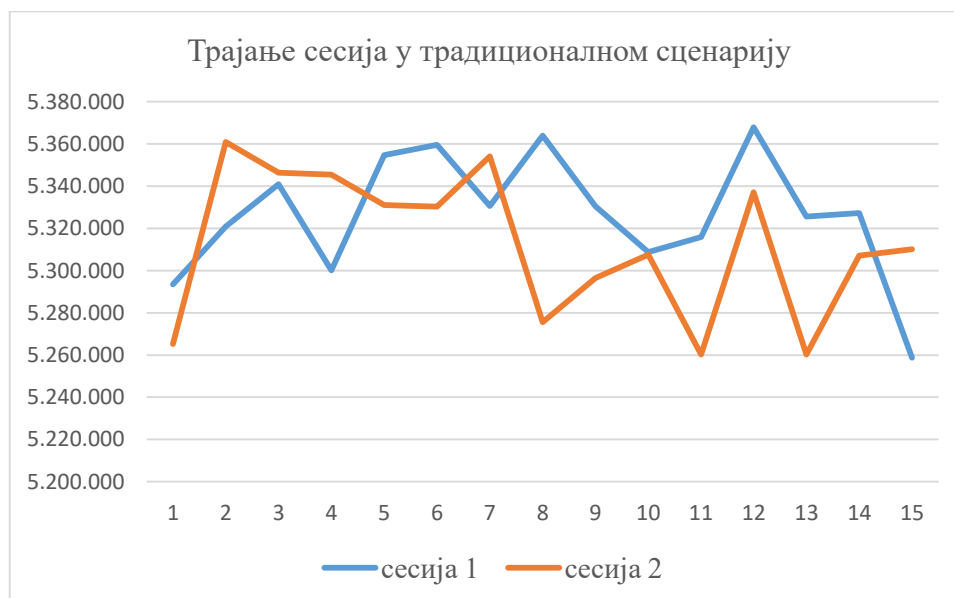
6.3 РЕЗУЛТАТИ ПРАЋЕЊА ПРОДУКТИВНОСТИ И ДЕФЕКТАТА

У табели 6.8 је приказано трајање прве и друге сесије у неергономском и ергономском сценарију за сваког испитаника.

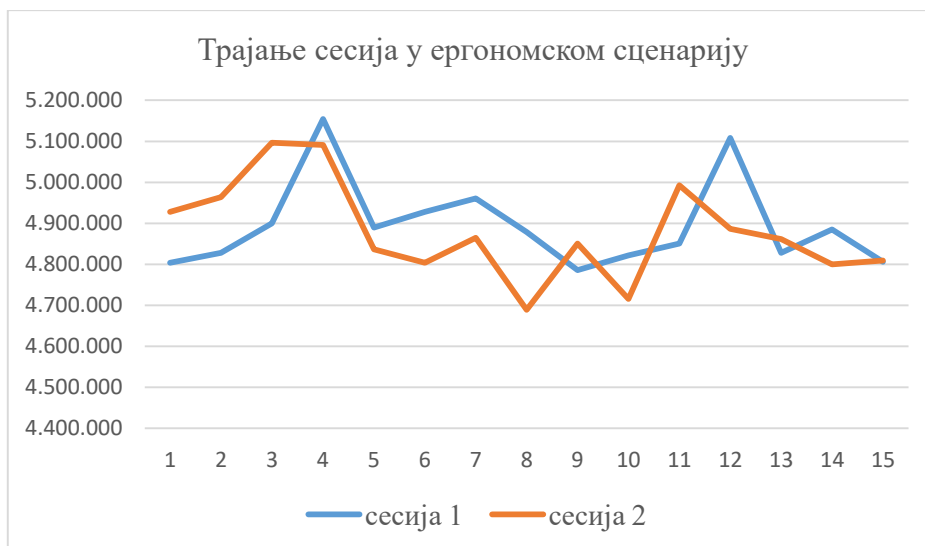
Табела 6.8 Трајање прве и друге сесије у неергономском и ергономском сценарију

	Трајање сесија Неергономски сценарио		Трајање сесија Ергономски сценарио	
	сесија 1	сесија 2	сесија 1	сесија 2
1	5.293.397	5.265.163	4.803.824	4.928.178
2	5.320.886	5.360.886	4.828.424	4.964.256
3	5.340.957	5.346.361	4.899.743	5.096.615
4	5.300.036	5.345.385	5.154.110	5.090.769
5	5.354.665	5.331.025	4.889.512	4.836.762
6	5.359.536	5.330.346	4.928.178	4.803.824
7	5.330.558	5.354.069	4.960.928	4.864.917
8	5.364.011	5.275.484	4.878.558	4.688.929
9	5.330.450	5.296.541	4.785.636	4.850.330
10	5.308.719	5.307.570	4.822.135	4.715.768
11	5.315.811	5.260.229	4.850.688	4.992.942
12	5.367.900	5.337.171	5.108.561	4.886.742
13	5.325.578	5.260.174	4.828.424	4.861.793
14	5.327.240	5.307.092	4.885.370	4.799.889
15	5.258.680	5.310.159	4.806.440	4.809.356

На основу података из табеле 6.8 може се установити да је код неких испитаника трајање прве сесије било краће у односу на другу сесију у оба сценарија а код неких испитаника је примећена обрнута ситуација тј. примећено је да је трајање друге сесије било краће у односу на прву сесију, што је приказано на сликама 6.35 и 6.36.



Слика 6.35 Трајање сесија у традиционалном (неергономском сценарију)



Слика 6.36 Трајање сесија у ергономском сценарију

Ово се поклапа са резултатима усменог интервјуа спроведеног након експеримента према којем су се неки испитаници изјаснили да је у току друге сесије долазило до пада пажње и концентрације, да су осећали ментални умор и стога им је било потребно више времена да изврше радни задатак.

Добијени резултати су показали да ефективна примена ергономских принципа приликом дизајнирања радних система, успостављање баланса између карактеристика радника и захтева радних задатка и усклађивање радног простора, алата и метода рада физиолошким, психолошким и когнитивним способностима радника доприноси побољшању продуктивности.

На основу резултата може се закључити да ергономска оптимизација доприноси смањењу времена потребног за извршење задатака. Посматрањем података уочава се позитиван утицај ергономских мера на брзину рада испитаника. Код већине испитаника укупно или просечно време је ниже у другој сесији у односу на прву сесију, што указује на то да су се испитаници адаптирали на радне задатке.

На основу табеле 6.8 може се закључити да је укупно време трајања активности мање у ергономском сценарију у односу на неергономски сценарио код већине испитаника што указује да су сви испитаници брже завршавали радне задатке у ергономском сценарију у односу на неергономски сценарио. Разлог томе се може наћи у чињеници да је ергономски сценарио погоднији за испитанике с обзиром да је предложена радна станица усклађена са ергономским и *lean* принципима па није било потребе за додатним истезањем и савијањем тела. Такође, класери са компонентама неопходним за обављање процеса монтаже у ергономском сценарију су постављени у складу са стандардима „златне зоне“, 5 С принципима па је стога елиминисано обављање активности које не додају вредност а повећавају укупно време трајања активности.

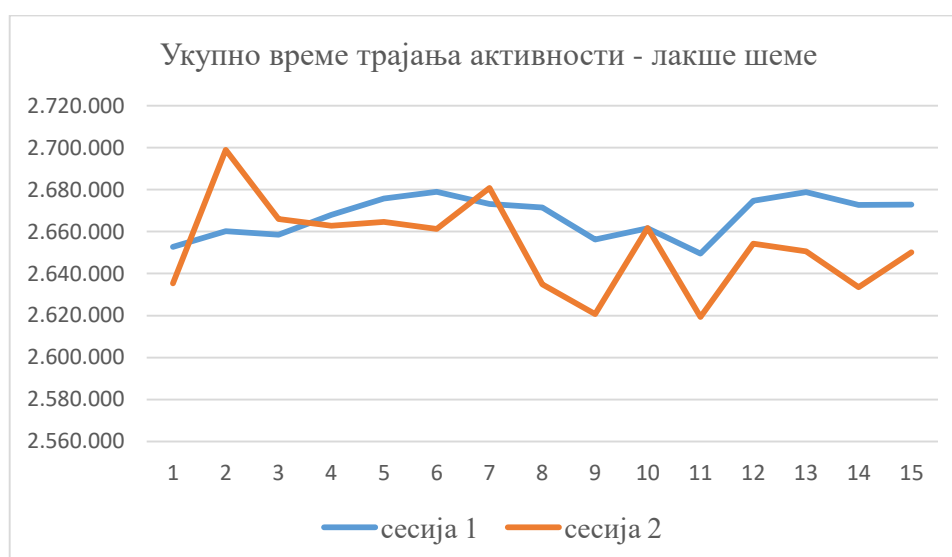
У традиционалном сценарију инструкције су представљене у папирном формату у регистраторима тако да су испитаници морали да окрећу стране када прелазе на следећу шему што је додатно одузимало време а у ергономском сценарију инструкције су приказане на монитору рачунара осетљивог на додир који је био постављен у оквиру златне зоне. У неергономском сценарију у класерима за складиштење су биле помешане плаве, беле, зелене и жуте жичице а у ергономском сценарију у класерима су се налазиле само плаве жичице што је испитаницима олакшало извођење радних активности.

У табели 6.9 је приказано укупно време трајања активности приликом склапања лакших шема у неергономском и ергономском сценарију за сваког од петнаест испитаника.

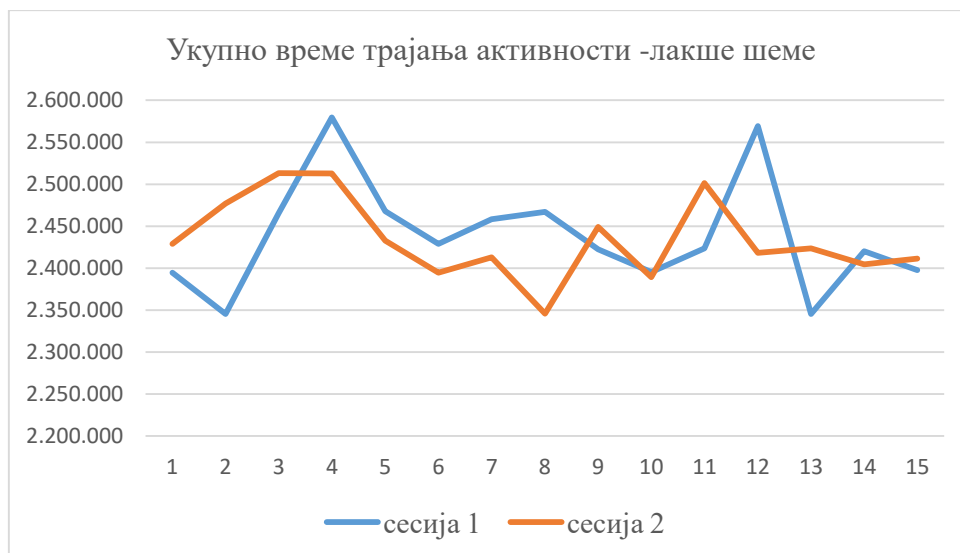
Табела 6.9 Укупно време трајања активности - лакше шеме

	Укупно време трајања активности - лакше шеме Неергономски сценарио		Укупно време трајања активности - лакше шеме Ергономски сценарио	
	сесија 1	сесија 2	сесија 1	сесија 2
1	2.652.665	2.635.332	2.394.700	2.428.912
2	2.660.136	2.698.932	2.345.416	2.476.992
3	2.658.523	2.665.948	2.465.439	2.513.343
4	2.667.926	2.662.783	2.579.633	2.512.721
5	2.675.766	2.664.612	2.467.958	2.432.606
6	2.678.976	2.661.341	2.428.912	2.394.700
7	2.673.124	2.680.763	2.458.256	2.412.977
8	2.671.495	2.634.952	2.467.014	2.345.788
9	2.656.198	2.620.674	2.422.537	2.449.252
10	2.661.570	2.661.780	2.395.272	2.389.332
11	2.649.495	2.619.274	2.423.532	2.501.268
12	2.674.632	2.654.298	2.569.305	2.418.286
13	2.678.889	2.650.562	2.345.416	2.423.444
14	2.672.762	2.633.497	2.420.328	2.404.543
15	2.672.868	2.650.193	2.397.466	2.411.567

Прегледом података из табеле може се закључити да код већине испитаника приликом склапања лакших шема укупно време трајања активности ниже у другој сесији у односу на прву сесију у оба сценарија што се може видети на основу слика 6.37 и слика 6.38.



Слика 6.37 Укупно време трајања активности- лакше шеме у традиционалном (неергономском) сценарију



Слика 6.38 Укупно време трајања активности - лакше шеме у ергономском сценарију

Највеће смањење времена у неергономском сценарију је примећено код испитаника бр. 8, 9, 11, 12, 14 и 15 а у ергономском сценарију код испитаника бр. 7, 8, 12, 14.

У табели 6.10 су представљени резултати праћења укупног времена трајања активности код тешких шема.

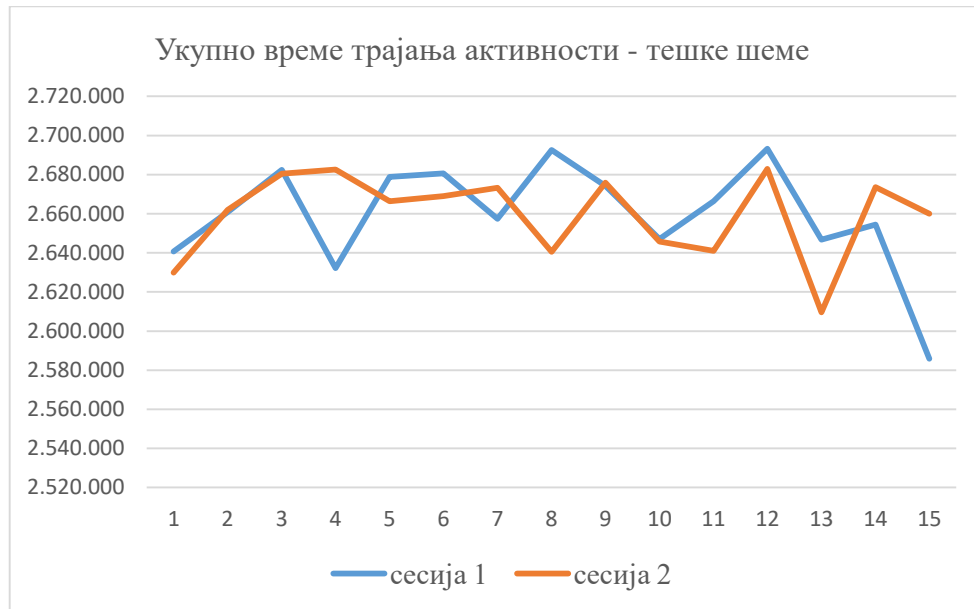
Табела 6.10 Укупно време трајања активности - тешке шеме

	Укупно време трајања активности - тешке шеме Неергономски сценарио		Укупно време трајања активности - тешке шеме Ергономски сценарио	
	сесија 1	сесија 2	сесија 1	сесија 2
1	2.640.732	2.629.831	2.409.124	2.499.266
2	2.660.750	2.661.954	2.483.008	2.487.264
3	2.682.434	2.680.413	2.434.304	2.583.272
4	2.632.110	2.682.602	2.574.477	2.578.048
5	2.678.899	2.666.413	2.421.554	2.404.156
6	2.680.560	2.669.005	2.499.266	2.409.124
7	2.657.434	2.673.306	2.502.672	2.451.940
8	2.692.516	2.640.532	2.411.544	2.343.141
9	2.674.252	2.675.867	2.363.099	2.401.078
10	2.647.149	2.645.790	2.426.863	2.326.436
11	2.666.316	2.640.955	2.427.156	2.491.674
12	2.693.268	2.682.873	2.539.256	2.468.456
13	2.646.689	2.609.612	2.483.008	2.438.349
14	2.654.478	2.673.595	2.465.042	2.395.346
15	2.585.812	2.659.966	2.408.974	2.397.789

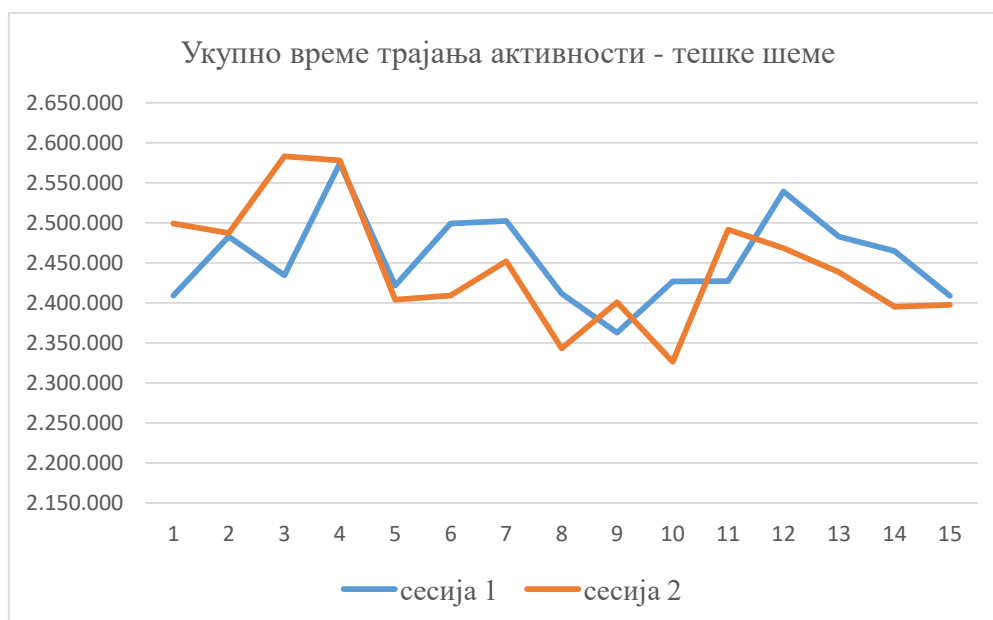
Упоредном анализом табела бр. 6.9 и 6.10 може се утврдити да испитаницима више времена било потребно за састављање тешких шема. Добијени резултати се поклапају са одговорима испитаника у усменом интервјуу с обзиром да су испитаници потврдили да је састављање комплекснијих шема било изазовније. На основу одговора испитаника утврђено је да су испитаници обављали монтажу најбрже што су могли и

већина њих није обрађала превише пажње на штоперицу, што значи да су у потпуности били фокусирани на извршавање радног задатка.

На сликама 6.39 и 6.40 је графички представљено укупно време трајања активности приликом састављања тешких шема.



Слика 6.39 Укупно време трајања активности - тешке шеме у традиционалном (неергономском) сценарију



Слика 6.40 Укупно време трајања активности - тешке шеме у ергономском сценарију

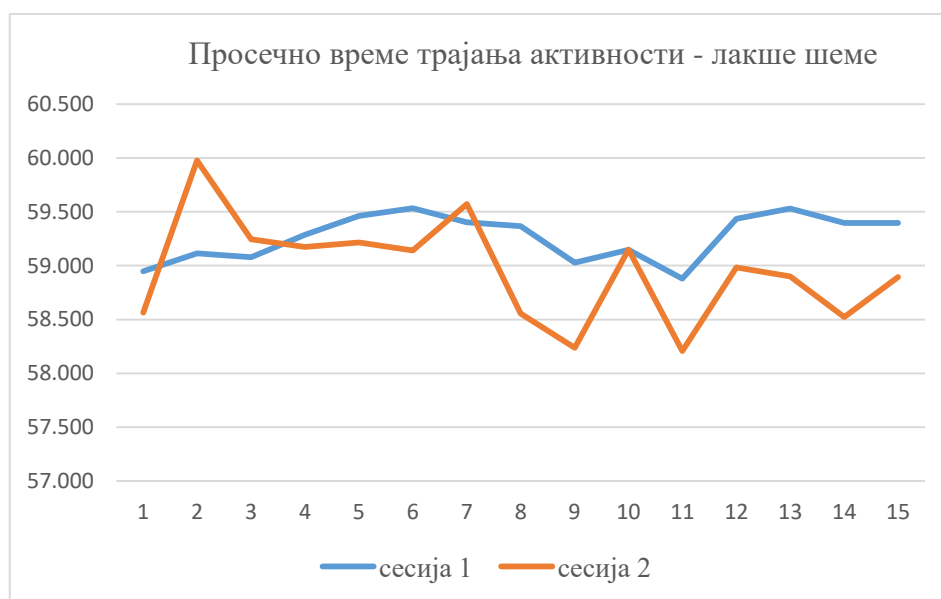
У табели 6.11 је приказано просечно време трајања активности склапања делова и компоненти приликом склапања лакших шема у неергономском и ергономском сценарију.

Табела 6.11 Просечно време трајања активности приликом склапања лакших шема у неергономском и ергономском сценарију

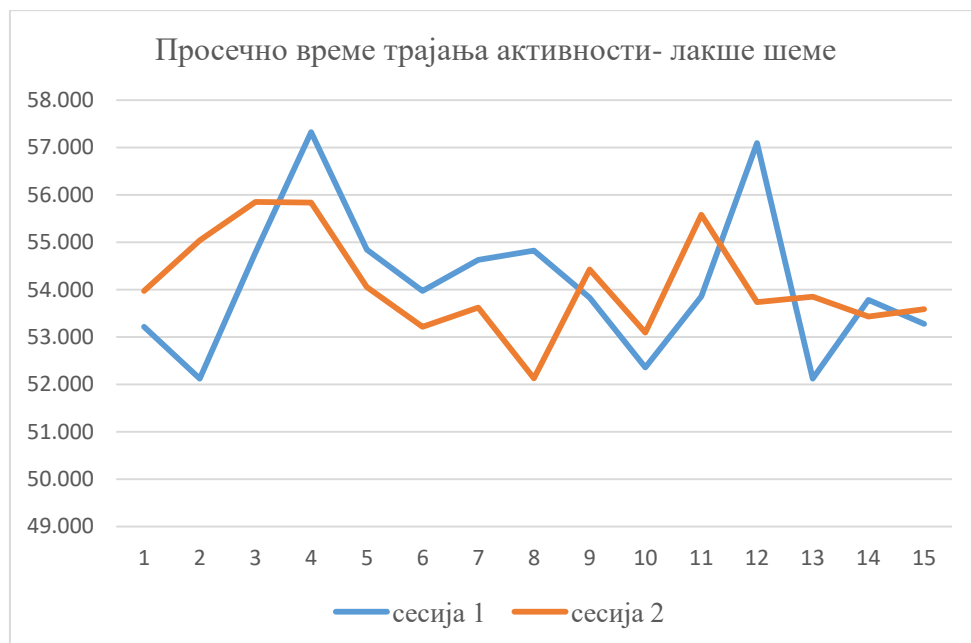
	Просечно време трајања активности - лакше шеме Неергономски сценарио		Просечно време трајања активности - лакше шеме Ергономски сценарио	
	сесија 1	сесија 2	сесија 1	сесија 2
1	58.948	58.563	53.216	53.976
2	59.114	59.976	52.120	55.044
3	59.078	59.243	54.788	55.852
4	59.287	59.173	57.325	55.838
5	59.461	59.214	54.844	54.058
6	59.533	59.141	53.976	53.216
7	59.403	59.573	54.628	53.622
8	59.367	58.554	54.823	52.129
9	59.027	58.237	53.834	54.428
10	59.146	59.151	52.356	53.096
11	58.878	58.206	53.856	55.584
12	59.436	58.984	57.096	53.740
13	59.531	58.901	52.120	53.854
14	59.395	58.522	53.785	53.434
15	59.397	58.893	53.277	53.590

Посматрањем табеле 6.11 може се закључити да је у неергономском сценарију, просечно време трајања активности код свих испитаника било је дуже него у ергономском сценарију. Ово може бити повезано са повећаним физичким и менталним оптерећењем. Пад пажње и концентрације успорава темпо рада. Време извршавања монтажних активности у ергономском сценарију је значајно краће у односу на традиционални сценарио. Ова разлика указује на позитиван утицај примене ергономских и *lean* принципа на предложеној радној станици за монтажу.

На сликама 6.41 и 6.42 је дат графички приказ просечног времена трајања активности током склапања лакших шема у неергономском и ергономском сценарију.



Слика 6.41 Просечно време трајања активности- лакше шеме у неергономском сценарију



Слика 6.42 Просечно време трајања активности- лакше шеме у ергономском сценарију

У табели 6.12 је приказано просечно време трајања активности током склапања тешких шема у традиционалном и ергономском сценарију.

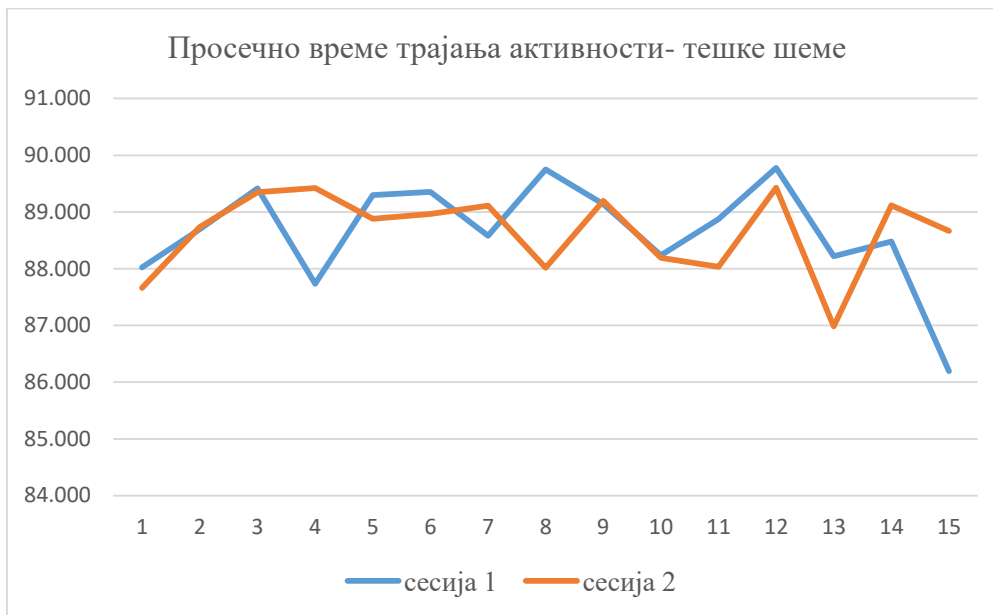
Табела 6.12 Просечно време трајања активности током склапања тешких шема у традиционалном и ергономском сценарију

	Просечно време трајања активности - тешке шеме Неергономски сценарио		Просечно време трајања активности тешке шеме Ергономски сценарио	
	сесија 1	сесија 2	сесија 1	сесија 2
1	88.024	87.661	80.304	83.309
2	88.692	88.732	82.767	82.909
3	89.414	89.347	81.143	86.109
4	87.737	89.420	85.816	85.935
5	89.297	88.880	80.718	80.139
6	89.352	88.967	83.309	80.304
7	88.581	89.110	83.422	81.731
8	89.751	88.018	80.385	78.105
9	89.142	89.196	78.770	80.036
10	88.238	88.193	80.895	77.548
11	88.877	88.032	80.905	83.056
12	89.776	89.429	84.642	82.282
13	88.223	86.987	82.767	81.278
14	88.483	89.120	82.168	79.845
15	86.194	88.666	80.299	79.926

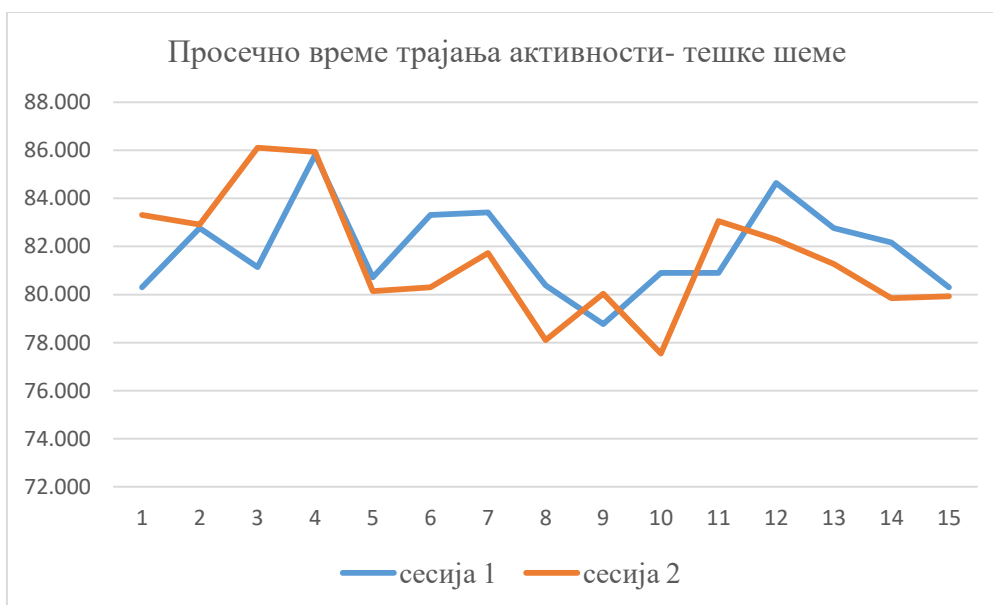
Резултати из табеле 6.11 указују да је просечно време трајања активности приликом склапања тешких шема у неергономском сценарију знатно дуже у односу на ергономски сценарио односно да је испитаницима било потребно више времена за склапање шема. Ови подаци указују да примена ергономских принципа може значајно

утицати на смањење времена извршења задатака, што доприноси унапређењу ефикасности.

На сликама 6.43 и 6.44 је представљено просечно време трајања активности приликом склапања тешких шема у неергономском и ергономском сценарију.



Слика 6.43 Просечно време трајања активности - тешке шеме у традиционалном (неергономском) сценарију



Слика 6.44 Просечно време трајања активности - тешке шеме у ергономском сценарију

На основу слика 6.43 и 6.44 може се установити да је у неергономском сценарију, просечно време трајања активности код свих испитаника било је дуже него у ергономском сценарију. Ово може бити повезано са повећаним физичким и менталним оптерећењем којем су испитаници били изложени у неергономском сценарију. Пад пажње и концентрације успорава темпо рада. Време извршавања монтажних активности

у ергономском сценарију је значајно краће у односу на традиционални сценарио. Детаљним прегледом података може се извући закључак да ергономска оптимизација доприноси смањењу времена извршења монтажних активности и унапређењу ефикасности производних процеса.

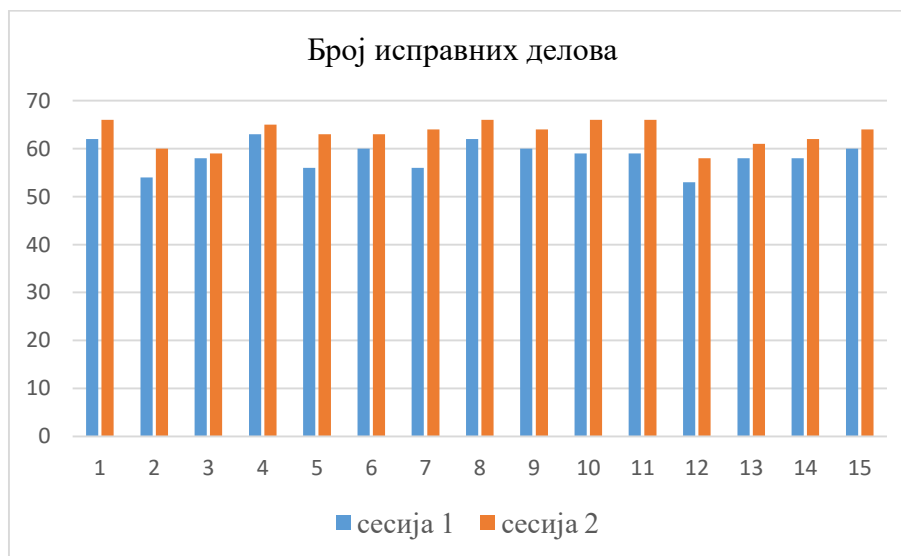
Табела 6.13 приказује упоредни преглед исправно састављених производа у неергономском и ергономском сценарију.

Табела 6.13 Упоредни преглед исправно састављених производа у оба сценарија

	Број исправних производа Неергономски сценарио		Број исправних производа Ергономски сценарио	
	<i>сесија 1</i>	<i>сесија 2</i>	<i>сесија 1</i>	<i>сесија 2</i>
1	62	66	64	68
2	54	60	59	62
3	58	59	64	65
4	63	65	65	66
5	56	63	59	65
6	60	63	63	65
7	56	64	58	65
8	62	66	65	68
9	60	64	65	67
10	59	66	63	69
11	59	66	65	69
12	53	58	58	63
13	58	61	60	64
14	58	62	58	63
15	60	64	62	67

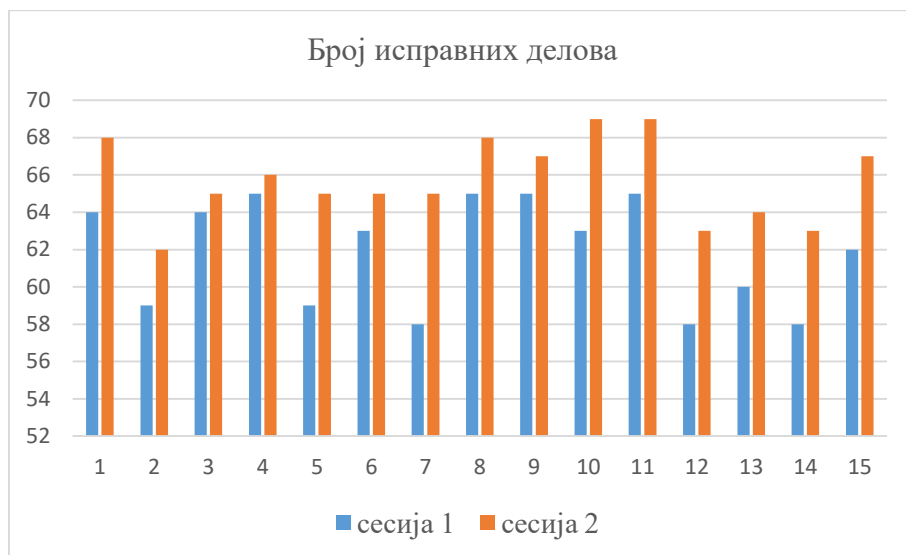
Подаци из табеле 6.13 показују да је број исправних производа значајно већи у ергономском сценарију у односу на неергономски сценарио.

На сликама 6.45 и 6.46 је представљен број исправно састављених делова у неергономском и ергономском сценарију.



Слика 6.45 Број исправно састављених производа у неергономском сценарију

У ергономском сценарију, број исправно састављених производа значајно је већи. Оптимизација радног простора, боља организација компоненти и алата и прилагодљивост радне станице испитаницима као и смањење физичког и менталног напора, омогућили су прецизније и ефикасније обављање монтажних задатака, што је резултирало већим бројем исправних производа.



Слика 6.46 Број исправно састављених производа у ергономском сценарију

У табели 6.14 су приказани резултати праћења дефеката током извођења радних задатака у ергономском и неергономском сценарију за свих 15 испитаника у обе сесије.

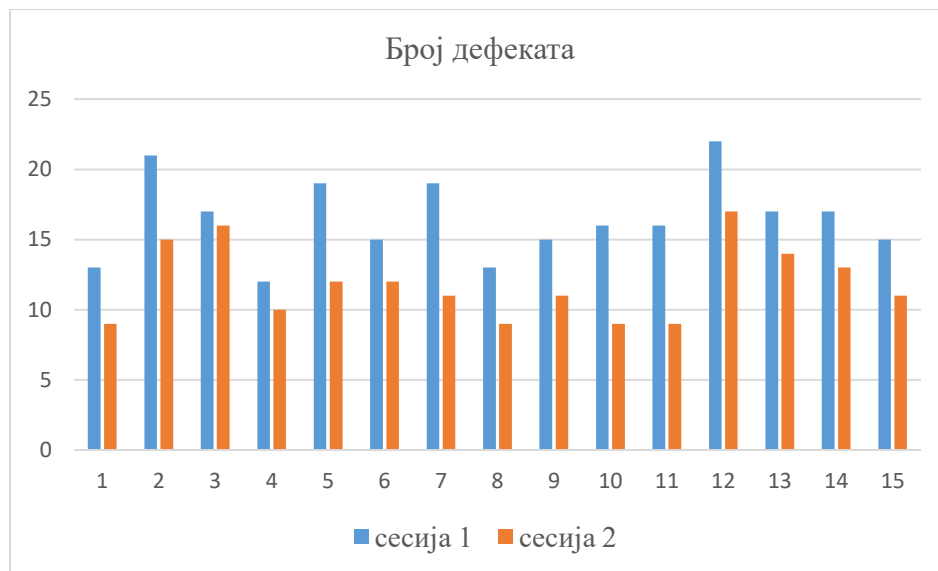
Табела 6.14 Резултати праћења дефеката у неергономском и ергономском сценарију

	Број дефеката Неергономски сценарио		Број дефеката Ергономски сценарио	
	сесија 1	сесија 2	сесија 1	сесија 2
1	13	9	11	7
2	21	15	16	13
3	17	16	11	10
4	12	10	10	9
5	19	12	16	10
6	15	12	12	10
7	19	11	17	10
8	13	9	10	7
9	15	11	10	8
10	16	9	12	6
11	16	9	10	6
12	22	17	17	12
13	17	14	15	11
14	17	13	17	12
15	15	11	13	8

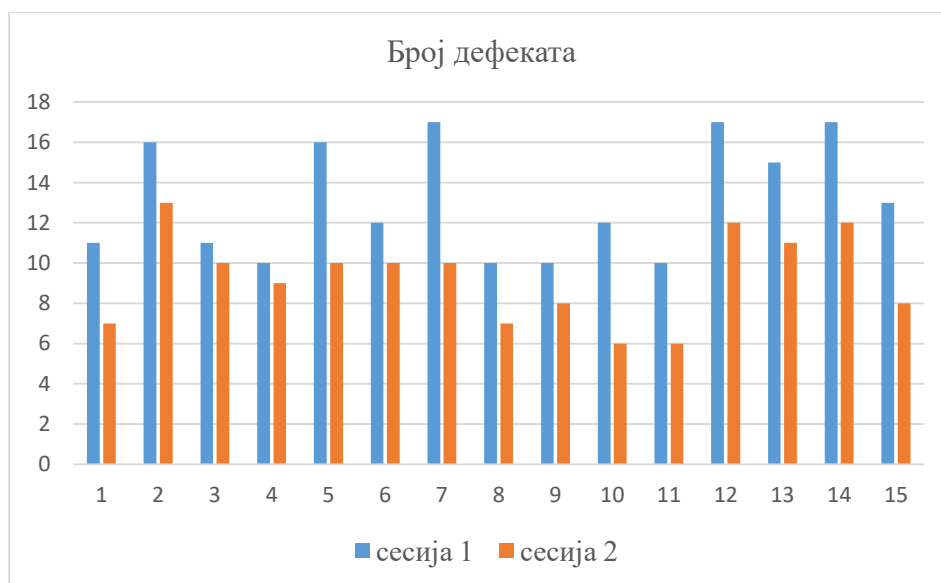
Резултати из табеле 6.14 указују на директну корелацију између радних услова и броја дефеката. Као што се може закључити из табеле током обављања активности у неергономском сценарију, забележен је значајно већи број дефеката у односу на

ергономски сценарио. Ови резултати указују да су неадекватни услови рада допринели повећању грешака. Повећан број грешака је последица менталног напора, пада пажње и концентрације, неадекватне организације радног простора.

Као што се може видети из табеле 6.14 резултати су показали да је увођење ергономских принципа допринело смањењу дефеката. У ергономском сценарију код свих петнаест испитаника је забележен мањи број дефеката. Ово указује на то да ергономска оптимизација доприноси смањењу грешака и повећању квалитета финалних производа. Ово је у складу са очекивањима, јер је ергономска оптимизација значајно допринела смањењу физичког и менталног оптерећења, тако да су испитаници више били фокусирани на радни задатак и правили мање дефеката. На сликама 6.47 и 6.48 су приказани резултати праћења дефеката у оба сценарија.



Слика 6.47 Број дефеката у традиционалном (неергономском) сценарију



Слика 6.48 Број дефеката у ергономском сценарију

Табела 6.15 и табела 6.16 дају резултате везане за време извршења активности и дефекте за свих 15 испитаника. У табели 6.15 приказани су резултати експерименталних истраживања за неергономски сценарио, док су у табели 6.16 приказани резултати експерименталних истраживања у ергономском сценарију.

Табела 6.15 *Резултати за неергономски сценарио*

	Не ергономски сценарио - сесија 1				Неергономски сценарио - сесија 2			
	Трајање сесије	Просечно време за лаке шеме	Просечно време за тешке шеме	Дефекти (%)	Трајање сесије	Просечно време за лаке шеме	Просечно време за тешке шеме	Дефекти (%)
Испитаник 1	5293.397	58.948	88.024	17.3%	5265.163	58.563	87.661	12.0%
Испитаник 2	5320.886	59.114	88.692	28.0%	5360.886	59.976	88.732	20.0%
Испитаник 3	5340.957	59.078	89.414	22.7%	5346.361	59.243	89.347	21.3%
Испитаник 4	5300.036	59.287	87.737	16.0%	5345.385	59.173	89.420	13.3%
Испитаник 5	5345.665	59.461	89.297	25.3%	5331.025	59.214	88.880	16.0%
Испитаник 6	5359.536	59.533	89.352	20.0%	5330.346	59.141	88.967	16.0%
Испитаник 7	5330.558	59.403	88.581	25.3%	5354.069	59.573	89.110	14.7%
Испитаник 8	5364.011	59.367	89.751	17.3%	5275.484	58.554	88.018	12.0%
Испитаник 9	5330.450	59.027	89.142	20.0%	5296.541	58.237	89.196	14.7%
Испитаник 10	5308.719	59.146	88.238	21.3%	5307.570	59.151	88.193	12.0%
Испитаник 11	5315.811	58.878	88.877	21.3%	5260.229	58.206	88.032	12.0%
Испитаник 12	5367.900	59.436	89.776	29.3%	5337.171	58.984	89.429	22.7%
Испитаник 13	5325.578	59.531	88.223	22.7%	5260.174	58.901	86.987	18.7%
Испитаник 14	5327.240	59.395	88.483	22.7%	5307.092	58.522	89.120	17.3%
Испитаник 15	5258.680	59.397	86.194	20.0%	5310.159	58.893	88.666	14.7%
Просек	5325.962	59.267	88.652	21.9%	5312.510	58.955	88.651	

Као што се може видети из табеле код већине испитаника примећено је смањење времена за извршење активности у другој сесији у односу на прву сесију. Свим испитаницима је било потребно више времена за склапање тежих шема тј. 3Д слика. Највише дефеката у првој сесији су направили испитаници бр. 12, 2, 5 и 7 а у другој сесији испитаници бр. 3 и бр. 12. Код свих испитаника примећено је смањење дефеката у другој сесији у поређењу са првом сесијом. Најмање дефеката у првој сесији су направили испитаници бр. 1 и 4.

Табела 6.16 Резултати за ергономски сценарио

	Ергономски сценарио - сесија 1				Ергономски сценарио - сесија 2			
	Трајање сесије	Просечно време за лаке шеме	Просечно време за тешке шеме	Дефекти (%)	Трајање сесије	Просечно време за лаке шеме	Просечно време за тешке шеме	Дефекти (%)
Испитаник 1	4803.824	53.216	80.304	14.7%	4928.178	53.976	83.309	9.3%
Испитаник 2	4828.424	52.120	82.767	21.3%	4964.256	55.044	82.909	17.3%
Испитаник 3	4899.743	54.788	81.143	14.7%	5096.615	55.852	86.109	13.3%
Испитаник 4	5154.110	57.325	85.816	13.3%	5090.769	55.838	85.935	12.0%
Испитаник 5	4889.512	54.844	80.718	21.3%	4836.762	54.058	80.139	13.3%
Испитаник 6	4928.178	53.976	83.309	16.0%	4803.824	53.216	80.304	13.3%
Испитаник 7	4960.928	54.628	83.422	22.7%	4864.917	53.622	81.731	13.3%
Испитаник 8	4878.558	54.823	80.385	13.3%	4688.929	52.129	78.105	9.3%
Испитаник 9	4785.636	53.834	78.770	13.3%	4850.330	54.428	80.036	10.7%
Испитаник 10	4822.135	52.356	80.895	16.0%	4715.768	53.096	77.548	8.0%
Испитаник 11	4850.688	53.856	80.905	13.3%	4992.942	55.584	83.056	8.0%
Испитаник 12	5108.561	57.096	84.642	22.7%	4886.742	53.740	82.282	16.0%
Испитаник 13	4828.424	52.120	82.767	20.0%	4861.793	53.854	81.278	14.7%
Испитаник 14	4885.370	53.785	82.168	22.7%	4799.889	53.434	79.845	16.0%
Испитаник 15	4806.440	53.277	80.299	17.3%	4809.356	53.590	79.926	10.7%
Просек	4895.369	54.136	81.887	17.5%	4879.405	54.097	81.501	12.3%

Резултати приказани у табелама 6.15 и 6.16 су показали да примена ергономских принципа доприноси смањењу времена потребног за извршење активности и смањењу броја дефеката. Компаративном анализом забележених резултата може се установити да

су испитаници постигли значајно боље резултате у ергономском у односу на неергономски сценарио, што се може сумирати кроз следеће закључке:

- Сесија 1 је у просеку краћа за око 430 секунди, док је сесија 2 у просеку краћа за око 433 секунде у ергономском сценарију. То значи да су испитаници у ергономском сценарију завршили обе сесије отприлике 863 секунде раније или око 14,4 минута раније у поређењу са неергономским сценаријем.
- Лаке шеме су урађене у просеку брже за 5.130 у сесији 1 и за 4.858 у сесији 2 у ергономском сценарију.
- Теже шеме су завршаване у просеку брже за 6.765 у сесији 1 и за 7.150 у сесији 2 у ергономском сценарију.
- Процент дефеката је смањен у просеку за 4,44% у сесији 1 и за 3,48% у сесији 2 у ергономском сценарију.

Према резултатима ове студије, перформансе на новој ергономски дизајнираној радној станици су побољшане у односу на традиционално неергономски дизајнирану монтажну радну станицу, а то се види кроз смањење времена потребног за обављање активности и смањење дефеката. Сесија 1 је у просеку краћа за око 405 секунди, док је сесија 2 у просеку краћа за око 346 секунди у ергономском сценарију. Испитаници у ергономском сценарију завршили су обе сесије отприлике 751 секунду раније у поређењу са неергономским сценаријем. Лаке шеме су решаване у просеку брже за 4.719 у сесији 1 и за 4.280 у сесији 2 у ергономском сценарију. Тешке шеме су решаване у просеку брже за 6.483 у сесији 1 и за 5.128 у сесији 2 у ергономском сценарију.

Може се запазити да су перформансе на новој ергономски дизајнираној радној станици побољшане у односу на традиционални неергономски сценарио, а то се види кроз смањење времена потребног за обављање активности, повећање продуктивности и ефикасности и смањење дефеката. Резултати су показали да је сесија 1 у просеку краћа за око 405 секунди, док је сесија 2 у просеку краћа за око 346 секунди у ергономском сценарију. Испитаници у ергономском сценарију завршили су обе сесије отприлике 751 секунду раније у поређењу са неергономским сценаријем. Лаке шеме су решаване у просеку брже за 4.719 у сесији 1 и за 4.280 у сесији 2 у ергономском сценарију. Тешке шеме су решаване у просеку брже за 6.483 у сесији 1 и за 5.128 у сесији 2 у ергономском сценарију. Након спровођења ергономских интервенција у радном окружењу проценат дефеката је смањен у просеку за 4,80% у сесији 1 и за 3,47% у сесији 2 у ергономском сценарију. Међутим, применом корелационе анализе утврђено је да не постоји значајна статистичка повезаност између укупног и просечног времена утрошеног на дефектне делове. То у суштини значи да број неисправних делова није директно утицао на укупно време утрошено на неисправне делове.

Из датих података може се закључити да су у ергономском сценарију постигнуте знатно бољи резултати, али је потребна детаљнија анализа да би се донели коначни закључци:

- Коefицијент корелације између трајања сесије у неергономском и ергономском сценарију је $r=0,31$. Овај податак указује да постоји релативно слаб линеарни однос између ових скупова података, али он практично није значајан. То значи да су се неки испитаници боље прилагодили ергономском сценарију, иако су раније потрошили више времена у неергономском сценарију. Важи и обрнуто. Дакле, може се закључити да је у ергономском сценарију значајно скраћено време извршења задатка, мада ово време доста зависи од појединачног испитаника.

- Са просечним временом за извршавање лаких и тешких шема је слична ситуација као са укупним временом трајања сесије. Коефицијент корелације при разматрању лаких шема у оба сценарија је $r=0,14$, док је за тешке шеме $r=0,14$. Ово потврђује да се испитаници нису подједнако прилагодили ергономском сценарију, иако су сви брже завршили експеримент.
- Када су у питању дефекти, коефицијент корелације између процента неисправних делова у неергономском и ергономском сценарију је $r=0,89$. Ови подаци указују на јаку позитивну линеарну везу између ова два скупа података. Другим речима, код испитаника који су склопили више неисправних производа у неергономском сценарију дошло је до већег смањења неисправних делова у ергономском сценарију. Дакле, иако су сви испитаници смањили број неисправних делова у ергономском сценарију, може се закључити да су они који су направили више грешака током иницијалног експеримента значајно побољшали своје перформансе. Тако је ергономски сценарио значајно допринео побољшању перформанси испитаника који су имали лошије резултате у иницијалном експерименту.

Добијени резултати се слажу са хипотезом број два, тј. доказано је да је могуће унапредити продуктивност и ефективност радника оптимизовањем индустријске радне станице на којој се обављају мануалне понављајуће радне активности применом ергономских принципа.

На основу података приказаних у табелама 6.31 и 6.32, могуће је одредити очекивано трајање сесије у оба сценарија, као и очекивано просечно трајање сесија и време извршења активности у ова два сценарија. Ова анализа је приказана у табели 6.17, спроведена на основу интервала поверења на стандардном нивоу ризика од 5%.

Табела 6.17 Очекиване вредности трајања сесије и времена извршавања (лаке и тешке шеме) на основу измерених података у спроведеним експериментима

	Очекиване вредности			
	Трајање сесије (секунде)	Просечно време за лаке шеме (секунде)	Просечно време за тешке шеме (секунде)	Дефекти (%)
Неергономски сценарио	$5309.407 \leq \mu \leq 5329.065$	$58.985 \leq \mu \leq 59.238$	$88.394 \leq \mu \leq 88.908$	$17.4 \leq \mu \leq 20.4$
Ергономски сценарио	$4852.121 \leq \mu \leq 4922.653$	$53.703 \leq \mu \leq 54.531$	$81.006 \leq \mu \leq 82.383$	$13.6 \leq \mu \leq 16.3$

На исти начин може се одредити очекивани проценат смањења неисправних делова у ергономском у односу на неергономски сценарио. Ова вредност се може представити у следећем интервалу: $1.9\% \leq \mu \leq 6.0\%$.

Претходно приказани интервал показује да је минимална очекивана вредност смањења неисправних производа у ергономском сценарију 1,9%, док је максимална очекивана вредност 6,0%. Наравно, то су очекиване (пројектоване) вредности и могу се очекивати одређена одступања (екстремни случајеви).

Поређењем трајања прве и друге сесије, како у неергономском тако и у ергономском сценарију, добијени су следећи резултати:

- Коефицијент корелације између трајања прве и друге сесије у неергономском сценарију је $r=0,17$;

- Коефицијент корелације између трајања прве и друге сесије у ергономском сценарију је $r=0,36$;

Први податак подржава идеју да у неергономском сценарију готово да не постоји линеарна зависност између трајања прве и друге сесије. То у суштини значи да дуже трајање прве сесије за истог испитаника не значи нужно да ће и друга сесија бити дугачка. Важи и обрнуто. Из другог датог податка може се закључити да постоји умерено слаба позитивна корелациона зависност између трајања прве и друге сесије. Међутим, ова корелација није довољно висока да би се тврдило да трајање прве сесије утиче на трајање друге сесије.

Као коначну анализу у оквиру овог истраживања узето је у обзир време које су испитаници потрошили на делове који су на крају означени као дефекти. Табела 6.18 приказује укупно време потрошено на неисправне производе и просечно време потрошено на један неисправан производ. Анализа је обављена за обе сесије.

Табела 6.18 *Време потрошено на дефектне производе*

	Неергономски сценарио				Ергономски сценарио			
	Укупно време утрошено на неисправне делове-Сесија 1	Просечно време утрошено на дефектне делове-Сесија 1	Укупно време утрошено на дефектне делове-Сесија 2	Просечно време проведено на дефектним деловима-Сесија 2	Укупно време утрошено на дефектне делове-Сесија 1	Просечно време утрошено на дефектне делове-Сесија 1	Укупно време утрошено на дефектне делове-Сесија 2	Просечно време проведено на дефектним деловима-Сесија 2
Испитаник 1	943.911	72.608	757.664	84.185	720.534	65.503	562.370	80.339
Испитаник 2	1721.810	81.991	1294.421	86.295	1249.826	78.114	995.212	76.555
Испитаник 3	1525.042	89.708	1341.124	83.820	848.989	77.181	834.420	83.442
Испитаник 4	983.606	81.967	802.965	80.297	754.496	75.450	704.900	78.322
Испитаник 5	1636.352	86.124	1037.834	86.486	1242.481	77.655	708.543	70.854
Испитаник 6	1254.732	83.649	1005.426	83,785	908.894	75.741	770.556	77.056
Испитаник 7	1540.676	81.088	892.276	81.116	1286.234	75.661	781.196	78.120
Испитаник 8	1107.140	85.165	747.132	83.015	734.617	73.462	501.736	71.677
Испитаник 9	1277.364	85.158	918.362	83.487	765.706	76.571	623.000	77.875
Испитаник 10	1273.924	79.620	715.537	79.504	913.044	76.087	457.356	76.226
Испитаник 11	1337.646	83.603	764.611	84.957	785.772	78.577	412.400	68.733
Испитаник 12	1820.756	82.762	1460.709	85.924	1308.398	76.965	941.960	78.497
Испитаник 13	1427.043	83.944	1116.534	79.752	1136.896	75.793	821.330	74.666
Испитаник 14	1431.446	84.203	1095.354	84.258	1257.872	73.992	886.124	73.844
Испитаник 15	1109.946	73.996	923.280	83.934	1000.626	76.971	629.980	78.747
Просек	1359.426	82.372	991.549	83.388	994.292	75.582	708.739	76.330

Применом корелационе анализе утврђено је да не постоји значајна статистичка повезаност између укупног и просечног времена утрошеног на неисправне делове (у неергономском сценарију $r=0,27$, а у ергономском сценарију $r=0,21$). То у суштини значи да број неисправних делова није директно утицао на укупно време утрошено на неисправне делове.

Добијени резултати се поклапају са резултатима студија које су спровели аутори (*Roper* и други, 2007; *Baudin*, 2002; *Dul* и други, 2004; *Neumann* и *Dul*, 2010; *Hendrick*, 2003) и које показују да примена ергономских принципа доприноси повећању продуктивности и ефикасности, и побољшању квалитета производа.

Усмени интервју је спроведен са сваким испитаником након завршетка експеримента. Основни циљ спровођења интервјуа је био активно учешће испитаника у дизајнирању и оптимизацији радних станица, како би се боље разумели проблеми и изазови са којима се радници суочавају током обављања свакодневних активности у реалном индустријском окружењу. Према резултатима усменог интервјуа што се тиче општих утисака о задатку већина испитаника је сматрала да је задатак био осредње тежак, у почетку занимљив а касније досадан. Са друге стране, неколико испитаника је изјавило да је у почетку задатак био досадан а касније је постао занимљив. Већина испитаника је изјавила да је задатак био напоран на почетку и при крају експеримента. Неким испитаницима је требало мало времена да се уходају у обављање активности. Неколико испитаника се изјаснило да је задатак био заморан у почетку јер су размишљали о томе како да правилно споје жице тј. како да убаце жице у рупице а да не погреше а касније у току трајања експеримента су се опустили. Према мишљењу већине испитаника задатак није био напоран и превише дуг. Само 2 испитаника су се изјаснила да је радни задатак био напоран и да је трајао дуго.

Положај жица је према мишљењу испитаника био ок. Испитаници су изјавили да им је лакше било да обављају монтажу по 2Д шемама јер су биле јасније и прегледније а теже су се сналазили са 3Д сликама јер су слике често биле ротиране под различитим угловима а жице замршене па нису увек лепо могли да виде где би требало да убаце коју жичицу тако да су изгубили мало више времена око анализирања слике. Такође, незгодно им је било да убацују жице које су повезивале два удаљена преклопника (преклопници које се налазе на самим крајевима шеме). Већина испитаника сматра да је временски интервал за склапање је био дужи него што су очекивали и да су имали довољно времена за склапање шема.

Током монтаже испитаници су имали мале техничке потешкоће са преклопницима. По мишљењу већине испитаника преклопници су били тешки за руковање и углавном су имали проблеме са затварањем преклопника. Испитаницима који имају дебље прсте је било теже да затварају преклопнике. Један испитаник је рекао да је имао проблем са затварањем преклопника јер му се дешавало да је затварао по два тј. поред оног који је требао да затвори затварао је и онај до њега па је морао да их отвара поново а то му је одузимало време. Такође, дешавало се да не успеју да убаце жичице на предвиђено место често а понекад се дешавало да се жичице заглаве. Многи испитаници су осетили болове у прстима јер их је преклопник докачио приликом затварања.

Испитаници су се према њиховим речима углавном трудили да раде најбрже могуће. Један испитаник је одговорио да се на почетку углавном трудио да ради најбрже могуће. Али касније када је видео да има довољно времена и да стиже да заврши задатке схватио је да је боље да више времена утроши да размисли како да повеже жице него да жури приликом повезивања. Већина испитаника је успела да заврши већину задатака пре звука аларма и нису нешто посебно обраћали пажњу на штоперицу јер су временом

стекли утисак колико времена им је требало да спроведу сваку операцију. Углавном су обрађали пажњу на штоперицу само на почетку експеримента а када су схватили да имају довољно времена нису обрађали пажњу. Два испитаника су изјавила да су обрађала пажњу на штоперицу углавном на половини склапања сваког дела како би успели да заврше задатак на време. Такође, више су обрађали пажњу на штоперицу када су склапали 3Д слике, а не шеме. Један испитаник је изјавио да је гледао у штоперицу сваки пут када погледа у екран.

Испитаници нису имали неку посебну стратегију. Све шеме су углавном решавали редом почев од једне референтне тачке, прво горњу страну а након тога су прелазили на преклопнике са доње стране. Исту стратегију су примењивали и за лакше и за тешке шеме. Један испитаник је изјавио да је прво повезивао жичице које су биле паралелне а онда све остале.

Већина испитаника је одговорила да у првом делу експеримента није осећала физички умор. Физички умор и болове у врату су углавном почели да осећају у току друге половине другог дела и при крају другог дела експеримента у неергономском сценарију. Код пар испитаника умор се десио при крају првог дела експеримента (отприлике након 2/3 времена од почетка првог дела експеримента).

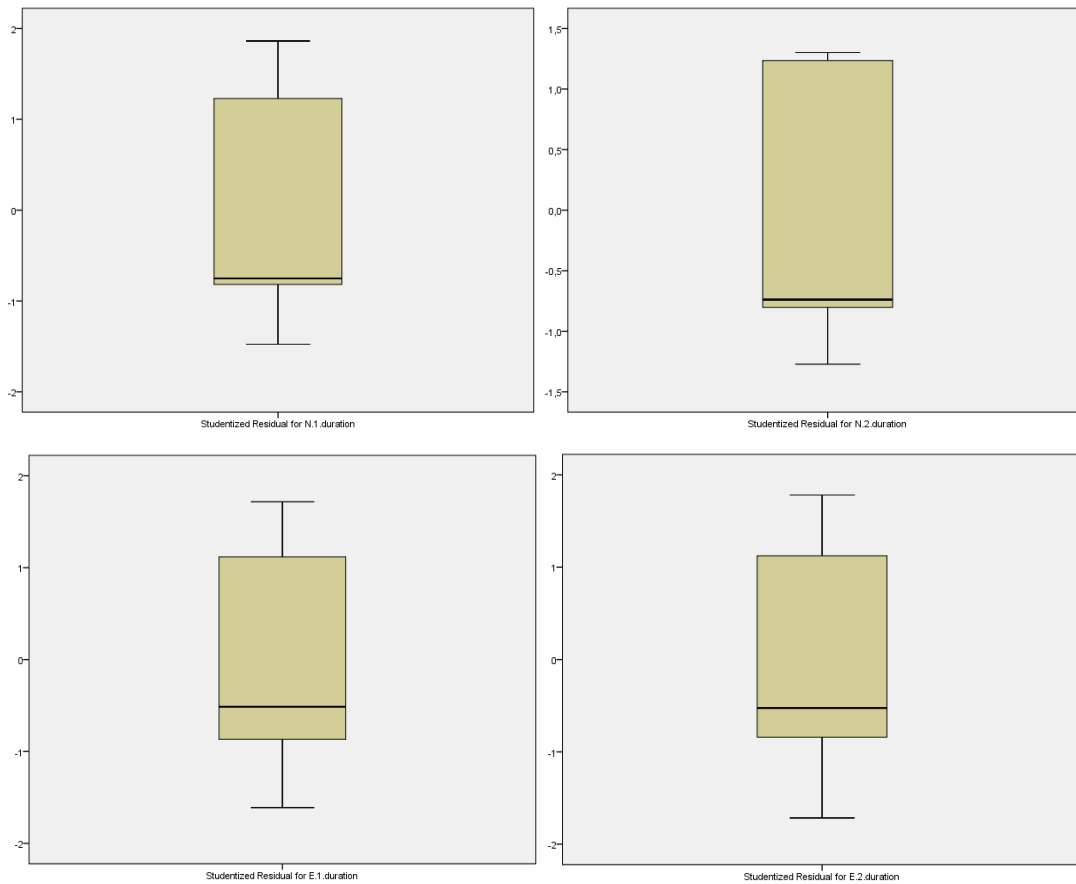
Ментални замор и пад концентрације код већине испитаника се дешавао углавном на средини првог и другог дела експеримента у неергономском сценарију. Један испитаник је изјавио да му је концентрација лутала често у току другог дела експеримента али на кратко. Три испитаника су одговорила да им концентрација углавном није падала, евентуално можда на кратко у току другог дела експеримента.

У неергономском сценарију испитаници су се првенствено жалили на неадекватно осветљење. Услед смањене видљивости испитаници су морали да напрежу очи током обављања монтажних активности што је након одређеног времена довело до умора и негативно утицало на време извршења активности. Такође, испитаницима је сметала бука којој су били изложени. Бука је негативно утицала на концентрацију и способност да прецизно извршавају задатке а то се одразило кроз повећање неправилности и дефеката. Током обављања активности у неергономском сценарију просторија није била климатизована. Услед повишене температуре у лабораторији долазило је до пада пажње и концентрације што се такође негативно одразило на време извршења активности и дефекте.

Утицај сценарија и сесија на време потребно за извршење активности

Да би се испитао утицај сценарија и сесија на време потребно за извршење монтажних активности коришћена је двофакторска анализа варијансе за поновљена мерења (енгл. *two - way repeated measures ANOVA*). Независне варијабле у моделу су сценарио (ергономски и неергономски) и сесије којих је било по две за сваки сценарио. Зависна варијабла у моделу је време које је потребно да би се извршио задатак. Сви испитаници су изводили монтажне активности у оба сценарија - неергономском и ергономском.

Прелиминарно су проверене претпоставке за примену овог теста: присуство екстремних вредности и нормалност стандардизованог резидуала. Нарушена је претпоставка нормалности расподеле стандардизованог резидуала, $p < 0,05$. Присуство екстремних вредности је проверено бок дијаграмом. Није уочено присуство екстремних вредности.



Утврђено је да не постоји статистички значајна корелација између сценарија и сесије, Wilks lambda = 1,00; $F(1, 1124) = 0,02$; $p = 0,89$; $\eta^2_{\text{partial}} = 0,00$.

Постоји значајан ефекат сесије, Wilks lambda = 1,00; $F(1, 1124) = 4,45$; $p = 0,04$; $\eta^2_{\text{partial}} = 0,004$.

Такође, постоји значајан ефекат сценарија, Wilks lambda = 0,27; $F(1, 1124) = 3040,43$; $p < 0,001$; $\eta^2_{\text{partial}} = 0,73$.

У табели 6.19 је представљена дескриптивна статистика времена потребног за извршење активности у оба сценарија у обе сесије.

Табела 6.19 Дескриптивна статистика времена потребног за извршење монтажних активности у неергономском и ергономском сценарију у обе сесије

	<i>Прва сесија</i>			<i>Друга сесија</i>		
	N	M	SD	N	M	SD
<i>Неергономски сценарио</i>	1125	71,02	14,66	1125	70,83	14,74
<i>Ергономски сценарио</i>	1125	65,27	14,11	1125	65,06	13,99

Просечно време потребно за извршење монтажних активности у неергономском сценарију је веће у другој сесији ($M = 70,83$; $SD = 14,74$) ($M = 71,02$; $SD = 14,66$). Просечно време потребно за извршење активности у ергономском сценарију је мање у другој сесији ($M = 65,06$; $SD = 13,99$) у односу на прву сесију ($M = 65,27$; $SD = 14,11$). У обе сесије, просечно време за извршење монтажних активности је мање у ергономском сценарију у поређењу са неергономским.

Утицај сценарија, сесија и типова шема на време потребно за извршење активности

Да би се испитао утицај сценарија, сесија и типова шема на време потребно за извршење активности коришћена је трофакторска анализа варијансе за поновљена мерења (енгл. *three - way repeated measures ANOVA*). Независне варијабле у моделу су сценарио (ергономски и неергономски), сесија којих је било по две за сваки сценарио и шеме које су подразумевале два типа - лакше (2Д шеме) и тешке (3Д слике). Зависна варијабла у моделу је време које је потребно да би се извршио задатак. Сви испитаници су учествовали у обе сесије у неергономском и ергономском сценарију и састављали су лаке и тешке шеме.

Прелиминарно су проверене претпоставке за примену овог теста: присуство екстремних вредности и нормалност стандардизованог резидуала. Нарушена је претпоставка нормалности расподеле стандардизованог резидуала, $p < 0,05$. Присуство екстремних вредности је проверено box дијаграмом. Из анализе су уклоњени сви случајеви чији је стандардизовани резидуал био већи од апсолутне вредности 3. Анализа је рађена на укупно 344 случаја.

Установљено је да не постоји статистички значајна корелација између сценарија, сесија и шема, $Wilks\ lambda = 1,00$; $F(1, 343) = 0,02$; $p = 0,89$; $\eta^2_{partial} = 0,00$. Не постоји статистички значајна корелација између сесија и шема, $Wilks\ lambda = 1,00$; $F(1, 343) = 0,00$; $p = 0,99$; $\eta^2_{partial} = 0,00$. Такође, не постоји статистички значајна корелација између сценарија и сесија, $Wilks\ lambda = 1,00$; $F(1, 343) = 0,13$; $p = 0,72$; $\eta^2_{partial} = 0,00$.

Постоји статистички значајна корелација између сценарија и шема, $Wilks\ lambda = 0,77$; $F(1, 343) = 105,43$; $p < 0,001$; $\eta^2_{partial} = 0,24$. Постоји значајан ефекат сесије, $Wilks\ lambda = 0,98$; $F(1, 343) = 8,87$; $p = 0,003$; $\eta^2_{partial} = 0,03$. Постоји значајан ефекат сценарија, $Wilks\ lambda = 0,10$; $F(1, 343) = 3158,96$; $p < 0,001$; $\eta^2_{partial} = 0,90$. Постоји значајан ефекат шеме, $Wilks\ lambda = 0,01$; $F(1, 343) = 58175,12$; $p < 0,001$; $\eta^2_{partial} = 0,99$.

У неергономском сценарију просечно време потребно за извршење тешких задатка је дуже у односу на лакше шеме. Такође, у ергономском сценарију је дуже време монтаже за тешке у односу на лаке шеме. За оба типа шема је просечно време краће у ергономском сценарију у односу на неергономски сценарио. У табели 6.20 је представљена дескриптивна статистика времена потребног за извршење активности у оба сценарија у обе сесије и два типа шема.

Табела 6.20 *Дескриптивна статистика времена потребног за извршење задатка у два сценарија у обе сесије и два типа шема*

	<i>Лакше шеме</i>						<i>Тешке шеме</i>					
	Прва сесија			Друга сесија			Прва сесија			Друга сесија		
	N	M	SD	N	M	SD	N	M	SD	N	M	SD
<i>Неергономски сценарио</i>	344	59,39	0,60	344	59,04	0,73	344	89,44	0,50	344	89,12	0,88
<i>Ергономски сценарио</i>	344	54,35	3,73	344	54,10	3,24	344	82,07	3,94	344	81,79	4,39

Утицај сценарија, сесија и шеме на време потребно за извршење задатка

Да би се испитао утицај сценарија, сесија и шеме на време потребно за извршење задатка у неергономском сценарију у 1. сесији, коришћена је двофакторска анализа варијансе (енгл. two - way ANOVA). Независне варијабле у моделу су шема (лаки и тешки задаци) и присуство грешке (постоји - не постоји дефект). Зависна варијабла у моделу је време које је потребно да би се извршио задатак.

Прелиминарно је проверена претпоставка за примену овог теста - хомогеност варијансе. Нарушена је претпоставка хомогености варијансе; $F(3, 1121) = 12,99$; $p < 0,001$.

Не постоји значајан ефекат интеракције дефеката и шема; $F(1, 1121) = 1,29$; $p = 0,257$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,001$. Не постоји значајан ефекат грешке; $F(1, 1121) = 0,88$; $p = 0,348$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,001$. Постоји значајан ефекат шеме; $F(1, 1121) = 15561,04$; $p < 0,001$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,93$. Табела 6.21 приказује дескриптивну статистику времена потребног за извршење задатка (у два типа шема) без и са дефектом.

Табела 6.21 *Дескриптивна статистика времена потребног за извршење задатка (у два типа шема) без и са дефектом у неергономском сценарију у 1. сесији*

	<i>Лакше шеме</i>			<i>Тешке шеме</i>		
	N	M	SD	N	M	SD
<i>Дефекти</i>	53	59,22	0,77	194	88,93	3,32
<i>Исправни делови</i>	622	59,27	1,64	256	88,44	4,27

Да би се испитао утицај сценарија, сесија и шеме на време потребно за извршење активности у неергономском сценарију у 2. сесији, коришћена је двофакторска анализа варијансе (енгл. two - way ANOVA). Независне варијабле у моделу су шема (лаке и тешке шеме) и присуство грешке (постоји дефект - нема га). Зависна варијабла у моделу је време које је потребно да би се извршио задатак.

Прелиминарно је проверена претпоставка за примену овог теста - хомогеност варијансе. Нарушена је претпоставка хомогености варијансе; $F(3, 1121) = 6,20$; $p < 0,001$.

Не постоји значајан ефекат интеракције грешке и шеме; $F(1, 1121) = 0,30$; $p = 0,861$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,00$. Не постоји значајан ефекат грешке; $F(1, 1121) = 0,29$; $p = 0,589$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,00$. Постоји значајан ефекат шеме; $F(1, 1121) = 14723,41$; $p < 0,001$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,93$. У табели 6.22 је приказана дескриптивна статистика времена потребног за извршење задатка (у два типа шема) без и са дефектом.

Табела 6.22 Дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у неергономском сценарију у 2. сесији

	<i>Лакше шеме</i>			<i>Тешке шеме</i>		
	N	M	SD	N	M	SD
<i>Дефекти</i>	31	59,12	0,85	147	88,71	3,20
<i>Исправни делови</i>	644	58,95	1,91	303	88,62	2,65

Да би се испитао утицај сценарија, сесија и шеме на време потребно за извршење задатка у ергономском сценарију у 1. сесији, коришћена је двофакторска анализа варијансе (енгл. two - way ANOVA). Независне варијабле у моделу су шема (лаки и тешки задаци) и присуство грешке (има-нема дефекта). Зависна варијабла у моделу је време које је потребно да би се извршио задатак.

Прелиминарно је проверена претпоставка за примену овог теста - хомогеност варијансе. Нарушена је претпоставка хомогености варијансе; $F(3, 1121) = 3,81$; $p = 0,01$.

Утврђено је да не постоји значајан ефекат интеракције грешке и шеме; $F(1, 1121) = 0,77$; $p = 0,381$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,001$. Постоји значајан ефекат грешке; $F(1, 1121) = 18,11$; $p < 0,001$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,02$. Постоји значајан ефекат шеме; $F(1, 1121) = 6425,28$; $p < 0,001$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,85$. Табела 6.23 приказује дескриптивну статистику времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у ергономском сценарију у 1. сесији.

Табела 6.23 *Дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у ергономском сценарију у 1. сесији*

	<i>Лакше шеме</i>			<i>Тешке шеме</i>		
	N	M	SD	N	M	SD
<i>Дефекти</i>	51	55,80	3,33	146	82,66	3,46
<i>Исправни делови</i>	624	54,06	3,61	304	81,52	4,45

Да би се испитао утицај сценарија, сесија и шема на време потребно за извршење задатка у ергономском сценарију у 2. сесији, коришћена је двофакторска анализа варијансе (енг. *two - way ANOVA*). Независне варијабле у моделу су шема (лаки и тешки задаци) и присуство грешке (постоји дефект - без дефекта). Зависна варијабла у моделу је време које је потребно да би се извршио задатак.

Прелиминарно је проверена претпоставка за примену овог теста - хомогеност варијансе. Нарушена је претпоставка хомогености варијансе; $F(3, 1121) = 19,94$; $p < 0,001$.

Не постоји значајан ефекат интеракције грешке и шеме; $F(1, 1121) = 2,80$; $p = 0,094$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,002$. Постоји значајан ефекат грешке; $F(1, 1121) = 16,16$; $p < 0,001$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,01$. Постоји значајан ефекат шеме; $F(1, 1121) = 3984,07$; $p < 0,001$; $\eta_{\text{partial}}^2 = 0,78$. У табели 6.24 је приказана дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у ергономском сценарију у 2. сесији.

Табела 6.24 *Дескриптивна статистика времена потребног за монтажу исправних и дефектних делова у два типа шема у ергономском сценарију у 2. сесији*

	<i>Лакше шеме</i>			<i>Тешке шеме</i>		
	N	M	SD	N	M	SD
<i>Дефекти</i>	31	56,38	2,64	108	82,25	4,38
<i>Исправни делови</i>	644	53,99	3,33	342	81,26	4,81

Појединачне разлике у времену потребном за извршење активности

Да би се испитале разлике по времену потребном за извршење задатка између сесија, коришћен је Т тест за зависне узорке. У табели 6.25 су приказане разлике између сесија.

Табела 6.25 Разлике између сесија

	<i>Прва сесија</i>			<i>Друга сесија</i>			t	p
	N	M	SD	N	M	SD		
<i>Неергономски сценарио</i>	1125	71,02	14,66	1125	70,83	14,74	1,762	0,078
<i>Ергономски сценарио</i>	1125	65,27	14,11	1125	65,06	13,99	1,408	0,159

Не постоји значајна разлика између сесија ни у ергономском ни у неергономском сценарију, $p > 0,05$.

Да би се испитале разлике по времену потребном за извршење задатка монтаже у односу на сценарио, коришћен је t тест за зависне узорке. Време потребно за извршење задатка за сваки сценарио је рачунато као просек обе сесије.

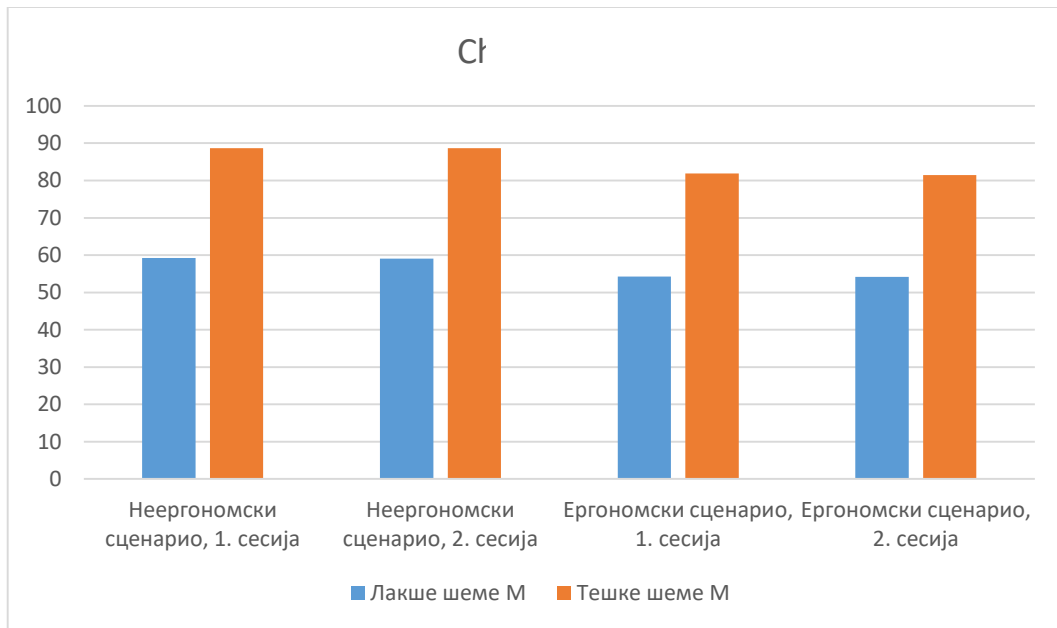
У просеку, време потребно за извршење задатка у ергономском сценарију ($M = 65,17$; $SD = 13,83$) је значајно краће у односу на неергономски сценарио ($M = 70,93$; $SD = 14,59$); $t(1124) = 55,14$; $p < 0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2 = 0,73$.

Да би се испитале разлике по времену потребном за извршење задатка у односу на шему (тежину задатка) коришћен је t тест за зависне узорке (табела 6.26).

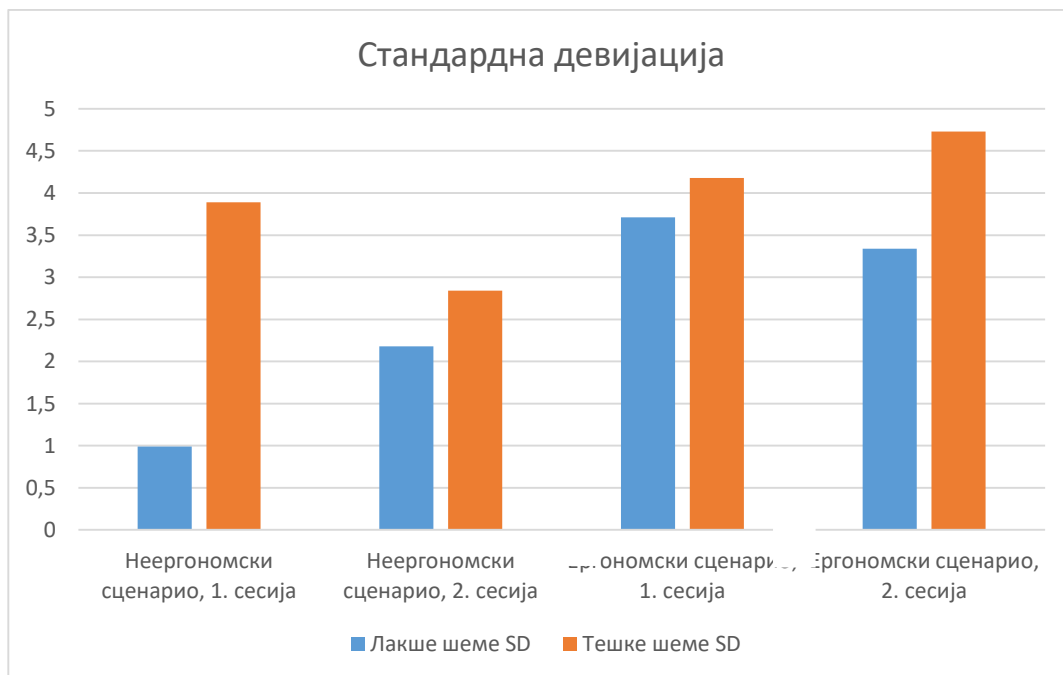
Табела 6.26 Разлике између шема

	<i>Лакше шеме</i>			<i>Тешке шеме</i>			t	p
	N	M	SD	N	M	SD		
<i>Неергономски сценарио, 1. сесија</i>	450	59,24	0,99	450	88,65	3,89	-157,14	<0,001
<i>Неергономски сценарио, 2. сесија</i>	450	59,08	2,18	450	88,65	2,84	-177,14	<0,001
<i>Неергономски сценарио (просек обе сесије)</i>	450	59,16	1,22	450	88,65	2,43	-232,75	<0,001
<i>Ергономски сценарио, 1. сесија</i>	450	54,28	3,71	450	81,89	4,18	-108,59	<0,001
<i>Ергономски сценарио, 2. сесија</i>	450	54,13	3,34	450	81,50	4,73	-99,22	<0,001
<i>Ергономски сценарио (просек обе сесије)</i>	450	54,20	2,68	450	81,69	3,45	-131,03	<0,001

Резултати из табеле су представљени у виду хистограма на сликама 6.49 и 6.50.



Слика 6.49 Хистограм - средње време



Слика 6.50 Хистограм - стандардна девијација

Закључци су следећи:

У неергономском сценарију у 1. сесији, време потребно за извршење задатка по лакшим шемама ($M=59,24$; $SD=0,99$) је значајно краће у односу на тешке шеме ($M=88,65$; $SD=3,89$); $t(449)=-157,14$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2=0,98$.

У неергономском сценарију у 2. сесији, време потребно за извршење задатка по лакшим шемама ($M=59,08$; $SD=2,18$) је значајно краће у односу на тешке шеме ($M=88,65$;

SD=2,84); $t(449)=-177,14$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2=0,99$.

У неергономском сценарију када се посматрају обе сесије, време потребно за извршење задатка по лакшим шемама ($M=59,16$; $SD=1,22$) је значајно краће у односу на тешке шеме ($M=88,65$; $SD=2,43$); $t(449)=-232,75$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2=0,99$.

У ергономском сценарију у 1. сесији, време потребно за извршење задатка по лакшим шемама ($M=54,28$; $SD=3,71$) је значајно краће у односу на тешке шеме ($M=81,89$; $SD=4,18$); $t(449)=-108,59$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2=0,96$.

У ергономском сценарију у 2. сесији, време потребно за извршење задатка по лакшим шемама ($M=54,13$; $SD=3,34$) је значајно краће у односу на тешке шеме ($M=81,50$; $SD=4,73$); $t(449)=-99,22$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2=0,96$.

У ергономском сценарију када се посматрају обе сесије, време потребно за извршење задатка по лакшим шемама ($M=54,20$; $SD=2,68$) је значајно краће у односу на тешке шеме ($M=81,69$; $SD=3,45$); $t(449)=-131,03$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика, $\eta^2=0,97$.

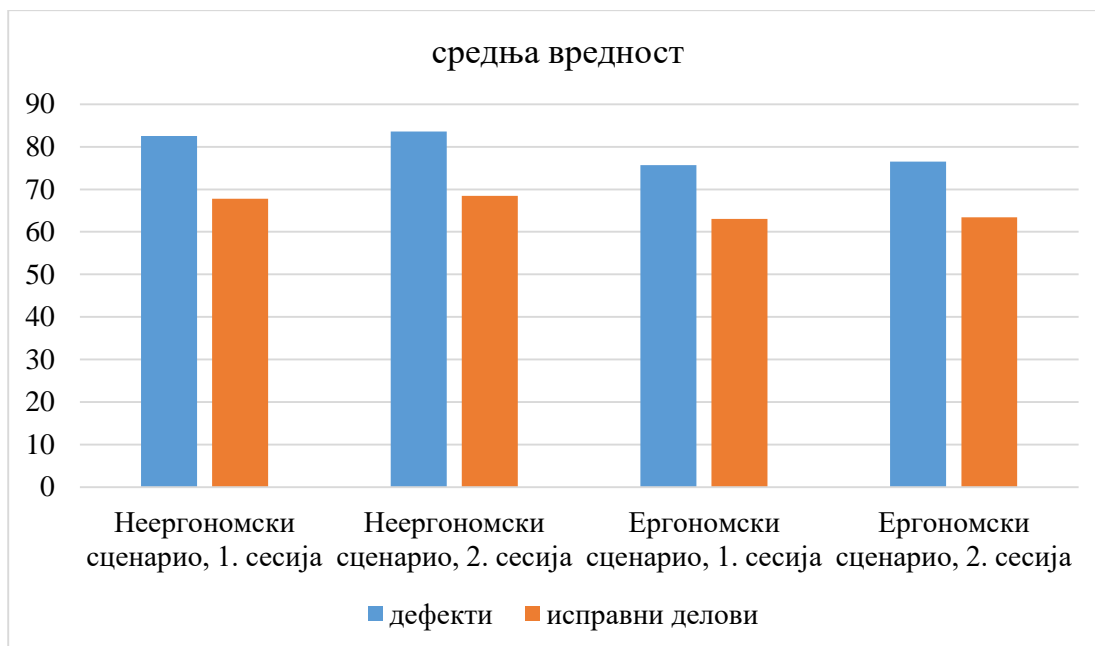
Разлике у времену потребном за монтажу исправних и дефектних делова

Како би се испитале разлике времена потребног за монтажу исправних делова и дефектних делова коришћен је t тест за независне узорке. У табели 6.27 приказане су разлике у времену потребном за монтажу исправних делова и дефектних делова.

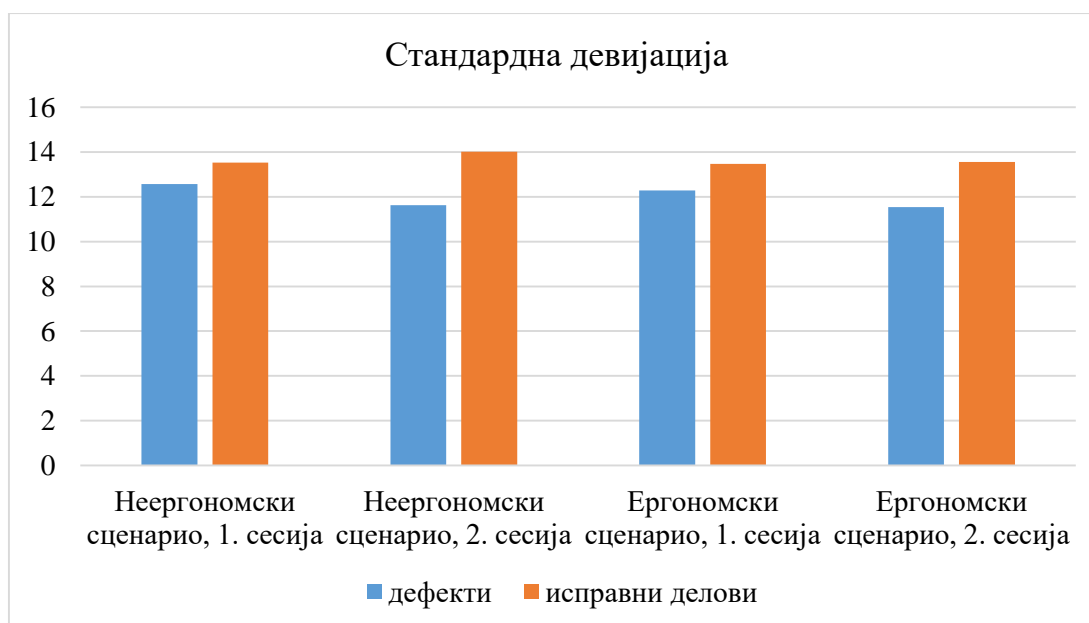
Табела 6.27 Разлике у времену потребном за монтажу исправних делова и дефектних делова

	Дефекти			Исправни делови			t	p
	N	M	SD	N	M	SD		
Неергономски сценарио, 1. сесија	247	82,56	12,57	878	67,78	13,53	16,04	<0,001
Неергономски сценарио, 2. сесија	178	83,56	11,63	947	68,44	14,02	15,37	<0,001
Ергономски сценарио, 1. сесија	197	75,71	12,28	928	63,06	13,47	12,91	<0,001
Ергономски сценарио, 2. сесија	139	76,48	11,54	986	63,45	13,56	12,18	<0,001

На слици 6.51 је представљена редња вредност а на слици 6.52 стандардна девијација.



Слика 6.51 Хистограм - средња вредност



Слика 6.52 Хистограм - стандардна девијација

Закључци су следећи:

У првој сесији у неергономском сценарију испитаници су значајно више времена потрошили на делове које нису исправно саставили ($M=82,56$; $SD=12,57$) него на исправне делове ($M=67,78$; $SD=13,53$), $t(419,97)=16,04$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика; $\eta^2=0,18$.

Такође, у другој сесији у неергономском сценарију испитаници су значајно више времена потрошили на делове које нису исправно саставили ($M=83,56$; $SD=11,63$) него на исправне делове ($M=68,44$; $SD=14,02$), $t(283,04)=15,37$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је велика; $\eta^2=0,17$.

У првој сесији у ергономском сценарију испитаници су значајно више времена потрошили на састављање дефектних делова ($M=75,71$; $SD=12,28$) него на исправне

делове ($M=63,06$; $SD=13,47$), $t(304,70)=12,91$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је умерена; $\eta^2=0,13$.

У другој сесији у ергономском сценарију испитаници су значајно више времена потрошили на дефектне делове ($M=76,48$; $SD=11,54$) него на исправне делове ($M=63,45$; $SD=13,56$), $t(195,95)=12,18$; $p<0,001$. Величина разлике је рачуната помоћу ета квадрата и она је умерена; $\eta^2=0,12$.

Добијени резултати се слажу са резултатима анкете која је послата на мејл испитаницима неколико дана након експеримента. Сврха анкете је била добијање повратних информација и сугестија од испитаника у циљу побољшања безбедности и здравља, побољшања ергономских аспеката и ефикасности испитаника. Укључивање радника кроз изношење предлога за решавање проблема може значајно допринети смањењу мишићно-коштаних поремећаја, повећању продуктивности и задовољства. Такође, партиципативни приступ доприноси бржем усвајању ергономских мера.

У оквиру истраживања спроведено је анкетирање испитаника са циљем процене задовољства приликом извођења активности на новопредложеној радној станици која је дизајнирана у складу са ергономским принципима и стандардима „златне зоне“. Анализа одговора испитаника показала је висок ниво задовољства радом на новој станици. На питање како оцењују функционалност предложене радне станице већина испитаника је одговорила да су веома задовољни. Такође, испитаници су рекли да је нова радна станица врло удобна. Већина испитаника је истакла да је нови дизајн допринео смањењу физичког напора и менталног замора током обављања монтажних активности, као и повећању продуктивности. Испитаници су посебно истакли да им се свиђа што је радна станица прилагођена њиховим индивидуалним карактеристикама и што постоји могућност распоређивања потребних делова и компоненти у оквиру „златне зоне“, што је омогућило брже и ефикасније извођење монтажних задатака. Додатно, испитаници су указали на смањење нелагодности и болова у мишићима посебно у пределу рамена и леђа током извођења активности у ергономском сценарију.

Ови резултати се поклапају са резултатима истраживања из области организационе психологије, која су спроведена деценијама уназад и која су показала значајну повезаност између задовољства радника и продуктивности. Радници који су задовољнији су били мотивисанији, више су се ангажовали у обављању радних задатака и постизали су боље резултате. Такође, задовољство у великој мери доприноси смањењу стреса и менталног оптерећења, што директно утиче на смањење дефеката и повећање ефикасности.

7. ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА И ПРАВЦИ БУДУЋИХ ИСТРАЖИВАЊА

Савремене производне компаније послују у турбулентном пословном окружењу, што убрзава неопходност оптимизације производних процеса. Ова динамика намеће императив прилагођавања организација растућим захтевима тржишта, које све више гравитирају персонализованим и висококвалитетним производима без дефеката. У том контексту, адекватна реакција на променљиве захтеве са тржишта остварује се кроз унапређење оперативне ефикасности производних процеса.

Са друге стране, савремене компаније које послују у складу са принципима производње светске класе и *lean* принципима настоје да побољшају здравље и безбедност радника, сведу повреде на раду, професионалне болести и болести у вези са радом на најмањи могући ниво и обезбеде оптимално радно окружење. Унапређење безбедности и здравља на раду представља једну од главних компоненти постизања финансијског успеха, повећања продуктивности, смањења дефеката и повећања квалитета производа.

Индустрија 4.0 подразумева потпуну аутоматизацију и дигитализацију производње кроз примену савремених дигиталних технологија, као и трансформацију производних процеса на такав начин да се изоловане производне ћелије међусобно повезују и интегришу у паметни систем. У контексту Индустрије 4.0, радно место усредсређено на човека је оно које подразумева примену напредних технологија на тај начин да пружају помоћ радницима у извођењу радних активности уместо да их замењује. Користећи предности нових технологија, организације могу побољшати безбедност и здравље радника и створити безбеднија и пријатнија радна окружења. Посебан фокус у оквиру Индустрије 4.0 се ставља на раднике и повећање њиховог задовољства и благостања. Примена проактивних и превентивних техничких, организационих, здравствених, психолошких и других мера омогућава откривање и елиминацију или смањење опасности које могу угрозити безбедност и здравље радника.

Радна места на којима радници обављају монотоне, понављајуће и заморне активности састављања делова и компоненти у финални производ током дужег временског периода су репрезентативни пример радних места на којима се не може извршити потпуна дигитализација. Разлог за то лежи у чињеници да се на радним станицама за монтажу производе комплексни финални производи у малим количинама уз велику варијабилност. Извођење понављајућих активности ручног склапања на традиционалним радним станицама је широко распрострањено у многим савременим производним системима.

Ове послове карактеришу чести понављајући покрети горњих екстремитета на високој фреквенцији. Монтажне активности на индустријским радним станицама се најчешће изводе у ергономски неадекватним и нефизиолошким положајима тела што дугорочно повећава ризик од појаве професионалних болести најчешће мишићно-коштаних поремећаја, као што су синдром карпалног тунела, тендинитис и др. Извођење понављајућих покрета током дужег временског периода додатно доприноси нарушавању

њиховог здравља (а у неким случајевима може проуроковати инвалидитет), што даље доводи до апсентизма, смањења продуктивности и повећања трошкова. Такође, током обављања монтажних активности, радници су изложени психичком напору и менталном оптерећењу а то даље негативно утиче на продуктивност и доприноси појави дефеката.

Основни циљ докторске дисертације је побољшање постојећих традиционалних индустријских радних станица на којима радници обављају монтажне активности са аспекта безбедности и здравља на раду, ергономије и организације рада применом ергономске оптимизације. Посебан фокус је на дизајну и развоју нове индустријске радне станице која је усклађена са ергономским и *lean* принципима и прилагођена је индивидуалним карактеристикама, способностима и ограничењима радника. Приликом пројектовања и израде лабораторијског модела радне станице за монтажу, посебна пажња је посвећена радном простору за руковање материјалима, деловима и компонентама, с обзиром на чињеницу да је неопходно да радници претежно обављају монтажне активности унутар златне зоне. На овај начин је уклоњена потреба за досезањем и напрезањем, заузимањем нефизиолошких положаја тела и извођењем неергономских покрета.

У оквиру студије случаја истовремено су праћени и анализирани мишићна активност и мождана активност радника, продуктивност, дефекти и задовољство испитаника у два сценарија - неергономском и ергономском. У неергономском сценарију, монтажне активности су обављане на традиционалној радној станици у условима сличним онима у реалном индустријском окружењу. Испитаници су обављали активности ван зоне максималног дохвата у неергономском положају тела и били су принуђени да се истежу и савијају тело како би дохватили потребне компонентне и делове. Ергономски сценарио је подразумевао извођење монтажних активности на предложеној и развијеној новој радној станици која је у потпуности прилагођена потребама, способностима и ограничењима радника и елиминише сва ограничења која карактеришу традиционалну радну станицу.

Применом електроенцефалографије и електромиографије идентификовани су ергономски ризици који се јављају током извршења мануелних радних задатака монтаже. Применом напредних технологија Индустрије 4.0 (ЕЕГ капа са електродама и ЕМГ сензори) праћене су мишићна активност и мождана активност, како би се утврдило оптерећење и напрезање мишића на врату и раменима и установило када долази до пада пажње у току спровођења монтажних активности. Применом ЕМГ сензора праћена је мишићна активност при извођењу монтажних активности у ергономском и неергономском сценарију како би се проценило напрезање мишића и предузеле одговарајуће превентивне мере у циљу спречавања настанка мишићно-коштаних обољења. Применом ЕЕГ-а праћена је мождана активност како би се утврдило у коликој мери су радници изложени менталном оптерећењу током обављања активности монтаже на традиционалној радној станици. Положаји тела испитаника и покрети руку током обављања активности су праћени преко стандардне камере а покрети очију преко фронталне камере. Продуктивност је праћена преко времена потребног за састављање финалних производа а дефекти преко чек листе.

Допринос дисертације се огледа у унапређењу и оптимизацији традиционалних индустријских радних станица на којима радници обављају мануелне радне активности у седећем положају током дужег временског периода и повећању ефикасности производних процеса кроз смањење времена извођења активности с обзиром да у доступној литератури није понуђено решење за ту врсту проблематике.

Добијени резултати су показали да ергономска оптимизација има значајну улогу у побољшању безбедности и здравља радника, повећању продуктивности и смањењу дефеката током обављања монтажних активности. Према резултатима РУЛА анализе на предложеној ергономски дизајнираној радној станици је смањен ризик од професионалних болести услед смањења физичког напрезања и побољшано је здравствено стање радника. Кроз студију случаја је показано да је прилагођавањем радног окружења потребама и индивидуалним карактеристикама испитаника повећана продуктивност и побољшан квалитет финалних производа.

Резултати су показали да је на редизајнираној индустријској радној станици побољшано задовољство испитаника, чиме је доказана трећа хипотеза. Резултати добијени применом ЕМГ и ЕЕГ методе су указали да је у ергономском сценарију смањено физичко и когнитивно оптерећење радника у односу на неергономски сценарио што је даље допринело повећању продуктивности и смањењу дефеката. У неергономском сценарију, испитаници су били изложени већем физичком оптерећењу услед неадекватне организације радног простора, заузимања неадекватних положаја тела и извођења неергономских покрета јер су алати, делови и компоненте потребне за монтажу постављени ван зоне максималног дохвата испитаника. Фактори из спољашњег окружења су у великој ометали испитанике у току извођења монтажних активности у неергономском сценарију што је допринело повећању менталног оптерећења и самим тим повећању времена потребног за извршење активности и појави неправилности и дефеката. Анализом резултата праћења времена извршења активности и дефеката који су настали током извођења активности монтаже у оба сценарија установљено је да је у ергономском сценарију дошло до повећања продуктивности и смањења неправилности и дефеката у односу на неергономски сценарио чиме је долазана друга хипотеза.

Главна ограничења дисертације односе се на број испитаника и чињеницу да су у експерименту учествовали само испитаници мушког пола. У наредном периоду у истраживање ће бити укључен већи број испитаника и испитаници женског пола. Будућа истраживања ће бити спроведена у реалном индустријском окружењу како би се тестирали бенефити предложене нове индустријске радне станице и испитали дугорочни ефекти примене ергономских мера кроз смањење напрезања мишића, смањење менталног замора и повреда код радника који обављају монтажне активности.

Правци будућих истраживања су везани за интеграцију технологија Индустрије 4.0 у радну станицу за монтажу. Један од праваца будућих истраживања биће усмерен на увођење колаборативног робота опремљеног сензорима током обављања монтажних активности у циљу побољшања са једне стране безбедности и здравља радника а са друге стране побољшања ефикасности производних процеса. Колаборативни робот ће имати улогу да пружи подршку радницима током обављања физички захтевних и напорних активности ручног склапања компоненти и делова и на тај начин допринесе смањењу физичког и менталног оптерећења. Сензори уграђени у робота ће имати улогу да укажу радницима на заузимање нефизиолошких положаја тела што ће допринети смањењу ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја и побољшању ергономских аспеката а то ће даље допринети повећању продуктивности и задовољства испитаника. Сензори имају могућност да препознају и анализирају намере радника и тако побољшају све аспекте ергономије (физичка, когнитивна и организациона). Током колаборативног обављања задатака, испитаник ће покретима рукама и покретима очију давати упутства роботу. Робот ће преузети обављање физички захтевних активности а испитаник активности које подразумевају доношење одлука, решавање проблемских ситуација и увођење одређених промена.

У истраживањима ће истовремено бити примењена ЕЕГ и ЕМГ метода. Прегледом литературе утврђено је да је написано само неколико научно-истраживачких радова о физичкој и когнитивној ергономији у оквиру сарадње радника и робота, те да постоји простор за даља истраживања у овој области (*Pearce* и други, 2018).

У већем броју научно-истраживачких радова су истакнуте бенефити увођења колаборативних робота у виду, смањења мишићног замора (*Zanchettin* и други, 2019; *Sadrifaridpour* и други, 2016) и смањења ризика од настанка мишићно-коштаних поремећаја (*Pearce* и други, 2018; *Liau* и *Ryu*, 2020). У студијама које су спровели аутори (*Palomba* и други, 2021; *Awad* и други, 2017) закључено је да су након имплементације колаборативних робота у производне процесе значајно побољшани услови рада.

У традиционалним радним срединама, радне активности су стриктно подељене на оне које обављају роботи и активности које обављају радници (*Wongphati* и други, 2015). Колаборативна сарадња радника и робота чини основу Индустрије 5.0. Током директне интеракције између робота и радника, комбинују се позитивне карактеристике радника (прилагодљивост, креативност, способност доношења одлука, спретност, перцепција, агилност, когнитивне способности, способност критичког мишљења и интелектуалне способности) са карактеристикама колаборативних робота (снага, издржљивост, прецизност, брзина, поновљивост и конзистентност) у циљу ефикаснијег и безбеднијег обављања радних активности.

У студијама чији су аутори (*Pini* и други, 2016; *Gualtieri* и други, 2021; *Palomba* и други, 2021) је приказана дигитална трансформација традиционалне радне станице у колаборативну и указано на предности сарадње између радника и робота (*Consiglio* и други, 2007; *Sadrifaridpour* и *Wang*, 2017; *Heydaryan* и други, 2018; *Ruiz Castro* и други, 2018; *Liau* и *Ryu*, 2020; *Parra* и други, 2020; *Pérez* и други, 2020).

Такође, будући правци истраживања биће усмерени на примену вештачке интелигенције и компјутерске визије. Вештачка интелигенције у контексту Индустрије 5.0 има значајну улогу у побољшању радних услова и прилагођавању радног места сваком раднику, оптимизацији радног окружења и превенцији професионалних болести. Методе вештачке интелигенције ће омогућити детаљнију анализу података добијених применом ЕМГ и ЕЕГ методе у циљу дубљег проучавања напрезања трапезних мишића и менталног оптерећења радника који обављају монтажне активности и спровођења додатних побољшања.

Још један од праваца истраживања биће интеграција компјутерске визије у монтажну радну станицу како би се детектовале неправилности и дефекти у реалном времену. Напредни алгоритми машинског учења ће омогућити препознавање дефеката, чиме се смањује потреба за интервенцијом људи и унапређује ефикасност производних процеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Aftanas L., Varlamov A., Pavlov S., Makhnev V., Reva N. (2002), Time-dependent cortical asymmetries induced by emotional arousal: Eeg analysis of event-related synchronization and desynchronization in individually defined frequency bands, *International journal of psychophysiology: official journal of the International Organization of Psychophysiology*, vol. 44, pp. 67-82, doi: 10.1016/s0167-8760(01)00194-5
2. Ahmed M. H., Kaya M., Taebi A., Thibbotuwawa G. P. (2023), Feasibility of Trapezius Muscle Electromyography and Electrocardiography to Monitor Stress Levels in High Demand Positions, *Proceedings of the Volume 5: Biomedical and Biotechnology*, New Orleans, USA, vol. 29, doi: 10.1115/IMECE2023-112653
3. Al Zuheri A., Lee H. S. L., Ke X. (2016), Developing a multi-objective genetic optimisation approach for an operational design of a manual mixed-model assembly line with walking workers, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 27, no. 5, pp.1049-1065, doi: 10.1007/s10845-014-0934-3
4. Al Zuheri A., Luong L., Xing K. (2014), Developing a multi-objective genetic optimisation approach for an operational design of a manual mixed-model assembly line with walking workers, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol 27, no. 5, pp. 1-17, doi:10.1007/s10845-014-0934-3
5. Alexopoulos E. C. (2003), Risk factors for musculoskeletal disorders among nursing personnel in Greek hospitals, *International archives of occupational and environmental health*, vol. 76, pp. 289-294, doi: 10.1007/s00420-003-0442-9
6. Al-Mulla M. R., Sepulveda F., Colley M. (2011), A review of non-invasive techniques to detect and predict localised muscle fatigue, *Sensors*, vol. 11, no. 4, pp. 3545-3594, doi: 10.3390/s110403545
7. Alves A. Ferreira A., Maia L., Leao C., Carneiro P. (2019), A symbiotic relationship between Lean Production and Ergonomics: insights from Industrial Engineering final year projects, *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 10, pp. 243-256, doi: 10.24867/IJIEM-2019-4-244
8. Alves J. A., Silva L. T., Remoaldo P. C. (2018), Impacts of low frequency noise exposure on well-being: a case-study from Portugal, *Noise Health*, vol. 20, no. 95, pp. 131-145, doi: 10.4103/nah.NAH_64_17
9. Aminoff T., Smolander J., Korhonen O., Louhevaara V. (1996), Physical work capacity in dynamic exercise with differing muscle masses in healthy young and older men, *European Journal of Applied Physiology*, vol. 73, pp. 180-185, doi: 10.1007/bf00262829
10. Andersen J. H., Haahr J. P., Frost P. (2007), Risk factors for more severe regional musculoskeletal symptoms: a two-year prospective study of a general working population, *Arthritis and Rheumatology*, vol. 56, pp. 1355-1364, doi: 10.1002/art.22513

11. Andreessen L. M., Gerjets P., Meurers D., Zender T. O. (2021), Toward neuro adaptive support technologies for improving digital reading: a passive BCI-based assessment of mental workload imposed by text difficulty and presentation speed during reading, *User Modeling and User-Adapted Interaction*, vol. 31, pp.75-104, doi: 10.1007/s11257-020-09273-5
12. Anghel D. C., Nițu E. L., Rizea A. D., Gavriluță A., Gavriluță A., Belu N. (2019), Ergonomics study on an assembly line used in the automotive industry, *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, vol. 290, doi: 10.1051/mateconf/201929012001
13. Anon (2005), Workstations, track system smooth assembly, *Assembly*, vol. 48, no. 4, pp. 32-35
14. Antonakis J. (2006), Could lean production job design be intrinsically motivating? Contextual, configurational, and levels-of-analysis issues, *Journal of Operations Management*, vol. 24, no. 2, pp. 99-123, doi: 10.1016/j.jom.2005.04.001
15. Antonenko P. D., Paas F., Grabner R. H., Gog T. V. (2010), Using Electroencephalography to Measure Cognitive Load, *Educational Psychology Review*, vol. 22, no. 4, pp. 425-438, doi: 10.1007/s10648-010-9130-y
16. Arghavani V., Zamanian Z., Ghanbary A., Hassanzadeh J. (2014), Investigation of the relationship between carrying school bags (handbags and backpacks) and the prevalence of musculoskeletal pains among 12-15-year-old students in Shiraz, *Pakistan Journal of Biological Sciences*, vol.17, pp. 550-554, doi: 10.3923/pjbs.2014.550.554
17. Arnold J., Ramulu M., Rao P. N. (2004), Importance of assembly simulation as an aid for process planning for an aircraft assembly operation: perspective from experience, *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, vol. 6, no. 5, pp. 434-456, doi: 10.1504/IJMTM.2004.005672
18. Aromaa S., Liinasuo M., Kaasinen E., Bojko M., Schmalfuß F., Apostolakis K. C., Zarpalas D., Daras P., Öztürk C., Boubekour M. (2018), User Evaluation of Industry 4.0 Concepts for Worker Engagement, *1st International Conference on Human Systems Engineering and Design (IHSED 2018)*, Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 876, Springer, Cham, doi:10.1007/978-3-030-02053-8_6
19. Awad R., Fechter M., van Heerden J. (2017), Integrated risk assessment and safety consideration during design of HRC workplaces, *22 nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) (Limassol)*, pp.1-10, doi: 10.1109/ETFA.2017.8247648
20. Axelsson J. (2000), Quality and ergonomics-towards successful integration, *Phd thesis*, Linköping University, Sweden
21. Ayaz H., Dehais F. (2019), Neuroergonomics: the brain at work and in everyday life, *Elsevier*, ISBN: 978-0-12-811926-6, doi: 10.1016/C2016-0-02196-4
22. Babović P. (2009), Povrede na radu kao indikatori neadekvatnih uslova rada i radne sredine, *Acta medica medianae*, vol. 48, no. 3, pp. 22-26
23. Badri A., Boudreau-Trudel B., Souissi A.S. (2018), Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern?, *Safety science*, vol. 109, pp. 403-411, doi: 10.1016/j.ssci.2018.06.012
24. Bahrin B. M., Klein M., Friederichsen N. (2016), The relevance of manufacturing flexibility in the context of Industrie 4.0, *48th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Procedia CIRP 41, pp. 105-110

25. Balasubramanian K. R., Sivapirakasam S. P., Krishna V. (2018), Fatigue evaluation in manual handling using surface EMG and ergonomic design of trolley, *Ergonomics International Journal*, vol. 2, no. 3, pp.145-154, doi: 10.23880/EOIJ-16000145
26. Banks A. D., Aghazadeh F. (2009), Progressive fatigue effects on manual lifting factors, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries*, vol. 19, no. 5, pp.361- 377, doi: 10.1002/hfm.20170
27. Bao S., Silverstein B., Cohen M. (2001), An electromyography study in three high risk poultry processing jobs, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 27, pp. 375-385, doi: 10.1016/S0169-8141(01)00004-X
28. Baraldi E. C., Paulo C. (2011), Ergonomic planned supply in an automotive assembly line, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries*, vol. 21, no. 1, pp. 104-119, doi: 10.1002/hfm.20228
29. Barr A. E., Barbe M. F., Clark B. D. (2004), Work-related musculoskeletal disorders of the hand and wrist: epidemiology, pathophysiology, and sensorimotor changes, *The Journal of orthopaedic and sports physical therapy*, vol. 34, no. 10, pp. 610-27, doi: 10.2519/jospt.2004.34.10.610
30. Başar E., Başar-Eroglu C., Karakaş S., Schürmann M. (2001), Gamma, alpha, delta, and theta oscillations govern cognitive processes, *International Journal of Psychophysiology*, vol. 39, no. 2-3, 241-248, doi: 10.1016/s0167-8760(00)00145-8
31. Basmajian J. V., De Luca C. J. (1985), Muscles alive: their functions revealed by electromyography, *Williams & Wilkins*, Baltimore (5th ed)
32. Battaia O., Otto A., Sgarbossa F., Pesch E. (2018), Future trends in management and operation of assembly systems: from customized assembly systems to cyber-physical systems, *Omega*, vol. 78, pp. 1- 4, doi: 10.1016/j.omega.2018.01.010
33. Battini D., Faccio M., Persona A., Sgarbossa F. (2011), New Methodological Framework to Improve Productivity and Ergonomics in Assembly System Design, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 41, pp. 30-32, doi: 10.1016/j.ergon.2010.12.001
34. Battini D., Finco S., Sgarbossa F. (2020), Human-Oriented assembly line balancing and sequencing model in the industry 4.0 era, *Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing*, eds Sokolov B., Ivanov D., Dolgui A. (Springer), pp. 141-165, doi: 10.1007/978-3-030-43177-8_8
35. Battini D., Persona A., Sgarbossa F. (2014), Innovative real-time system to integrate ergonomic evaluations into warehouse design and management, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 77, pp. 1-10, doi: 10.1016/j.cie.2014.08.018
36. Baudin M. (2002), *Lean Assembly: The Nuts and Bolts of Making Assembly Operations Flow*, New York: *Productivity Press*, ISBN 9781563272639
37. Bauters K., Cottyn J., Claeys D., Slembrouck M., Veelaert P., van Landeghem H. (2018), Automated Work Cycle Classification and Performance Measurement for Manual Work Stations, *Robotics and computer-integrated manufacturing*, vol. 51, pp. 139-157, doi: 10.1016/j.rcim.2017.12.001
38. Belli L., Luca D., Alice M., Pier L. M., Gianluigi F. (2019), Toward Industry 4.0 With IoT: Optimizing Business Processes in an Evolving Manufacturing Factory, *Frontiers in ICT*, vol. 6, no. 17, doi: 10.3389/fict.2019.00017

39. Bennie K. J., Ciriello V. M., Johnson P. W., Dennerlein J. T. (2002), Electromyographic activity of the human extensorcarpi ulnaris muscle changes with exposure to repetitive ulnar deviation, *European Journal of Applied Physiology*, vol. 88, no. 1-2, pp. 5-12, doi: 10.1007/s00421-002-0666-5
40. Bentley T., Tappin D. (2010), Incorporating organisational safety culture within ergonomics practice, *Ergonomics*, vol. 53, no. 10, pp. 1167-74, doi: 10.1080/00140139.2010.512981
41. Bergman M. W., Berlin C., Chafi M. B., Falck A., Örtengren R. (2021), Cognitive ergonomics of assembly work from a job demands-resources perspective: Three qualitative case studies, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 23, 12282, doi: 10.3390/ijerph182312282
42. Bergman S., Per H., Kjell H., Ingemar F. P., Björn S., Lennart T. H. J. (2001), Chronic musculoskeletal pain, prevalence rates, and sociodemographic associations in a Swedish population study, *The Journal of rheumatology*, vol. 28, no. 6, pp. 1369-1377
43. Berka C., Levendowski D. J., Lumicao M. N., Yau A., Davis G., Živković V. T., Olmstead R. E., Tremoulet P. D., Craven P. L. (2007), EEG correlates of task engagement and mental workload in vigilance, learning, and memory tasks, *Aviation, space, and environmental medicine*, vol. 78, no. 5, pp. 231-244, PMID: 17547324
44. Bernal D., Campos-Serna J., Tobias A., Vargas-Prada S., Benavides F. G., Serra G. (2015), Work-related psychosocial risk factors and musculoskeletal disorders in hospital nurses and nursing aides: a systematic review and meta-analysis, *International Journal of Nursing Studies*, vol. 52, pp. 635-648, doi: 10.1016/j.ijnurstu.2014.11.003
45. Bernard B. (1997), Musculoskeletal Disorders (MSDs) and Workplace Factors, 2nd printing, *U.S. Department of Human Services-Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention*, National Institute for Occupational Safety and Health
46. Bernard B., Sauter S., Fine L. (1994), Job task and psychosocial risk factors for work-related musculoskeletal disorders among newspaper employees, *Scandinavian journal of work, environment and health*, vol. 20, no. 6, pp. 417- 426, doi:10.5271/sjweh.1379
47. Bernardo F. G. P. (2018), Muscle Fatigue Assessment in Manual Handling of Loads using Motion Analysis and Accelerometers: A short review, 1st Edition, *CRC Press*, doi:10.1201/9781351008884-12
48. Bevan S. (2015), Economic impact of musculoskeletal disorders (MSDs) on work in Europe, *Best Practice and Research. Clinical Rheumatology*, vol. 29, no. 3, pp. 356-373, doi: 10.1016/j.berh.2015.08.002
49. Bhamu J., Singh S. K. (2014), Lean manufacturing: literature review and research issues, *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 34, no. 7, pp. 876-940, doi:10.1108/IJOPM-08-2012-0315
50. Binoosh G., Mohan M., Ashok P., Sekaran K. D. (2017), Virtual postural assessment of an assembly work in a small scale submersible pump manufacturing industry, *Work*, vol. 58, no. 4, pp. 567-578, doi:10.3233/WOR-172635
51. Biondi F. N., Cacanindin A., Douglas C., Cort J. O. (2021), Investigating the Effect of Cognitive Workload on Assembly Task Performance, *Human Factors*, vol. 63, no. 5, pp. 813-820, doi: 10.1177/0018720820929928

52. Björinga G., Hagga G. M. (2000), Musculoskeletal exposure of manual spray painting in the woodworking industry-an ergonomic study on painters, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 26, pp. 603-614, doi: 10.1016/S0169-8141(00)00026-3
53. Björklund M., Crenshaw A. G., Djupsjöbacka M., Johansson H. (2000), Position sense acuity is diminished following repetitive low-intensity work to fatigue in a simulated occupational setting, *European journal of applied physiology*, vol. 81, no. 5, pp. 361-370, doi: 10.1007/s004210050055
54. Böckerman P., Ilmakunnas P. (2009), Job disamenities, job satisfaction, quit intentions, and actual separations: putting the pieces together, *Industrial Relations: A Journal of Economy an Society*, vol. 48, no. 1, pp. 73-96, doi: 10.1111/j.1468-232X.2008.00546.x
55. Böckerman P., Ilmakunnas P. (2010), The job satisfaction-productivity nexus: a study using matched survey and register data, *SSRN Electronic Journal*, vol. 65, no. 2, pp. 244-262, doi: 10.2139/ssrn.1626126
56. Bonato P., Boissy P., Della Croce U., Roy S. H. (2002), Changes in the surface EMG signal and the biomechanics of motion during a repetitive lifting task, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 38-47, doi: 10.1109/TNSRE.2002.1021585
57. Bongers P. M. (2006), Epidemiology of work related neck and upper limb problems: psychosocial and personal risk factors (part I) and effective interventions from a bio behavioural perspective (part II), *Journal of occupational rehabilitation*, vol. 16, no. 3, pp. 272-295, doi: 10.1007/s10926-006-9044-1
58. Bonini M., Prenesti D., Urru A., Echelmeyer W. (2015), Towards the full automation of distribution centers, *4th International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT) (Valenciennes)*, pp. 47-52, doi: 10.1109/ICAdLT.2015.7136589
59. Borghini G., Astolfi L., Vecchiato G., Mattia D., Babiloni F. (2014), Measuring neurophysiological signals in aircraft pilots and car drivers for the assessment of mental workload, fatigue and drowsiness, *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 44 pp. 58-75, doi: 10.1016/j.neubiorev.2012.10.003
60. Bortolini M., Faccio M., Gamberi M., Pilati F. (2020), Motion Analysis System (MAS) for Production and Ergonomics Assessment in the Manufacturing Processes, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, doi: 10.1016/j.cie.2018.10.046
61. Bortolini M., Ferrari E., Gamberi M., Pilati F., Faccio M. (2017), Assembly system design in the Industry 4.0 era: A general framework, *IFAC-Papers OnLine*, vol. 50, pp. 5700-5705, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.1121
62. Bosch T., De Looze M. P., Kingma I., Visser B., Van Dieën J. H. (2009), Electromyographical manifestations of muscle fatigue during different levels of simulated light manual assembly work, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 19, pp. 246-256, doi: 10.1016/j.jelekin.2008.04.014
63. Bosch T., de Looze M. P., van Dieën J. H., (2007), Development of fatigue and discomfort in the upper trapezius muscle during light manual work, *Ergonomics*, vol. 50, no. 2, pp. 161-177, doi: 10.1080/00140130600900282.
64. Bossomaier T., Bruzzone A., Cimino A., Longo F., Mirabelli G. (2010), Scientific Approaches For The Industrial Workstations Ergonomic Design: A Review, *24th European Conference on Modelling and Simulation*, pp. 1-11, doi: 10.7148/2010-0189-0199

65. Botti L., Gamberi M., Manzini R., Mora C., Regattieri A. (2014), A bi-objective optimization model for work activity scheduling of workers exposed to ergonomic risk, *Proceedings of the XIX Summer School „Francesco Turco“*, Ancona (Italy), pp. 226-231, doi: 10.1016/j.cie.2017.05.011
66. Botti L., Melloni R., Oliva M. (2022), Learn from the past and act for the future: a holistic and participative approach for improving occupational health and safety in industry, *Safety Science*, vol. 145, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105475
67. Botti L., Mora C., Regattieri A. (2015), Improving Ergonomics in the Meat Industry: A Case Study of an Italian Ham Processing Company, *IFAC-Papers OnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 598-603, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.147
68. Botti L., Mora C., Regattieri A. (2017), Integrating ergonomics and lean manufacturing principles in a hybrid assembly line, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 111, no. 3, pp. 481-491, doi: 10.1016/j.cie.2017.05.011
69. Boyd N. M., Nowell B. (2020), Sense of community, sense of community responsibility, organizational commitment and identification, and public service motivation: A simultaneous test of affective states on employee well-being and engagement in a public service work context, *Public Management Review*, vol. 22, no. 7, pp. 1024-1050, doi: 10.1080/14719037.2020.1740301
70. Bradshaw J. M., Dignum V., Jonker C., Sierhuis M. (2012), Human-agent-robot teamwork, *IEEE Intelligent Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 8-13, doi: 10.1145/2157689.2157843
71. Bridger R. (2017), Introduction to human factors and ergonomics, *CRC press*, 4th Edition, doi: 10.1201/9781351228442
72. Brito M. F., Ramos A. L. F. A., Carneiro P., Gonçalves M. A. (2017a), Ergonomic design intervention in a coating production area, *Occupational Safety and Hygiene*, pp. 305-310, doi: 10.1201/9781315164809-55
73. Brito M. F., Ramos A. L. F. A., Carneiro P., Gonçalves M. A. (2017b), Combining SMED methodology and ergonomics for reduction of setup in a turning production area, *Procedia Manufacturing*, vol. 13, pp. 1112-1119, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.172
74. Brolin A., Thorvald P., Case K. (2017), Experimental study of cognitive aspects affecting human performance in manual assembly, *Production and Manufacturing Research*, vol. 5, pp. 141-163, doi: 10.1080/21693277.2017.1374893
75. Brookings J. B., Wilson G. F., Swain C. R. (1996), Psychophysiological responses to changes in workload during simulated air traffic control, *Biological Psychology*, vol. 42, no. 3, pp. 361-377, doi: 10.1016/0301-0511(95)05167-8
76. Brouwer A., Zander T. O., van Erp J. B., Korteling J. E., Bronkhorst A. W. (2015), Using neurophysiological signals that reflect cognitive or affective state: six recommendations to avoid common pitfalls, *Frontiers in Neuroscience*, vol. 9, no. 136, doi: 10.3389/fnins.2015.00136
77. Bruzzone A. G., (2004), Modeling and Simulation Methodologies for Logistics and Manufacturing Optimization, *Journal of Simulation*, vol. 80, no. 3, pp. 119-174, doi: 10.1177/0037549704045812
78. Bryson A., Forth J., Stokes L. (2017), Does employees' subjective well-being affect workplace performance?, *Human Relations*, vol. 70, no. 8, pp. 1017-37, doi: 10.1177/001872671769307

79. Buckle P. (2005), Ergonomics and musculoskeletal disorders: overview, *Occupational Medicine*, vol. 55, no. 3, pp. 164-167, doi: 10.1093/occmed/kqi081
80. Buckle P. W., Devereux J. J. (2002), The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders, *Applied Ergonomics*, vol. 33, no. 3, pp. 207-217, doi: 10.1016/s0003-6870(02)00014-5
81. Bullinger H., Rally P., Schipfer J. (1997), Some aspects of ergonomics in assembly planning, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 20, no. 5, pp. 389-397, doi:10.1016/S0169-8141(96)00080-7
82. Burdorf A. (2010), The role of assessment of biomechanical exposure at the workplace in the prevention of musculoskeletal disorders, *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 36, pp.1-2, doi: 10.5271/sjweh.2882
83. Burggräf P., Kampker A., Kreisköther K., Adlon T., Riegauf A., Dorn B., Casla P., Marguglio A., Donvito G. (2020), Enabling smart workplaces by implementing an adaptive software framework, *Advances in Human Factors and Systems Interaction: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Factors and Systems Interaction*, Springer International Publishing, vol. 959 , pp. 116-127, doi: 10.1007/978-3-030-20040-4_11
84. Burri G. J., Helander M. G. (1991), A field study of productivity improvements in the manufacturing of circuit boards, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 7, no. 3, pp.207-215, doi: 10.1016/0169-8141(91)90004-6
85. Byrne E.A., Parasuraman R. (1996), Psychophysiology and adaptive automation, *Biological Psychology*, vol. 42, no. 3, pp. 249-268, doi: 10.1016/0301-0511(95)05161-9
86. Caiza G., Saeteros M., Oñate W., Garcia M. V. (2020), Fog computing at industrial level, architecture, latency, energy, and security: A review, *Heliyon*, vol. 6, no. 4, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03706
87. Callaghan J. P., Gregory D. E., Durkin J. L. (2010), Do NIRS measures relate to subjective low back discomfort during sedentary tasks?, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 40, no. 2, pp. 165-170, doi: 10.1016/j.ergon.2009.01.006
88. Cañas J. J., Velichkovsky B. B., Velichkovsky B. M. (2011), Human Factors and Ergonomics, *IAAP Handbook of Applied Psychology*, New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, pp. 316-337, doi: 10.1002/9781444395150.ch13
89. Canjuga M., Hammig O., Bauer G. F., Laubli T. (2010), Correlates of Short- and Long-Term Absence Due to Musculoskeletal Disorders, *Occupational Medicine*, vol. 60, no. 5, pp. 358-361, doi: 10.1093/occmed/kqq024
90. Carayon P., Smith M. J., Haims M. C. (1999), Work organization, job stress and work-related musculoskeletal disorders, *Human Factors*, vol. 41, no. 4, pp. 644-663, doi: 10.1518/001872099779656743
91. Cardoso A., Colim A., Bicho E., Braga A., Menozzi M., Arezes, P. (2021), Ergonomics and human factors as a requirement to implement safer collaborative robotic workstations: A literature review, *Safety*, vol. 7, no. 4, doi:10.3390/safety7040071
92. Carey E. J., Gallwey T. J. (2002), Evaluation of human postures with computer aids and virtual workplace designs, *International Journal of Production Research*, vol. 40, no. 4, pp. 825-843, doi: 10.1080/00207540110093927

93. Carlopio J. R. (1991), Construct Human Factors Satisfaction Questionnaire, Working Paper 91-001, *Australian Graduate School of Management*, The University of New South Wales, Australia
94. Caroly S. M., Major M. E., Probst I., Molinié A. F. (2013), Le genre des troubles musculo-squelettiques: interventions ergonomiques en France et au Canada, *Travail; genre et sociétés*, pp. 49-67, doi: 10.3917/tgs.029.0049
95. Castor M. C. (2003), *GARTEUR Handbook of mental workload measurement*, GARTEUR, Group for Aeronautical Research and Technology in Europe, Flight Mechanics Action Group FM AG13: 164
96. Celik N., Oztürk F. (2017), The upcoming issues of industry 4.0 on occupational health and safety specialized on turkey example, *International Journal Economy Business Management*, vol. 1, no. 5, pp. 236-256, ISSN: 2456-7760
97. Chaffin D. B. (2007), Human motion simulation for vehicle and workplace design, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries*, vol. 17, pp. 475-484, doi:10.1002/hfm.20087
98. Chakravarthy S. P., Subbaiah K. M., Shekar G. L. (2015), Ergonomics study of automobile assembly line, *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering*, vol. 2, no. 5, pp. 110-114
99. Chandrasakaran A., Chee H. L., Rampal K. G., Tan G. L. E. (2003), The prevalence of musculoskeletal problems and risk factors among women assembly workers in the semiconductor industry, *Medical Journal of Malaysia*, vol. 58, no. 5, pp. 657-666
100. Chang S. W., Wang M. J. J. (2007), Digital human modeling and workplace evaluation: using an automobile assembly task as an example, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing and Service Industries*, vol. 17, pp. 445-455, doi:10.1002/hfm.20085
101. Charles R., Nixon J. (2019), Measuring mental workload using physiological measures: A systematic review, *Applied ergonomics*, vol. 74, pp. 221-232, doi: 10.1016/j.apergo.2018.08.028
102. Chen J., Ren B., Xinyi S., Zhenghang L. (2015), Revealing the „Invisible Gorilla“ in construction: Estimating construction safety through mental workload assessment, *Automation in Construction*, vol. 63, pp. 173-183, doi: 10.22260/ISARC2015/0104
103. Chen J., Taylor J. E., Comu S. (2017), Assessing Task Mental Workload in Construction Projects: A Novel Electroencephalography Approach, *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 143, no. 8, doi: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.000134
104. Cherubini A., Navarro-Alarcon D. (2021), Sensor-based control for collaborative robots: Fundamentals, challenges, and opportunities, *Frontiers in Neurorobotics*, vol. 14, doi:10.3389/fnbot.2020.576846
105. Cheshmehgaz H. R., Haron H., Kazemipour F., Desa M. I. (2012), Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 63, no. 2, pp. 503-512, doi: 10.1016/j.cie.2012.03.017
106. Chia G., Lim S. M., Sng G. K. J., Hwang Y. J., Chia K. S. (2019), Need for a new workplace safety and health (WSH) strategy for the fourth Industrial Revolution, *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 62, no. 4, pp. 275-281, doi: 10.1002/ajim.22960

107. Chiasson M. E., Major J. Aubry K., Delisle A. (2015), Influence of musculoskeletal pain on workers' ergonomic risk-factor assessments, *Applied Ergonomics*, vol. 49, no. 1, pp. 1-7, doi: 10.1016/j.apergo.2014.12.011
108. Choobineh A., Hosseini M., Lahmi M., Jazani R. K. Shahnava H. (2007), Musculoskeletal problems in Iranian hand woven carpet industry: guidelines for workstation design, *Applied Ergonomics*, vol. 38, no. 5, pp. 617-624, doi: 10.1016/j.apergo.2006.06.005
109. Choobineh A., Lahmi M., Shahnava H., Jazani R. K., Hosseini M. (2004), Musculoskeletal symptoms as related to ergonomic factors in Iranian hand-woven carpet industry and general guidelines for workstation design, *International journal of occupational safety and health*, vol. 10, no. 2, pp. 157-168, doi:10.1080/10803548.2004.11076604157-168
110. Choobineh A., Tabatabaei S. H., Mokhtarzadeh A., Salehi M. (2007a), Musculoskeletal problems among workers of an Iranian rubber factory, *Journal of Occupational Health*, vol. 49, no. 5, pp. 418-423, doi: 10.1539/joh.49.418
111. Ciccarelli M., Papetti A., Cappelletti F., Brunzini A., Germani M. (2022), Combining World Class Manufacturing system and Industry 4.0 technologies to design ergonomic manufacturing equipment, *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 16, pp. 263-279, doi: 16. 10.1007/s12008-021-00832-7
112. Cifrek M., Medved V., Tonković S., Ostojić S. (2009), Surface EMG based muscle fatigue evaluation in biomechanics, *Clinical Biomechanics*, vol. 24, no. 4, pp. 327-340, doi: 10.1016/j.clinbiomech.2009.01.010
113. Cimino A., Curcio D., Longo F., Mirabelli G. (2009), Improving workers conditions within Industrial Workstations, *Proceedings of the Summer Computer Simulation Conference*, Istanbul, Turkey, pp. 200-207
114. Cimino A., Curcio D., Longo F., Papoff E. (2008), Workstation productivity enhancement within hydraulic hoses manufacturing process, *Proceedings of the 7th International Workshop on Modeling & Applied Simulation*, pp. 268-274
115. Cimino A., Mirabelli G. (2009), Modeling, simulation and ergonomic standards as support tools for a workstation design in manufacturing system, *International Journal of Simulation and Process Modeling*, vol. 5, no. 2, pp. 138-148, doi: 10.1504/IJSPM.2010.03266
116. Coelli S., Sclocco R., Barbieri R., Reni G., Zucca C., Bianchi A.M. (2015), EEG-based index for engagement level monitoring during sustained attention, *Proceedings of the 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, Italy, 25-29 August, pp. 1512-1515
117. Cole H. W. Ray W. J. (1985), EEG correlates of emotional tasks related to attentional demands, *International Journal of Psychophysiology*, vol. 3, no. 1, pp. 33-41, doi: 10.1016/0167-8760(85)90017-0
118. Colim A., Faria C. Cunha J., Oliveira J., Sousa N., Rocha L. A. (2021b), Physical Ergonomic Improvement and Safe Design of an Assembly Workstation through Collaborative Robotics, *Safety*, vol. 7, doi:10.3390/safety7010014
119. Colim A., Morgado R., Carneiro P., Costa N., Faria C., Sousa N., Rocha L. A., Arezes P. (2021a), Lean Manufacturing and Ergonomics Integration: Defining Productivity and

- Wellbeing Indicators in a Human-Robot Workstation, *Sustainability*, vol. 13, no. 4, doi:10.3390/su13041931
120. Colim A., Sousa N., Carneiro P., Costa N., Arezes P., Cardoso A. (2020), Ergonomic Intervention on a Packing Workstation with Robotic Aid Case Study at a Furniture Manufacturing Industry, *Work: A journal of prevention, Assessment and Rehabilitation*, vol. 66, no. 1, doi: 10.3233/WOR-203144
 121. Colombini D. (2002), Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and Exertions of Upper Limbs: Job Analysis, Ocra Risk Indices, *Prevention Strategies and Design Principles*, Elsevier, ISBN: 9780444549150
 122. Consiglio S., Seliger G., Weinert N. (2007), Development of hybrid assembly workplaces, *CIRP Annals*, vol. 56, no. 1, pp. 37-40, doi: 10.1016/j.cirp.2007.05.011
 123. Corlett E. N., Eklund, J. A. E. (1983), The measurement of spinal loads arising from working seats, *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, Sage CA: Los Angeles, CA: SAGE Publications, vol. 27, no. 9, pp. 786-789, doi:10.1177/154193128302700907
 124. Coury H. J. C. G., Léo A. J., Kumar S. (2000), Effects of progressive levels of industrial automation on force and repetitive movements of the wrist, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 25, no. 6, pp. 587-595, doi: 10.1016/S0169-8141(99)00045-1
 125. Crawford J. O. (2007), The Nordic Musculoskeletal Questionnaire, *Occupational medicine*, vol. 57, no. 4, pp. 300-301, doi: 10.1093/occmed/kqm036
 126. Dainoff M. J. (2002), The Effects of Ergonomic Worktools on Productivity in Today's Automated Workstation Design, Center for Ergonomic Research, Miami University, Oxford, Ohio
 127. Das B. (1987), An ergonomic approach to designing a manufacturing work system, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 1, no. 3, pp. 231-240, doi: 10.1016/0169-8141(87)90017-5
 128. Das B., Grady R. M. (1983), Industrial workplace layout design: An application of engineering anthropometry, *Ergonomics*, vol. 26, no. 5, pp. 433-447, doi: 10.1080/00140138308963360
 129. Das B., Sengupta A. K. (1996), Industrial workstation design: A systematic ergonomics approach, *Applied Ergonomics*, vol. 27, no. 3., pp. 157-163, doi: 10.1016/0003-6870(96)00008-7
 130. Das B., Shikdar A. (1999), Participative versus assigned production standard setting in a repetitive industrial task: a strategy for improving worker productivity, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 5, no. 3, pp. 417-430, doi:10.1080/10803548.1999.11076429
 131. Das B., Shikdar A., Winters T. (2007), Workstation redesign for a repetitive drill press operation: a combined work design and ergonomics approach, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, vol. 17, no. 4, pp. 395-410, doi: 10.1002/hfm.20060
 132. David G. (2005), Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders, *Occupational Medicine*, vol. 55, pp. 190-199, doi: 10.1093/occmed/kqi082
 133. Davis K. G., Kotowski S. E., Sharma B., Herrmann D. (2009), Combating the effects of sedentary Work: postural Variability reduces musculoskeletal discomfort, *Proceedings of*

- the Human Factors and Ergonomics*, vol. 53, no. 14, pp. 884-886, doi: 10.1177/15419312090530140
134. De Guimarães L. B. M., Anzanello M. J., Ribeiro J. L. D., Saurin T. A. (2015), Participatory ergonomics intervention for improving human and production outcomes of a Brazilian furniture company, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 49, pp. 97-107, doi: 10.1016/j.ergon.2015.02.002
 135. De La Torre J., van der Ark L. A., Rossi G. (2018), Analysis of clinical data from a cognitive diagnosis modeling framework, *Measurement and Evaluation in Counseling and Development*, vol. 51, no. 4, pp. 281-296
 136. De Luca C. J. (1984), Myoelectrical manifestations of localized muscular fatigue in humans, *Critical Reviews in Biomedical Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 251-279
 137. De Luca C. J. (1997), The use of surface electromyography in biomechanics, *Journal of applied biomechanics*, vol. 13, no. 2, pp. 135-163, doi: 10.1123/jab.13.2.135
 138. De Treville S., Antonakis J. (2006), Could lean production job design be intrinsically motivating? Contextual, configurational, and levels-of-analysis issues, *Journal of Operations Management*, vol. 24, no. 2, pp. 99-123, doi: 10.1016/j.jom.2005.04.001
 139. De Vos M. (2009), Decomposition methods with applications in neuroscience, *PhD thesis*, Faculty of Engineering, KU Leuven (Leuven, Belgium)
 140. Delorme A., Scott M. (2004), EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis, *Journal of neuroscience methods*, vol. 134, no. 1, pp. 9-21, doi: 10.1016/j.jneumeth.2003.10.009
 141. Dennerlein J. T. (2008), Ergonomics/Musculoskeletal, *Elsevier*, pp. 443-452, doi: 10.1016/B978-012373960-5.00288-4
 142. Deros B. M., Khamis N. K., Ismail A. R., Jamaluddin H., Adam A. M., Rosli S. (2011), An ergonomics study on assembly line workstation design, *American Journal of Applied Sciences*, vol. 8, no.11, pp. 1195-1201, doi: 10.3844/ajassp.2011.1195.1201
 143. Deros B. M., Mohamad D., Ismail A. R., Soon O. W., Lee K. C., Nordin M. S. (2009), Recommended chair and work surfaces dimensions of VDT tasks for Malaysian citizens, *European Journal of Scientific Research*, vol. 34, no. 2, pp. 156-167, ISSN 1450-216X
 144. Deros B. M., Daruis D. D. I., Ismail A. R., Abdullah N., Ghani A. J. (2010), Work-related musculoskeletal disorders among workers' performing Manual Material Handling work in an automotive manufacturing company, *American Journal of Applied Sciences*, vol.7, no. 8, pp. 1087-1092, doi: 10.3844/ajassp.2010.1087.1092
 145. Dieën van J. H., Westebring-van der Putten E. P., Kingma I., Looze de M. P. (2009), Low-level activity of the trunk extensor muscles causes electromyographic manifestations of fatigue in absence of decreased oxygenation, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 19, no. 3, pp. 398-406, doi: 10.1016/j.jelekin.2007.11.010
 146. Dimitrova N. A., Dimitrov G. V. (2003), Interpretation of EMG changes with fatigue: facts, pitfalls, and fallacies, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 13, no. 1, pp. 13-36, doi: 10.1016/s1050-6411(02)00083-4
 147. Ding Z. (2013), Manual Assembly Modelling and Simulation for Ergonomics Analysis, Liverpool: *PhD thesis-University of Liverpool*

148. Dingwell J. B., Joubert J. E., Diefenthaler F., Trinity J. D. (2008), Changes in muscle activity and kinematics of highly trained cyclists during fatigue, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 55, pp. 2666-2674, doi: 10.1109/TBME.2008.2001130
149. Dittmar A., Murray D. M., van der Veer, G. C., Witchel H. J. (2021), Cognitive ergonomics: A European take on HCI, *Interactions*, vol. 28, no. 2, pp. 88-92, doi: 10.1145/3447792
150. dos Santos Z. G., Vieira L., Balbinotti G. (2015), *Lean manufacturing and ergonomic working conditions in the automotive industry*, *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 5947-5954, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.687
151. Dul J., de Vries H., Verschoof S., Eveleens W., Feilzer A. (2004), Combining economic and social goals in the design of production systems by using ergonomics standards, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 47, pp. 207-222, doi: 10.1016/j.cie.2017.05.011
152. Eatough E. M., Way J. D., Chang C. H. (2012), Understanding the link between psychosocial work stressors and work-related musculoskeletal complaints, *Applied ergonomics*, vol. 43, no. 3, pp. 554-563, doi: 10.1016/j.apergo.2011.08.009
153. Ebara T., Kubo T., Inoue T., Murasaki G., Takeyama H., Sato T., Suzumura H., Niwa S. Takanishi T., Tachi N., Itani T. (2008), Effects of Adjustable Sit-stand VDT Workstations on Workers' Musculoskeletal Discomfort, *Alertness and Performance, Industrial health*, vol. 46., pp. 497-505, doi: 10.2486/indhealth.46.497
154. Ellegast R. (2016), Assessment of Physical Workloads to Prevent Work-Related MSDs, *Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance: Berlin, Germany*
155. Enoka R. M., Duchateau, J. (2008), Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function, *The Journal of Physiology*, vol. 586, no. 1, pp. 11-23, doi: 10.1113/jphysiol.2007.139477
156. Erdinc O., Vayvay O. (2008), Ergonomics interventions improve quality in manufacturing: A case study, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 727-745, doi: 10.1504/IJISE.2008.020683
157. Erisman J., Wick J. (1992), Ergonomic and productivity improvements in an assembly clamping fixture, *Advances in Industrial Ergonomics and Safety*, Philadelphia, PA, Taylor & Francis, pp. 463-468
158. Eswaramoorthi M., John M., Rajagopal C. A., Prasad P. S. S., Mohanram P. V. (2010), Redesigning assembly stations using ergonomic methods as a lean tool, *Work*, vol. 35, no. 2, pp. 231-240, doi: 10.3233/WOR-2010-0975
159. Fafrowicz M., Marek T. (2007), Quo vadis, neuroergonomics?, *Ergonomics*, vol. 50, no. 11, pp. 1941-1949, doi: 10.1080/00140130701676096
160. Falck A. C., Rosenqvist M. (2012), What are the obstacles and needs of proactive ergonomics measures at early product development stages? An interview study in five Swedish companies, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 42, no. 5, pp. 406-415, doi:10.1016/j.ergon.2012.05.002
161. Fan C., Peng Y., Peng S., Zhang H., Wu Y., Kwong S. (2022), Detection of Train Driver Fatigue and Distraction Based on Forehead EEG: A Time-Series Ensemble Learning Method, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, pp. 13559-13569, doi: 10.1109/TITS.2021.3125737

162. Farina D., Leclerc F., Arendt- Nielsen L., Buttelli O., Madeleine P. (2008), The change in spatial distribution of upper trapezius muscle activity is correlated to contraction duration, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 18, no. 1, pp. 16-25, doi: 10.1016/j.jelekin.2006.08.005
163. Farina D., Mesin L. (2005), Sensitivity of surface EMG-based conduction velocity estimates to local tissue in-homogeneities-influence of the number of channels and inter-channel distance, *Journal of Neuroscience Methods*, vol. 142, no. 1, pp. 83-89, doi:10.1016/j.jneumeth.2004.07.011
164. Fath-Berglund Å., Stahre J. (2013), Cognitive automation strategy for reconfigurable and sustainable assembly systems, *Assembly Automation*, vol. 33, no. 3, pp. 294-303, doi: 10.1108/AA-12-2013-036
165. Fenety A., Walker J. M. (2002), Short- term effects of workstation exercises on musculoskeletal discomfort and postural changes in seated video display unit workers, *Physical Therapy*, vol. 82, no. 6, pp. 578-589, PMID: 12036399
166. Fernandez J. E. (1995a), Ergonomics in the workplace, *Facilities*, vol. 13, no. 4, pp. 20-27
167. Fernández T., Harmony T., Rodriguez M., Bernal J., Silva J., Reyes A., Marosi E. (1995b), EEG activation patterns during the performance of tasks involving different components of mental calculation, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, vol. 94, pp.175-182, doi: 10.1016/0013-4694(94)00262-j
168. Finnsgård C., Medbo L., Wänström C., Neumann P. (2008), The impact of materials exposure on the conditions at the workstation, *Proceedings of EurOMA conference*, Groningen, The Netherlands
169. Finnsgård C., Wänström C., Medbo L., Neumann W. (2011), Impact of materials exposure on assembly workstation performance, *International Journal of Production Research*, vol. 49, pp. 7253-7274, doi: 10.1080/00207543.2010.503202
170. Fish L. A., Drury C. G., Helander M. G. (1997), Operator specific model: An assembly time prediction model, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 7, no. 3, pp. 211-235, doi: 10.1002/(SICI)1520-6564(199722)7:3<211::AID-HFM4>3.0.CO;2-6
171. Fisherl C. D. (1993), Boredom at work: A neglected concept, *Human Relations*, vol. 46, no. 3, pp. 395-417, doi: 10.1177/001872679304600305
172. Flynn R., Mearns K., O'Connor P., Bryden R. (2000), Measuring safety climate: identifying the common features, *Safety Science*, vol. 34, no. 1-3, pp. 177-192, doi: 10.1016/S0925-7535(00)00012-6
173. Fogarty C., Stern J. A. (1989), Eye movements and blinks: their relationship to higher cognitive processes, *International Journal of Psychophysiology*, vol. 8, no. 1, pp. 35-42, doi: 10.1016/0167-8760(89)90017-2
174. Foong R., Ang K. K., Zhang Z., Quek C. (2019), An iterative cross-subject negative-unlabeled learning algorithm for quantifying passive fatigue, *Journal of Neural Engineering*, vol. 16, no. 5, 056013, doi: 10.1088/1741-2552/ab255d
175. Francesco L., Giovanni M., Enrico P. (2006), Effective Design of an Assembly Line Using Modeling and Simulation, *Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference*, Monterey, CA, USA, 2006, pp. 1893-1898, doi: 10.1109/WSC.2006.322971.

176. Galante E. B. Bordalo F. D., Nobrega M. (2014), Risk Assessment Methodology: Quantitative HazOp, *Journal of Safety Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 31-36, doi: 10.5923/j.safety.20140302.01
177. Galy E., Cariou M., Mélan C. (2012), What is the relationship between mental workload factors and cognitive load types?, *International Journal of Psychophysiology*, vol. 83, pp. 269-275, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2011.09.023
178. Gerr F., Fethke N. B., Anton D., Merlino L., Rosecrance J., Marcus M., Jones M. P. (2014), A Prospective Study of Musculoskeletal Outcomes among Manufacturing Workers, *Human Factors*, vol. 56, no. 1, pp.178-190, doi: 10.1177/0018720813491114
179. Gervasi R., Capponi M., Mastrogiacomo L., Franceschini F. (2024), Eye-tracking support for analyzing human factors in human-robot collaboration during repetitive long-duration assembly processes, *Production Engineering*, doi:10.1007/s11740-024-01294-y
180. Gevins A., Leong H., Du R., Smith M. E., Le J., Du Rousseau D., Libove J. (1995), Towards measurement of brain function in operational environments, *Biological Psychology*, vol. 40, no.1, pp. 169-186, doi: 10.1016/0301-0511(95)05105-8
181. Gevins A., Smith M. E. (2003), Neurophysiological Measures of Cognitive Workload during Human-Computer Interaction, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 4, no. 1-2, pp. 113-131, doi: 10.1080/14639220210159717
182. Ghasemkhani M., Aten S., Azam K. (2006), Musculoskeletal Symptoms Among Automobile Assembly Line Workers, *Journal of Applied Sciences*, vol. 6, no. 1, pp 35-39, doi: 10.3923/jas.2006.35.39
183. Gonçalves M. T., Salonitis K. (2017), Lean assessment tool for workstation design of assembly lines, *Procedia CIRP*, vol. 60, pp. 386-391, doi: 10.1016/j.procir.2017.02.002
184. Gonen D., Oral A., Yosunlukaya M. (2016), Computer-aided ergonomic analysis for assembly unit of an agricultural device, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 26, no. 5, pp. 615-626, doi:10.1002/hfm.20681
185. González B. A., Adenso-Díaz B., González-Torre Pilar (2003), Ergonomic performance and quality relationship: an empirical evidence case, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 31, no. 1, pp. 33-40, doi: 10.1016/S0169-8141(02)00116-6
186. Gordon R. P. (1998), The contribution of human factors to accidents in the offshore oil industry, *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 61, no. 1-2, pp. 95-108, doi: 10.1016/S0951-8320(98)80003-3
187. Graham R. B. (2009), Effectiveness of an on-body lifting aid at reducing low back physical demands during an automotive assembly task: Assessment of EMG response and user acceptability, *Applied Ergonomics*, vol. 40, no. 5, pp. 936-942, doi: 10.1016/j.apergo.2009.01.006
188. Gramann K., Gwin J. T., Ferris D. P., Oie K. S., Jung T., Lin C., Liao L., Makeig S. (2011), Cognition in action: imaging brain/body dynamics in mobile humans, *Reviews in the Neurosciences*, vol. 22, no. 6, pp. 593-608, doi: 10.1515/RNS.2011.047
189. Grandjean E. (1988), Fitting the task to the man: a textbook of occupational ergonomics (4th Edition), London: *Taylor and Francis*
190. Gruber T., Mueller M. M., Keil A., Elbert T. (1999), Selective visual-spatial attention alters induced gamma band responses in the human, *Clinical Neurophysiology*, vol. 110, no. 12, pp. 2074-2085, doi: 10.1016/s1388-2457(99)00176-5

191. Gualtieri L., Palomba I., Merati F. A., Rauch E., Vidoni R. (2020), Design of Human-Centered Collaborative Assembly Workstations for the Improvement of Operators' Physical Ergonomics and Production Efficiency: A Case Study, *Sustainability*, vol. 12, no. 9, doi: 10.3390/su12093606
192. Gualtieri L., Rauch E., Vidoni R. (2021), Emerging Research Fields in Safety and Ergonomics in Industrial Collaborative Robotics: A Systematic Literature Review, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 67, doi: 10.1016/j.rcim.2020.101998
193. Guerreiro M. M., Serranheira F., Cruz E. B., Sousa-Uva A. (2021), Working time and upper limb musculoskeletal symptoms: a longitudinal study among assembly line workers, *Industrial health*, vol. 59, no. 1, pp. 43-53
194. Guo F., Liu L., Lv W. (2020), Biomechanical analysis of upper trapezius, erector spinae and brachioradialis fatigue in repetitive manual packaging tasks: Evidence from Chinese express industry workers, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 80, doi: 10.1016/j.ergon.2020.103012
195. Habibi E., Dehghan H., Dehkordy S. E., Maracy M. R. (2013), Evaluation of the effect of noise on the rate of errors and speed of work by the ergonomic test of two-hand coordination, *International Journal of Preventive Medicine*, vol. 4, no. 5, pp. 538-545
196. Hägg G. M. (2003), Corporate initiatives in ergonomics-an introduction, *Applied Ergonomics*, vol. 34, no. 1, pp. 3-15, doi: 10.1016/S0003-6870(02)00078-9
197. Halim I, Omar A. R., Saman A. M., Othman I. (2011), A review on health effects associated with prolonged standing in the industrial workplaces, *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, vol. 8, no. 1, pp. 14-21
198. Hallowell M. R. (2010), Worker fatigue: Managing concerns in rapid renewal highway construction projects, *Professional Safety*, vol. 55, no. 12, pp. 18-26
199. Hamrol A., Kowalik D., Kujawin´ sk A. (2011), Impact of selected work condition factors on quality of manual assembly process, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 21, no. 2, pp. 156-163, doi: 10.1002/hfm.20233
200. Hanson R., Brolin A. (2011), A comparison of kitting and continuous supply in in-plant materials supply, *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 4, pp. 979-992, doi: 10.1080/00207543.2012.657806
201. Hansson G., Balogh I., Ohlsson K., Pålsson B., Rylander L., Skerfving S. (2000), Impact of physical exposure on neck and upper limb disorders in female workers, *Applied Ergonomics*, vol. 31, no. 3, pp. 301-10, doi: 10.1016/s0003-6870(99)00047-2
202. Hart S. G. (2006), NASA-Task Load Index (NASA-TLX): 20 Years Later, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Orlando, FL, USA, vol. 50, no. 9, pp. 904-908, doi: 10.1177/154193120605000909
203. Hartanti L. P. S. (2016), Work Measurement Approach to Determine Standard Time in Assembly Line, *International Journal of Management and Applied Science*, vol. 2, no. 10, pp. 192-195, ISSN 2394-7926
204. Hasselquist R. J. (1981), Increasing manufacturing productivity using human factors principles, *Proceedings of the Human Factors Society-25th Annual Meeting*, vol. 25, no. 1, pp. 204-206, doi: 10.1177/107118138102500152

205. Hedge A. (2005), Physical Methods, Handbook of Human Factors and Ergonomics, In: Stanton N., Hedge A., Brookhuis K., Salas E., Hendrick H. W. (eds), *CRC Press*, ISBN 0-415-28700-6
206. Hedge A., Ray E. J. (2004), Effects of an electronic height-adjustable worksurface on self-assessed musculoskeletal discomfort and productivity among computer workers, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 48th Annual Meeting*, vol. 48, no. 8, pp. 1091-1095, doi: 10.1177/154193120404800803
207. Heilala J., Voho P. (2001), Modular reconfigurable flexible final assembly systems, *Assembly Automation*, vol. 21, no. 1, pp. 20-30, doi: 10.1108/01445150110381646
208. Hendrick H. (2001), Good Ergonomics is Good Economics, *Human Factors and Ergonomics Society*, Santa Monica, Santa Monica: HFES press
209. Hendrick H. W. (2003), Determining the cost-benefits of ergonomics projects and factors that lead to their success, *Applied Ergonomics*, vol. 34, no. 5, pp. 419-427, doi: 10.1016/S0003-6870(03)00062-0
210. Henneberg K. (2000), Principles of electromyography, In: J. D. Bronzino (ed.), *The Biomedical Engineering Handbook* (2nd edition), vol. 2, pp. 1-12, *CRC Press LLC*
211. Hermann M., Pentek T., Otto B. (2016), Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios, *49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, Koloa, Hawaii, USA, pp. 3928-3937, doi: 10.1109/HICSS.2016.488
212. Hernandez-Arellano J. L., Perez J. N. S., de la Torre A. (2015), Design proposal of an adjustable workstation for very short and very tall people, *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 5699-5706, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.796
213. Heydari A. N. (2010), EMG analysis of lumbar paraspinal muscles as a predictor of the risk of low-back pain, *European Spine Journal*, vol. 19, no. 7, pp. 1145-1152, doi: 10.1007/s00586-010-1277-1
214. Heydaryan S., Bedolla J. S., Belingardi G. (2018), Safety Design and Development of a Human-Robot Collaboration Assembly Process in the Automotive Industry, *Applied Sciences*, vol. 8, no. 3, doi: 10.3390/app8030344
215. Hockey G. R. J. (1997), Compensatory control in the regulation of human performance under stress and high workload: a cognitive-energetical framework, *Biological Psychology*, vol. 45, pp. 73-93, doi: 10.1016/s0301-0511(96)05223-4
216. Hogervorst M. A., Brouwer A. M., Van Erp J. B. (2014), Combining and comparing EEG, peripheral physiology and eye-related measures for the assessment of mental workload, *Frontiers in Neuroscience*, vol. 8, 322, doi: 10.3389/fnins.2014.00322
217. Holm A., Lukander K., Korpela J., Sallinen M., Müller K. M. I. (2009), Estimating Brain Load from the EEG, *Scientific World Journal*, vol. 14, pp. 639-665, doi: 10.1100/tsw.2009.83
218. Homan R. W. (1988), The 10-20 electrode system and cerebral location, *American Journal of EEG Technology*, vol. 28, no. 4, pp. 269-279, doi: 10.1080/00029238.1988.11080272
219. Hunter A. M., St Clair Gibson A., Lambert M. I., Nobbs L., Noakes T. D. (2003), Effects of supramaximal exercise on the electromyographic signal, *British Journal of Sports Medicine*, vol. 37, no. 4, pp. 296-299, doi: 10.1136/bjism.37.4.296

220. Hussain T. (2004), Musculoskeletal symptoms among truck assembly workers, *Occupational Medicine*, vol. 54, no. 8, pp. 506-512, doi: 10.1093/occmed/kqh087
221. Ilić A. (2000), Bezbednost i zdravlje na radu, *Beosing*, Beograd
222. Imada A. S. (1990), Ergonomics influencing management behaviour, *Ergonomics*, vol. 33, no. 5, pp. 621-629, doi: 10.1080/00140139008927172
223. Infantolino Z. P., Miller G. A. (2014), Psychophysiological Methods in Neuroscience, In Biswas-Diener R., Diener E. (Eds), *Noba textbook series: Psychology*. Champaign, IL: DEF publishers
224. ISO 6385-2016; Ergonomics Principles in the Design of Work Systems, *International Standard Organization (ISO)*: Geneva, Switzerland, 2016
225. Ivanjac M., Luković S., Mišljenović D., (2006), Bezbednost i zdravlje na radu-sindikalni priručnik, *UGS Nezavisnost*, Beograd
226. Jackson M. (2011), How to improve the use of industrial robots in lean manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Technology Management*, vol. 22, no. 7, pp. 891-905, doi: 10.1108/17410381111160951
227. Jacob D. (2017), Quality 4.0 impact and strategy handbook: Getting digitally connected to transform quality management, *LNS Research: Cambridge, MA, USA*
228. Jahncke H., Hygge S., Halin N., Green A. M., Dimberg K. (2011), Open-plan office noise: Cognitive performance and restoration, *Journal of Environmental Psychology*, vol. 31, no. 4, pp. 373-382, doi: 10.1016/j.jenvp.2011.07.002
229. Jarosz E. (1996), Determination of the workspace of wheelchair users, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 17, no. 2, pp. 123-133, doi: 10.1016/0169-8141(95)00044-5
230. Javaid M. H. (2021), Significance of Quality 4.0 towards comprehensive enhancement in manufacturing sector, *Sensors International*, vol. 2, pp. 100-109, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100109
231. Jones T., Kumar S. (2004), Six years of injuries and accidents in the sawmill industry of Alberta, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 33, no. 5, pp. 415-427
232. Jonsson B. G. (1988), Disorders of the cervicobrachial region among female workers in the electronics industry: a two-year follow up, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 3, no. 1, pp. 1-12, doi: 10.1016/0169-8141(88)90002-9
233. Jorgen A., Eklund E. (1995), Relationships between ergonomics and quality in assembly work, *Applied Ergonomics*, vol. 26, no. 1, pp. 15-20, doi: 10.1016/0003-6870(95)95747-N
234. Judith I. K., Burdorf A., Verbeek J. H. A. M., Monique H. W., Beek J. V. D., Juntura V. (1999), Epidemiological evidence on manual materials handling as a risk factor for back disorders: a systematic review, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 24, no. 4, pp. 389-404, doi: 10.1016/S0169-8141(99)00006-2
235. Jun J. H., Chang T. W., Jun S. (2020), Quality prediction and yield improvement in process manufacturing based on data analytics, *Processes*, vol. 8, no. 9, doi: 10.3390/pr8091068
236. Jung T. P., Makeig S., Stensmo M., Sejnowski T. J. (1997), Estimating alertness from the EEG power spectrum, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 60-69, doi: 10.1109/10.553713

237. Kantowitz B. H. (1988), Mental workload, *Human Factors Psychology*, Amsterdam, Elsevier
238. Karlqvist L., Leijon O., Härenstom A. (2003), Physical demands in working life and physical capacity, *European Journal of Applied Physiology*, vol. 89, no. 6, doi: 10.1007/s00421-003-0832-4
239. Karlsson S., Gerdle B. (2001), Mean frequency and signal amplitude of the surface EMG of the quadriceps muscles increase with increasing torque—a study using the continuous wavelet transform, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol.11, no. 2, pp. 131-140, doi: 10.1016/S1050-6411(00)00046-8
240. Kartali A., Janković M. M., Gligorijević I., Mijović P., Mijović B., Chiara Leva M. (2019), Real-time mental workload estimation using EEG, *Human Mental Workload: Models and Applications: Third International Symposium, H-WORKLOAD 2019*, Rome, Italy, pp. 20-34, doi: 10.1007/978-3-030-32423-0_2
241. Karthikeyan G. R., Balaguhan B., Mathanmohan A., Deepak V., Indrapriyadharshini K., Devar M. N. (2022), Insights into knowledge, attitude and perception about dental ergonomics and work-related musculo skeletal disorders (MSD) among dental professionals at Chengalpet District, Tamil Nadu, India: a cross-sectional study, *International Journal of Occupational Safety and Health*, vol. 12, no. 1, pp. 1-7
242. Karwowski W. (1991), Complexity, fuzziness and ergonomic incompatibility issues in the control of dynamic work environments, *Ergonomics*, vol. 34, no. 6, pp. 671-686, doi: 10.1080/00140139108967345
243. Katmah R. M. (2021), Stress Management Using Physiological Signals and Audio Stimulation, master thesis
244. Keren N., Mills T. R., Freeman S. A., Shelley II M.C. (2009), Can level of safety climate predict level of orientation toward safety in a decision making task?, *Safety Science*, vol. 47, no. 10, pp. 1312-1323, doi: 10.1016/j.ssci.2009.01.009
245. Kester J. (2013), A lean look at ergonomics, *Industrial Engineer*, vol. 45, no. 3, pp. 28-32
246. Khan M., Pope-Ford R. (2015), Improving and Modifying the Design of Workstations within a Manufacturing Environment, *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 4927-4934, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.631
247. Khan S., Mohan T. R., Abed A. A., Bhumik A. (2020), Posture Related Musculoskeletal Disorders (MSDs) among Computer Users in Higher Education Sectors of Malaysia, *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, vol. 16, pp. 71-78, ISSN: 1675-8544
248. Kim W., Lee J., Peternel L., Tsagarakis N., Ajoudani A. (2018), Anticipatory Robot Assistance for the Prevention of Human Static Joint Overloading in Human-Robot Collaboration, *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 68-75, doi: 10.1109/LRA.2017.2729666
249. Kim W., Lorenzini M., Balatti P., Nguyen P. D. H., Pattacini U., Tikhanoff V., Peternel L., Fantacci C., Natale L., Metta G. (2019), Adaptable Workstations for Human-Robot Collaboration: A Reconfigurable Framework for Improving Worker Ergonomics and Productivity, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 26, no. 3, pp.14-26, doi: 10.1109/MRA.2018.2890460

250. Knaflitz M., Merletti R., De Luca C. J. (1990), Inference of motor unit recruitment order in voluntary and electrically elicited contractions, *Journal of Applied Physiology*, vol. 68, no. 4, pp. 1657-1667, doi: 10.1152/jappl.1990.68.4.1657
251. Kohlmorgen J., Dornhege G., Braun M., Blankertz B., Müller K. R., Curio G., Hagemann K., Bruns A., Schrauf M., Kincses W. (2007), Improving human performance in a real operating environment through real-time mental workload detection, In: Dornhege G., del Millán J., Hinterberger T., McFarland D. J., Müller K. R. (Eds.), *Toward Brain Computer Interfacing*, pp. 409-422, doi: 10.7551/mitpress/7493.003.0031
252. Kolus A., Wells R., Neumann P. (2018), Production quality and human factors engineering: A systematic review and theoretical framework, *Applied Ergonomics*, vol. 73, pp. 55-89, doi:10.1016/j.apergo.2018.05.010
253. Konrad P. (2005), *The ABC of EMG-A practical introduction to kinesiological electromyography*, Noraxon INC, USA
254. Kosch T., Funk M., Schmidt A., Chuang L. L. (2018), Identifying cognitive assistance with mobile electroencephalography: A case study with in-situ projections for manual assembly, *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, vol. 2, pp. 1-20, doi: 10.1145/3229093
255. Kramer A., Parasuraman R. (2007), Neuroergonomics: Applications of neuroscience to human factors. In Cacioppo J. T., Tassinary L. G., Berntson G. G., (Eds.), *Handbook of psychophysiology*, 3rd edition, pp. 704-722, Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9780511546396.030
256. Kumar P., Maiti J., Gunasekaran A. (2018), Impact of quality management systems on firm performance, *International Journal Quality and Reliability Management*, vol. 35, no. 5, pp. 1034-1059, doi: 10.1108/IJQRM-02-2017-0030
257. Kuorinka I., Jönsson B., Kilbom A., Vinterberg H., Biering-Sorensen F., Andersson G., Jørgensen K. (1987), Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms, *Applied Ergonomics*, vol. 18, no. 3, pp. 233-237; doi: 10.1016/0003-6870(87)90010-x
258. Kurillo G., Han J. J., Abresch R. T., Nicorici A., Yan P., Bajcsy R. (2012), Development and application of stereo camera-based upper extremity workspace evaluation in patients with neuromuscular diseases, *PloS one*, vol. 7, no. 9, doi: 10.1371/journal.pone.0045341
259. Lansdown T. C., Deighan C., Brotherton C. (2007), *Health and safety in the small to medium sized enterprise, Psychosocial Opportunities for Intervention*, Health and Safety Executive, London
260. Larsson S. E., Larsson R., Zhang Q., Cai H., Ake Oberg P. (1995), Effects of psychophysiological stress on trapezius muscles blood flow and electromyography during static load, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 71, no. 6, pp. 493-498, doi: 10.1007/BF00238550
261. Lasota A. M., Hankiewicz K. (2016), Assessment of risk to work-related musculoskeletal disorders of upper limbs at welding stations, *International Symposium on Occupational Safety and Hygiene-SHO 2016*, pp.138-140
262. Ledda A., Palomba R. (2020), Innovative Wearable Systems for Improving Workers' Safety, In: Ahram, T., Taiar, R., Colson, S., Choplin, A. (eds) *Human Interaction and Emerging Technologies, IHET 2019, Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1018, pp. 332-337, Springer, Cham, doi: 10.1007/978-3-030-25629-6_51

263. Lemasters G. K., Atterbury M. R., Booth-Jones A. D., Bhattacharya A., Ollila-Glenn N., Forrester C., Forst L. (1998), Prevalence of work related musculoskeletal disorders in active union carpenters, *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 55, no. 6, pp. 421-427, doi: 10.1136/oem.55.6.421
264. Leskova A. (2014), Designing of manual workstation structure with emphasis on ergonomics, *Bulletin of Engineering Tome*, vol. 7, no. 4, pp. 41-46, ISSN: 2067-3809
265. Liao C. Y., Chen R. C., Tai S. K. (2018), Emotion stress detection using EEG signal and deep learning technologies, *2018 IEEE International Conference on Applied System Invention (ICASI)*, Chiba, Japan, pp. 90-93, doi: 10.1109/ICASI.2018.8394414
266. Liao M. H., Drury C. G. (2000), Posture, discomfort and performance in a VDT task, *Ergonomics*, vol. 43, no. 3, pp. 345-359, doi: 10.1080/001401300184459
267. Liao Y. Y., Ryu K. (2020), Task Allocation in Human-Robot Collaboration (HRC) Based on Task Characteristics and Agent Capability for Mold Assembly, *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 179-186, doi: 10.1016/j.promfg.2020.10.026
268. Lin L., Drury C. G., Kim S. W. (2001), Ergonomics and quality in paced assembly lines, *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, vol. 11, no. 4, pp. 377-382
269. Lin R. T., Chan C. C. (2007), Effectiveness of workstation design on reducing musculoskeletal risk factors and symptoms among semiconductor fabrication room workers, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 37, no. 1, pp. 35-42, doi: 10.1016/j.ergon.2006.09.015
270. Lindblom J., Thorvald P. (2014), Towards a framework for reducing cognitive load in manufacturing personnel, In: Stanney K., Hale K. S., (eds) *Advances in Cognitive Engineering and Neuroergonomics, AHFE (2019) International Conference*, vol 7., doi: 10.54941/ahfe100234
271. Linton S. J. (2000), A review of psychological risk factors in back and neck pain, *Spine*, vol. 25, no. 9, pp. 1148-1156, doi: 10.1097/00007632-200005010-0001
272. Liu J., Sheng Y., Liu H. (2019), Corticomuscular coherence and its applications: a review, *Frontiers in human neuroscience*, vol. 13, doi: 10.3389/fnhum.2019.00100
273. Loch F., Quint F., Brishtel I. (2016), Comparing video and augmented reality assistance in manual assembly, *12th International Conference on Intelligent Environments*, London, UK, pp. 147-150, doi: 10.1109/IE.2016.31.
274. Loft S., Bowden V., Braithwaite J., Morrell D., Huf S., Durso F. (2014), Situation awareness measures for simulated submarine track management, *Human Factors*, vol. 57, no. 2, doi: 10.1177/0018720814545515
275. Lomax M., Tasker L., Bostanci O. (2015), An electromyographic evaluation of dual role breathing and upper body muscles in response to front crawl swimming, *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, vol. 25, no. 5, pp. 472-478, doi: 10.1111/sms.12354
276. Longo F., Mirabelli G. (2009), Effective Design of an Assembly Line using Modeling & Simulation, *International Journal of Simulation*, vol. 3, pp. 50-60, doi: 10.1057/jos.2008.18

277. Lu C. S., Tsai C. L. (2008), The effects of safety climate on vessel accidents in the container shipping context, *Accident Analysis and Prevention*, vol. 40 , no. 2, pp. 594-601, doi: 10.1016/j.aap.2007.08.015
278. Lu J. M., Twu L. J., Wang M. J. J. (2016), Risk assessments of work-related musculoskeletal disorders among the TFT-LCD manufacturing operators, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 52, pp. 40-51, doi: 10.1016/j.ergon.2015.08.004
279. Luijckx R., Hermens H. J., Bodar L., Vossen C. J., Os J. V. Lousberg R. (2014), Experimentally induced stress validated by EMG activity, *PLoS one*, vol. 9, no. 4, doi: 10.1371/journal.pone.0095215
280. Luopajarvi T. K. (1979), Prevalence of tenosynovitis and other injuries of the upper extremities in repetitive work, *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, vol. 5, no. 3, pp. 48-55
281. Lysaght R. J., Hill S. G., Dick A. O., Plamondon B., Linton P. M. (1989), Operator workload: comprehensive review and evaluation of operator workload methodologies, *U.S. Army Research Institute for the Behavioural and Social Sciences*, Fort Bliss, Texas, doi: 10.21236/ada212879
282. Mačužić I., Đapan M. (2016), *LEAN koncept u upravljanju proizvodnjom*, monografija, *Fakultet inženjerskih nauka*, Kragujevac, ISBN 978-86-6335-035-9
283. Mahatme C., Mahakalkar S., Pradhan V., Sonwane S. (2014), A path for horizing your innovative work ergonomic analysis and workstation design for automation in steel industry, *International Journal of Pure and Applied Research in Engineering and Technology*, vol. 2, no. 9, pp. 390-401
284. Maluf K. S., Enoka R. M. (2005), Task failure during fatiguing contractions performed by humans, *Journal of Applied Physiology*, vol. 99, no. 2, pp. 389-396, doi: 10.1152/jappphysiol.00207.2005
285. Marković K. (2022), *Unapređenje bezbednosti i zdravlja na radu primenom fizičke ergonomije*, Kragujevac
286. Mathiassen S. E. (1993), The influence of exercise/rest schedule on the physiological and psychophysical response to isometric shoulder-neck exercise, *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, vol. 67, no. 6, pp. 528-539, doi: 10.1007/BF00241650
287. Mathiassen S. E., Winkel J., Hägg G. M. (1995), Normalization of surface EMG amplitude from the upper trapezius muscle in ergonomic studies-A review, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 5, no. 4, pp. 197-226, doi: 10.1016/1050-6411(94)00014-x
288. Mattsson S., Partini J., Fast-Berglund Å. (2016), Evaluating four devices that present operator emotions in real-time, *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 524-528, ISSN 2212-8271
289. Mc Atamney L., Corlett E. N. (1993), RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders, *Applied Ergonomics*, vol. 24, no. 2, pp. 91-99, doi: 10.1016/0003-6870(93)90080-s
290. Mc Lean L., Tingley M., Scott R. N., Rickards J. (2001), Computer terminal work and the benefit of microbreaks, *Applied Ergonomics*, vol. 32, no. 3, pp. 225-237, doi: 10.1016/s0003-6870(00)00071-5

291. Mehlum I. S. (2009), Self-reported versus expert-assessed work-relatedness of pain in the neck, shoulder and arm, *Scandinavian journal of work, environment & health*, pp. 222-232, doi:10.5271/sjweh.1327
292. Mehta R. K. (2016), Integrating Physical and Cognitive Ergonomics, *IIE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, vol. 4, no. 2-3, pp. 83-87, doi: 10.1080/21577323.2016.1207475
293. Mehta R. K., Parasuraman R. (2013a), Neuroergonomics: a review of applications to physical and cognitive work, *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 7, 889, doi: 10.3389/fnhum.2013.00889
294. Mehta R. K., Parasuraman, R. (2013b), Effects of mental fatigue on the development of physical fatigue A neuroergonomic approach, *Human Factors*, vol. 54, no. 4, pp. 645-656, doi: 10.1177/0018720813507279
295. Melin B., Lundberg U., Söderlund J. Granqvist M. (1999), Psychological and physiological stress reactions of male and female assembly workers: a comparison between two different forms of work organization, *Journal of Organizational Behavior*, vol. 20, no. 1, pp. 47-61, doi: 10.1002/(SICI)1099-1379(199901)20:1<47::AID-JOB871>3.0.CO;2-F
296. Merlo A., Campanini I. (2010), Technical aspects of surface electromyography for clinicians, *The Open Rehabilitation Journal*, vol. 3, no.1, pp., 98-109, doi: 10.2174/1874943701003010098
297. Mijović P., Ković V., De Vos M., Mačuzić I., Jeremić B., Gligorijević I. (2016), Benefits of Instructed Responding in Manual Assembly Task: An ERP Approach, Trends in Neuroergonomics, *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 10, 171, doi: 10.3389/fnhum.2016.00171
298. Mijović P., Ković V., De Vos M., Mačuzić I., Todorović P., Jeremić B., Gligorijević I. (2016), Towards Continuous and Real-Time Attention Monitoring at Work: Reaction Time versus Brain Response, *Ergonomics*, vol. 60, no. 2, pp. 241-254, doi: 10.1080/00140139.2016.1142121
299. Mijović P., Ković V., Mačuzić I., Todorović P., Jeremić B., Milovanović M., Gligorijević I. (2015), Do Micro-Breaks Increase the Attention Level of an Assembly Worker? An ERP Study, *Procedia Manufacturing*, vol. 3, pp. 5074-5080, doi: 10.1016/j.promfg.2015.07.521
300. Milea A., Cioca L. I. (2024), Work evolution and safety and health at work in Industry 4.0/Industry 5.0, *MATEC Web of Conferences*, vol. 389, doi: 10.1051/mateconf/202438900074
301. Molinari F. K. (2006), Electrical manifestations of muscle fatigue during concentric and eccentric isokinetic knee flexion-extension movements, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 53, no. 7, pp. 1309-1316, doi: 10.1109/TBME.2006.873680
302. Mossa G., Boenzi F., Digiesi S., Mummolo G., Romano V. A. (2016), Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model, *International Journal of Production Economics*, vol. 171, no. 4, pp. 471-477, ISSN 0925-5273, doi:10.1016/j.ijpe.2015.06.017
303. Muhundhan M. (2013), Improved work station design for improved productivity, *International Journal of Scientific Engineering and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 225-227

304. Murata A., Uetake A., Takasawa Y. (2005), Evaluation of mental fatigue using feature parameter extracted from event-related potential, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 35, no. 8, pp. 761-770, doi: 10.1016/j.ergon.2004.12.003
305. Neumann W. P. (2004), Production Ergonomics: Identifying and Managing Risk in the Design of High Performance Work Systems, *Doctoral Thesis, Ergonomics and Aerosol Technology, Department of Design Sciences, Faculty of Engineering, Lund University*
306. Neumann W. P., Dul J. (2010), Human factors: Spanning the gap between OM and HRM, *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 30, no. 9-10, pp. 923-950, doi: 10.1108/01443571011075056
307. Neumann W. P., Kihlberg S., Medbo P., Mathiassen S. E., Winkel J. (2002), A case study evaluating the ergonomic and productivity impacts of partial automation strategies in the electronics industry, *Journal of Production Research*, vol. 40, no. 16. pp. 4059-4075, doi: 10.1080/00207540210148862
308. Nielsen I. E., Ngoc Anh D. D., Zbigniew A. B., Mukund N. J. (2017), Material supply scheduling in a ubiquitous manufacturing system, *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*, vol. 45, pp. 21-33, doi: 10.1016/j.rcim.2016.08.009
309. Norros L. (2014), Developing human factors/ergonomics as a design discipline, *Applied Ergonomics*, vol. 45, no. 1, pp. 61-71, doi: 10.1016/j.apergo.2013.04.024
310. Nunes I., Machado V. C. (2007), Merging Ergonomic Principles into Lean Manufacturing, *Industrial Engineering Research Conference*, pp. 19-23
311. Nur N. M., Md Dawal S. Z., Dahari M. (2014), The Prevalence of Work Related Musculoskeletal Disorders Among Workers Performing Industrial Repetitive Tasks in the Automotive Manufacturing Companies, *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Bali, Indonesia, January 7-9
312. Ohlsson K. A. (1989), Self-reported symptoms in the neck and upper limbs of female assembly workers: impact of length of employment, work pace, and selection, *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, vol. 15, no. 1, pp. 75-80, doi: 10.5271/sjweh.1879
313. Ohlsson K. A. (1995), Repetitive industrial work and neck and upper limb disorders infemales, *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 27, no. 5, pp. 731-747, doi:10.1002/ajim.4700270508
314. Ostensvik T., Veiersted K. B., Nilson P. (2009), Association between numbers of long periods with sustained low-level trapezius muscle activity and neck pain, *Ergonomics*, vol. 52, no. 12, pp. 1556-1567, doi: 10.1080/00140130903199889
315. Oswald A. J., Proto E., Sgroi D. (2015), Happiness and productivity, *Journal of Labor Economics*, vol. 33, no. 4, pp. 789-822
316. Otto A., Scholl A. (2011), Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, vol. 212, no. 2, pp. 277-286, doi: 10.1016/j.ejor.2011.01.056
317. Palomba I., Gualtieri L., Rojas R., Rauch E., Vidoni R., Ghedin A. (2021), Mechatronic Re-Design of a Manual Assembly Workstation into a Collaborative One for Wire Harness Assemblies, *Robotics 2021*, vol. 10, no. 43, doi: 10.3390/robotics10010043
318. Pankok J. C., Zahabi M., Zhang W., Choi I., Liao Y. F., Chang S. N., David K. (2017), The effects of interruption similarity and complexity on performance in asimulated visual-

- manual assembly operation, *Applied ergonomics*, vol. 59, pp. 94-103, doi: 10.1016/j.apergo.2016.08.022
319. Parasuraman R. (2003), Neuroergonomics: research and practice, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 4, no. 1-2, pp. 5-20, doi: 10.1080/14639220210199753
320. Parasuraman R. (2011), Neuroergonomics brain, cognition, and performance at work, *Current Directions in Psychological Science*, vol. 20, no. 3, pp. 181-186, doi: 10.1177/0963721411409176
321. Parasuraman R., Wilson G. F. (2008), Putting the brain to work: Neuroergonomics past, present, and future, *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, vol. 50, no. 3, pp. 468-474, doi: 10.1518/001872008X288349
322. Parasuraman, R., Rizzo, M. (2006). Neuroergonomics: The Brain at Work, Oxford University Press, doi: 10.1093/acprof:oso/9780195177619.001.0001
323. Park M. H., Kim G. H., Cho J. H. (2015), Risk factors for musculoskeletal symptoms among Korean broadcast actors, *Annals of global health*, vol. 81, no. 4, pp. 475-481, doi: 10.1016/j.aogh.2015.06.001
324. Parra P. S., Calleros O. L., Ramirez- Serrano A. (2020), Human-Robot Collaboration Systems: Components and Applications, *7th International Conference of Control Systems and Robotics (CDSR'20)*, Virtual Conference, vol. 150, pp. 1-9, doi: 10.11159/cdsr20.150
325. Patrizi A., Pennestrì E., Valentini P. P. (2015), Comparison between low-cost markerless and high-end marker-based motion capture systems for the computer-aided assessment of working ergonomics, *Ergonomics*, vol. 59, no. 1, pp. 1-8, doi: 10.1080/00140139.2015.1057238
326. Pearce M., Mutlu B., Shah J., Radwin R. (2018), Optimizing Makespan and Ergonomics in Integrating Collaborative Robots into Manufacturing Processes, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 1772-1784, doi: 10.1109/TASE.2018.2789820
327. Pérez L., Rodríguez-Jiménez S., Rodríguez N., Usamentiaga R., García D. F., Wang L. (2020), Symbiotic human- robot collaborative approach for increased productivity and enhanced safety in the aerospace manufacturing industry, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 106, pp. 851-863, doi: 10.1007/s00170-019-04638-6
328. Petreanu V., Seracin A. M. (2017), Risk Factors for Musculoskeletal Disorders Development: Hand-Arm Tasks, *Repetitive Work, National Research-Development for Health and Safety*, Bucharest, Romania
329. Pincus T., Burton A. K., Vogel S., Field A. P. (2002), A systematic review of psychological factors as predictors of chronicity/disability in prospective cohorts of low back pain, *Spine*, vol. 27, no. 5, pp. 109-120, doi: 10.1097/00007632-200203010-00017
330. Pini F., Ansaloni M., Leali F. (2016), Evaluation of Operator Relief for an Effective Design of HRC Workcells, *Proceedings of the 21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation-ETFA 2016*, Berlin, Germany, pp. 1-6, doi: 10.1109/ETFA.2016.7733526
331. Pinzone M., Albè F., Orlandelli D., Barletta I., Berlin C., Johansson B., Taisch M. (2020), A framework for operative and social sustainability functionalities in human-centric cyber-physical production systems, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 139, 105132, doi: 10.1016/j.cie.2018.03.028

332. Pizzagalli D. A. (2007), Electroencephalography and high-density electrophysiological source localization, *Handbook of Psychophysiology*, edited by Cacioppo J. T., Louis G., Brentson, pp. 56-84, doi: 10.1017/CBO9780511546396.003
333. Plamondon A., Delisle A., Bellefeuille S., Denis D., Gagnon D., Larivière C., IRSST MMH Research Group (2014), Lifting strategies of expert and novice workers during a repetitive palletizing task, *Applied Ergonomics*, vol. 45, no. 3, pp. 471-481, doi: 10.1016/j.apergo.2013.06.008
334. Polak-Sopinska A., Wisniewski Z., Walaszczyk A., Maczewska A., Sopinski P. (2020), Impact of industry 4.0 on occupational health and safety, *Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control: Proceedings of the AHFE 2019 International Conference on Human Aspects of Advanced Manufacturing*, and the AHFE International Conference on Advanced Production Management and Process Control, July 24-28, 2019, Washington DC, USA 10, Springer International Publishing, pp. 40-52
335. Pope A.T., Bogart E. H. Bartolome D. S. (1995), Biocybernetic system evaluates indices of operator engagement in automated task, *Biological Psychology*, vol. 40, pp. 187-195, doi: 10.1016/0301-0511(95)05116-3
336. Porter W., Gallagher S., Torma- Krajewski J. (2010), Analysis of applied forces and electromyography of back and shoulder muscles when performing a simulated hand scaling task, *Applied Ergonomics*, vol. 41, no. 3, pp. 411-416, doi: 10.1016/j.apergo.2009.09.004
337. Potvin J. R. (2008), Occupational spine biomechanics: a journey to the spinal frontier, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 18, no. 6, pp. 891-899, doi: 10.1016/j.jelekin.2008.07.004
338. Pourmohammadi S., Maleki A. (2020), Stress detection using ECG and EMG signals: A comprehensive study, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, vol. 193, 105482, doi: 10.1016/j.cmpb.2020.105482
339. Punnett L., Fine L. J. , Keyserling W. M., Herrin G. D., Chaffin D. B. (1991), Back disorders and nonneutral trunk postures of automobile assembly workers *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, vol.17, no. 5, pp 337-346, doi: 10.5271/sjweh.1700
340. Punnett L., Wegman D. H. (2004), Work-related musculoskeletal disorders: the epidemiologic evidence and the debate, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 14, no. 1, pp. 13-23, doi: 10.1016/j.jelekin.2003.09.015
341. Pušica M., Caiazzo C., Djapan M., Savković M., Leva M. C. (2023), Visual Mental Workload Assessment from EEG in Manual Assembly Task, *Proceedings of the 33rd European Safety and Reliability Conference*, Southampton, UK, pp. 3-7, doi: 10.3850/978-981-18-8071-1_P667-cd
342. Quiroz J. C., Aquino D. M., Rodrigue E. A., Montoya M. F. (2021), Redesign of workspace through an ergo-lean model to reduce musculoskeletal disorders in SMEs in the clothing accessories sector, *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 69, no.12, pp. 163-174, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V69I12P219
343. Qutubuddin S. M., Hebbal S. S, Kumar A. C. S. (2013), An ergonomic study of work related musculoskeletal disorder risks in Indian Saw Mills, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 7, no. 5, pp. 7-13, doi: 10.6084/M9.FIGSHARE.1141687

344. Qutubuddin S. M., Hebbal S. S., Kumar A. C. S. (2012), Computer Assisted System for Enhancing the Application of Ergonomics in Manufacturing Systems, *International Journal of Ergonomics*, vol. 2, no. 1, pp. 1-11
345. Rabby M. M. K., Khan M. A., Karimodini A., Xiaochun J. S. (2019), An Effective Model for Human Cognitive Performance within a Human-Robot Collaboration Framework, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, Bari, Italy, pp. 3872-3877, doi: 10.1109/SMC.2019.8914536.
346. Rajesh R., Srinath R. (2016), Review of Recent Developments in Ergonomic Design and Digital Human Models, *Industrial Engineering and Management*, vol. 5, no. 2, pp 1-7, doi: 10.4172/2169-0316.1000186
347. Raufi B., Longo L. (2022), An Evaluation of the EEG alpha-to-theta and theta-to-alpha band Ratios as Indexes of Mental Workload, *Frontiers in Neuroinformatics*, vol. 16, 10.3389/fninf.2022.861967
348. Reese C. D. (2018), Occupational Health and Safety Management, a Practical Approach, 3rd ed., *CRC PRESS*, Boca Raton, doi: 10.1201/9781351228848
349. Resnick M. L., Zanotti A. (1997), Using ergonomics to target productivity improvements, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 33, no. 1-2, pp. 185-188, doi:10.1016/S0360-8352(97)00070-3
350. Rivera-Rodriguez A. J., Hundt A., Hoonakker P., Holden R., Gurses A. (2014), Human factors systems approach to healthcare quality and patient safety, *Applied Ergonomics*, vol. 45, no.1, pp. 14-25, doi: 10.1016/j.apergo.2013.04.023
351. Roelen C. A. M., Schreuder K. J., Koopmans P. C., Groothoff J. W. (2008), Perceived job demands relate to self-reported health complaints, *Occupational Medicine*, vol. 58, no. 1, pp. 58-63, doi: 10.1093/occmed/kqm134
352. Roelofs A., Straker L. (2002), The experience of musculoskeletal discomfort amongst bank tellers who just sit, just stand or sit and stand at work, *Ergonomics*, vol. 14, no. 2, pp. 11-29
353. Rogé J., Pebayle, T., Muzet, A. (2001), Variations of the level of vigilance and of behavioural activities during simulated automobile driving, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 33, no. 2, pp. 181-186, doi: 10.1016/s0001-4575(00)00029-4
354. Romero D., Gaiardelli P., Powell D., Wuest T., Thürer M. (2019), Rethinking jidoka systems under automation & learning perspectives in the digital lean manufacturing world, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 899-903, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.309
355. Roper K. O., Yeh, D. C. (2007), Ergonomic solutions for an aging workforce, *Journal of Facilities Management*, vol. 5, no. 3, pp. 172-178, doi: 10.1108/14725960710775054
356. Roquelaure Y. (2016), Evaluation of ergonomic physical risk factors in a truck manufacturing plant: case study in SCANIA production Angers, *Industrial Health*, vol. 54, no. 2, pp. 163-176, doi: 10.2486/indhealth.2015-0055
357. Ruiz Castro P., Högberg D., Ramsen H., Bjursten J., Hanson L. (2018), Virtual simulation of human-robot collaboration workstations. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018), Volume V: Human Simulation and Virtual Environments, Bagnara, S., Tartaglia, R., Albolino. S., Alexander, T., Fujita, Y. (Eds.), pp. 250-261, ISBN 978-3-319-96076-0 (print), doi: 10.1007/978-3-319-96077-7

358. Russell S. J., Winnemuller L., Camp J. E., Johnson P. W. (2007), Comparing the results of five lifting analysis tools, *Applied Ergonomics*, vol. 38, no. 1, pp. 91-97, doi: 10.1016/j.apergo.2005.12.006
359. Ryu K., Myung R. (2005), Evaluation of mental workload with a combined measure based on physiological indices during a dual task of tracking and mental arithmetic, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 35, pp. 991-1009, doi: 10.1016/j.ergon.2005.04.005
360. Sader S., Husti I., Daroczi M. (2022), A review of quality 4.0: Definitions, features, technologies, applications, and challenges, *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 33, no. 9-10, pp. 1164-1182, doi: 10.1080/14783363.2021.1944082
361. Sadrfaridpour B., Saeidi H., Wang Y. (2016), An Integrated Framework for Human-Robot Collaborative Assembly in Hybrid Manufacturing Cells, *Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, CASE 2016*, Fort Worth, TX, USA, 21–25 August 2016, IEEE Computer Society: Department of Mechanical Engineering, Clemson University, pp. 462-467, doi: 10.1109/COASE.2016.7743441
362. Sadrfaridpour B., Wang, Y. (2017), Collaborative assembly in hybrid manufacturing cells: an integrated framework for human-robot interaction, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 15, no. 3, pp. 1178-1192, doi: 10.1109/TASE.2017.2748386
363. Salunkhe O., Stensöta O., Åkerman M., Berglund Å. F., Alveflo P. A. (2019), Assembly 4.0: wheel hub nut assembly using a cobot, *9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control*, Berlin, pp. 1632-1637, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.434
364. Salvendy G. (2001), *Handbook of industrial engineering: technology and operations management*, 3rd edition, New York, NY, USA, Wiley Interscience, ISBN: 978-0471330578
365. Salvendy G. (2012), *Handbook of human factors and ergonomics*, 4th edition, United States: John Wiley & Sons, ISBN:978-0470528389
366. Sanchez-Lite A., Garcia-Garcia M. (2012), Simulation and ergonomics approach for service and manufacturing process improvement, *Key Engineering Materials*, 502, pp. 121-125, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.502.121
367. Sanders M. S., Mc Cormick E. J. (1993), *Human Factors in Engineering and Design*, 7th Edn, New York, NY: McGraw-Hill Education, ISBN: 978-0070549012
368. Sanei S., Chambers J. A. (2013), *EEG signal processing*, John Wiley & Sons, ISBN: 978-1-118-69123-6
369. Santos J., Silva F. J. G., Pinto G., Baptista A. (2019), Lean and Ergonomics: How to increase the productivity improving the wellbeing of the workers, *Lean Manufacturing: Implementation, Opportunities and Challenges*, Nova Science Publishers, New York, U.S.A, pp.189-224, ISBN: 978-1-53615-725-3
370. Sarter N., Sarter M. (2003), Neuroergonomics: Opportunities and challenges of merging cognitive neuroscience with cognitive ergonomics, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 4, no. 1-2, pp. 142-150, doi: 10.1080/1463922021000020882
371. Savioja P., Liinasuo M., Koskinen H. (2014), User experience: does it matter in complex systems?, *Cognition Technology & Work*, vol. 16, pp. 429-449, doi: 10.1007/s10111-013-0271-x

372. Savković M., Caiazzo C., Đapan M., Vukićević A., Pušica M., Mačužić I. (2022a), Development of Modular and Adaptive Laboratory Set-Up for Neuroergonomic and Human-Robot Interaction Research, *Frontiers in Neurorobotics*, vol.16, ISSN 1662-5218, doi: 10.3389/fnbot.2022.863637
373. Savković M., Đapan M., Mačužić I., Todorović P., Radenković M., Vukićević A., Mijović N. (2019), Barriers, challenges and opportunities to improve occupational health and safety management in small and medium enterprises in Serbia: case study approach, *13 th International quality conference-quality festival 2019*, Kragujevac, 29 May-1 June, pp. 369-377, ISBN 2620-2832
374. Savković M., Đapan M., Mačužić I., Vukićević A., Jovičić M. (2021a), Model for the occupational safety and health improvement in small and medium enterprises in Serbia, *International scientific conference ETIKUM 2021*, Novi Sad, 02-04 december, pp. 225-228, ISBN 978-86-6022-387-8
375. Savković M., Dašić M., Đapan M., Vukićević A., Mačužić I., Stefanović M. (2021b), Improving workplace safety using advanced industry 4.0 technologies, *International conference „industrial engineering and environmental protection“ IIZS 2021*, Zrenjanin, 07-08. oktober, pp. 545-552, ISBN 978-86-7672-348-5
376. Savković M., Komatina N., Caiazzo C., Đapan M. (2022b) Improving the quality of final product by Poka-Yoke system on assembly workstation: a case study, *8th international conference on industrial engineering - SIE 2022*, Belgrade, Serbia, September 29-30th, pp. 152-155, ISBN 978-86-6060-131-7
377. Savković M., Mijailović N., Caiazzo C., Đapan M., Vukićević A. (2022b), Advanced physical ergonomics and neuroergonomics research on an assembly workstation, *19 th International conference Man and working environment - OESEM 2022*, Niš, november 24-25
378. Savković M., Petrović M., Caiazzo C., Đapan M., Vukićević A. (2023b), Determine muscle strain of assembly workers by applying advanced EMG measurement, *Quality Festival Conference 2023*, Kragujevac, Serbia
379. Savković M., Pušica M., Caiazzo C., Mijailović N., Đapan M. (2023a), Investigating mental workload in assembly workstations: an integrated analysis of eeg and eye tracking, *International Scientific Conference ETIKUM 2023*, Novi Sad, Serbia
380. Scafà M., Papetti A., Brunzini A., Germani M. (2019), How to improve worker's well-being and company performance: A method to identify effective corrective actions, *Procedia CIRP 2019*, vol. 81, pp. 162-167
381. Schaub K., Caragnano G., Britzke B. Bruder R. (2013), The European Assembly Worksheet, *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, vol. 14, no. 6, pp. 616-639, doi: 10.1080/1463922X.2012.678283
382. Schleifer L. M., Spalding T. W., Kerick S. E., Cram J. R., Ley R., Hatfield B. D. (2008), Mental stress and trapezius muscle activation under psychomotor challenge: A focus on EMG gaps during computer work, *Psychophysiology*, vol. 45, no. 3, pp. 356-365, doi: 10.1111/j.1469-8986.2008.00645.x
383. Schneider E., Irastorza X., Copsey S. (2010), OSH in Figures: Work-Related Musculoskeletal Disorders in the EU, *European Agency for Safety and Health at work, Publications Office of the European Union*, Luxembourg, ISBN: ISBN 978-92-9191-261-2

384. Schwab K. (2016), *The Fourth Industrial Revolution*, Crown Publishing Group, New York, ISBN: 978-1524758868
385. Segning C. M., Ezzaidi H., da Silva, R. A., Ngomo S. (2021), A neurophysiological pattern as a precursor of work-related musculoskeletal disorders using EEG combined with EMG, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 18, no. 4, doi: 10.3390/ijerph18042001
386. Sek T. K., Low E., Saim H., Wan Zakaria W. N., Khialdin S. B. M., Isa H., Awad M. I., Soon C. F. (2017), A study on the ergonomic assessment in the workplace, *AIP Conference Proceedings*, vol. 1883, no. 1, 020034
387. Shah R., Ward P. T. (2003), Lean manufacturing: Context, practice bundles, and performance, *Journal of Operations Management*, vol. 21, no. 2, pp. 129-149, doi: 10.1016/S0272-6963(02)00108-0
388. Shair E. F., Ahmad S. A., Marhaban M. H., Mohd T. S. B., Abdullah A. R. (2017), EMG processing based measures of fatigue assessment during manual lifting, *BioMed Research International*, 3937254, doi: 10.1155/2017/3937254
389. Shikdar A. A., Sawaqed N. M. (2004), Ergonomics and occupational health and safety in the oil industry: a managers' response, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 47, no. 2-3, pp. 223-232, doi: 10.1016/j.cie.2004.07.004
390. Shikdar A., Garbie I. (2011), Development of a Smart Workstation for an Assembly Task, *Proceeding of the 2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 826-831
391. Shikdar A., Hadhrami M. (2007), Smart workstation design: An ergonomics and methods engineering approach, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, vol. 2, no. 4, pp. 363-374, doi: 10.1504/IJISE.2007.013184
392. Smith M. E., Gevins A., Brown H., Arati Karnik, Du R. (2001), Monitoring task loading with multivariate EEG measures during complex forms of human-computer interaction, *Human Factors*, vol. 43, no. 3, pp. 366-380, doi: 10.1518/001872001775898287
393. Smith R. T. (2003), Growing an ergonomics culture in manufacturing, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 217, no. 7, pp. 1027-1030, doi: 10.1243/09544050360686879
394. Snook S. H. (1985), Psychophysical acceptability as a constraint in manual working capacity, *Ergonomics*, vol. 28, no. 1, pp. 331-335, doi: 10.1080/00140138508963141
395. Sogaard K., Gandevia S. C., Todd G., Petersen N. T., Taylor J. L. (2006), The effect of sustained low-intensity contractions on supraspinal fatigue in human elbow flexor muscles, *Journal of Physiology*, vol. 573, pp. 511-523, doi: 10.1113/jphysiol.2005.103598
396. Sommerich C. M. (2000), Use of surface electromyography to estimate neck muscle activity, *Journal of Electromyography and Kinesiology*, vol. 10, no. 6, pp. 377-398, doi: 10.1016/s1050-6411(00)00033-x
397. Sørensen O., Holman D. (2014), A participative intervention to improve employee well-being in knowledge work jobs: a mixed-methods evaluation study, *Work Stress*, vol. 28, no. 1, pp. 67-86, doi: 10.1080/02678373.2013.876124
398. Spath D., Braun M., Meinken K. (2012), Human factors in manufacturing, *Handbook of Human Factors and Ergonomics*, ed. G. Salvendy, NJ: John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 1643-1666, doi: 10.1002/9781118131350

399. Sprigg C. A., Jackson P. R. (2006), Call centers as lean service environments: job-related strain and the mediating role of work design, *Journal of Occupational Health Psychology*, vol. 11, no. 2, pp. 197-212, doi: 10.1037/1076-8998.11.2.197
400. Stanton N. A., Hedge A., Brookhuis K., Salas E., Hendrick H. W. (2004), Handbook of human factors and ergonomics methods, CRC Press, Florida, ISBN 0-415-28700-6
401. Stipacek A., Grabner R. H., Neuper C., Fink A., Neubauer A. C. (2003), Sensitivity of human EEG alpha band desynchronization to different working memory components and increasing levels of memory load, *Neuroscience Letters*, vol. 353, no. 3, pp. 193-196, doi: 10.1016/j.neulet.2003.09.044
402. Stulen F. B., De Luca C. J. (1981), Frequency parameters of the myoelectric signal as a measure of muscle conduction velocity, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 28, no. 7, pp. 515-523, doi: 10.1109/TBME.1981.324738.
403. Suarjana I. W. G., Pomalingo M. F., Parhusip B. R. (2022), Penerapan Ergo-Mechanical Design Sebagai Upaya Peningkatan Kualitas Kesehatan Pekerja CV. Victorina, *Jurnal Abdimas Jatibara*, vol., no.1, pp. 73-82, doi: 10.29241/jaj.v1i1.1121
404. Suetta C., Aagaard P., Rosted A., Jakobsen A. K., Duus B., Kjaer M., Magnusson S. P. (2004), Training-induced changes in muscle CSA, muscle strength, EMG, and rate of force development in elderly subjects after long-term unilateral disuse, *Journal of Applied Physiology*, vol. 97, no. 5, pp. 1954-61, doi: 10.1152/jappphysiol.01307.2003
405. Sundelin G (1993), Patterns of electromyographic shoulder muscle fatigue during MTM-paced repetitive arm work with and without pauses, *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 64, no. 7, pp. 485-493, doi: 10.1007/BF00381096
406. Swift K. G. Booker J. (2013), *Manufacturing Process Selection Handbook*, 1st Edition, ISBN: 9780080993607
407. Szombathyová E., Kováč J. (2010), The usage of selected work activities studies in practice, *INERCATHEDRA*, no. 26, pp. 42-45, ISSN 1640-3622
408. Takala E. P. (2002), Static muscular load, an increasing hazard in modern information technology. *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, vol. 28, no. 4, pp. 211-213, doi: <https://doi.org/10.5271/sjweh.667>
409. Takala E. P., Pehkonen I., Forsman M., Hansson G. A., Mathiassen S. E., Neumann W. P., Sjøgaard G., Veiersted K. B., Westgaard R. H., Winkel J. (2010), Systematic evaluation of observational methods assessing biomechanical exposures at work, *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, vol. 36, pp. 3-24, doi: 10.5271/sjweh.2876
410. Temple R., Adams T. (2000), Ergonomic analysis of a multi-task industrial lifting station using the NIOSH method, *The Journal of Industrial Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 1-6
411. Tewari S., Vinay D. (2019), Musculoskeletal disorders amongst workers of glass manufacturing unit of Western Uttar Pradesh, *Journal of Applied and Natural Science*, vol. 11, no. 2, pp. 445-449, doi: 10.31018/jans.v11i2.2082
412. Thongpanja S., Phinyomark A., Phukpattaranont P., Limsakul C. (2013), Mean and median frequency of EMG signal to determine muscle force based on time-dependent power spectrum, *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 3, pp. 51-56, doi: 10.5755/j01.eee.19.3.3697

413. Thorvald P., Lindblom J. (2014), Initial development of a cognitive load assessment tool, *The 5th AHFE International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics*, Krakow, Poland. pp. 223-232, doi: 10.54941/ahfe100233
414. Thun J. H., Lehr C. B., Bierwirth M. (2011), Feel free to feel comfortable an empirical analysis of ergonomics in the German automotive industry, *International Journal of Production Economics*, vol. 133, no. 3, pp. 551-561, doi: 10.1016/j.ijpe.2010.12.017
415. Trimmel M., Fairclough S., Henning R. (2009), Psychophysiology in ergonomics, *Applied ergonomics*, vol. 40, no. 6, pp. 963-964, doi: 10.1016/j.apergo.2009.02.003
416. Troiano A., Naddeo F., Sosso E., Camarota G., Merletti R., Mesin, L. (2008), Assessment of force and fatigue in isometric contractions of the upper trapezius muscle by surface EMG signal and perceived exertion scale, *Gait & Posture*, vol. 28, no. 2, pp. 179-186, doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.04.002
417. Ulin S. S., Keyserling W. M. (2004). Case studies of ergonomic interventions in automotive parts distribution operations, *Journal of Occupational Rehabilitation*, vol. 14, no. 4, pp. 307-326, doi: 10.1023/B:JOOR.0000047432.07837.64
418. Vaidya R. D., Sontakke K. G., Ansari N. A. (2014), Ergonomics Evaluation of Body Posture of Worker In SSI, *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, vol. 1, no. 6, pp. 430-434
419. Valero E., Sivanathan A., Bosche F., M. Abdel-Wahab (2016), Musculoskeletal disorders in construction: A review and a novel system for activity tracking with body area network, *Applied Ergonomics*, vol. 54, pp.120-130, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2015.11.020>
420. Van A., Bram B., Klaas B., Wouter D., Davy D. Parmentier, Joao C. M., Biondi A., Saldien J., Vlerick P. (2020), Mobile pupillometry in manual assembly: A pilot study exploring the wearability and external validity of a renowned mental workload lab measure, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 75, 102891, doi: 10.1016/j.ergon.2019.102891
421. Vanderperren K. (2011), Improving data-driven EEG-fMRI analyses for the study of cognitive functioning, докторска дисертација, Faculty of Engineering, KU Leuven, Leuven, Belgium
422. Vayvay Ö., Erdinc O. (2008), Quality improvement through ergonomics methodology: conceptual framework and an application, *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 3, no. 3, pp. 311-324, doi: 10.1504/IJPQM.2008.017501
423. Vieira L., Balbinotti G., Varasquin A., Gontijo L. (2012), Ergonomics and Kaizen as strategies for competitiveness: a theoretical and practical in an automotive industry, *Work*, vol. 41, pp. 1756-1762, doi: 10.3233/WOR-2012-0381-1756
424. Vignais N., Miezal M., Bleser G., Mura K., Gorecky D., Marin F. (2013), Innovative system for real-time ergonomic feedback in industrial manufacturing, *Applied Ergonomics*, vol. 44, no. 4, pp. 566-574, doi: 10.1016/j.apergo.2012.11.008
425. Virpi K., Andreas H., Emilia O., Antti U., Kai P. (2019), Cognitive ergonomics for data analysis, Experimental study of cognitive limitations in adatabased judgement task, *Behaviour & Information Technology*, vol. 38, no. 10, pp. 1038-1047. doi:10.1080/0144929X.2019.1657181
426. Vysocky A., Novak P. (2016), Human-robot collaboration in industry, *MM Science Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 903-906, doi: 10.17973/MMSJ.2016_06_201611

427. Walder J., Karlin J., Kerk C. (2007), Integrated Lean Thinking & Ergonomics: Utilizing Material Handling Assist Device Solutions for a Productive Workplace, An MHIA White Paper, доступно на:
http://www.mhi.org/downloads/industrygroups/lmps/whitepapers/Integrating_Lean_Thinking.pdf (приступљено 21.06.2022)
428. Walker-Bone K., Cooper C. (2005), Hard work never hurt anyone: or did it? A review of occupational associations with soft tissue musculoskeletal disorders of the neck and upper limb, *Annals of the Rheumatic Diseases*, vol. 64, no. 10, pp. 1391-1396, doi: 10.1136/ard.2003.020016
429. Wallace J. C., Vodanovich S. J. (2003), Can accidents and industrial mishaps be predicted? Further investigation into the relationship between cognitive failure and reports of accidents, *Journal of Business and Psychology*, vol. 17, pp. 503-514, doi: 10.1023/A:1023452218225
430. Wang J., Sun Y., Sun S. (2020), Recognition of Muscle Fatigue Status Based on Improved Wavelet Threshold and CNN-SVM, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 207914-207922, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038422
431. Warner M. B. (1998), Acute traumatic injuries in automotive manufacturing, *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 34, no. 4, pp. 351-358, doi: 10.1002/(sici)1097-0274(199810)34:4<351::aid-ajim8>3.0.co;2-v
432. Wascher E., Heppner H., Hoffmann S. (2014), Towards the measurement of event-related EEG activity in real-life working environments, *International Journal of Psychophysiology*, vol. 91, no. 1, pp. 3-9, doi: 10.1016/j.ijpsycho.2013.10.006.
433. Wickens C. D., Mc Carley J. S. (2008), Applied Attention Theory, London, CRC Press, ISBN: ISBN 9780367533557
434. Wilks S., Mortimer, M., Nylén P. (2006), The introduction of sit-stand worktables aspects of attitudes, compliance and satisfaction, *Applied Ergonomics*, vol. 37, no. 3, pp. 359-365, doi: 10.1016/j.apergo.2005.06.007
435. Wilson G. C., Schlegel, R. E., Veltman J. A. (2004), Operator functional state assessment. Paris, FR, North Atlantic Treaty Organisation (NATO), *Research and Technology Organisation (RTO) I Symposium BP 25*, F-92201, Neuilly-sur-Seine Cedex, France.
436. Wongphati M., Osawa, H., and Imai, M. (2015), Gestures for manually controlling a helping hand robot, *International Journal of Social Robotics*, vol. 7, pp. 731-742, doi: 10.1007/s12369-015-0302-2
437. Wygant R. M., White B. E. Hunt D. (1993), Combining ergonomics and work measurement for job analysis, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 25, no. 1-4, pp. 423-426, doi: 10.1016/0360-8352(93)90311-K
438. Xu X., Lu Y., Vogel-Heuser B., Wang L. (2021), Industry 4.0 and Industry 5.0-Inception, conception and perception, *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 61, pp. 530-535, doi: 10.1016/j.jmsy.2021.10.006
439. Xu Z., Ko J., Cochran D., Jung M. (2012), Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 431-441, doi: 10.1016/j.cie.2011.10.008

440. Yeow J. A., Ng P. K., Tan K. S., Chin T. S., Lim W. Y. (2014), Effects of stress, repetition, fatigue and work environment on human error in manufacturing industries, *Journal of Applied Sciences*, vol. 14, no. 24, pp. 3464-34717, doi: 10.3923/jas.2014.3464.3471
441. Yeow P. H. P., Sen R. N. (2006), Productivity and quality improvements, revenue increment, and rejection cost reduction in the manual component insertion lines through the application of ergonomics, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 36, no. 4, pp. 367-377, <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.12.008>.
442. Yeow P. H. P., Sen, R. N. (2003), Quality, productivity, occupational health and safety and cost effectiveness of ergonomic improvements in the test workstations of an electronic factory, *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 32, no. 3, pp. 147-163, doi:10.1016/S0169-8141(03)00051-9
443. Young M. S., Brookhuis K. A., Wickens C. D., Hancock P. A. (2015), State of science: Mental workload in ergonomics, *Ergonomics*, vol. 58, no. 1, pp. 1-17, doi: 10.1080/00140139.2014.956151
444. Yusuff R. M. (2016), Ergonomics as a lean manufacturing tool for improvements in a manufacturing company, *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 581-588.
445. Zaeh M. F., Wiesbeck M., Stork S., Schubö A. (2009), A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations, *Production Engineering*, vol. 3, no. 4, pp. 489-496, doi: 10.1007/s11740-009-0171-3
446. Zanchettin A. M., Lotano E., Rocco P. (2019), Collaborative robot assistant for the ergonomic manipulation of cumbersome objects, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Macau, pp. 6729-6734, doi: 10.1109/IROS40897.2019.8968154
447. Zhang C., Yu X (2010), Estimating mental fatigue based on electroencephalogram and heart rate variability, *Polish Journal of Medical Physics and Engineering*, vol.16, pp. 67-84.
448. Zhang X., Krol L. R., Zander T. O. (2018), Towards task-independent workload classification: shifting from binary to continuous classification, *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Miyazaki, pp. 556-561, doi: 10.1109/SMC.2018.00104
449. Zhang X., Li H., Dong R., Lu Z., Li C. (2022), Electroencephalogram and surface electromyogram fusion-based precise detection of lower limb voluntary movement using convolution neural network-long short-term memory model, *Frontiers in Neuroscience*, vol. 16, doi: 10.3389/fnins.2022.954387
450. Zheng W. L., Lu, B. L. (2017), A multimodal approach to estimating vigilance using EEG and forehead EOG, *Journal of Neural Engineering*, vol. 14, no. 2, doi: 10.1088/1741-2552/aa5a98
451. Zhou Q., Fang D., Wang X. (2008), A method to identify strategies for the improvement of human safety behavior by considering safety climate and personal experience, *Safety Science*, vol. 46, no. 10, pp. 1406-1419, doi: 10.1016/j.ssci.2007.10.005
452. Zolotova M., Giambattista A. (2019), Designing cognitive ergonomics features of medical devices, aspects of cognitive interaction, *The Design Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 463-474, doi: 10.1080/14606925.2019.1595432

Интернет извори

1. A Brief History of Biosignal-Driven Art, доступно на: http://econtact.ca/14_2/ortiz_biofeedback.html (приступљено 18.02.2024)
2. Ambu Neuroline EMG Needle, доступно на: <https://www.smitmedical.com/project/ambu-neuroline-emg-needle/> (приступљено 11.06.2023)
3. Analysis and Biophysics of Surface EMG for Physiotherapists and Kinesiologists: Toward a Common Language With Rehabilitation Engineers, доступно на: <https://www.frontiersin.org/journals/neurology/articles/10.3389/fneur.2020.576729/full> (приступљено 13.03.2024)
4. Aqlan F., Lam S., Ramakrishnan S., Boldrin W. (2014), Integrating Lean and Ergonomics to Improve Internal Transportation in a Manufacturing Environment, Industrial and Systems Engineering Research Conference (ISERC), доступно на: <https://www.highbeam.com/doc/1P3-3491047341.html> (приступљено 22.04.2022)
5. BSI: ISO 45001, доступно на <https://www.bsigroup.com/en-GB/Occupational-Health-and-Safety-ISO-45001> (приступљено 01.05.2023)
6. CATIA Student Edition, доступно на: <https://edu.3ds.com/en/software/catia-v5-student-edition> (приступљено 18.07.2024)
7. CCOHS, Work-related Musculoskeletal Disorders (WMSDs) доступно на: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/diseases/rmirsi.html> (приступљено 21.04.2024)
8. ELECTRODE GEL, ISOTONIC, доступно на: <https://www.biopac.com/product/electrode-gel-isotonic-114-g> (приступљено 6.04.2023)
9. Electromyography (EMG), доступно на: <https://www.nuffieldhealth.com/tests-scans/electromyography-emg> (приступљено 6.04.2023)
10. Electromyography royalty-free images, доступно на: <https://www.shutterstock.com/search/electromyography> (приступљено 12.04.2024)
11. Ergonomic sitting at industrial work benches, <https://blog.item24.com/en/workbenches/ergonomic-sitting-at-industrial-work-benches> (приступљено 16.01.2024)
12. Ergonomie in der Produktion: höhere Effizienz dank ergonomischem Montagearbeitsplatz, доступно на: <https://ergoimpuls.com/industrie> (приступљено 16.01.2024)
13. European Agency for Safety and Health at Work (2019), Work-related musculoskeletal disorders: prevalence, costs and demographics in the EU, European Risk Observatory Report, доступно на: <https://osha.europa.eu/en/publications/msds-facts-and-figures-overview-prevalence-costs-and-demographics-msds-europe/view> (приступљено 17.09.2024)
14. Health and Safety Executive UK. (2020), Work related musculoskeletal disorder statistics (WRMSDs) in Great Britain, Annual Statistics, доступно: <https://www.hse.gov.uk/statistics/causdis/msd.pdf> (приступљено 4.03.2024)

15. How Ergonomic Workstations Benefit Packing and Assembly Lines, доступно на: <https://www.progressiveautomations.com/blogs/how-to/how-ergonomic-workstations-benefit-packing-and-assembly-lines> (приступљено 5.07.2024)
16. Industry 4.0 overview, доступно на: <https://www.sap.com/hk/products/scm/industry-4-0/what-is-industry-4-0.html> (приступљено 11.03.2023)
17. International Ergonomics Association (2000), Definition of Ergonomics (Online), доступно на: <https://iea.cc/what-is-ergonomics> (приступљено 16.02.2023)
18. ISO 45001- Occupational health and safety, доступно на: <https://www.iso.org/iso-45001-occupational-health-and-safety.html> (приступљено 12.02.2024)
19. Malavasi M., Schenetti G. (2017), Lean Manufacturing and Industry 4.0: an empirical analysis between Sustaining and Disruptive change, Politecnico Di Milano, Master thesis, доступно на: https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/136902/3/Malavasi_Schenetti%20-%20Lean%20Manufacturing%20and%20Industry%204.0-%20an%20empirical%20analysis%20between%20Sustaining%20and%20Disruptive%20Change.pdf (приступљено 12.08.2024)
20. Mbraintrain, доступно на: <https://www.mbraintrain.com> (приступљено 11.05.2024)
21. Motor neuron, <https://www.docplexus.com/posts/-the-pattern-of-motor-neuron-discharge-and-the-characteristics-of-the-motor-unit> (приступљено 11.10.2024)
22. Neurobehavioral Systems, Inc., Berkeley, CA, доступно на: www.neurobs.com (приступљено 2.01.2024)
23. Overview of work bench design in production, доступно на: <https://blog.item24.com/en/manual-production/overview-of-work-bench-design-in-production> (приступљено 2.05.2024)
24. Plux Biosignals, MuscleBAN BE, <https://www.pluxbiosignals.com/>: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://support.pluxbiosignals.com/wp-content/uploads/2021/10/biosignalsplux-muscleBAN-Datasheet.pdf (приступљено 19.01.2024)
25. Presentation mBrainTrain, <https://mbraintrain.com/smarter-mobi/> (приступљено 13.08.2024)
26. Structure of Skeletal Muscle, доступно на: <https://training.seer.cancer.gov/anatomy/muscular/structure.html> (приступљено 4.09.2024)
27. The Future of PPE: The „Connected Worker“ <https://www.linkedin.com/pulse/future-ppe-connected-worker-erik-jensen> (приступљено 18.06.2024)
28. Trapezius Muscle: Anatomy, Function, Disorder and Treatment, доступно на: <https://www.narayanahealth.org/blog/trapezius-muscle-anatomy-function-disorder-and-treatment> (приступљено 13.08.2024)
29. U. S. Department of Health and Human Services (1997), Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors-A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back, Public Health Service, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, доступно на: <https://www.cdc.gov/niosh/docs/97-141/pdfs/97-141.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB97141> (приступљено 11.04.2024)

30. Wireless EEG, доступно на: <https://mbraintrain.com/smarting-wireless-ee/>
(приступљено 16.02.2024)
31. Zakon o bezbednosti i zdravlju na radu (2015), Službeni glasnik RS, доступно на:
https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_bezbednosti_i_zdravlju_na_radu.html
(приступљено 3.02.2024)
32. Zakon o penzijskom i invalidskom osiguranju (2003),
https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_penzijskom_i_invalidskom_osiguranju.html
(приступљено 10.02.2024)

ПРИЛОЗИ

Табела П1 Резултати праћења мишићне активности испитаника преко основних показатеља - неергономски сценарио

	Hmax	Hmin	Hmax-Hmin	Average H	Median H	Median H - Average H	H max	Average H	Median H	RMS	r
испитаник 1 сесија 1	40705	27153	13552	32314.17	32307	-7.17	8390.82	179.56	107.82	32315.59	-0.0
испитаник 1 сесија 2	42084	25217	16867	32315.48	32307	-8.48	9768.51	183.59	117.48	32316.97	-0.06
испитаник 2 сесија 1	56811	619	56192	32314.45	32396	81.54	31695.45	1081.95	805.54	32346.36	0.10
испитаник 2 сесија 2	43038	14328	28710	32317.34	32369	51.65	17989.34	1063.73	803.65	32349.89	0.11
испитаник 3 сесија 1	65520	/	65517	32526.03	32353	-173.03	32993.96	2985.03	642.03	30557.39	0.19
испитаник 3 сесија 2	65518	0	65518	32312.53	32312	-0.53	33205.46	353.65	144.46	32281.18	0.16
испитаник 4 сесија 1	47883	17158	30725	32315.14	32268	-47.14	15567.85	784.13	495.85	32336.17	-0.08
испитаник 4 сесија 2	65416	0	65416	32313.58	32264	-49.58	33102.41	791.16	506.41	32315.14	0.08
испитаник 5 сесија 1	39552	19836	19716	32314.7	32326	11.22	12478.77	387.06	182.22	32321.52	0.04
испитаник 5 сесија 2	37932	22945	14987	32314.74	32320	5.25683	9369.74	219.83	87.74	32317.62	0.01
испитаник 6 сесија 1	39756	22350	17406	32312.79	32328	15.20	9962.79	482.47	356.79	32319.62	0.12
испитаник 6 сесија 2	38454	22912	15542	32312.00	32342	29.99	9400.00	525.07	395.99	32319.76	0.01
испитаник 7 сесија 1	36862	28646	8216	32314.64	32305	-9.64	4547.35	176.61	116.64	32315.69	-0.01
испитаник 7 сесија 2	36785	27388	9397	32314.44	32308	-6.446	4926.44	130.49	88.55	32315.03	-0.06
испитаник 8 сесија 1	38483	26699	11784	32311.36	32312	0.63	6171.63	70.74	33.63	32311.92	-0.01
испитаник 8 сесија 2	37939	28241	9698	32310.63	32312	1.36	5628.36	63.67	33.36	32311.01	0.02
испитаник 9 сесија 1	40024	27462	12562	32313.57	32297	-16.57	7710.42	275.11	169.57	32316.38	0.12
испитаник 9 сесија 2	39987	27286	12701	32313.17	32300	-13.17	7673.82	251.81	139.17	32315.72	0.05
испитаник 10 сесија 1	36628	27545	9083	32315.01	32315	-0.01	4770.01	178.75	71.01	32316.72	-0.35
испитаник 10 сесија 2	35832	28702	7130	32314.35	32313	-1.35	3612.35	81.92	49.35	32314.75	0.07

Табела П1 (наставкак) Резултати праћења мишићне активности испитаника преко основних показатеља - ергономски сценарио

	Hmax	Hmin	Hmax-Hmin	Average H	Median H	Median H - Average H	H max	Average H	Median H	RMS	г
испитаник 11 сесија 1	36953	25200	11753	32315.76	32320	4.23	7115.76	109.27	52.23	32316.43	-0.31
испитаник 11 сесија 2	35124	27875	7249	32314.81	32321	6.18	4439.81	111.04	62.81	32315.34	0.14
испитаник 12 сесија 1	41380	14844	26536	32313.85	32310	-3.85	17469.85	138.94	62.14	32315.11	-0.18
испитаник 12 сесија 2	59964	1180	58784	32312.46	32312	-0.46	31132.46	95.02	50.46	32306.72	0.04
испитаник 13 сесија 1	44299	25065	19234	32314.44	32308	-6.44	11984.55	208.15	105.44	32316.60	0.02
испитаник 13 сесија 2	39284	24449	14835	32315.32	32310	-5.32	7866.32	152.61	87.32	32316.33	0.01
испитаник 14 сесија 1	36716	29212	7504	32317.19	32308	-9.19	4398.80	143.05	93.80	32317.87	-0.01
испитаник 14 сесија 2	35932	29393	6539	32317.19	32313	-4.19	3614.80	96.88	62.80	32317.52	-0.09
испитаник 15 сесија 1	49891	21990	27901	32316.869	32296	-20.86	17574.13	666.56	380.86	32334.01	-0.16
испитаник 15 сесија 2	64358	0	64358	32343.067	32315	-28.06	32343.06	710.93	263.06	32138.62	-0.27

Табела П2 Резултати праћења мишићне активности испитаника преко основних показатеља - ергономски сценарио

	Hmax	Hmin	Hmax-Hmin	Average H	Median H	Median H - Average H	H max	Average H	Median H	RMS	г
испитаник 1 сесија 1	33817.60	30243.20	3574.40	32312.54	32313.60	1.05	2069.34	65.85	42.65	32312.71	0.00
испитаник 1 сесија 2	33728.00	30195.20	3532.80	32313.52	32313.60	0.079	2118.32	67.57	44.72	32313.68	0.027
испитаник 2 сесија 1	51724.80	18249.60	33475.20	32316.54	32340.80	24.25	19408.25	529.41	321.85	32326.67	-0.131
испитаник 2 сесија 2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
испитаник 3 сесија 1	45572.8	18460.8	27112.00	32313.26	32307.20	-6.060	13852.46	275.32	131.53	32316.82	-0.160
испитаник 3 сесија 2	43377.6	23729.6	19648.00	32316.49	32313.6	-2.899	11061.10	178.70	93.10	32318.08	0.103
испитаник 4 сесија 1	40705.6	27153.6	13552	32314.57	32307.2	-7.373	8391.02	179.57	107.82	32315.99	-0.069
испитаник 4 сесија 2	42084.8	25217.6	16867.2	32315.88	32307.2	-8.682	9768.91	183.59	117.48	32317.37	-0.008
испитаник 5 сесија 1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
испитаник 5 сесија 2	36785.6	27388.8	9396.80	32314.84	32308.8	-6.046	4926.04	130.49	88.35	32315.43	-0.064

Табела П2 (наставкак) Резултати праћења мишићне активности испитаника преко основних показатеља - ергономски сценарио

	Hmax	Hmin	Hmax-Hmin	Average H	Median H	Median H - Average H	H max	Average H	Median H	RMS	r
испитаник 6 сесија 1	38563.20	22094.40	16468.79	32311.89	32326.40	14.50	10217.49	307.76	212.90	32314.88	0.035
испитаник 6 сесија 2	36492.80	27896.00	8596.80	32312.39	32308.80	-3.59	4416.39	220.19	151.60	32313.96	0.119
испитаник 7 сесија 1	36716.8	29212.8	7504	32317.59	32308.8	-8.79	4399.20	143.05	93.60	32318.27	-0.012
испитаник 7 сесија 2	35932.8	29393.6	6539.2	32317.59	32313.6	-3.997	3615.20	96.88	63.19	32317.92	-0.09
испитаник 8 сесија 1	36628.8	27545.6	9083.2	32315.41	32315.2	-0.218	4769.81	178.76	70.61	32317.12	-0.350
испитаник 8 сесија 2	35832.00	28702.4	7129.6	32314.75	32313.6	-1.151	3612.35	81.92	49.15	32315.15	0.072
испитаник 9 сесија 1	39318.4	24852.8	14465.60	32313.51	32320.0	6.48	7460.71	377.25	185.51	32319.69	0.405
испитаник 9 сесија 2	39136.0	26187.2	12948.8	32313.57	32324.8	11.22	6822.42	289.99	177.62	32316.59	-0.025
испитаник 10 сесија 1	35056.0	28964.8	6091.20	32315.05	32316.80	1.74	3350.25	160.88	95.85	32316.04	0.214
испитаник 10 сесија 2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
испитаник 11 сесија 1	36721.60	29460.80	7260.79	32313.78	32313.60	-0.185	4407.81	67.23	47.81	32313.95	0.142
испитаник 11 сесија 2	34608.0	30684.8	3923.20	32313.53	32315.2	1.667	2294.46	128.28	78.46	32314.09	0.270
испитаник 12 сесија 1	36675.2	28048.0	8627.19	32314.53	32318.4	3.86	4360.66	173.34	112.66	32315.59	0.05
испитаник 12 сесија 2	52798.4	13438.4	39360.0	32313.64	32320.0	6.35	20484.75	205.76	118.35	32316.36	0.03
испитаник 13 сесија 1	39724.80	25353.60	14371.20	32312.60	32305.60	-7.00	7412.19	140.37	85.40	32313.58	0.058
испитаник 13 сесија 2	37827.20	26252.80	11574.39	32313.30	32308.80	-4.50	6060.50	114.33	65.30	32314.01	0.072
испитаник 14 сесија 1	36862.4	28646.4	8216	32315.04	32305.6	-9.44	4547.35	176.61	116.64	32316.09	-0.01
испитаник 14 сесија 2	36785.6	27388.8	9396.8	32314.84	32308.8	-6.04	4926.04	130.49	88.35	390652.32	-0.06
испитаник 15 сесија 1	38486.4	28214.4	10272.0	32313.58	32307.2	-6.38	6172.81	127.94	81.58	32314.21	-0.004
испитаник 15 сесија 2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

У табели нису приказане вредности за испитаника бр. 2 у другој сесији, испитаника бр. 5 у првој сесији, испитаника бр. 10 у другој сесији и испитаника бр. 15 у другој сесији због техничких проблема.

ЕМГ ПРОТОКОЛ

ПОСТАВЉАЊЕ СЕНЗОРА И ПРАЋЕЊЕ МИШИЋНЕ АКТИВНОСТИ

1. Упознавање испитаника са циљем и процедурама истраживања.
2. Проверити да ли су ЕМГ сензори добро очишћени тј. да ли су уклоњени остаци гела.
3. Уклонити косу.
4. Проверити да ли је кожа око горњих трапезних мишића чиста и очистити је алкохолом како би се смањио отпор коже.
5. Нанети мању количину гела на сензоре.
6. Поставити ЕМГ сензоре на трапезне мишиће са леве и десне стране на врату испитаника и причврстити их медицинским фластером. Електроде се постављају паралелно са мишићним влакнима, на удаљености од 2 cm.
7. Покренути софтвер *Open signals*.
8. Подесити ЕМГ уређај за снимање сигнала на одговарајући опсег.
9. Започети снимање ЕМГ сигнала притиском на дугме *Record*.
10. Проверити квалитет сигнала пре почетка мерења, како би се елиминисали шумови и артефакти.
11. Измерити активност мишића у стању мировања.
12. Тражити од испитаника да изведе максималну контракцију мишића за калибрацију резултата.
13. Зауставити снимање сигнала.
14. Када се установи да уређај и софтвер добро функционишу започети снимање мишићне активности и испитаника притиском на дугме *Record*.
15. Снимити фајл на изабрану локацију ради даље обраде и анализе података.

ЕЕГ ПРОТОКОЛ

МОНТИРАЊЕ КАПЕ:

1. Проверити да ли је капа добро опрана (нема остатка гела по електродама).
2. Повезати појачивач на конектор капе.
3. Повезати појачивач у *SmartingStreamer* 3.4.3 софтверу.
4. Изабрати *Sampling frequency* од 250 Hz.
5. Изабрати *Measure impedance on ref* за мерење импедансе на референци.
6. Покренути стримовање података.
7. Попунити 3 електроде гелом: *DRL* белу электроду, электроду са леве или десне стране од *DRL* електроде и *REF* плаву электроду. Циљати да импеданса електроде у софтверу показује мање од 5 kOhms у идеалном случају, а може и до 10 kOhms (обавезно да боја буде светло зелена и стабилна).
8. Прекинути стримовање.
9. Изабрати *Measure impedance* за мерење импеданси на свим електродама, и покренути стримовање.
10. Попунити једну по једну электроду гелом тако да су светло зелене боје и стабилне.
11. Након монтирања, угасити стримовање и изабрати *No impedance measurement*.
12. Изабрати опцију *gyro data*.
13. Покренути стримовање и погледати ЕЕГ сигнале у *Show signals* прозору.

СНИМАЊЕ ФАЈЛА:

14. Покренути експерименталну скрипту у зависности од шеме која је по реду (**.exp**).
15. У *SmartingStreamer* 3.4.3 софтверу притиснути *Record* дугме.
16. У *recording* прозору кликнути на дугме *refresh streams*.
17. Селектовати *EEG stream*
18. Селектовати *Presentation strim*.
19. Изабрати локацију и назив фајла. Покренути снимање.
20. Покренути експериментални фајл кликом на *Run* дугме.

*БЕЛЕШКА: Ако се не чује звук, прекинути одмах експеримент и снимање фајла. Ући на **Sound Settings** рачунара и променити **Output Device**.*

21. Након експеримента, прекинути снимање фајла у *SmartingStreamer* 3.4.3 софтверу. **Уколико је било изгубљених података, записати колико и за који фајл!**

УПИТНИК 1 - Усмени интервју- питања

1. Општи утисци о задатку (задатак је био тежак/лак, занимљив/досадан, напоран, превише дуго је трајао)?
2. да ли сте имали неке техничке потешкоће? Нпр. Преклопници су били тешки за руковање, незгодан положај шема/жица за дохватање?
3. Да ли сте на звук аларма одмах прелазили на другу шему (уколико нисте стигли да завршите тренутну шему)?
4. Да ли сте имали неку посебну стратегију за лакше шеме?
5. Да ли сте имали неку посебну стратегију за тешке шеме?
6. Да ли сте се уморили у неком тренутку и када се то десило?
7. Да ли се десило да Вам концентрација одлута у неком тренутку и колико често се то дешавало?
8. Да ли сте се увек трудили да радите најбрже могуће?
9. Да ли сте обраћали пажњу на штоперицу и у коликој мери?

УПИТНИК 2 - Упитник о задовољству предложеном новом радном станицом

Поштовани/а,

Молимо Вас да попуните овај упитник како бисмо проценили задовољство новом радном станицом. Ваши одговори ће нам помоћи да унапредимо радно окружење. Попуњавање упитника је анонимно и траје око 5 минута.

1. Општа оцена радне станице

1.1. Како оцењујете функционалност нове радне станице?

- Врло незадовољан/на
- Незадовољан/на
- Ни задовољан/на ни незадовољан/на
- Задовољан/на
- Врло задовољан/на

2. Ергономија радне станице

2.1. Како оцењујете удобност радне станице током обављања задатака?

- Врло незадовољан/на
- Незадовољан/на
- Ни задовољан/на ни незадовољан/на
- Задовољан/на
- Врло задовољан/на

2.2. Да ли је радни простор прилагођен Вашим потребама?

- Уопште није
- Делимично
- Потпуно

3. Оперативна ефикасност

3.1. Да ли нова радна станица омогућава брже извршавање радних задатака?

- Уопште не
- Делимично
- Потпуно

3.2. Да ли су потребни делови и компоненте лако доступни?

- Уопште не
- Делимично
- Потпуно

4. Осветљење и бука

4.1. Како оцењујете осветљење на новој радној станици?

- Врло незадовољан/на
- Незадовољан/на
- Ни задовољан/на ни незадовољан/на
- Задовољан/на
- Врло задовољан/на

4.2. Како оцењујете ниво буке током обављања активности?

- Врло незадовољан/на
- Незадовољан/на
- Ни задовољан/на ни незадовољан/на
- Задовољан/на
- Врло задовољан/на

5. Општи утисци и предлози

5.1. Шта Вам се највише допада код нове радне станице?

5.2. Шта бисте променили или побољшали?

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Марија Савковић је рођена 15.07.1984. године у Крагујевцу. Основно образовање је стекла у Основној школи "Милутин и Драгиња Тодоровић" у Крагујевцу. Након завршене основне школе уписала је и завршила Другу крагујевачку гимназију, општи смер са одличним успехом.

Факултет организационих наука Универзитета у Београду, смер менаџмент је завршила са просечном оценом 8,60 и стекла звање мастер инжењер организационих наука одбранивши рад "Промоција изнад линије-АТЛ" под менторством проф. др Велимира Штавланина. Након тога је завршила мастер студије на Економском факултету Универзитета у Крагујевцу, смер Општа економија са просечном оценом 8,30. Мастер рад из предмета Контроверзе у макроекономији "Политика тржишта рада у земљама ЕУ и Србији" под менторством проф. др Гордане Марјановић, одбранила је оценом 10. Докторске студије уписала је 2017. године на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, смер Индустијско инжењерство и инжењерски менаџмент. Положила је све испите предвиђене планом и програмом докторских студија са просечном оценом 9,16.

У досадашњем научно-истраживачком раду значајну пажњу је посветила решавању проблема из области организација рада, безбедност и здравље на раду, ергономија, управљање квалитетом што се може констатовати увидом у објављене радове.

Учествовала је у реализацији неколико научно-истраживачких пројеката. Као истраживач приправник, од октобра 2018. године ангажована је на научно-истраживачком пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије ТР-35033 - Одрживи развој технологија и опреме за рециклажу моторних возила и пројектима Програм за развој пројеката из области вештачке интелигенције - *Artificial intelligence for managing workplace safety (AI4WorkplaceSafety)* и *Modular and versatile collaborative intelligent waste management robotic system for circular economy (CircuBot)*, финансијски подржаних од стране Фонда за науку. Од јуна 2021. године запослена је на Факултету инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу као истраживач сарадник. До сада је објавила више од 5 радова у часописима индексираним на *SCI* листи и више од 20 радова у зборницима међународних конференција.

Од ступања у радни однос ангажована је у извођењу вежби на следећим предметима Основи предузетничког менаџмента и економије, Интегрисани системи менаџмента, Менаџмент квалитетом, Управљање индустријским процесима, Менаџмент пројектима, Истраживачки рад у инжењерству.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:


УНАПРЕЂЕЊЕ ЕФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ
ЕРГОНОМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ИНДУСТРИЈСКИХ РАДНИХ СТАНИЦА

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Крагујевцу, 02.12.2024. године,



потпис аутора

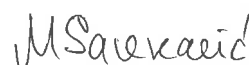
Образац 2

**ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ**

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:
УНАПРЕЂЕЊЕ ЕФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ
ЕРГОНОМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ИНДУСТРИЈСКИХ РАДНИХ СТАНИЦА

истоветне.

У Крагујевцу, 02.12.2024. године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Марија Савковић,

дозвољавам

не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

УНАПРЕЂЕЊЕ ЕФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДНИХ ПРОЦЕСА ПРИМЕНОМ ЕРГОНОМСКЕ ОПТИМИЗАЦИЈЕ ИНДУСТРИЈСКИХ РАДНИХ СТАНИЦА

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

дозвољавам

не дозвољавам³

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима

³ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

- 3) Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада⁴

У Крагујевцу, 02.12.2024. године,



потпис аутора

⁴ Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>