

Modeliranje utjecaja kompleksnosti pri upravljanju ključnim pokazateljima uspješnosti montaže

Aljinović Meštrović, Amanda

Doctoral thesis / Disertacija

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:179:517618>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-10**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture - University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Amanda Aljinović Meštrović

**MODELIRANJE UTJECAJA
KOMPLEKSNOSTI PRI UPRAVLJANJU
KLJUČNIM POKAZATELJIMA
USPJEŠNOSTI MONTAŽE**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Amanda Aljinović Meštrović

***Modeliranje utjecaja kompleksnosti pri upravljanju
ključnim pokazateljima uspješnosti montaže***

DOKTORSKA DISERTACIJA

Split, 2023.

Bibliografski podaci

Doktorska disertacija je izrađena na Zavodu za proizvodno strojarstvo, Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.

Mentor: izv. prof. dr. sc. Nikola Gjeldum

Rad br. 187

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU

Ključne riječi: ključni pokazatelji uspješnosti, proizvodnost, kompleksnost proizvodnog sustava, kompleksnost montaže, pokazatelj kompleksnosti montaže radnih stanica, balansiranje montažne linije, ručna montaža

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Strojarstvo

Znanstvena grana: Proizvodno strojarstvo

Institucija na kojoj je rad izrađen: Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Mentor rada: izv. prof. dr. sc. Nikola Gjeldum

Broj stranica: 243

Broj slika: 74

Broj tablica: 62

Broj korištenih bibliografskih jedinica: 133

Podaci o ocjeni i obrani doktorske disertacije:

Povjerenstvo za ocjenu doktorske disertacije:

1. Prof. emer. dr. sc. Ivica Veža, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
2. Izv. prof. dr. sc. Željko Stojkić, Sveučilište u Mostaru, Fakultet strojarstva, računarstva i elektrotehnike
3. Doc. dr. sc. Nataša Tošanović, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
4. Doc. dr. sc. Ivan Peko, Sveučilište u Split, Prirodoslovno-matematički fakultet
5. Doc. dr. sc. Marko Mladineo, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Povjerenstvo za obranu doktorske disertacije:

1. Prof. emer. dr. sc. Ivica Veža, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje
2. Izv. prof. dr. sc. Željko Stojkić, Sveučilište u Mostaru, Fakultet strojarstva, računarstva i elektrotehnike
3. Doc. dr. sc. Nataša Tošanović, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
4. Doc. dr. sc. Ivan Peko, Sveučilište u Split, Prirodoslovno-matematički fakultet
5. Doc. dr. sc. Marko Mladineo, Sveučilište u Splitu, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Disertacija obranjena dana: 18. srpnja 2023.

Modeliranje utjecaja kompleksnosti pri upravljanju ključnim pokazateljima uspješnosti montaže

Sažetak:

U znanstvenoj zajednici prihvaćeno je mišljenje da porast raznolikosti proizvoda sa sobom povlači i porast kompleksnosti montažnog sustava. Međutim, konkretna definicija kompleksnosti montaže još uvijek nije dana i predmet je rasprava. Kompleksnost montaže na razini radne stanice prvenstveno je rezultat količine sadržaja rada. Porast sadržaja rada na radnoj stanici reflektira se kroz čitav niz čimbenika koji utječu na rad operatera na radnoj stanici. Kroz istraživanja u literaturi i preliminarna istraživanja određeni su čimbenici koji najviše utječu na kompleksnost montaže na razini radne stanice. Na temelju uočenih čimbenika predložen je novi pokazatelj kompleksnosti montaže. Njegova točnost ispitana je kroz primjene u studijama slučaja. S obzirom da je u literaturi zamijećena potreba za razumijevanjem povezanosti kompleksnosti montaže i proizvodnosti, kao i kompleksnosti montaže i raspodjele radnog opterećenja, razvijen je matematički model za predviđanje proizvodnosti montažne linije koji kao izlaznu vrijednost daje i podatke o balansiranosti montažne linije. Njegova točnost ispitana je primjenom diskretne simulacije. Uočene su prednosti i nedostaci modela te su dane smjernice kako se predloženi model može koristiti za određivanje najprikladnijeg slijeda upućivanja radnih naloga. Predložena je integracija razvijenog pokazatelja kompleksnosti montaže u matematički izraz za proizvodnost u svrhu poboljšanja sposobnosti njegovog predviđanja. Uočena je povezanost razvijenog pokazatelja kompleksnosti s proizvodnošću i balansiranjem montažne linije.

Ključne riječi:

ključni pokazatelji uspješnosti, proizvodnost, kompleksnost proizvodnog sustava, kompleksnost montaže, pokazatelj kompleksnosti montaže radnih stanica, balansiranje montažne linije, ručna montaža

Modeling the influence of the assembly process complexity for management of key performance indicators

Abstract:

In the scientific community, it is an accepted opinion that the increase in product variety entails an increase in the complexity of the assembly system. However, a concrete definition of assembly complexity has not yet been given and is the subject of discussion. The assembly complexity at the workstation level primarily results from the amount of work involved. The increase in work content at the workstation is reflected through the array of factors affecting the operator's work. The factors that most influence the assembly complexity at the workstation level have been determined through research in the literature and preliminary research. According to the observed factors, a new indicator of assembly complexity was proposed. Its accuracy has been tested through case study applications in the industrial environment. Regarding the necessity in the literature that deals with assembly complexity, for understanding the connection between assembly complexity and productivity, as well as assembly complexity and workload distribution, a mathematical model for predicting assembly line productivity was developed. In addition to productivity, the output value of the proposed model is information about the assembly line balance. The accuracy of a mathematical model of productivity was tested using discrete simulation. The advantages and disadvantages of the model are noted. Guidelines for how the proposed model can be used to determine the most appropriate sequence of placing work orders are given. Integration of the developed indicator of assembly complexity into the mathematical expression of productivity was proposed in order to improve the ability to predict it. The correlation of the developed indicator of assembly complexity with the assembly line productivity and assembly line balancing is perceived.

Keywords:

key performance indicators, productivity, production system complexity, assembly complexity, workstation assembly complexity indicator, assembly line balancing, manual assembly

Zahvala

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Nikoli Gjeldumu što je nesebično podijelio svoje znanje i iskustvo sa mnom te što me konstruktivnim savjetima i raspravama usmjeravao prilikom izrade ovog rada. Jedno veliko hvala za svu pomoć, podršku, kritiku, savjet, uloženo vrijeme, razumijevanje te strpljenje.

Hvala i članovima Povjerenstva za ocjenu i obranu ovog doktorskog rada, posebice prof. emer. dr. sc. Ivici Veži te docentu dr.sc. Marku Mladineu, na sugestijama i pomoći tijekom izrade ove disertacije. Također, hvala i prof. dr. sc. Boženku Biliću koji nije bio član Povjerenstva, ali čiji su me savjeti i podrška pratili cijelim ovim putem.

Hvala i svim kolegama sa Zavoda za proizvodno strojarstvo koji su mi bili podrška za vrijeme izrade ovog rada. Posebice veliko hvala mojim dragim kolegicama i prijateljicama, Ivani i Marini, na svakodnevnoj beskrajnoj podršci, sugestijama, smijehu te riječima ohrabrenja. C405 zasigurno ne bi bio isti bez vas.

Posebnu zahvalnost dugujem svojim roditeljima koji su me naučili prave vrijednosti u životu. Hvala im za svaku toplu riječ, ljubav, beskrajno strpljenje, razumijevanje i motivaciju. Veliko hvala i mome bratu i sestri što su uvijek vjerovali u mene. Hvala im na neprocjenjivoj potpori i ljubavi prilikom izrade ovog doktorskog rada.

Veliko hvala i mojim Meštrovićima koji su uvijek bili tu pružajući mi nesebičnu potporu i razumijevanje. Hvala i ostatku obitelji i svim prijateljima koji su strpljivo dočekali ovaj dan.

I za kraj hvala Dinu, mojoj stijeni i uporištu, što je uvijek bio moja mirna luka, čak i kada fizički nije bio prisutan. Hvala ti što si uvijek vjerovao u mene.

Sadržaj

Bibliografski podaci.....	ii
Podaci o ocjeni i obrani doktorske disertacije	iii
Sažetak.....	iv
Abstract.....	v
Zahvala.....	vii
Popis tablica.....	xi
Popis ilustracija.....	xv
Popis oznaka.....	xix
Popis kratica.....	xxiv
1. UVOD	1
1.1. Motivacija, svrha i ciljevi istraživanja.....	1
1.2. Kratak pregled dosadašnjih istraživanja.....	5
1.3. Hipoteze	6
1.4. Opis i metodologija istraživanja	6
1.5. Očekivani znanstveni doprinos istraživanja.....	8
1.6. Struktura rada.....	9
2. ISTRAŽIVANJA U LITERATURI I NEISTRAŽENI PROBLEMI	11
2.1. Koncept i značenje riječi kompleksnost	12
2.2. Teorija kompleksnosti u proizvodnim sustavima	13
2.2.1. Vrste unutarnje kompleksnosti u proizvodnim sustavima.....	14
2.2.2. Taksonomija pristupa za procjenu fizičke domene kompleksnosti	16
2.2.3. Teorija kaosa i nelinearne dinamike	17
2.2.4. Teorija informacija.....	18
2.2.5. Hibridne metode.....	19

2.2.6. Metode nabiranja.....	20
2.2.7. Teorija grafova.....	21
2.2.8. Ostali pristupi.....	22
2.3. Montaža i istraživani problemi u montaži	23
2.3.1. Problemi istraživanja u montaži.....	24
2.3.2. Problemi u mjerenju kompleksnosti	25
2.3.3. Problemi balansiranja linije za montažu	30
2.3.4. Problemi pronalaženja slijeda varijanti proizvoda.....	32
2.4. Osvrt na stanje istraživanja	35
3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE.....	37
3.1. Definiranje terminologije za matematički model	37
3.2. Matematički model za predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti.....	41
3.2.1. Predviđanje proizvodnosti montažne linije.....	57
3.2.2. Osvrt na razvijeni matematički model za predviđanje proizvodnosti.....	65
3.2.3. Uporaba simulacijskog softvera za dinamičko predviđanje proizvodnosti	71
3.2.4. Predviđanje vodećeg vremena proizvodnje (montaže)	85
3.2.5. Optimalan slijed upućivanja radnih naloga za montažu proizvoda primjenom razvijenog matematičkog modela za predviđanje proizvodnosti.....	89
3.2.6. Zaključak o razvijenom matematičkom modelu za predviđanje proizvodnosti	90
4. RAZVOJ POKAZATELJA KOMPLEKSNOSTI MONTAŽE U MMAL	94
4.1. Koncept tvornice za učenje i njezina važnost u svijetu	96
4.1.1. Tvornica za učenje na FESB-u - LLF	108
4.2. Definicija pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice.....	114
4.2.1. Modeliranje pokazatelja kompleksnosti montaže proizvoda na razini radne stanice .	115
4.2.2. Statistička obrada eksperimentalnih rezultata za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže	116
4.3. Pokazatelj kompleksnosti montaže na razini radne stanice	117
4.3.1. Plan eksperimenata za predviđanje kompleksnosti montaže na razini radne stanice .	121
4.3.2. Matematički model za predviđanje kompleksnosti montaže na razini radne stanice .	127

4.3.3. Ispitivanje ispravnosti razvijenog matematičkog modela.....	131
4.4. Korekcija modela za predviđanje proizvodnosti pokazateljem kompleksnosti montaže ..	132
5. VREDNOVANJE POKAZATELJA KOMPLEKSNOSTI MONTAŽE.....	135
5.1. Osvrt na kompleksnost montaže kod različitih operatera	135
5.1.1. Utjecaj različitih operatera na vrijeme montaže	138
5.1.2. Izračun pokazatelja kompleksnosti kod različitih operatera	144
5.2. Kompleksnost montaže na razini radne stanice i povezivanje s balansiranjem montažne linije	145
5.2.1. Određivanje elemenata rada i njihovih idealnih prosječnih vremena montaže	148
5.2.2. Balansiranje mjenjačke kutije automobila jednog proizvoda primjenom LCR metode – inicijalno balansiranje	156
5.2.3. Provođenje balansiranja MMAL radi uočavanja povezanosti s pokazateljem kompleksnosti montaže.....	163
5.2.4. Usporedba stvarne vrijednosti pokazatelja kompleksnosti montaže i vrijednosti dobivene razvijenim matematičkim modelom.....	171
5.2.5. Povezivanje pokazatelja kompleksnosti montaže s balansiranjem MMAL te njezinom proizvodnošću	173
6. ZAKLJUČAK	176
LITERATURA	180
PRILOZI.....	193
Prilog A.....	193
Prilog B	202
Prilog C	206
Prilog D.....	210
Prilog E	215
Životopis.....	216
Curriculum vitae	217

Popis tablica

Tablica 2.1. Razlika montažnih postupaka i tehnoloških postupaka izrade dijelova, [60].....	23
Tablica 3.1. Vrijednosti udjela proizvoda i minimalne količine u uzorku.....	46
Tablica 3.2. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s tri raznolika proizvoda na tri radne stanice.....	49
Tablica 3.3. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s tri raznolika proizvoda na pet radnih stanica	50
Tablica 3.4. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s tri raznolika proizvoda na sedam radnih stanica	50
Tablica 3.5. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak sa šest raznolikih proizvoda na tri radne stanice	51
Tablica 3.6. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak sa šest raznolikih proizvoda na pet radnih stanica.....	51
Tablica 3.7. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak sa šest raznolikih proizvoda na sedam radnih stanica ...	52
Tablica 3.8. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s devet raznolikih proizvoda na tri radne stanice	53
Tablica 3.9. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s devet raznolikih proizvoda na pet radnih stanica.....	53
Tablica 3.10. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s devet raznolikih proizvoda na sedam radnih stanica ..	54
Tablica 3.11. Ukupna vrijednost pripremno-završnih vremena za promatrani uzorak.....	58
Tablica 3.12. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri raznolika proizvoda koji se montiraju na tri radne stanice.....	59
Tablica 3.13. Udio pripremno-završnog vremena u ukupnom raspoloživom vremenu za uzorak od tri raznolika proizvoda na tri radne stanice.....	60
Tablica 3.14. Pojedinačna proizvodnost proizvoda za uzorak s tri raznolika proizvoda koji se montiraju na tri radne stanice.....	61
Tablica 3.15. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri, šest i devet raznolikih proizvoda koji se montiraju na tri radne stanice.....	62
Tablica 3.16. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri, šest i devet raznolikih proizvoda koji se montiraju na pet radnih stanica	63

Tablica 3.17. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri, šest i devet raznolikih proizvoda koji se montiraju na sedam radnih stanica.....	64
Tablica 3.18. Učinkovitost radnih stanica pri ograničenim kapacitetima međuskladišta, $n = 3, m = 5, \eta_{AL} = 90 \%$	76
Tablica 3.19. Učinkovitost radnih stanica pri ograničenim kapacitetima međuskladišta, $n = 6, m = 5, \eta_{AL} = 90 \%$	77
Tablica 3.20. Učinkovitost radnih stanica pri ograničenim kapacitetima međuskladišta, $n = 9, m = 5, \eta_{AL} = 90 \%$	78
Tablica 3.21. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} perioda za $n = 3$	80
Tablica 3.22. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} perioda za $n = 6$	81
Tablica 3.23. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} za $n = 9$	81
Tablica 3.24. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} za $n = 3, \eta_{AL} = 90 \%$	82
Tablica 3.25. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} za $n = 6, \eta_{AL} = 90 \%$	82
Tablica 3.26. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitost uskog grla kod T_{EPEI} za $n = 9, \eta_{AL} = 90 \%$	83
Tablica 3.27. Usporedba rezultata proizvodnosti za $m = 5, \eta_{AL} = 90 \%$ za različite vrijednosti T_{EPEI}	85
Tablica 3.28. Usporedba rezultata vodećeg vremena proizvodnje za $n = 3, m = 5, \eta_{AL} = 90 \%$ za različite vrijednosti T_{EPEI}	88
Tablica 3.29. Usporedba rezultata vodećeg vremena proizvodnje za $n = 3, m = 5, \eta_{AL} = 90 \%$ za $T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$	88
Tablica 4.1. Razlike između definicija LF-a u užem i širem smislu.....	99
Tablica 4.2. Podjela LF-ova s obzirom na namjenu	100
Tablica 4.3. Glavno područje (tema) istraživanja unutar LF-a.....	105
Tablica 4.4. Idealna prosječna vremena montaže raznolikih proizvoda i njihova standardna odstupanja	122
Tablica 4.5. Idealna prosječna vremena montaže proizvodâ s obzirom na promatrani uzorak proizvoda n , tj. promatrani EPEI period	123

Tablica 4.6. Plan eksperimenata za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice	123
Tablica 4.7. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od tri raznolika proizvoda	124
Tablica 4.8. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od pet raznolikih proizvoda	124
Tablica 4.9. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za ponovljene eksperimente 5P17D1A	125
Tablica 4.10. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od sedam raznolikih proizvoda	125
Tablica 4.11. Prosječno vrijeme montaže proizvoda u ovisnosti o definiranim ulaznim parametrima	126
Tablica 4.12. Plan eksperimenata i izlazne vrijednosti pokazatelja kompleksnosti montaže.....	126
Tablica 4.13. Analiza varijance (ANOVA) za kompleksnost montaže na razini radne stanice ...	127
Tablica 4.14. Rezultati regresijske analize za kompleksnost montaže na razini radne stanice	128
Tablica 4.15. Vrijednosti prosječnih vremena i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od četiri raznolika proizvoda.....	131
Tablica 5.1. Broj raznolikih dijelova, ukupan broj dijelova te ukupan broj alata u ovisnosti o proizvodu koji se montira	136
Tablica 5.2. Prosječna vremena montaže Operatera 1 za proizvod IT30-6INO kod dva različita skupa proizvoda	137
Tablica 5.3. Idealna prosječna vremena montaže proizvoda i njihova standardna odstupanja	138
Tablica 5.4. Idealna prosječna vremena proizvoda s obzirom na uzorak proizvoda za različite operatere.....	139
Tablica 5.5. Ukupna prosječna vremena pripreme i vremena procesa montaže za uzorak od tri raznolika proizvoda kod različitih operatera.....	141
Tablica 5.6. Ukupna prosječna vremena pripreme i vremena procesa montaže za uzorak od pet raznolikih proizvoda kod različitih operatera	142
Tablica 5.7. Ukupna prosječna vremena pripreme i vremena procesa montaže za uzorak od sedam raznolikih proizvoda kod različitih operatera	143
Tablica 5.8. Prosječna vremena montaže proizvoda na radnoj stanici j kod prisutnosti izmjene sadržaja rada.....	144
Tablica 5.9. Kompleksnost montaže operatera na razini radne stanice	145

Tablica 5.10. Prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje u pokusnom snimanju	152
Tablica 5.11. Potrebni broj snimaka za svaki element rada prema koeficijentu stabilizacije	154
Tablica 5.12. Idealna prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje	155
Tablica 5.13. Prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje nakon provođenja eksperimenata na montažnoj liniji	160
Tablica 5.14. Usporedba raznolikosti na radnim stanicama	163
Tablica 5.15. Definirani slijed proizvoda i uzorak	163
Tablica 5.16. Prosječna vremena elemenata rada kod uvođenja raznolikih proizvoda na montažnu liniju	164
Tablica 5.17. Rezultati prosječnih vremena montaže elemenata rada nakon njihove preraspodjele	167

Popis ilustracija

Slika 1.1. Prijelaz s masovne proizvodnje na individualnu, [3], [7]	2
Slika 1.2. Metodologija znanstvenog istraživanja	8
Slika 1.3. Struktura doktorskog rada.....	10
Slika 2.1. Spektar rasta kompleksnosti procesa, [19]	13
Slika 2.2. Domene kompleksnosti u proizvodnim sustavima, [19]	14
Slika 2.3. Metode analize kompleksnosti proizvodnih sustava, [4], [29]	17
Slika 2.4. Primjer prikaza ugrađene i prenesene kompleksnosti za radnu stanicu 3, [34].....	27
Slika 2.5. Analogija molekularne strukture s proizvodom, [44].....	29
Slika 2.6. Porast topološke kompleksnosti na temelju unutarnje strukture proizvoda, [22].....	30
Slika 3.1. Takt proizvodnje na primjeru s tri procesa	38
Slika 3.2. Raspored proizvodnje familije proizvoda za dvije različite vrijednosti EPEI-a.....	39
Slika 3.3. Razine vodećeg vremena za proizvodni sustav, [94].....	40
Slika 3.4. Komponente vodećeg vremena proizvodnje na montažnoj liniji	41
Slika 3.5. Shematski prikaz "I" ručne montažne linije	42
Slika 3.6. Grafovi vremena procesa montažne linije s tri radne stanice za različit broj varijanti razolikih proizvoda za definirani uzorak proizvoda	55
Slika 3.7. Grafovi vremena procesa montažne linije s pet radnih stanica za različit broj varijanti razolikih proizvoda za definirani uzorak proizvoda	56
Slika 3.8. Grafovi vremena procesa montažne linije sa sedam radnih stanica za različit broj varijanti razolikih proizvoda za definirani uzorak proizvoda	56
Slika 3.9. Primjer raspodjele opterećenja nakon balansiranja za pojedinačne proizvode te kod zbirnog balansiranja, odnosno kada se više proizvoda montira na istoj montažnoj liniji.....	66
Slika 3.10. Ukupno vrijeme montaže kod T_{EPEI} kada je $n = 3$, $m = 3$, $\eta_{AL} = 90\%$	68
Slika 3.11. Ukupno vrijeme montaže kod T_{EPEI} kada je $n = 6$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$	69
Slika 3.12. Ukupno vrijeme montaže kod T_{EPEI} kada je $n = 9$, $m = 7$, $\eta_{AL} = 90\%$	69
Slika 3.13. Montažna linija s pet radnih stanica	72
Slika 3.14. Trend nagomilavanja podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI} = 1$ dan.....	73
Slika 3.15. Trend nagomilavanja podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI} = 3$ dana	74
Slika 3.16. Trend nagomilavanja podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI} = 5$ dana	74

Slika 3.17. Popunjenost međuskладишта kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90 \%$, $T_{EPEI} = 1$ dan za vremenski period promatranja od 165 h	79
Slika 4.1. Odvijanje montaže	94
Slika 4.2. Struktura poglavlja za razvoj pokazatelja kompleksnosti montaže	96
Slika 4.3. Koncept LF diljem svijeta, [67]	97
Slika 4.4. Ključne značajke Tvornica za učenje i razlika između Tvornica za učenje u užem (crvena kocka) i u širem smislu (sive kocke), [112]	98
Slika 4.5. Utjecaj edukacije i treninga na nacionalnoj, organizacijskoj i individualnoj razini, [1]	103
Slika 4.6. LLF kao poveznica u Triple helix modelu, [123]	108
Slika 4.7. Prostorna raspodjela LLF-a na FESB-u	109
Slika 4.8. Prostorni raspored LLF-a s pripadajućom opremom	110
Slika 4.9. Primjer primjene robotske ruke za različite namjene: a) testiranje performansi RFID sustava, b) prijenos elemenata s radne stanice, c) kao pomoć čovjeku prilikom montaže mjenjačke kutije automobila	111
Slika 4.10. Dio proizvoda koji se montiraju na četvrtom funkcionalnom području LLF-a na FESB-u	112
Slika 4.11. Montažna linija mjenjačke kutije automobila	113
Slika 4.12. Sedam raznolikih proizvoda čija se montaža promatra	118
Slika 4.13. Slijed proizvoda i uzorak proizvoda na radnoj stanici te objašnjenje oznaka eksperimenata	120
Slika 4.14. Primjer radne stanice za montažu sedam proizvoda s maksimalnim brojem raznolikih ugradbenih dijelova	121
Slika 4.15. Primjeri rasporeda ugradbenih dijelova na radnoj stanici prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda	122
Slika 4.16. Utjecaj broja raznolikih proizvoda i broja raznolikih ugradbenih dijelova na kompleksnost montaže	128
Slika 4.17. Prosječna vremena montaže proizvoda za različite kombinacije uzoraka i broja ugradbenih elemenata	130
Slika 4.18. Prosječna vremena montaže proizvoda za različite kombinacije uzoraka i broja ugradbenih elemenata	131
Slika 5.1. Sedam raznolikih proizvoda u drugoj studiji slučaja	135
Slika 5.2. Promatrani slijed proizvoda i uzorak proizvoda na radnoj stanici za drugi skup proizvoda	136

Slika 5.3. Primjer radne stanice za montažu: a) tri raznolika proizvoda , b) pet raznolikih proizvoda, c) sedam raznolikih proizvoda	137
Slika 5.4. Prosječna vremena montaže za različite kombinacije uzoraka proizvoda i ugradbenih elemenata kod triju operatera.....	140
Slika 5.5. Procedura balansiranja MMAL	147
Slika 5.6. Promatrani raznoliki proizvodi iz familije proizvoda mjenjačke kutije automobila	148
Slika 5.7. a) vanjski izgled mjenjačke kutije YZS, b) unutrašnjost mjenjačke kutije YZS.....	149
Slika 5.8. Dijagram prethodnosti elemenata rada mjenjačke kutije YZS	149
Slika 5.9. Primjer rasporeda ugradbenih dijelova na radnoj stanici prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda za element rada 1 i dio montaže	150
Slika 5.10. Primjer rasporeda ugradbenih dijelova na radnoj stanici prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda za element rada 9 i dio montaže	150
Slika 5.11. Prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje u pokusnom snimaju	152
Slika 5.12. Idealna prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje	155
Slika 5.13. Shema montažne linije mjenjačke kutije automobila	156
Slika 5.14. Ulazni podaci za LCR simulaciju	157
Slika 5.15. Raspodjela elemenata rada nakon balansiranja montažne linije jednog proizvoda na temelju idealnih prosječnih vremena montaže elemenata rada.....	158
Slika 5.16. Početni dijagram prethodnosti montaže elemenata rada YZS mjenjačke kutije nakon balansiranja	158
Slika 5.17. Raspodjela radnog opterećenja po radnim stanicama nakon provođenja LCR metode	159
Slika 5.18. Usporedba prosječnih vremena montaže elemenata rada dobivena eksperimentima na montažnoj liniji i idealnih prosječnih vremena montaže elemenata rada	161
Slika 5.19. Raspodjela radnog opterećenja po radnim stanicama dobivena provođenjem eksperimenata na montažnoj liniji te na temelju idealnih prosječnih vremena	162
Slika 5.20. Usporedba prosječnih vremena montaže elemenata rada kod montaže jednog proizvoda i nakon uvođenja raznolikih proizvoda u montažnu liniju balansiranu na temelju jednog proizvoda	165
Slika 5.21. Usporedba radnog opterećenja na radnim stanicama kod jednog proizvoda i nakon uvođenja raznolikih proizvoda.....	166

Slika 5.22. Preraspodjela elemenata rada na temelju rezultata o prosječnim vremenima montaže dobivenim nakon uvođenja raznolikih proizvoda.....	166
Slika 5.23. Usporedba rezultata prosječnih vremena montaže elemenata rada	168
Slika 5.24. Opterećenja po radnim stanicama pri montaži raznolikih proizvoda	169
Slika 5.25. Preraspodjela opterećenja nakon ponovnog provođenja LCR simulacije	169
Slika 5.26. Opterećenje radnih stanica nakon posljednje preraspodjele elemenata rada.....	170
Slika 5.27. Opterećenje radnih stanica nakon podjele elementa rada na manje cjeline koje se montiraju na različitim radnim stanicama.....	171
Slika 5.28. Usporedba pokazatelja kompleksnosti montaže dobivena razvijenim matematičkim modelom te stvarne vrijednosti kompleksnosti.....	172
Slika 5.29. Kompleksnost montaže montažne linije i njezina balansiranost	174
Slika 5.30. a) vrijednosti prosječnog vremena montaže uskog grla i b) vrijednosti ukupnog vremena montaže proizvoda na montažnoj liniji u ovisnosti o balansiranosti linije	175

Popis oznaka

Oznaka	Opis
A_{ef}	binarna matrica veza među komponentama
c	kapacitet jednog međuskladišta
c'	minimalan kapacitet međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod T_{EPEI}
b_0, b_l, b_{lh}, b_{ll}	koeficijenti regresije
C_{AL}	ukupan kapacitet međuskladišta na uzvodnim radnim stanicama
C_f	ugrađena kompleksnost (engl. <i>feed complexity</i>)
$C_{product}$	kompleksnost proizvoda
C_{rs}	kompleksnost odabira radne stanice na razini sustava
C_{xy}	prenesena kompleksnost (engl. <i>transfer complexity</i>)
C_1	ukupna kompleksnost individualnih komponenti proizvoda
C_2	ukupna kompleksnost svake interakcije u paru
C_3	kompleksnost topologije proizvoda
D_{min}	ukupna minimalna količina proizvoda za uzorak raznolikih proizvoda
D_T	ukupna količina proizvodnje u promatranom periodu vremena T
E	ukupan broj komponenti od kojih se proizvod sastoji
E_A	energija grafa
$H(X)$	entropija varijable X
i	indeks raznolikog proizvoda, $i \in n, i = 1, 2, \dots, n$
j	indeks radne stanice, $j \in m, j = 1, 2, \dots, m$
k	element rada, $k \in K, k = 1, 2, \dots, K$
K	ukupan broj identificiranih elemenata rada promatranog proizvoda
K_s	koeficijent stabilizacije radnog mjesta

m	ukupan broj radnih stanica na montažnoj liniji
$\min w$	minimalni udio proizvoda u uzorku
n	ukupan broj raznolikih proizvoda
n_j^{RA}	ukupan broj raznolikih alata na radnoj stanici j
n_j^{RD}	ukupan broj raznolikih sastavnih dijelova na radnoj stanici j
$p_{idealno,k}$	idealno prosječno vrijeme montaže k -tog elementa rada
$p_{idealno,j}^n$	idealno prosječno vrijeme montaže proizvodâ na radnoj stanici j s obzirom na broj raznolikih proizvoda, n , za T_{EPEI}
p_{ij}	ukupno vrijeme procesa montaže proizvoda i na radnoj stanici j
$p_{ij,k}$	vrijeme procesa montaže k -tog elementa rada i -tog proizvoda na j -toj radnoj stanici
$p_{i,k}$	vrijeme procesa montaže k -tog elementa rada za i -ti proizvod
$p_{pokusno,k}$	prosječno vrijeme montaže k -tog elementa rada u pokusnom snimanju
$(p_{pokusno,k})^{max}$	najveće vrijeme montaže k -tog elementa rada u pokusnom snimanju
$(p_{pokusno,k})^{min}$	najmanje vrijeme montaže k -tog elementa rada u pokusnom snimanju
p_s	vjerojatnost da će se promatrana varijabla (element) naći u s -tom stanju
$p_j^{n,n_j^{RD}}$	prosječno vrijeme montaže proizvodâ na radnoj stanici j u ovisnosti o definiranim ulaznim parametrima n , n_j^{RD} .
$p_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	ukupno prosječno vrijeme montaže k -tog elementa rada na radnoj stanici j za zadane vrijednosti ulaznih parametara n , n_j^{RD}
PR_{EPEI}	ukupna proizvodnost za T_{EPEI} period
PR_i	potrebni rad za montažu proizvoda i
PR_{EPEI}^i	ukupna proizvodnost proizvoda i za T_{EPEI} period
PR_T	ukupna proizvodnost za promatrani period vremena T
PR_T^i	ukupna proizvodnost proizvoda i za promatrani period vremena T
q_i	količina proizvodnje proizvoda i za promatrani period vremena T

R^2	koeficijent determinacije
R_{adj}^2	prilagođeni koeficijent determinacije
R_{pred}^2	predviđeni koeficijent determinacije
S	broj stanja odabrane varijable (elementa) promatranja
$S_{snimke,k}$	potrebni broj snimaka, tj. potrebni broj eksperimenata prema koeficijentu stabilizacije radnog mjesta za određivanje idealnog prosječnog vremena k -tog elementa rada
T	promatrani period vremena za koji se definiraju zahtjevi tržišta (npr. mjesec ili godina)
T_{EPEI}	vrijednosti perioda izmjene proizvoda, tj. vrijednosti EPEI perioda
$TAKT_{\text{prosječni proizvod}}$	prosječno vrijeme montaže jedne jedinice proizvoda iz uzorka na radnoj stanici koja predstavlja proces uskog grla kod T_{EPEI}
$TAKT_{\text{uzorak}}$	takt uzorka montažne linije
$T_{\text{efektivno}}$	efektivno vrijeme za promatrani T_{EPEI}
t_{pz}	pripremno-završno vrijeme
T_{pz_EPEI}	ukupno pripremno-završno vrijeme za T_{EPEI} vrijednost
$T_{pz_EPEI}^{\text{udio}}$	udio pripremno-završnog vremena u ukupnom raspoloživom vremenu rada za pojedini T_{EPEI}
$t_{pz_{ij}}$	pripremno-završno vrijeme radne stanice j za proizvod i
$t_{rs,j}$	ukupno vrijeme montaže radne stanice j za uzorak proizvoda
$t_{rs,j}^{\text{idealno},n}$	idealno prosječno vrijeme montaže radne stanice j s obzirom na definirani uzorak proizvoda n
T_v	prosječno vodeće vrijeme montaže jedinice proizvoda iz uzorka
T_v^i	prosječno vodeće vrijeme proizvodnje proizvoda i
TW_i	potrebni rad za montažu jednog proizvoda i

u_{grlo}	varijabla koja pamti poziciju radne stanice na kojoj se javlja usko grlo, pozicija je jednaka broju radne stanice unutar montažne linije
$V_{ij,k}$	varijabla odlučivanja koja poprima vrijednost 1 ako je element rada k proizvoda i dodijeljen radnoj stanici j , u drugim slučajevima poprima vrijednost 0
$V_{j,k}$	varijabla odlučivanja koja poprima vrijednost 1 ako je element rada k dodijeljen radnoj stanici j , u drugim slučajevima poprima vrijednost 0
w_i	udio proizvoda i u ukupnoj proizvodnji u promatranom periodu vremena T

Grčka slova

Oznaka	Opis
$\alpha_{individual,e}$	individualna kompleksnost komponente proizvoda
$\beta_{interaction,ef}$	kompleksnost interakcije para komponenti $e-f$ promatranog proizvoda
λ_{AL}	kompleksnost montaže na razini montažne linije
λ_j	pokazatelj kompleksnosti montaže radne stanice j
$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$	pokazatelj kompleksnosti montaže radne stanice j za poznate vrijednosti ulaznih parametara n, n_j^{RD}
η_{AL}	ukupna balansiranost montažne linije
$\eta_{rs,j}$	učinkovitost radne stanice j za uzorak proizvoda
π_T	ukupni broj T_{EPEI} perioda u promatranom vremenu T
$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	Standardno odstupanje k -tog elementa rada na radnoj stanici j za zadane vrijednosti ulaznih parametara n, n_j^{RD}
$\sigma_{idealno,k}$	standardno odstupanje za vrijednosti idealnog prosječnog vremena k -tog elementa rada

Popis kratica

Kratica	Opis
AD	Aksiomatski dizajn (engl. <i>Axiomatic Design</i>)
AEM	Hitachijeva metoda procjene montaže (engl. <i>Hitachi Assembly Evaluation Method</i>)
ALBP	Problem balansiranja linije za montažu (engl. <i>Assembly Line Balancing Problem</i>)
ANOVA	Analiza varijance
CCD	Centralni kompozitni dizajn (engl. <i>Central Composite Design</i>)
CCF	Nerotabilni plan eksperimenata središnje centriran (engl. <i>face centered central composite design</i>)
CS	Određivanje slijeda automobila (engl. <i>Car Sequencing</i>)
CXB	Osnovni kriterij kompleksnosti (engl. <i>Basic compleXity Criteria</i>)
CXC	Kalkulator kompleksnosti (engl. <i>CompleXity Calculator</i>)
CXI	Indeks kompleksnosti (engl. <i>CompleXity Index</i>)
DFA	Dizajn za montažu (engl. <i>Design for Assembly</i>)
DOE	Dizajn eksperimenata (engl. <i>Design of Experiment</i>)
DSS	Sustav za podršku odlučivanja (engl. <i>Decision Support System</i>)
EPEI	prosječan interval između dvije uzastopne serije istog proizvoda (engl. <i>Every Product, Every Interval</i>)
FESB	Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu
FMS	Fleksibilni proizvodni sustav (engl. <i>Flexible Manufacturing System</i>)
JIT	Upravo na vrijeme (engl. <i>Just In Time</i>)
KPI	Ključni pokazatelji uspješnosti (engl. <i>Key Performance Indicators</i>)
LCR	Metoda najvećeg kandidata (engl. <i>Largest Candidate Rule</i>)
LF	Tvornica za učenje (engl. <i>Learning Factory</i>)

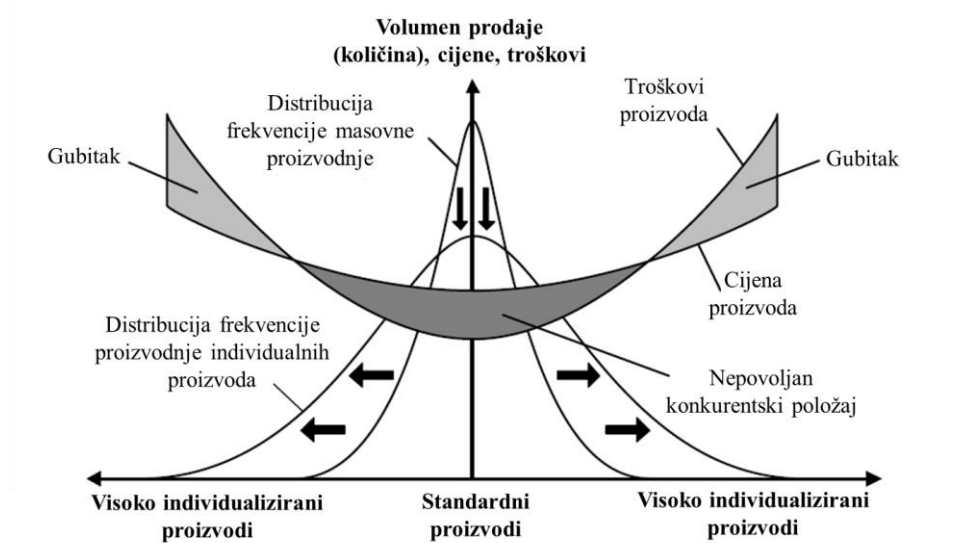
LS	Podjednako korištenje komponenata proizvoda (engl. <i>Level Scheduling</i>)
MMAL	Linija za montažu različitih proizvoda (engl. <i>Mixed Model Assembly Line</i>)
MMALBP	Problem balansiranja montažnih linija različitih proizvoda (engl. <i>Mixed Model Assembly Line Balancing Problem</i>)
MMALSP	Problem sekvencioniranja varijanti proizvoda (engl. <i>Mixed Model Assembly Line Sequencing Problem</i>)
MMS	Određivanje slijeda skupa različitih varijanti (engl. <i>Mixed-Model Sequencing</i>)
IPSO	Poboljšani algoritam optimizacije roja čestica (engl. <i>Improved Particle Swarm Optimization algorithm</i>)
PLM	Upravljanje životnim ciklusom proizvoda (engl. <i>Product Lifecycle Management</i>)
PZ	Pripremno-završno vrijeme
SALBP	Problem balansiranja linije za montažu jednog proizvoda (engl. <i>Simple Assembly Line Balancing Problem</i>)
SCC	Metoda kodiranja i klasificiranja proizvodnog sustava (engl. <i>Structural Classification and Coding System</i>)

1. UVOD

1.1. Motivacija, svrha i ciljevi istraživanja

Globalizacija tržišta praćena ekonomskim, tehnološkim i sociopolitičkim napretkom u kombinaciji sa sve većom konkurencijom i sve kraćim životnim ciklusom proizvoda, neki su od trendova koji otežavaju poslovanje suvremenih proizvodnih sustava. Vremena su se uvelike promijenila od ere Fordovog Modela T kada su zahtjevi tržišta bili zadovoljeni ponudom samo jednog modela proizvoda. Globalizacija je dovela do porasta zahtjeva kupaca za raznolikim proizvodima i kratkim rokovima isporuke koji su svakim danom sve izraženiji. Naime, kupci su manje voljni kupovati gotove proizvode te zahtijevaju one koji odgovaraju njihovim specifičnim ili jedinstvenim potrebama. Sve veća potražnja za prilagođenim proizvodima praćena tehnološkim napretkom dovodi do kraćih životnih ciklusa proizvoda, što znači da je vrijeme između dvije uzastopne generacije proizvoda sve kraće i kraće. Primjerice, prosječni životni ciklus u automobilskoj industriji 80-ih godina prošlog stoljeća bio je približno osam godina. Danas, trajanje životnog ciklusa se prepolovilo na četiri godine [1]. Dinamični uvjeti na tržištu podrazumijevaju da se svako proizvodno poduzeće koje želi opstati i biti konkurentno na tržištu suočava s izazovom ponude širokog asortimana proizvoda koji će zadovoljiti raznovrsne potrebe kupaca po prihvatljivoj cijeni [2]. Poduzeća su uvjereni da će pružanjem pravih, novih, raznolikih proizvoda tržištu uspješno odgovoriti na heterogene zahtjeve kupaca te da će na taj način maksimirati usklađenost između dostupnih proizvoda i potreba kupaca. Potrebe kupaca se razlikuju zbog individualnosti svakog korisnika, njihovih društvenih vrijednosti, načina korištenja proizvoda itd. Kako bi se udovoljilo različitim potrebama, stvorena je raznolikost proizvoda. Raznolikost proizvoda ili asortiman proizvoda može se definirati kao zbirka različitih stvari određene kategorije iste opće vrste, pri čemu je varijanta proizvoda primjer kategorije koja pokazuje male razlike od uobičajenog tipa ili norme [3]. Može se reći da je današnja filozofijablica 3.27 proizvodnje u potpunoj suprotnosti s naslijeđenom filozofijom i načelima masovne proizvodnje. Spomenuti uvjeti predstavljaju izazove za proizvođače te ih prisiljavaju na kontinuirana ulaganja i prilagodbu postojećih proizvodnih sustava za proizvodnju raznolikih prilagođenih proizvoda. Odnosno, prisiljavaju ih na usvajanje nove paradigme izrade proizvoda koja je prilagođena potrebama kupaca, a koja uključuje povećanu raznolikost proizvoda te smanjeni životni ciklus proizvoda [4]. Promjena paradigme proizvodnje rezultira sve većim zahtjevima u pogledu promjenjivosti i fleksibilnosti

poduzeća te njihovih proizvodnih sustava. Dilemu između ekonomije razmjera i ekonomije opsega proizvodnog poduzeća prikazuje Slika 1.1. Ekonomija razmjera opisuje situaciju kada se mogućnost snižavanja troškova poslovanja veže uz povećanje obujma proizvodnje. Ovaj pojam stoga se u proizvodnoj domeni najčešće koristi kada je riječ o masovnoj proizvodnji standardiziranih proizvoda [5]. Pojam ekonomije opsega vezuje se za smanjivanje prosječnih proizvodnih troškova proizvodnjom raznolikih usko povezanih proizvoda. Kao što je uočljivo na Slici 1.1. zahtjevi za povećanjem broja raznolikih proizvoda dovode do širenja krivulje učestalosti (frekvencije) proizvoda, a postizanje ekonomije razmjera karakterističnog za masovnu proizvodnju više nije moguće. Povećanju portfelja proizvoda poduzeća trebaju pristupiti s oprezom kako se ne bi našla u situaciji „gubitka“ u kojem postojanje previše neprofitabilnih proizvoda uzrokuje veće troškove od prihoda. Većina poduzeća koja se nađu u takvoj situaciji, niski volumen individualnih proizvoda koji donosi niži profit od očekivanog nastoji subvencionirati porastom cijena standardnih proizvoda. Međutim, više cijene standardnih proizvoda dovode do smanjenja konkurentnosti poduzeća [3] zbog mogućeg porasta nezadovoljstva kupca koji neće htjeti kupovati proizvod po višoj cijeni te će se okrenuti konkurentskim proizvodima. Eksperimentalna istraživanja [6] pokazuju da su kupci često zbunjeni diferencijacijom među varijantama proizvoda unutar širokog asortimana proizvoda, stoga planiranju asortimana proizvoda treba pristupiti s oprezom vodeći računa o tome da ponuđene varijante proizvoda imaju jasnu diferencijaciju i opseg ključnih značajki prema kojima svaki kupac u asortimanu proizvoda može prepoznati točno ono što mu treba.



Slika 1.1. Prijelaz s masovne proizvodnje na individualnu, [3], [7]

Montaža, kao dio proizvodnog sustava, predstavlja jedan od najučinkovitijih načina postizanja visoke raznolikosti proizvoda. Montažne linije koje su oblikovane tako da mogu sastaviti široki raspon relativno različitih modela nazivaju se linije za montažu različitih proizvoda (engl. *Mixed Model Assembly Line*, MMAL). Montaža osigurava visoku raznolikost proizvoda te predstavlja važnu fazu životnog ciklusa proizvoda. O važnosti montaže u nekim proizvodnim poduzećima govori i činjenica da otprilike oko 50 % ukupnog proizvodnog vremena i 20 % ukupnih troškova proizvodnje otpada na ovaj proces. Uz to, montaža je radno intenzivan proces te se pretpostavlja da ona zahtijeva oko trećinu radne snage proizvodnog poduzeća [8]. Spomenuta statistika upućuje na relativnu važnost montaže u smislu i vremena i troškova proizvodnje proizvoda te naglašava potrebu za njezinim razumijevanjem i poboljšanjem. Unutar montaže, proizvodna poduzeća suočavaju se s različitim varijantama (izvedbama) dijelova i podsklopova. Različitom kombinacijom izvedbi pojedinačnih podsklopova tijekom procesa montaže, često je moguće kreirati željeni model proizvoda za individualnog kupca [2]. Kako bi poduzeće odgovorilo na varijabilnosti potražnje tržišta, proizvodnja svih varijanti proizvoda unutar familije proizvoda za skladište gotovih proizvoda više nije poželjna zbog troškova proizvodnje, skladištenja i „zamrznutog“ kapitala. Stoga se sve veći broj poduzeća okreće konceptu „Upravo na vrijeme“ (engl. *Just In Time*, JIT). Jedan od preduvjeta ostvarivanja JIT je učinkovito planiranje slijeda proizvodnje koje je ključno za racionalizaciju resursa i povećanje profita poduzeća. Štoviše, dobro osmišljenim planom proizvodnje može se postići učinkovito korištenje svih raspoloživih resursa.

Iako odluka o proširenju asortimana proizvoda poduzećima može omogućiti bolju usklađenost ponude i potražnje, takva promjena dovodi do niza izazova unutar montažnog, ali i cijelog proizvodnog sustava. Naime, rastom raznolikosti proizvoda, poduzeća često doživljavaju interne poteškoće poput porasta broja grešaka operatera, pada kvalitete proizvoda itd. koje dovode do visokih troškova proizvodnje, porasta prekovremenog rada, porasta cijene proizvoda te pada proizvodnosti montažne linije. Schleich i ostali [9] u svom istraživanju istaknuli su kako čak oko 64 % ispitanika kompleksnost koja je uzrokovana raznolikošću proizvoda smatra značajnim čimbenikom povećanja troškova proizvodnje.

Dugoročna uspješnost i konkurentnost proizvođača na tržištu uvelike je određena mogućnostima proizvodnog procesa na koje utječe čitav niz parametara. Operater je zasigurno ključan čimbenik svakog proizvodnog sustava, pogotovo kada je riječ o ručnoj montaži koja je i danas široko zastupljena u montažnim procesima [10]–[12]. Učestalost promjene vrste poslova operatera koja se ogleda u raznovrsnosti zadataka s kojima se on susreće u ovisnosti o

slijedu izrade proizvoda, utječe na vrijeme procesa montaže. Što je broj različitih proizvoda s kojim se operater na radnom mjestu susreće veći i što je učestalost izmjene proizvoda veća, operateru će trebati više vremena i više mentalnog, a i fizičkog napora kako bi pronašao i odabrao željeni dio i ugradio ga u točno određenu varijantu proizvoda [13]. U prilog spomenutome govore i rezultati istraživanja Zeltzere i ostalih [14] koji su istraživanjem u automobilskoj industriji ustanovili da najveći postotak ispitanika izmjenu sadržaja rada smatra glavnim uzrokom kompleksnosti na radnoj stanici. Isti zaključak potvrđen je i u radu Matsone i ostalih [15]. Stoga, može se zaključiti da je kompleksnost uvelike povezana s učinkovitošću operatera koja je određena sadržajem rada i uvjetima s kojima se operater susreće prilikom rada.

Sukladno svemu rečenome, može se ustanoviti da kompleksnost ima snažnu pozitivnu korelaciju s poteškoćama prilikom upravljanja sustavom, tj. kako sustav postaje kompleksniji, zadaci operatera postaju složeniji što znači da su podložniji pogreškama i iziskuju veće troškove [16].

U literaturi se mogu naći različiti pokušaji kojima se nastoje poboljšati performanse montažnih procesa. Jedan od načina kojim se to može postići je i smanjivanje utjecaja kompleksnosti montaže na MMAL [8]. Međutim, unatoč tome što je kompleksnost montaže prihvaćena kao pojam koji utječe na performanse montažne linije, njezina definicija i formalna kvantifikacija još uvijek su predmet rasprave u znanstvenoj literaturi. Mjere kompleksnosti koje su zastupljene u literaturi većinom su se usmjerile na kompleksnost proizvoda ili proizvodnje, ali poveznica tih dviju kompleksnosti i promatranje njihovog utjecaja na montažnu liniju i njezine performanse još uvijek nisu široko zastupljene. Naprijed navedeno upućuje na potrebu za daljnjim istraživanjem kompleksnosti montažnog procesa, njegovim definiranjem i kvantifikacijom te povezivanjem s performansama montažne linije. Stoga je jedan od glavnih ciljeva ovog istraživanja formiranje funkcijske vrijednosti kompleksnosti montaže u ovisnosti o njezinim ključnim uzrocima kako bi se bolje shvatio njezin utjecaj na pokazatelje uspješnosti montažne linije. Svrha razvoja funkcijske vrijednosti kompleksnosti procesa montaže je njegova uporaba u stvarnom industrijskom okruženju i bolje razumijevanje procesa koji se javlja tijekom montaže raznolikih proizvoda.

1.2. Kratak pregled dosadašnjih istraživanja

Zbog fluktuacije potražnje i porasta zahtjeva kupaca za proizvodima koji odgovaraju njihovim specifičnim potrebama, na današnjem tržištu mnoga proizvodna poduzeća su primorana proširiti svoje proizvodne programe. Ovaj trend praćen je porastom raznolikosti proizvoda koja bi poduzećima trebala pružiti konkurentsku prednost. S druge strane, porastom raznolikosti povećavaju se napori poduzeća u smislu prilagodbe proizvodnog sustava novim uvjetima na tržištu. Oni rezultiraju porastom troškova kapitala i rada, smanjenjem performansi sustava, porastom potrebe za fleksibilnijim sustavima i slično. U znanstvenoj zajednici prihvaćeno je mišljenje da porast raznolikosti proizvoda sa sobom povlači i porast kompleksnosti proizvodnog sustava iako još uvijek postoje polemike o tome što je točno kompleksnost i koji su njezini uzroci. U postojećoj literaturi mogu se pronaći različiti pristupi kojima se kompleksnost proizvodnog sustava nastoji opisati i kvantificirati. Predložene mjere kompleksnosti uglavnom su usmjerene na kompleksnost proizvoda ili proizvodnje, dok još uvijek poveznica ovih dviju kompleksnosti i promatranje njihovog utjecaja na performanse proizvodnog sustava nije dovoljno istražena tematika. Većina autora tvrdi da utjecaj kompleksnosti na performanse promatranog sustava prati negativan predznak, međutim u literaturi je još uvijek nedorečeno koliko kompleksnost uistinu negativno utječe na proizvodni sustav, kao i to ima li kompleksnost pozitivan utjecaj i ako da, koliki je. S obzirom da montaža predstavlja jedan od procesa u realizaciji proizvoda, jedan dio istraživanja kompleksnosti se fokusirao i na proces montaže. U ručnim montažnim sustavima kompleksnost montažnog procesa jedan je od ključnih čimbenika koji utječu na iskoristivost opreme, dinamiku stjecanja vještina, sigurnost i performanse operatera, zbog čega bi ju trebalo uzeti u obzir tijekom faze planiranja proizvodnje. Razumijevanje kompleksnosti procesa montaže nužno je kako bi se njezin utjecaj ublažio i kako bi se eventualno poboljšao radni prostor, oprema, performanse operatera i sukladno tome postigla montaža prilagođena čovjeku i kvalitetan finalni proizvod [11]. Kompleksnost u ručnim montažnim procesima je funkcija velike količine informacija koje se brzo mijenjaju te vremenskog pritiska koji zasigurno utječu na mentalno i fizičko zdravlje operatera [17]. Velika varijabilnost komponenti i stalne promjene potražnje kupaca uzrokuju potrebu za konstantnim planiranjem slijeda montaže proizvoda i rasporeda raspoloživih resursa. Stoga se i dalje objavljuju istraživanja koja nastoje predložiti nova rješenja za balansiranje montažne linije ili određivanje slijeda montaže proizvoda. Zbog složenosti spomenutih problema, rijedak je broj autora koji ova dva problema promatraju istovremeno. U posljednje vrijeme, u znanstvenoj zajednici vidljivi su napori autora koji

kompleksnost promatraju kao jedan od parametara koji koriste kako bi pronašli nova rješenja promatranih problema. Primjena mjera kompleksnosti u ovim područjima tek je u svojim začetcima te se očekuje njezino daljnje istraživanje.

1.3. Hipoteze

Na temelju dosadašnjih istraživanja postavljene su dvije znanstvene hipoteze ovog doktorskog rada:

1. hipoteza

Na tržištu koje potražuje raznolike proizvode u malim količinama, moguće je kombinacijom matematičkog i simulacijskog modeliranja, predvidjeti ključne pokazatelje uspješnosti montažne linije već u fazi njezina projektiranja.

Primjenom razvijenog modela, moguće je na temelju a priori definiranih preferencija menadžera, odrediti optimalan slijed upućivanja radnih naloga za montažu proizvoda.

2. hipoteza

Kod različitih konfiguracija radnih stanica, matematičkim modeliranjem moguće je odrediti utjecaj kompleksnosti montaže na vremena trajanja montaže te zatim matematički model integrirati u model razvijen za predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti montažne linije.

1.4. Opis i metodologija istraživanja

Struktura istraživanja prikazana je na Slici 1.2.

Prva faza istraživanja odnosi se na pregled literature iz područja i predmeta znanstvenog istraživanja. Cilj prve faze je razumijevanje i analiza postojećeg stanja i korištenih znanstvenih metoda u predmetu znanstvenog istraživanja te uočavanje nedostataka i neistraženih problema.

Druga faza odnosi se na prvu hipotezu. Matematičkim modeliranjem predviđet će se ključni pokazatelji uspješnosti montažne linije poput:

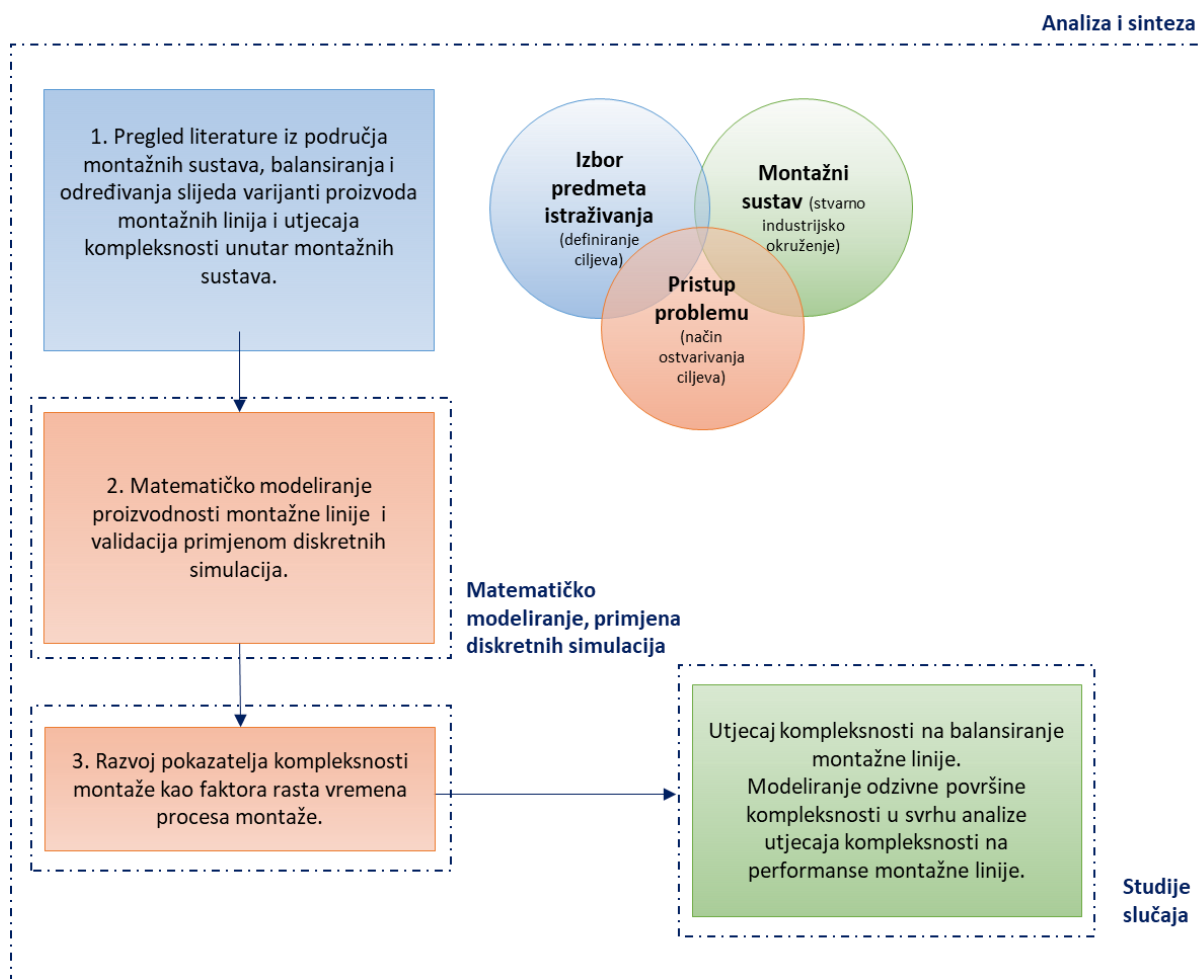
- proizvodnosti linije po broju i varijantama montiranih proizvoda
- prosječnog vremena trajanja ciklusa montaže.

Pri predviđanju ključnih pokazatelja uspješnosti montažne linije u obzir će se uzeti ulazni parametri poput:

- raznolikosti proizvoda
- pripremno-završnih vremena kod promjene proizvoda na montažnoj liniji
- vremena procesa montaže
- prosječna iskoristivost radnog mjesta
- broja radnih stanica na montažnoj liniji.

Validacija predloženog modela izvršit će se primjenom diskretne simulacije. Kada se složenost sustava toliko poveća da se matematičkim pristupom ne može modelirati sustav, koristit će se simulacijski model diskretnog događaja. U ovom dijelu dat će se smjernice kako se razvijeni matematički model može koristiti kao model za pronalaženje optimalnog slijeda upućivanja radnih naloga kako bi preferencije menadžera bile zadovoljene.

Posljednja faza istraživanja odnosi se na drugu hipotezu. Na temelju spoznaje o nedostatku mjera koje opisuju kompleksnost montaže, predložit će se mjera kompleksnosti montaže izražena kao čimbenik povećanja vremena montaže. Drugim riječima, ova faza podrazumijeva određivanje utjecaja kompleksnosti montaže na vremena trajanja montaže kod različitih konfiguracija radnih stanica. Nakon izvođenja eksperimenata na stvarnoj montažnoj liniji, moguće je matematički modelirati odzivnu površinu kompleksnosti.



Slika 1.2. Metodologija znanstvenog istraživanja

1.5. Očekivani znanstveni doprinos istraživanja

Znanstveni doprinos očekuje se u znanstvenom području Tehničkih znanosti, polju strojarstvo, grani proizvodno strojarstvo. Doprinos predloženog rada sažet je u narednim točkama:

- Matematičkim modeliranjem predložit će se model predviđanja ključnih pokazatelja uspješnosti montažne linije. Matematički model vrednovat će se simulacijom diskretnog događaja.
- Na temelju ograničenja matematičkog modela kod dinamike izvođenja montažnih postupaka raznolikih proizvoda, izradit će se simulacijski modeli koji preciznije definiraju ključne pokazatelje uspješnosti.
- Predložit će se okvir za odabir optimalne alternative slijeda radnih naloga uzimajući u obzir preferencije donositelja odluke.

- Razvit će se matematički model za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže kao čimbenika povećanja vremena montaže uzimajući u obzir odabrane parametre montaže.
- Kao dodatak postupcima balansiranja montažne linije predložit će se okvir za uključivanje pokazatelja kompleksnosti montaže kako bi se razvijenim modelom preciznije moglo predvidjeti vrijeme montaže.
- Uspostavit će se povezanost između balansiranja montažne linije i pokazatelja kompleksnosti, te će se dati smjernice za uključivanje kompleksnosti za različite konfiguracije montažnih sustava. Razvijeni pristup će se validirati na montažnoj liniji stvarnog industrijskog proizvoda u okviru Tvornice za učenje (engl. *Learning Factory*, LF).

1.6. Struktura rada

Disertacija je organizirana u šest poglavlja, Slika 1.3. U prvom poglavlju istaknuta je motivacija za istraživanje teme vezane za upravljanje montažnim sustavima te je prezentiran predmet, svrha i cilj istraživanja. Kroz isto poglavlje postavljene su dvije temeljne znanstvene hipoteze te je sažet očekivani znanstveni doprinos rada.

U drugom poglavlju analizirani su radovi iz područja znanstvenog istraživanja ovog doktorskog rada. Identificirani su još neistraženi problemi koji predstavljaju smjernice za oblikovanje daljnjeg istraživanja.

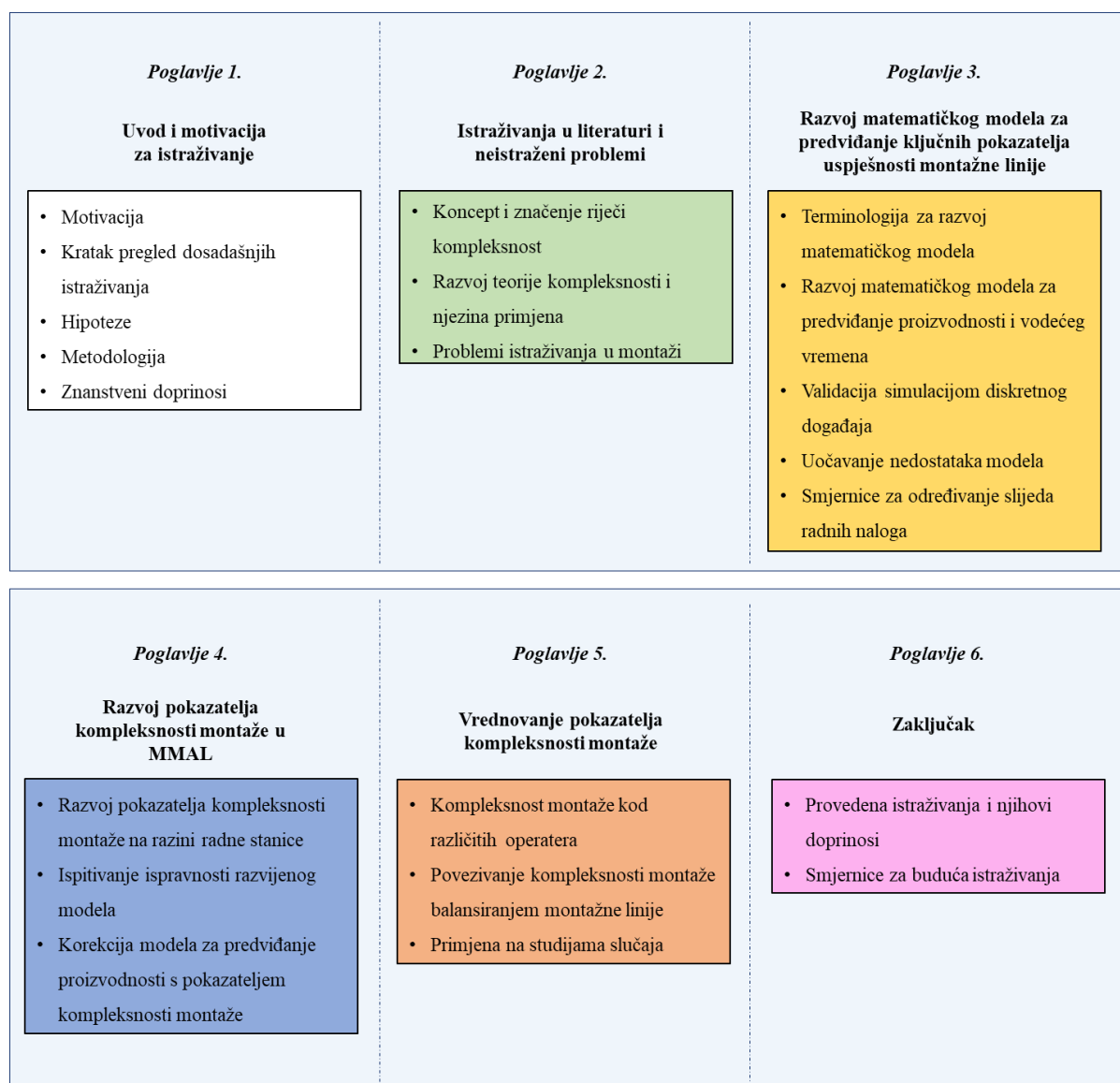
U trećem poglavlju razvijen je matematički model za predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti montažne linije. Predloženi model služi za predviđanje proizvodnosti montažne linije. Točnost njegovog predviđanja vrednovana je primjenom simulacije diskretnog događaja. Za složenost sustava koja je toliko velika da se matematičkim pristupom ne može modelirati sustav, koristio se simulacijski model diskretnog događaja kako bi opisao ponašanje ključnih pokazatelja uspješnosti montaže kod niza različitih ulaznih parametara.

U četvrtom poglavlju opisan je razvoj funkcijske vrijednosti kompleksnosti montaže. Koristeći studije slučaja u Tvornici za učenje, na temelju preliminarnih eksperimenata analiziran je utjecaj cijelog niza ulaznih parametara na kompleksnost montažnog procesa. Kompleksnost je promatrana kao čimbenik povećanja vremena montaže u odnosu na idealno vrijeme montaže koje se može postići kada se montaža izvodi na izdvojenoj radnoj stanici, bez suvišnih dijelova, alata i informacija. Uz niz postavljenih smjernica, razvijen je plan eksperimenata za dobivanje

vrijednosti kompleksnosti montaže u obliku funkcije. Dobivenu funkciju moguće je integrirati u već razvijeni matematički model koji je opisan u trećem poglavlju.

U petom poglavlju kroz studije slučaja vrednovan je razvijeni matematički model za predviđanje kompleksnosti montaže. Pokazatelj kompleksnosti montaže povezan je s balansiranjem montažne linije i s njezinom proizvodnošću.

U posljednjem poglavlju iznijeti su zaključci istraživanja provedenih u sklopu ovog doktorskog rada te je dan prijedlog budućih istraživanja na predmetnom području.



Slika 1.3. Struktura doktorskog rada

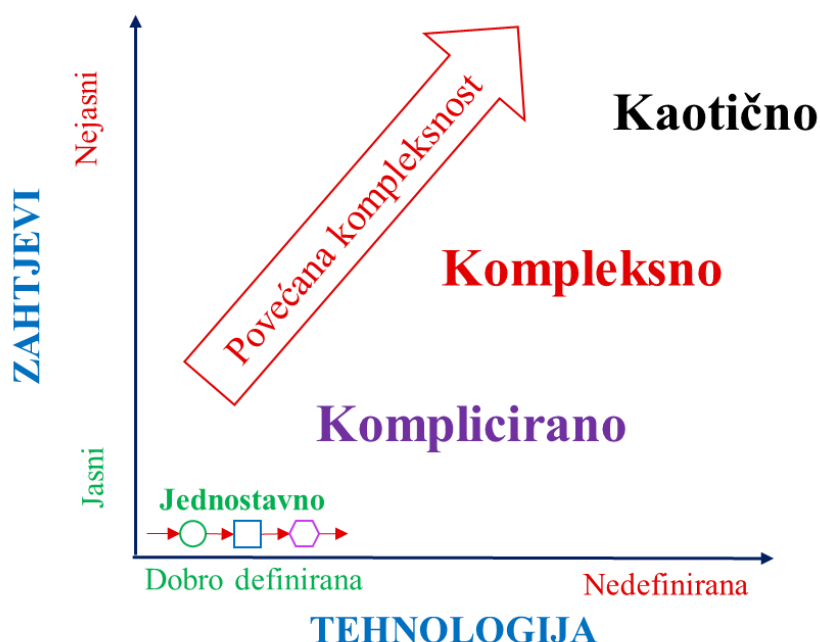
2. ISTRAŽIVANJA U LITERATURI I NEISTRAŽENI PROBLEMI

Proizvodnja se smatra temeljem svake ekonomije te je ključni čimbenik razvoja i boljitka svakog društva. Danas proizvodna poduzeća djeluju u uvjetima nesigurnog i promjenjivog okruženja koje uzrokuje porast nesigurnosti unutar proizvodnog sustava, a time i porast njezove kompleksnosti. Prema [18] nesigurnost je pojam kojim se opisuje sve ono što se o ponašanju sustava precizno ne zna i predstavlja odstupanje sustava od planiranog. Neovisno o tome je li riječ o objektivnoj ili subjektivnoj kompleksnosti proizvodnog sustava njezin rast posljedica je nesigurnosti koju uzrokuje porast raznolikosti proizvoda, složenost njihove proizvodnje te tržišne fluktuacije. Povećana raznolikost stvara više informacija i pruža mogućnosti za neočekivano ili nepoznato ponašanje proizvoda, procesa ili sustava [19]. Shodno tome, utjecaj raznolikosti najviše se očituje u dizajnu i strukturi proizvoda, planiranju procesa proizvodnje kao i u upravljanju proizvodnjom. U proizvodnim sustavima kompleksnost je uvijek prisutna, od trenutka kada sirovi materijal uđe u proizvodnju sve dok gotovi proizvod ne izađe iz nje. Sukladno tome, kompleksnost predstavlja izazov za proizvodna poduzeća koji rezultira porastom troškova proizvodnje, problemima unutar proizvodnih procesa te porastom vodećeg vremena realizacije proizvoda. Stoga, ovom problemu proizvodna poduzeća trebaju pristupiti s oprezom ako žele osigurati svoj opstanak na tržištu. Iako je literatura složna u tome da je kompleksnost karakteristika današnjih proizvodnih sustava, još uvijek nije dana jedinstvena definicija pojma kompleksnosti. Iako se čini da je pitanje kompleksnosti svima intuitivno jasno, u trenutku dubljeg upuštanja u razumijevanje značenja pojma kompleksnost uočljivo je kako njezina definicija ovisi o razini znanja osobe koja ju definira za promatrani sustav te o njezinom razumijevanju područja kompleksnosti kojeg nastoji obuhvatiti. Mnogi autori su nastojali definirati značenje kompleksnosti u proizvodnom sustavu što je rezultiralo nastankom različitih definicija i mjera u ovisnosti o području istraživanja i ciljevima. U nastavku poglavlja objašnjen je koncept i značenje riječi kompleksnost. Nadalje, dan je pregled pristupa koji se koriste za razvoj mjera kompleksnosti u proizvodnom sustavu, s posebnim naglaskom na razvoj mjera kompleksnosti u montažnom procesu. Također, u literaturi su uočena dva problema koja se najčešće spominju kada je riječ o MMAL. Riječ je o problemima balansiranja linije za montažu te o problemima pronalaženja slijeda varijanti proizvoda. Pregled literature u ova dva područja s osvrtom na primjenu mjera kompleksnosti prilikom njihovih rješavanja prikazan je na kraju poglavlja.

2.1. Koncept i značenje riječi kompleksnost

Kompleksnost je široko primjenjiv i popularan pojam koji je ušao u uporabu u gotovo svim područjima znanosti i tehnike. Riječ kompleksnost podrijetlo vuče iz latinske riječi *complexus* koja znači složen, a odnosi se na „nešto što se sastoji od više dijelova koji su međusobno povezani“ ili na „nešto što nije jednostavno analizirati i razumjeti“ [19]. U literaturi se najčešće opisuje pomoću dvaju izraza, različitost (engl. *distinction*) i međusobna povezanost (engl. *interconnectivity*) [20]. Različitost se odnosi na raznolikost, odnosno na heterogenost komponenata sustava. Međusobna povezanost odnosi se na interakcije (veze) među komponentama sustava i podrazumijeva da različite komponente nisu neovisne, već da ovise o komponentama s kojima su povezane. Porastom različitosti i broja veza među komponentama, složenost sustava raste. Sustav koji se sastoji od malog broja komponenti pri čemu su funkcije svake pojedine komponente, kao i interakcije među njima lako razumljive, a ishod sustava je predvidljiv, može se definirati kao jednostavan sustav, Slika 2.1. Porastom broja raznolikih komponenti, sustav postaje složeniji jer zahtjeva dodatno znanje i dodatne informacije kako bi se njegova stanja mogla opisati. Kompleksni sustav može se definirati kao cjelina koja se sastoji od većeg broja komponenti čija međusobna povezanost uzrokuje složene uzročne odnose među komponentama. Stoga, ta cjelina uključuje određena svojstva koja nisu vidljiva iz svojstava individualnih komponenata [21], [22]. Sam pojam kompleksnost u literaturi se često koristi kao sinonim riječi kompliciranost ili kaotičnost. Međutim, ElMaraghy i ostali [19] te Alkan i ostali [23] napominju kako postoje razlike među ovim pojmovima, Slika 2.1. Komplicirani sustavi su oni koji se sastoje od velikog broja dijelova (elemenata), ali su funkcije svakog od njih, kao i interakcije među njima dobro definirane i razumljive. Kompliciranost proizlazi iz razine detalja i veličine sustava koja je premašila granice razumijevanja pojedinca [22]. Unatoč velikom broju komponenata, ovakav sustav se ponaša na očekivan način, odnosno daje predvidljiv ishod. Primjer jednog kompliciranog proizvoda je automobil jer on nije jednostavan proizvod, ali je razumljiv [19]. S druge strane kompleksan sustav odnosi se na sustav u kojem postoji određena doza nesigurnosti tijekom izvođenja procesa što rezultira time da konačni ishod sustava nije u potpunosti predvidljiv ili upravljiv. Primjerice, proces razvoja automobila je kompleksan jer zahtjeva inženjersko znanje u nekoliko disciplina te kolaborativni rad u timovima, pri čemu detalji o procesu razvoja automobila nisu u potpunosti poznati svakom razvojnom inženjeru [19]. Unatoč različitim definicijama ovih pojmova, bitno je napomenuti kako se shvaćanje sustava kao kompleksnog ili kompliciranog odnosi na subjektivni doživljaj promatrača, odnosno uvelike ovisi o razini znanja osobe koja ga promatra

i definira. Stoga ni ne čudi što se ova dva pojma često poistovjećuju. Kaotični sustavi su sustavi koji su vrlo teško upravljivi i često nepredvidljivi, s obzirom na to da čak i malene promjene u početnim uvjetima uzrokuju vrlo raznolike ishode.



Slika 2.1. Spektar rasta kompleksnosti procesa, [19]

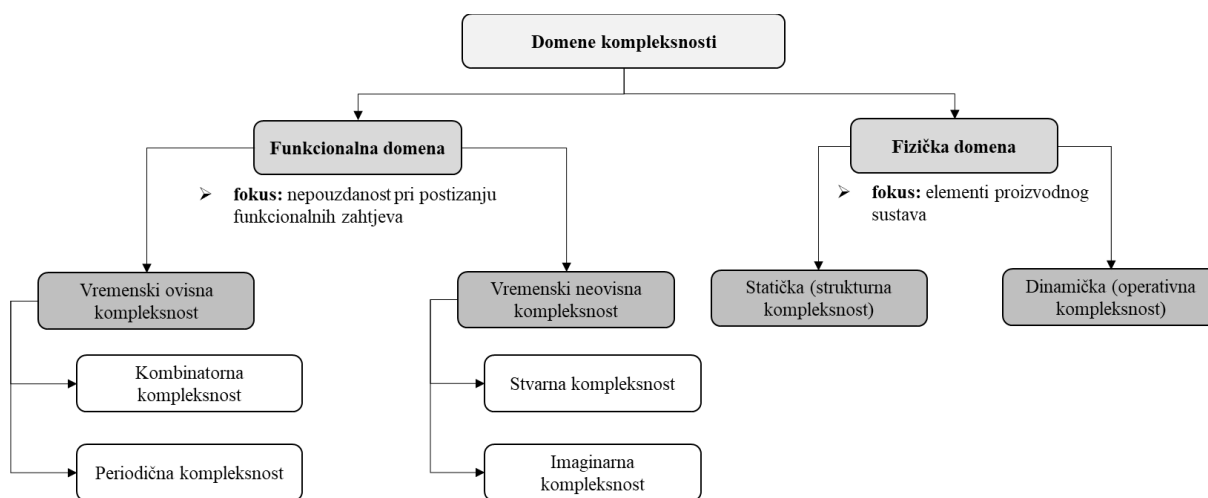
2.2. Teorija kompleksnosti u proizvodnim sustavima

Proučavanje kompleksnosti proizašlo je iz nastojanja da se ponašanje proizvodnog sustava objasni i predvidi kroz uporabu formalnih modela [24]. Modelima se nastoji opisati ponašanje sustava, odnosno izlazi sustava koji nastaju transformacijom ulaznih veličina kroz unutarnje procese. U literaturi se razlikuju dvije vrste kompleksnosti s kojima se proizvodno poduzeće susreće tijekom svog životnog vijeka, unutarnja i vanjska kompleksnost, a rezultat su djelovanja unutarnjih, odnosno vanjskih pokretača kompleksnosti. Pokretači kompleksnosti u literaturi se definiraju kao čimbenici koji utječu na kompleksnost sustava i postizanje ciljeva poduzeća [25]. Obje vrste pokretača imaju utjecaja na odluke poduzeća o tome koji proizvod i koje varijante proizvoda će se nuditi na ciljanom tržištu. Slijedom toga, može se reći da obje vrste pokretača uzrokuju kompleksnost u asortimanu proizvoda, arhitekturi proizvoda te u lancu dodavanja vrijednosti [26]. Vanjski pokretači kompleksnosti posljedica su djelovanja vanjskih utjecajnih čimbenika koji egzistiraju u okruženju poduzeća poput kupaca,

konkurencije, regulatornih tijela, tehnološkog napretka i slično. S obzirom da se ovi čimbenici formiraju van poduzeća, poduzeća na njih ne mogu utjecati niti ih mogu kontrolirati, ali mogu ih pratiti određenim praksama poput analize i prognoze tržišne potražnje, poslovne analize, analize konkurencije itd. Stoga, vanjska kompleksnost utječe na tokove koji se odvijaju unutar lanca dodavanja vrijednosti. S druge strane, unutarnja kompleksnost je ona koja nastaje unutar proizvodnog poduzeća kada se zahtjevi kupaca prevode u fizičke proizvode, a povezana je s tokovima koji se odvijaju unutar proizvodnog procesa (tokovi ljudi, materijala i informacija). Rezultat je djelovanja i vanjskih pokretača s obzirom da poduzeće u odnosu na njih mora prilagoditi svoje procese u lancu dodavanja vrijednosti, ali i problema koji su povezani s organizacijskom strukturom poduzeća te čimbenicima povezanim s ljudskim resursima (motivacija, trening, edukacija, itd.) [26]. U literaturi prevladava istraživanje unutarnje kompleksnosti proizvodnog poduzeća. Razvoj teorije unutarnje kompleksnosti u literaturi se može promatrati kroz nekoliko pristupa. Razvijeni pristupi za procjenu unutarnje kompleksnosti proizvodnog poduzeća primjenjivali su se u znanstvenim radovima orijentiranim na proizvodne sustave, a u kojima je kompleksnost kategorizirana kao kompleksnost proizvodnje (obrade) dijelova i kompleksnost u montažnim sustavima (završna faza proizvodnje).

2.2.1. Vrste unutarnje kompleksnosti u proizvodnim sustavima

Kompleksnost u proizvodnim sustavima definira se unutar dviju domena: funkcionalne i fizičke domene, Slika 2.2.



Slika 2.2. Domene kompleksnosti u proizvodnim sustavima, [19]

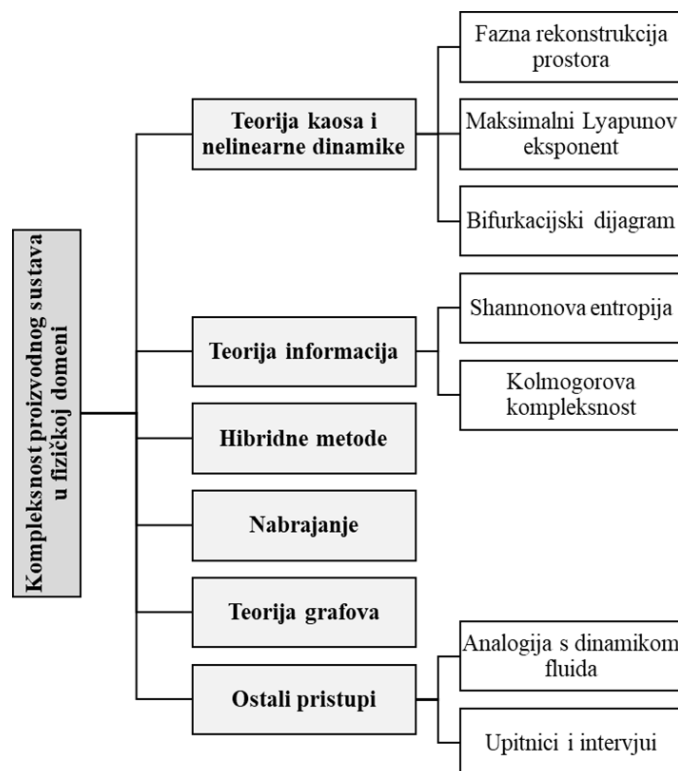
Interpretacija kompleksnosti u funkcionalnoj domeni svoje uporište pronalazi u teoriji aksiomatskog dizajna (engl. *Axiomatic Design*, AD) prema kojoj se kompleksnost definira kao mjera nepouzdanosti u ostvarenju prethodno definiranih funkcionalnih zahtjeva. Pri tome, nepouzdanost je rezultat lošeg dizajna i/ili nedostatka znanja i razumijevanja o elementu koji se promatra. Prema AD funkcionalni zahtjevi definiraju se kao minimalan skup neovisnih zahtjeva koji u potpunosti opisuje funkcionalne potrebe proizvoda u funkcionalnoj domeni [27]. Ova vrsta kompleksnosti u literaturi se najčešće koristi za opisivanje kompleksnosti dizajna proizvoda, procesa ili sustava. Funkcionalna kompleksnost može i ne mora biti funkcija vremena. Ovisno o tome, razlikuju se dvije primarne kategorije kompleksnosti, vremenski ovisna i vremenski neovisna kompleksnost. Vremenski ovisna kompleksnost može biti kombinatorna i periodična. Kombinatorna kompleksnost definira se kao kompleksnost koja raste kao funkcija vremena uslijed kontinuiranog porasta broja mogućih kombinacija stanja tijekom vremena. Periodična kompleksnost postoji u ograničenom periodu vremena u kojem je broj mogućih kombinacija stanja također ograničen. Vremenski neovisna kompleksnost je neovisna o vremenu i konstantna sve dok ne dođe do promjene parametara dizajna. Naime, ono što se želi postići u funkcionalnoj domeni izražava se preko funkcionalnih zahtjeva dok odgovor na pitanje kako realizirati funkcionalne zahtjeve u fizičkoj domeni daju parametri dizajna. Vremenski neovisna kompleksnost može biti stvarna i predstavljati mjeru nepouzdanosti u ostvarenju funkcionalnih zahtjeva te imaginarna koja je rezultat nepoznavanja povezanosti između funkcionalnih zahtjeva i parametara dizajna [28]. Fizička domena kompleksnosti oslanja se na elemente proizvodnog sustava te se dijeli na statičku (strukturnu) kompleksnost i dinamičku (operativnu) kompleksnost. Statička kompleksnost vremenski je neovisna i ona se bavi strukturom i konfiguracijom sustava, brojem proizvoda i njihovom raznolikošću te različitim elementarnim segmentima sustava (poput ljudi, strojeva, međuskladišta, transportnih sustava), njihovim povezanostima i međuovisnostima [4]. Dinamička kompleksnost povezana je pak s nesigurnošću ponašanja sustava tijekom određenog perioda vremena. Ova vrsta kompleksnosti također podrazumijeva i proučavanje vjerojatnosti da će sustav biti pod kontrolom [27]. Taksonomija pristupa za procjenu fizičke kompleksnosti proizvodnog sustava temelji se na teoretskom podrijetlu korištenih metoda analize, tj. pristupa za definiranje mjera kompleksnosti. Predložio ju je Eftymioue i ostali [4], a proširio Bugra i ostali [29]. Podjela podrazumijeva podjelu na šest pristupa.

Osim podjele kompleksnosti prema fizičkoj i funkcionalnoj domeni, u literaturi je prisutna i podjela kompleksnosti na objektivnu (realnu ili stvarnu) i subjektivnu (doživljenu)

kompleksnost. Prema spomenutoj klasifikaciji, objektivna kompleksnost temelji se na objektivnim mjerljivim parametrima proizvodnog sustava, dok je subjektivna kompleksnost pojam koji se koristi kako bi se istaknulo da se isti proizvodni sustav, ovisno o individualnim vještinama, sposobnostima i iskustvu osobe koja definira kompleksnost, ona može spoznati na drugačiji način. Stoga, subjektivna kompleksnost određena je subjektivnim čimbenicima poput osobnih čimbenika (znanje, vještine, tip osobe, motiviranost, raspoloženje, obuka i slično) te operativnom i upravljačkom strategijom poduzeća [15], [30]. Načini kojima se subjektivna kompleksnost nastoji opisati i definirati podrazumijevaju provođenje anketnih upitnika, intervju te razgovora sa zaposlenicima.

2.2.2. Taksonomija pristupa za procjenu fizičke domene kompleksnosti

Prema teoretskom podrijetlu razlikuje se šest kategorija metode analize koje se koriste za definiranje i kvantificiranje kompleksnosti proizvodnog sustava. Prva kategorija podrazumijeva metode koje proizlaze iz teorije kaosa i nelinearne dinamike. Druga kategorija utemeljena je na teoriji informacija, a njezina temeljna mjera je Shannonova entropija. Treća kategorija odnosi se na hibridne metode koje kompleksnost proizvodnog sustava definiraju kombiniranjem metoda iz teorija kompleksnosti i različitih područja znanosti. Četvrta kategorija koristi metode preko kojih kompleksnost definira količinama različitih elemenata proizvodnog sustava poput resursa, procesa, proizvoda. Peta kategorija podrazumijeva korištenje koncepta i metoda iz teorije grafova. Posljednja kategorija uključuje metode koje se ne mogu klasificirati prema prethodno nabrojanim kategorijama i u njih spadaju upitnici i intervjui te analogija s dinamikom fluida. Taksonomija pristupa za procjenu fizičke domene kompleksnosti prikazana je na Slici 2.3.



Slika 2.3. Metode analize kompleksnosti proizvodnih sustava, [4], [29]

2.2.3. Teorija kaosa i nelinearne dinamike

Teorija kaosa i nelinearne dinamike nudi teoretske temelje za interpretiranje nelinearnosti, nestabilnosti i nesigurnosti koje karakteriziraju sustave s rastućom kompleksnošću [4]. U proizvodnji, ovaj pristup koristi se za istraživanje dinamičkog ponašanja proizvodnog sustava, pri čemu se koriste tri metode: fazna rekonstrukcija prostora, maksimalni Lyapunov eksponent te bifurkacijski dijagram. Fazna rekonstrukcija prostora nastoji razviti model stanja sustava prikupljanjem i analizom povijesnih podataka značajnih obilježja sustava. Ona rezultira s geometrijskim prikazom koji pruža uvid u osnovno ponašanje sustava. Primjer primjene fazne rekonstrukcije prostora za definiranje kompleksnosti proizvodnog sustava može se pronaći u radovima [31], [32]. Lyapunov eksponent koristi se za kvantitativno mjerenje osjetljivosti i ovisnosti dinamičkog sustava o njegovim inicijalnim uvjetima, dok se bifurkacijski dijagram koristi za opisivanje ovisnosti sustava o promatranim parametrima i identifikaciju onih parametara sustava čije fluktuacije dovode do njegovog nestabilnog ponašanja [4]. Primjer primjene ovih metoda može se pronaći u radu od Papakosa i ostalih [31] koji su upotrijebili Lyapunov eksponent i bifurkacijski dijagram kako bi analizirali ponašanje proizvodnog sustava pri korištenju različitih politika prilagodljivosti proizvodnog sustava.

2.2.4. Teorija informacija

Teorija informacija je grana primijenjene matematike koja se bavi kvantificiranjem informacija. U proizvodnom sustavu, ova teorija pruža teoretske osnove za definiranje kompleksnosti kao informacijskog sadržaja stanja resursa i konfiguracije sustava te nepredvidljivosti njegovog ponašanja. Najpoznatiji pristup teorije informacija čija je uporaba dominantna prilikom razvoja mjera kompleksnosti proizvodnog sustava je Shannonova entropija. Shannonova entropija predstavlja temelj teorije informacija, a zasniva se na teoriji vjerojatnosti i statistike. Definirao ju je Shannon u svom radu [33] kao stupanj dvosmislenosti koji je povezan s izlazom slučajnog eksperimenta, odnosno kao stupanj nereda unutar sustava. U kontekstu procjene kompleksnosti proizvodnog sustava, Shannonova entropija koristi se za kvantificiranje nesigurnosti informacija koje su potrebne za definiranje stanja proizvodnog sustava ili za opisivanje njegovih resursa. U tom smislu, stanje resursa može se definirati subjektivno. Vjerojatnosti stanja mogu se promatrati na temelju dostupnih informacija o planiranom redoslijedu proizvodnje (statička kompleksnost) ili na temelju informacija koje se prikupljaju promatranjem u stvarnom vremenu (dinamička kompleksnost) [29]. Osnovna ideja ove teorije informacija je: što je više raznolikih informacija koje opisuju sustav, sustav je kompleksniji i zahtijeva više informacija koje su potrebne za opisivanje njegovog stanja. Jedan od prvih radova koji je uveo koncept Shannonove entropije te time pružio teoretske osnove za kvantificiranje statičke kompleksnosti proizvodnje je rad od Deshmukha i ostalih [18]. Predložena mjera statičke kompleksnosti definirana je na temelju zahtjevnosti obrade dijelova i mogućnosti korištenih strojeva. Ona nije primjenjiva na proizvodnim sustavima koji obuhvaćaju montažne i/ili demontažne zadatke. Varijacije statičke kompleksnosti autori proučavaju s obzirom na sličnost dijelova, promjenu dizajna proizvoda te veličinu proizvodnog sustava. Primjena Shannonove entropije u literaturi je široko zastupljena za procjenu nesigurnosti unutar proizvodnog sustava uzrokovanu porastom raznolikosti proizvoda. Zhu i ostali [34] predlažu mjeru kompleksnosti naziva kompleksnost odabira operatera koja podrazumijeva kvantificiranje ljudskih karakteristika prilikom procesa montaže odabranih proizvoda iz familije proizvoda, uzimajući u obzir odabir potrebnih dijelova proizvoda i sukladno njemu odabir alata, stezne naprave i ispravne procedure montaže. Predloženu mjeru kompleksnosti definirali su na razini radne stanice te na razini sustava. Na razini radne stanice kompleksnost je definirana kao suma entropija montažnih aktivnosti koje se na toj stanici odvijaju za skup različitih proizvoda. Na razini sustava kompleksnost je definirana kao suma kompleksnosti koje se pojavljuju zbog raznolikosti proizvoda na radnim stanicama i njima

uzvodnih radnih stanica. Hu i ostali [35] proširili su rad od Zhua za primjenu i na lanac dodavanja vrijednosti. Wang i Hu [36] proučavali su odnos kompleksnosti odabira operatera i propusnosti (engl. *throughput*) montažnog sustava, te su uočili da kompleksnost uzrokovana raznolikošću proizvoda utječe na pouzdanost i propusnost sustava. U svojim daljnjim istraživanjima Wang i ostali [37] predložili su dvociljnu optimizaciju za pronalaženje optimalnog podskupa proizvoda iz familije proizvoda koji će povećati tržišni udio uz istovremeno smanjenje relativne kompleksnosti. Kao osnovu za razvoj mjere relativne kompleksnosti autori su koristili kompleksnost odabira operatera. Park i Okudan [38] predstavili su mjeru strukturne kompleksnosti dizajna i strukturne kompleksnosti proizvodnje za familiju proizvoda. Razvoj mjera temelji se na kombiniranju koncepta sličnosti (engl. *commonality*) proizvoda/procesa te Shannonove entropije. Osim Shannonove entropije, za procjenu kompleksnosti u proizvodnom sustavu u literaturi su zastupljeni i drugi modeli iz domene teorije informacija, ali u smanjenom obujmu. Primjerice, Kolmogorovu Lempev Ziv metodu analize u kombinaciji sa simulacijom diskretnog događaja Efthymiou i ostali [39] upotrijebili su za opisivanje nepredvidljivosti pokazatelja performansi proizvodnog sustava u određenim vremenskim periodima razmatranja.

2.2.5. Hibridne metode

Hibridne metode podrazumijevaju kombinaciju metoda iz teorija kompleksnosti i drugih područja znanosti. ElMaraghy i ostali [40] u svojim radovima koristili su kombinaciju teorije informacija i heurističkog indeksa za definiranje vremenski neovisne kompleksnosti. Heurističke metode koriste se za klasificiranje proizvoda, strojeva i međuskладиšta na temelju niza kriterija kao što su količina promatranih značajki, raznolikost značajki i slično [4]. Korištenjem teorije informacija u svojim istraživanjima ElMaraghy i ostali [41] predložili su mjeru kompleksnosti proizvodnog sustava koju su izrazili kroz kompleksnost proizvoda i kompleksnost procesa. Kompleksnost proizvoda definirali su kao funkciju materijala, dizajna i određenih značajki svake komponente proizvoda, dok su kompleksnost procesa izrazili kao funkciju proizvoda, radnog okruženja (korištena vrsta alata, pomoćni alati, strojevi koji se koriste za izradu proizvoda) i traženog volumena proizvodnje. U daljnjem radu [42] autori su proširili prethodno istraživanje razmatranjem fizičkog i kognitivnog napora operatera koji je rezultat raznolikih značajki proizvoda, alata i zadataka s kojima se operater susreće. Nova predložena mjera nazvana je operativna kompleksnost. Kao slijed prethodnih istraživanja autori su u radu [40] predstavili novu metodu za definiranje strukturne kompleksnosti proizvodnog sustava naziva metoda kodiranja i klasificiranja proizvodnog sustava (engl.

Structural Classification and Coding System, SCC). Predložena metoda uključuje kodove za klasifikaciju različitih entiteta proizvodnog sustava. Kod entiteta sustava ona predstavlja količinu informacija koja je potrebna za njegovo opisivanje. Entiteti koje su autori promatrali su: strojevi, sustav za rukovanje materijalom i međuskladišta. Svaki kod sastoji se od 17 polja. Svako polje koda sastoji se od niza mogućih znamenki koje opisuju strukturu promatranog entiteta, način njegovog upravljanja, programiranja i rada, odnosno njegovu operativnu kompleksnost. Predložena metoda kodiranja i klasificiranja u [43] je prilagođena za primjenu u montažnim sustavima.

Još jedan zapažen pristup za definiranje kompleksnosti promatranog sustava može se pronaći u radu od Sinhe [22]. On je u svojim istraživanjima razvio teoretski okvir za procjenu strukturne kompleksnosti složenih inženjerskih sustava (poput nagibnog vlaka) modifikacijom Huckleove molekularne orbitalne teorije primjeni za proizvodne sustave uz uporabu heurističkih indeksa kojima se opisuju elementi kompleksnosti. Predloženi koncept kasnije je usvojio Bugra [44] koji ga je prilagodio kako bi definirao kompleksnost dizajna proizvoda unutar MMAL.

2.2.6. Metode nabiranja

Metode nabiranja povezuju kompleksnost s brojem elemenata od kojih se proizvod, proces ili sustav sastoji, primjerice poput količine i raznolikosti proizvodnih zadataka, učestalosti (broj promjena) potražnje, količine i raznolikosti korištenih resursa i slično. Sarkis i ostali [45] kompleksnost su promatrali kroz sumu numerički upravljanih strojeva i industrijskih robota unutar fleksibilnog proizvodnog sustava (engl. *Flexible Manufacturing System*, FMS). Proučavali su povezanost produktivnosti FMS-a i kompleksnosti te su uočili da porast kompleksnosti koja je izražena porastom broja uređaja koji rezultiraju porastom napora i vremena koje je potrebno utrošiti za njihovo upravljanje, uzrokuje pad proizvodnosti. Windt i ostali [46] predložili su klasifikaciju kompleksnosti sustava na temelju triju kategorija kompleksnosti. Kategorije kompleksnosti promatrane su kao kriteriji klasifikacije. Prva dimenzija povezana je s vremenom što znači da se odnosi na dinamiku kompleksnosti (statička ili dinamička kompleksnost). Druge dvije dimenzije predstavljaju organizacijsku kompleksnost (procesno orijentirana kompleksnost ili strukturna kompleksnost) i kompleksnost koja je određena granicama sustava (je li riječ o unutarnjoj ili vanjskoj kompleksnosti). Svaka kategorija predstavljena je vektorom koji podrazumijeva niz mjera kompleksnosti koje se temelje na prebrojavanju pripadajućih elemenata. Tri dimenzije kompleksnosti mogu se prikazati kao tri osi koje tvore kocku kompleksnosti. Mesa i ostali [47]

promatrali su familiju proizvoda koju karakterizira otvorena arhitektura proizvoda. Kompleksnost montaže definirali su kroz sličnost preobrazbe proizvoda među različitim varijantama proizvoda unutar promatrane familije proizvoda. Predložili su indekse rekonfiguracije proizvoda i ukupne familije proizvoda čije su razvoje temeljili na broju i vrsti montažnih/demontažnih zadataka koji su potrebni da bi se jedna varijanta proizvoda modificirala u drugu. Indeks rekonfiguracije proizvoda služi kako bi se uočio najkompleksniji proizvod u familiji proizvoda, dok indeks rekonfiguracije ukupne familije proizvoda služi kako bi se kompleksnosti različitih familija proizvoda mogle usporediti.

2.2.7. Teorija grafova

Posljednjih godina teorija grafova i mrežna teorija postala je aktualno područje za istraživanje entiteta proizvodnog sustava i veza među njima. Chryssolouris i ostali [48], ElMaraghy i ostali [49], Jenab i Liu [50] neki su od autora koji su u posljednjem desetljeću ovu teoriju koristili za procjenu fizičkog aspekta kompleksnosti proizvodnog sustava. Chryssolouris i ostali [48] predložili su mjeru naziva kompleksnost mreže (engl. *network complexity*) kojom procjenjuju statičku strukturu proizvodnog sustava. Teoriju grafova koriste za generiranje matrica prethodnosti kojim definiraju odnose između promatranih elemenata proizvodnog sustava. ElMaraghy i ostali [49] teoriju grafova upotrijebili su kako bi definirali ukupnu strukturnu kompleksnost proizvodnog sustava koja proizlazi iz rasporeda njegovih sastavnih elemenata (strojeva, radnih stanica, transportera itd.) i veza među njima. Raspored sastavnih elemenata oblikuje tokove materijala, informacija i ljudi te utječe na generiranje troškova u ovisnosti o dodijeljenim im različitim dijelovima. Autori su predložili šest indeksa kompleksnosti kojima definiraju strukturnu kompleksnost i informacijski sadržaj za svojstveni raspored proizvodnog sustava. Šest indeksa naposljetku se mogu integrirati u ukupni indeks kompleksnosti rasporeda proizvodnog sustava. Pomoću ukupnog indeksa moguće je usporediti različite alternative rasporeda sustava i donijeti odluku o odabiru najmanje složenog. Primjenu razvijene metode autori predlažu u ranoj fazi projektiranja rasporeda sustava. Jenab i ostali [50] koristili su teoriju grafova kako bi dobili grafički prikaz relativne kompleksnosti proizvoda i relativne sličnosti proizvoda unutar familije proizvoda. Obje mjere razvijene su na temelju sličnosti proizvoda unutar promatrane familije proizvoda. Sličnost proizvoda definirana je preko težina te funkcije iskoristivosti svakog pojedinog proizvoda koja računa trošak vremena obrade i potrebnih vještina operatera. Pomoću grafičkog prikaza, moguće je uočiti najkompleksniji proizvod, najmanje kompleksan proizvod te relativnu kompleksnost preostalih proizvoda između njih.

2.2.8. Ostali pristupi

Ostali pristupi za definiranje kompleksnosti proizvodnog sustava podrazumijevaju korištenje upitnika i anketa te dinamike fluida za definiranje kompleksnosti proizvodnog sustava. Unutar proizvodnog sustava upitnici i intervjui koriste se za definiranje subjektivne kompleksnosti. Mattsson i ostali [51] u svojim istraživanjima postavili su osnove za razvoj indeksa kompleksnosti naziva CXI (engl. *CompleXity Index*, CXI), kojeg su kasnije, uz određene izmjene, predstavili u radu [52]. CXI indeks se temelji na upitnicima s 23 pitanja kojim su autori željeli dobiti subjektivnu procjenu kompleksnosti proizvodnje primjenom Likertove ljestvice. Likertova ljestvica je psihometrijska ljestvica koja se koristi za skaliranje odgovora u upitnicima. Odgovori su definirani u rasponu od jedan do pet, gdje je jedan značio „Uopće se ne slažem“, a pet „U potpunosti se slažem“. Upitnik je obuhvatio pitanja za šest problematičnih područja: proizvod i njegove varijante, sadržaj rada, raspored radne stanice (npr. je li rukovanje materijalom dobro organizirano, je li ergonomija radnog mjesta prikladna itd.), alate i alate za potporu (koje vrste alata operateri koriste i pomažu li im alati za potporu tijekom montaže), upute za rad te općenito mišljenje operatera o radnom prostoru u kojem je mogao iznijeti svoje kritike te prijedloge poboljšanja. Ovisno o dobivenoj vrijednosti indeksa, autori su rezultate podijelili u tri kategorije na temelju kojih predlažu hitnost promjena. Falck i ostali [53], [54] predložili su CXB metodu (engl. *Basic compleXity Criteria*, CXB) koja primjenom upitnika definira kompleksnost montažnog zadatka. Kroz upitnik se od operatera traži da procijeni ispunjava li ili ne ručni montažni zadatak kriterije kompleksnosti koji se promatraju, a kojima se opisuju kognitivni i fizički aspekti ergonomije montaže. U ovisnosti o dobivenim rezultatima, zadatak se svrstava u pripadajuću kategoriju kompleksnosti.

Ohrabreni korištenjem analogije dinamike fluida za modeliranje proizvodnih sustava kojim je dobiven analitički okvir za procjenu pokazatelja učinkovitosti i rješavanje problema određivanja rasporeda proizvodnje (engl. *scheduling*), određene studije [55], [56] nastojale su analogiju s dinamikom fluida primijeniti za analizu turbulencije proizvodnog toka. Međutim, iako ova analogija može biti obećavajuća za identifikaciju područja koja najviše doprinose turbulenciji u proizvodnom toku, njihova primjena je tek u začetku i zahtijeva daljnja istraživanja [4]. Ostali pristupi u literaturi ne slijede nijednu od prethodno spomenutih podjela. Od pristupa koji ne slijede nijednu od prethodno spomenutih podjela zapažen pristup za definiranje objektivne kompleksnosti radne stanice u MMAL pružili su Zeltzer i ostali [57] koji su predložili CXC metodu mjerenja (engl. *CompleXity Calculator*, CXC). CXC metoda mjerenja koristi objektivne podatke o ručnim radnim montažnim stanicama koje prikuplja iz

sustava, a potom preko algoritma računa mjeru kompleksnosti svake radne stanice. Algoritam se temelji na statističkim modelima pomoću kojih se radna stanica klasificira kao radna stanica visoke ili niske razine kompleksnosti. Mattsson i ostali [58] u svom radu predložili su uzajamno korištenje CXI i CXC metode. Autori tvrde da se ove dvije metode međusobno nadopunjuju, u smislu da se metoda CXC može primijeniti za identifikaciju problematičnih radnih stanica, a potom da se uzroci problema dalje istražuju primjenom CXI metode.

2.3. Montaža i istraživani problemi u montaži

Montaža je jedan od najisplativijih pristupa postizanja visoke raznolikosti proizvoda [59] te se smatra važnom fazom životnog ciklusa proizvoda. Ona se u čitavom nizu značajki razlikuje od postupaka izrade dijelova, što prikazuje Tablica 2.1.

Tablica 2.1. Razlika montažnih postupaka i tehnoloških postupaka izrade dijelova, [60]

Montaža	Izrada dijelova
Više ugradbenih elemenata u procesu	Jedan izradak u procesu
Ugradbeni elementi složene geometrije	Dijelovi jednostavne geometrije
Različite montažne operacije na više ugradbenih elemenata	Različite tehnološke operacije na jednom izratku
Masa i obujam objekta i montaže rastu	Masa i obujam izratka se smanjuju
Montaža se na istom objektu izvede više puta	Obrada na izratku izvede se samo jednom
Mnogo rukovanja ugradbenim elementom	Malo rukovanja izratkom

Montaža najčešće predstavlja završnu fazu procesa proizvodnje proizvoda zbog čega se svi propusti, pogreške te nedostaci proizašli iz prethodnih faza proizvodnje u njoj reflektiraju. U današnjim uvjetima globalizacije na montažnu liniju se redovito uvode nove varijante proizvoda kao odgovor na potrebe potrošača. To rezultira dugom i rastućom listom izbora proizvoda zbog porasta broja varijanti podsklopova proizvoda, a time i mogućih opcija ugradnje. Proizašla velika varijabilnost izravno utječe na kompleksnost montažnog sustava. Očekuje se da će se ovaj trend nastaviti i u budućnosti [14]. Varijabilnosti komponenata i promjenjiva potražnja kupaca nameću potrebu za konstantnim planiranjem i upravljanjem slijeda montaže proizvoda i rasporeda raspoloživih resursa. Stoga ni ne čudi što se za MMAL u literaturi najčešće vežu dva problema. Prvi problem odnosi se na balansiranje montažne linije, a drugi problem odnosi se na određivanje slijeda montaže. Ranije su ovi pojmovi u literaturi

uglavnom bili proučavani zasebno. Međutim, posljednjih godina vidljiv je trend porasta broja istraživanja koji nastoje predložiti optimalno rješenje razmatrajući oba problema istodobno [61]–[63]. Primjena mjera kompleksnosti na probleme koji se javljaju u literaturi koja se odnosi na MMAL još uvijek je u svojim začecima. Razlog leži u činjenici što kompleksnost nije jednoznačno definirana mjera, već ovisi o problemu koji se promatra, kao i o gledištu autora koji definira problem. Unatoč tome, utjecaj kompleksnosti montaže na performanse montažne linije i njeno promatranje kao dodatnog kriterija prilikom optimizacije promatranog problema u literaturi je prepoznato i očekuje se njezino daljnje istraživanje.

2.3.1. Problemi istraživanja u montaži

Ključni izazovi u postizanju visoke raznolikosti proizvoda, koja se ostvaruje kroz montažni proces, mogu se promatrati s dva aspekta kompleksnosti. Prvi aspekt kompleksnost promatra na razini proizvoda gdje je fokus stavljen na dizajn za montažu (engl. *Design for Assembly*, DFA) kako bi se omogućilo učinkovito stvaranje raznolikosti, što uključuje dizajn određene familije proizvoda. Drugi aspekt promatra se na razini montažne linije. Njegov fokus stavljen je na realizaciju procesa montaže proizvoda velike raznolikosti. U ovom aspektu, kompleksnost se promatra na razini radne stanice, odnosno operatera.

U literaturi se najčešće spominju dva problema odlučivanja koja se javljaju kod MMAL-a. Oba problema pripadaju različitim horizontima planiranja. Prvi problem povezan je s dugoročnim horizontom planiranja. U njemu je potrebno donijeti odluku o dodjeljivanju različitih zadataka radnim stanicama kako bi se opterećenje među njima podjednako raspodijelilo. Ova vrsta problema naziva se problem balansiranja montažnih linija različitih proizvoda, a u literaturi se za njega najčešće koristi akronim MMALBP (engl. *Mixed Model Assembly Line Balancing Problem*, MMALBP). Međutim, za djelotvorno upravljanje MMAL-om, dugoročne odluke o balansiranju linije i željenoj količini proizvodnje nisu dovoljne. Razlog su neučinkovitosti koje proizlaze iz varijacija iskorištenosti radnih stanica zbog definiranog slijeda montaže različitih varijanti proizvoda. Varijacije su posljedice korištenja prosječnog vremena trajanja zadataka svih varijanti proizvoda tijekom balansiranja linije [64]. Sukladno navedenome, za očekivati je da će se unutar MMAL-a pojavljivati varijanta proizvoda čije će vrijeme montaže na radnoj stanici biti značajno manje od taktnog vremena, ali s druge strane za očekivati je i da će za neke druge varijante vrijeme montaže na radnim stanicama premašiti taktno vrijeme. Ovisno o tome koje varijante proizvoda slijede jedna drugu, može se pojaviti premala iskorištenost operaterâ na radnim stanicama ili pak njihova preopterećenost. Kako bi se taj problem riješio, potrebno

je problemu odlučivanja pristupiti s aspekta kratkoročnog planiranja. Kratkoročni problemi odlučivanja odnose se na određivanje slijeda u kojem se određena količina različitih modela proizvoda planira montirati unutar određenog vremenskog horizonta, npr. jednog dana ili jedne smjene [13]. Ovaj problem naziva se problem sekvencioniranja varijanti proizvoda. Za njega se u literaturi najčešće koristi akronim MMALSP (engl. *Mixed Model Assembly Line Sequencing Problem*, MMALSP). Iako je gotovo svaki slijed različitih varijanti proizvoda tehnički izvediv, postizanje značajnih ekonomskih učinaka zahtjeva temeljito planiranje slijeda proizvodnje. Obje vrste problema predstavljaju složene kombinatorno optimizacijske probleme te podrazumijevaju poštivanje ograničenja prethodnosti zadataka, vremena montaže, taktnog vremena, kvalifikacije operatera te ostalih dodatnih ograničenja vezanih za cilj ili ciljeve koji se žele postići.

U znanstvenim bazama može se pronaći velik broj znanstvenih radova koji pojedinačno promatraju problem balansiranja, sekvencioniranja te kompleksnosti montažne linije. Također, mogu se pronaći i radovi u kojima autori istražuju povezanost kompleksnosti montaže s dizajnom proizvoda i performansama operatera. Međutim, odnos između kompleksnosti te balansiranja i/ili sekvencioniranja je zanemaren. Praćenje i analiza kompleksnosti tijekom stvaranja rješenja za spomenute probleme je neistražena tema, posebice kada se koriste u stvarnom industrijskom okruženju [14].

2.3.2. Problemi u mjerenju kompleksnosti

Porastom raznolikosti proizvoda kod MMAL-a, omogućuje se ostvarivanje konkurentnosti poduzeća, zadržavanje postojećeg i stjecanje novog tržišnog udjela te porast prihoda i profita [15]. Međutim, unatoč spomenutim prednostima sam proces montaže može postati poprilično kompleksan. Porast kompleksnosti procesa montaže donosi probleme unutar montažnog sustava poput: negativnog utjecaja na rad i pada kvalitete proizvoda [65], [66], porasta pogrešaka koje se javljaju tijekom rada, porasta troškova rada [67], [68] i porasta vremena proizvodnje, odnosno smanjenja proizvodnosti linije [43], [44], [69]. Određivanje kompleksnosti je nužno kako bi se povećala svjesnost o njezinim uzrocima i utjecajima na montažni sustav. Sukladno tome, može se reći da upravljanje kompleksnošću iz perspektive montaže može doprinijeti smanjenju troškova i vremena proizvodnje te dovesti do povećanja proizvodnosti, kvalitete proizvoda, profitabilnosti i konkurentnosti [70]. Preduvjet za smanjenje negativnog utjecaja kompleksnosti je njezino definiranje i mjerenje [71].

Trenutačno se većina definicija kompleksnosti proizvoda, operacija, procesa i sustava definira uporabom Shannonove entropije [33]. Iz perspektive teorije informacija, entropija je definirana kao količina informacija potrebna za opis stanja promatranog sustava. Pretpostavimo da diskretna varijabla X ima s mogućih vrijednosti $\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_s\}$, a njihove vjerojatnosti su $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_s\}$, gdje je $p_s \geq 0$, tada se entropija varijable X , označena s $H(X)$ može izraziti jednadžbama:

$$H(X) = - \sum_{s=1}^s p_s \log_2 p_s \quad (2.1)$$

$$\sum_{s=1}^s p_s = 1 \quad (2.2)$$

gdje je:

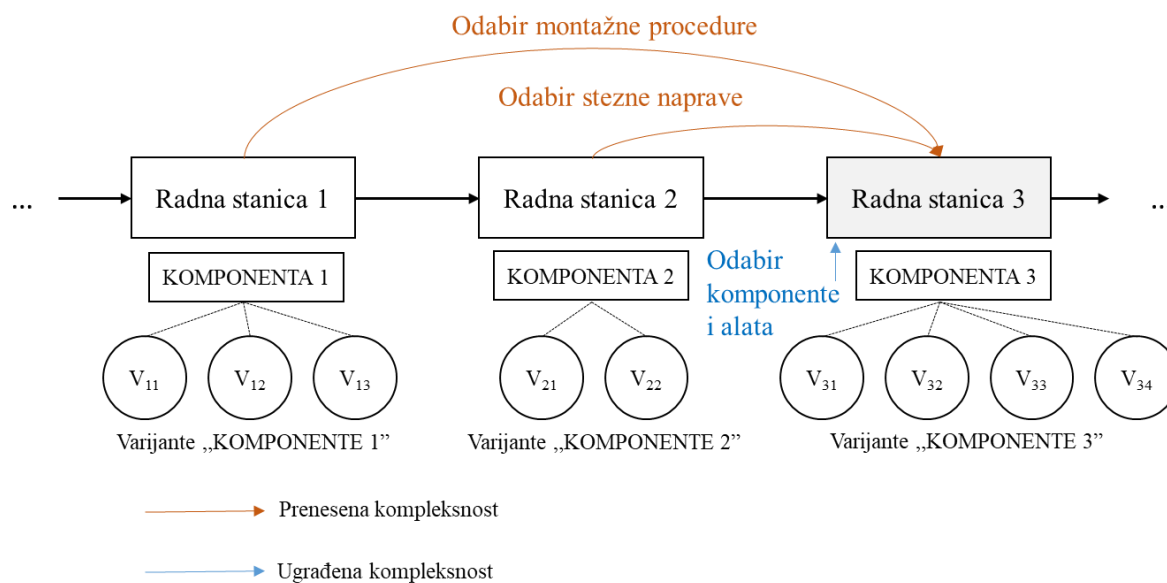
S - broj stanja odabrane varijable (elementa) promatranja

p_s - vjerojatnost da će se promatrana varijabla (element) naći u s -tom stanju.

Ako X predstavlja sustav, odnosno MMAL, x_s i p_s odnose se na stanje sustava i njegovu vjerojatnost pojavljivanja. Primjerice Liu i ostali [72] su u svom radu promatrali opterećenje radne stanice i sukladno tome stanja radnih stanica definirali su kao: radna stanica radi, radna stanica je blokirana i radna stanica je u procesu čekanja. U montažom sustavu entropija se može primijeniti na stanja radnih stanica, zadatke/odabire na radnim stanicama ili na cijelu montažnu liniju. Definiciju kompleksnosti montažne radne stanice za različite montažne sustave, između ostalih, predložili su Zeltzer i ostali [14], a ona glasi: „Kompleksnost radne stanice je zbroj svih tehničkih i ergonomskih aspekata i čimbenika koji omogućavaju izvršavanje skupa zadataka od strane operatera koji je sklon pogreškama, izložen stresu i od kojeg se zahtijeva koncentracija i razmišljanje“. Predložena definicija prepoznaje da je kompleksnost zadataka uvelike određena fizičkim i psihološkim stanjem operatera. Međutim, s obzirom na to da je kognitivno stanje i ponašanje čovjeka teško kvantificirati, autori su svoje napore usmjerili prema definiranju objektivne mjere kompleksnosti provođenjem ispitivanja u stvarnom industrijskom okruženju. Statističkom obradom podataka dobivenih od operaterâ, autori su uočili da je promjenjivost sadržaja rada (raznolikost alata, strojeva, varijanti proizvoda (podsklopova), broj korištenih metoda ili procedura montaže) parametar koji operateri

identificiraju kao onaj koji najviše utječe na kompleksnost montažnog zadatka koji obavljaju na radnoj stanici.

Najcitiraniji rad koji se tiče kompleksnosti montaže na razini radne stanice je rad od Zhua i ostalih [34]. U tom radu autori su predložili mjeru kompleksnosti na razini radne stanice i na razini sustava kojom kvantificiraju ljudske značajke prilikom donošenja odluke. Odnosno, autori su kvantificirali učinkovitost operatera prilikom odabira montažnih aktivnosti s kojima se operater suočava na radnom mjestu uslijed montaže raznolikih proizvoda (odabir traženih varijanti dijelova, odabir prikladnog alata, odabir stezne naprave, odabir ispravnog procesa montaže). Predloženu mjeru nazvali su kompleksnost odabira operatera (engl. *operator choice complexity*). Na razini radne stanice kompleksnost je definirana kao suma entropija montažnih aktivnosti koje se na toj stanici odvijaju za skup različitih proizvoda, dok je na razini sustava definirana kao suma kompleksnosti koje se pojavljuju zbog raznolikosti proizvoda na radnim stanicama i njima uzvodnim radnim stanicama. Kako bi naglasili dvojak uzrok nastanka kompleksnosti odabira na razini sustava, autori razlikuju dvije vrste kompleksnosti koje se pojavljuju na radnoj stanici. Prva kompleksnost naziva se ugrađena kompleksnost (engl. *feed complexity*) i ona je isključivo rezultat odabira varijante komponente na trenutnoj stanici, dok se druga vrsta naziva prenesena kompleksnost (engl. *transfer complexity*) i ona je rezultat utjecaja odabira komponente na uzvodnim stanicama. Grafički prikaz spomenutih kompleksnosti u montažnoj liniji dan je na Slici 2.4.



Slika 2.4. Primjer prikaza ugrađene i prenesene kompleksnosti za radnu stanicu 3, [34]

Sukladno tome, kompleksnost odabira radne stanice na razini sustava, C_{rs} , definirana je kao suma spomenutih kompleksnosti:

$$C_{rs} = C_f + \sum_{\forall x:x < y} C_{xy} \quad (2.3)$$

gdje je:

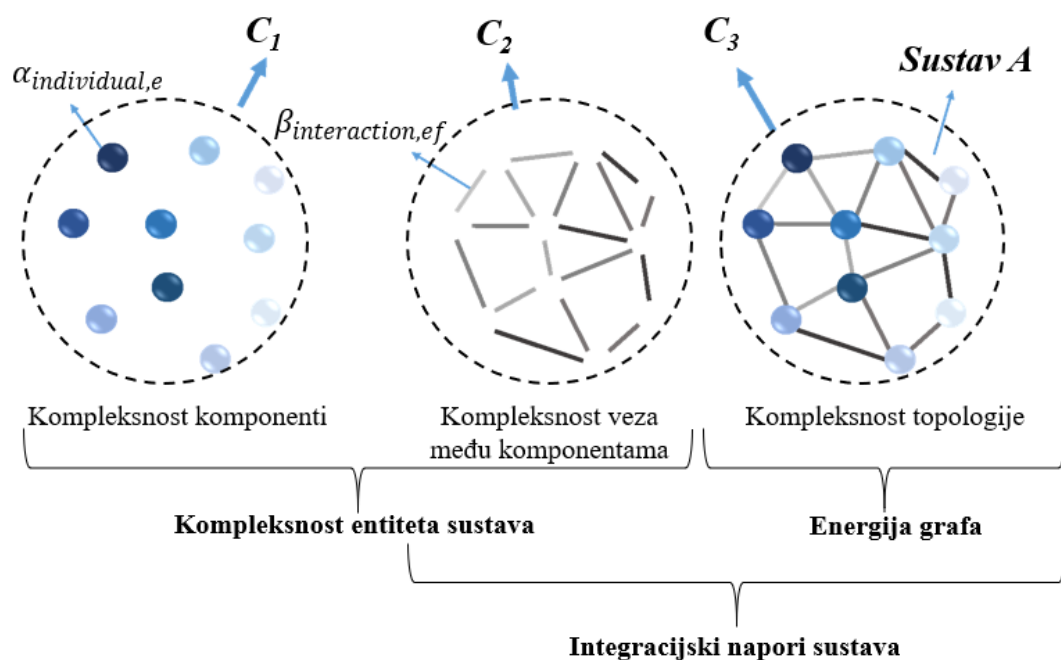
C_f - ugrađena kompleksnost

C_{xy} - prenesena kompleksnost.

Primjenu svoje mjere kompleksnosti autori su predložili u dizajnu različitih sustava s obzirom na to da ona naglašava dvojaki karakter nastanka kompleksnosti odabira (ugrađena kompleksnost i prenesena kompleksnost). U daljnjim radovima autori su razmatrali problem oblikovanja montažne linije u kojem su predloženu mjeru koristili kako bi utvrdili optimalan slijed izvođenja montažnih zadataka [73], a kasnije i kako bi pronašli podskup proizvoda iz familije proizvoda koji će istodobno minimizirati kompleksnost montažnog procesa te osigurati maksimalni tržišni udio primjenom genetskog algoritma [37].

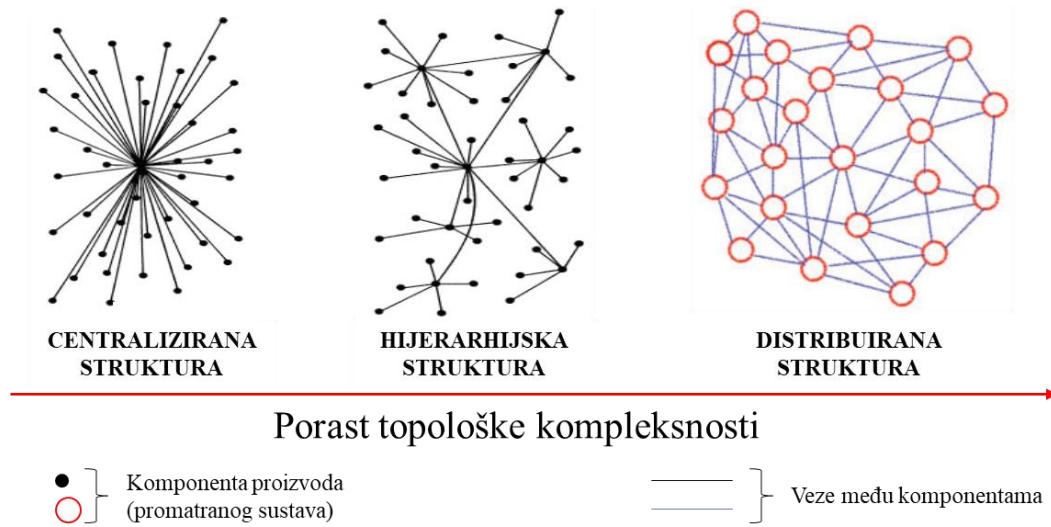
Park i Okudan [38] također su koristili Shannonovu entropiju kako bi predložili mjeru naziva kompleksnost proizvodnje proizvoda koja se odnosi i na procese proizvodnje dijelova proizvoda i na montažu različitih varijanti proizvoda iz familije proizvoda. Ova mjera kompleksnost definira kao mjeru nesigurnosti postizanja sličnosti procesa proizvodnje/montaže za proizvodnju/sklapanje različitih varijanti proizvoda iz familije proizvoda. Sličnost procesa odnosi se na broj raznolikih/istih procesa koji su potrebni da se proizvedu/montiraju različite tražene varijante proizvoda iz familije proizvoda. Osim kompleksnosti na razini radne stanice (tj. procesa), drugi aspekt promatranja kompleksnosti odnosi se na kompleksnost proizvoda. Kako se navodi u literaturi, kompleksnost proizvoda rezultat je utjecaja broja komponenata, broja modula, broja gotovih dobara u portfelju poduzeća, broja i raznolikosti veza među komponentama te sličnosti proizvoda unutar familije proizvoda [74]. U prethodno spomenutom radu Park i Okudan [38] su predložili i mjeru strukturne kompleksnosti proizvoda. Uporabom entropije i sličnosti dijelova komponenata izrazili su strukturnu sličnost proizvoda u familiji proizvoda. Sličnost proizvoda su iskazali kao raznolikost svih elemenata (dijelova) varijante proizvoda u odnosu na varijante komponenata unutar familije proizvoda.

Osim Shannonove entropije, kompleksnost u montaži često je povezana s fizičkim atributima proizvoda koji se montira. Tako razvijene mjere prvenstveno se fokusiraju na fazu dizajniranja proizvoda (kompleksnost proizvoda), a nastale su pod utjecajem metoda u kojima su proizvodi dizajnirani imajući na umu načela za ostvarivanje jednostavnosti montaže proizvoda poput: DFA, Lucasove metode ili Hitachijeve metode procjene montaže (engl. *Hitachi Assembly Evaluation Method*, AEM). Iako su pristupi koji ove razvijene mjere koriste različiti, ishodi su slični, tj. ove mjere dovode do smanjenja broja dijelova proizvoda, optimizacije rukovanja i ugradnje dijelova proizvoda te „kažnjavanja“ dizajna koji se smatra neučinkovitim [11], [44], [75]. Jedan od zapaženijih radova u ovom području je rad od Alkana [44] koji je kompleksnost proizvoda izrazio prilagodbom Huckleove molekularne orbitalne teorije procesu montaže. Prema njoj, kompleksnost montaže proizvoda izražena je kao funkcija kompleksnosti njegovih entiteta, tj. individualnih komponenata proizvoda i interakcije među svakim parom komponenata te topologije sustava. Analogija spomenutog molekularnog modela s proizvodom prikazana je na Slici 2.5.



Slika 2.5. Analogija molekularne strukture s proizvodom, [44]

Prva dva entiteta izražena su preko Lucasove metode, dok se posljednji iskazuje primjenom energije grafova. Kompleksnost topologije sustava potječe iz interakcija među komponentama sustava i ovisi o prirodi strukture povezanosti, a raste kako se arhitektura sustava mijenja od centralizirane prema distribuiranoj [22], Slika 2.6.



Slika 2.6. Porast topološke kompleksnosti na temelju unutarnje strukture proizvoda, [22]

Izraz za izračun kompleksnosti proizvoda prikazan je sljedećom jednačbom [44]:

$$C_{product} = C_1 + C_2 C_3 = \sum_{e=1}^E \alpha_{individual,e} + \left(\sum_{e=1}^E \sum_{f=1}^E \beta_{interaction,ef} A_{ef} \right) \left(\frac{E_A}{E} \right) \quad (2.4)$$

gdje je:

- C_1 - ukupna kompleksnost individualnih komponenti proizvoda
- C_2 - ukupna kompleksnost svake interakcije u paru
- C_3 - kompleksnost topologije proizvoda
- E - ukupan broj komponenti od kojih se proizvod sastoji
- $\alpha_{individual,e}$ - individualna kompleksnost komponente proizvoda
- $\beta_{interaction,ef}$ - kompleksnost interakcije para komponenti $e-f$ promatranog proizvoda
- A_{ef} - binarna matrica veza među komponentama
- E_A - energija grafa.

2.3.3. Problemi balansiranja linije za montažu

Balansiranje linije za montažu (engl. *Assembly Line Balancing Problem*, ALBP) je problem kojim se nastoje riješiti prepreke za postizanje uravnoteženog montažnog sustava u kojem su

kapaciteti sustava maksimalno iskorišteni. U literaturi postoje različite podjele problema balansiranja. Prema Uddin-u i Lastra-u [76] ALBP se mogu klasificirati prema funkciji cilja koja se nastoji optimizirati i prema strukturi problema. Na temelju strukture problema, Becker i Scholl [77] ALBP su podijelili s obzirom na tip proizvoda, odnosno raznolikost varijanti proizvoda koje se montiraju na promatranoj liniji. Linije od kojih se očekuje sposobnost istodobne montaže varijanti unutar familije proizvoda kontrastnih u pojedinim podesivim značajkama poznate su pod nazivom MMAL. Stoga je prema njihovoj podjeli ovaj problem poznat pod nazivom MMALBP. Problem balansiranja linija za montažu različitih proizvoda prvi je predstavio Thomopoulos [78] koji ga je promatrao kao problem balansiranja linije za montažu jednog proizvoda (engl. *Simple Assembly Line Balancing Problem*, SALBP). To je postigao pretvaranjem skupa dijagrama prethodnosti sličnih varijanti proizvoda u problem jedne varijante proizvoda uspostavom kombiniranog dijagrama prethodnosti. Prema Becker-u i Scholl-u [77] klasifikacija MMALBP-a podrazumijeva podjelu problema balansiranja prema trima ciljevima koji se žele postići. Prvi problem naziva se MMALBP-I. Njegov cilj je minimizirati broj radnih stanica za poznato taktno vrijeme. Drugi problem naziva se MMALBP-II, a njime se nastoji postići minimalno taktno vrijeme uz fiksni i poznati broj radnih stanica. Treći problem, poznat pod akronimom MMALBP-E odnosi se na problem u kojem se nastoje minimizirati i taktno vrijeme i broj radnih stanica. MMALBP karakterizira suvremene montažne sustave čije su odlike velika varijabilnost među modelima proizvoda te mala potražnja za svaku varijantu pojedinačno. Primjeri iz industrija koje se suočavaju s ovim problemom su raznoliki, npr. poduzeća za proizvodnju automobila (npr. BMW), poduzeća za proizvodnju TV prijamnika (npr. Samsung), poduzeća za proizvodnju računala (npr. Dell) i sl. [79]. Donošenje odluke o ispravnom balansiranju montažne linije prvenstveno ovisi o različitim ciljevima koje donositelji odluke uzimaju u obzir, a koji moraju biti u skladu sa strateškim ciljevima poduzeća.

Primjena teorije kompleksnosti za rješavanje MMALBP-a još uvijek je u svojim začecima. Prvi rad koji je istaknuo važnost uspostavljanja veze između kompleksnosti i problema balansiranja MMAL-a je rad od Zeltzer i ostalih [80]. U ovom radu, autori su predložili mjeru kompleksnosti radne stanice u montaži automobila koja povezuje entropiju radne stanice s dodjelom zadataka. Predložena mjera kompleksnosti korištena je za rješavanje problema balansiranja radnog opterećenja uz istodobnu jednoliku raspodjelu kompleksnosti po radnim stanicama. Mjera svoje uporište pronalazi u Shannonovoj entropiji, a definirana je kao mjera nepredvidljivosti zadataka na radnim stanicama. Predloženo rješenje promatranog problema

temelji se na primjeni dvostupanjskog hibridnog heurističkog algoritma. Njihov prijedlog za daljnja istraživanja usmjeren je na uočavanje važnosti slijeda montaže proizvoda unutar linije s obzirom da ona utječe na generiranje radnih opterećenja pojedinačnih stanica, ali i kompleksnost radne stanice. Također, autori su u svom prijedlogu budućih istraživanja naglasili i važnost uspostave robusnog sustava za podršku odlučivanja (engl. *Decision Support System*, DSS) za balansiranje MMAL-a.

Liu i ostali [81] predložili su integrirani optimizacijski model za balansiranje MMAL-a uz optimalnu alokaciju međuskладиšta. U ovom radu autori su definirali tri mjere kompleksnosti: vremensku kompleksnost radne stanice, vremensku kompleksnost montažne linije te vremensku kompleksnost stohastičke fluktuacije. Sve tri mjere razvijene su primjenom Shannonove entropije i teorije vjerojatnosti. Ciljevi predloženog optimizacijskog modela su maksimiziranje proizvodnosti te minimiziranje kompleksnosti i ukupnog kapaciteta međuskладиšta. Predstavljeni problem riješen je primjenom genetskog algoritma te simulacije. U daljnjem radu, Liu i ostali [72] također su se bavili problemom balansiranja MMAL-a uz razmatranje teorije kompleksnosti za mjerenje nesigurnosti unutar montažne linije. Nesigurnost montažne linije je uzrokovana promjenjivom potražnjom tržišta. Stoga, autori su predložili mjeru kompleksnosti radne stanice koju su izrazili primjenom Shannonove entropije te *fuzzy* entropije. Svrha balansiranja podrazumijevala je dodjelu zadataka radnim stanicama uz istodobno balansiranje radnog opterećenja unutar radne stanice te između radnih stanica uz maksimiziranje proizvodnosti. Problem balansiranja autori su riješili modifikacijom genetskog algoritma i primjenom simulacije diskretnog događaja.

2.3.4. Problemi pronalaženja slijeda varijanti proizvoda

Problem sekvencioniranja proizvoda unutar MMAL-a definira se kao problem pronalaženja slijeda u kojem će se tražena količina proizvoda planirati za montažu unutar određenog perioda promatranja. Naime, različiti sljedovi montaže proizvoda imat će različite ekonomske učinke koji su povezani s korištenjem resursa promatranog montažnog sustava. Općenito, ugradnja različitih komponenata ili podsklopova na radnim stanicama dovodi do varijacija iskorištenosti operaterâ kao i do varijacije broja ugrađenih komponenata proizvoda. Ukoliko radno intenzivne komponente ili podsklopovi proizvoda za montažu slijede jedan drugoga na određenoj radnoj stanici, pojavljuju se radna preopterećenja koja se moraju kompenzirati, primjerice dodatnim operaterom. Radna preopterećenja mogu se izbjeći ako je pronađen prikladan slijed proizvoda, gdje se izmjenjuju one varijante koje uzrokuju dugačka procesna

vremena na radnoj stanici s onima manje radno intenzivnim varijantama [82]. Problem određivanja slijeda proizvoda u literaturi se pretežito razmatra korištenjem triju pristupa, a to su: određivanje slijeda skupa različitih varijanti (engl. *Mixed-Model Sequencing*, MMS), određivanje slijeda automobila (engl. *Car Sequencing*, CS) te podjednako korištenje komponenata proizvoda (engl. *Level Scheduling*, LS) [82]. Prva dva pristupa podrazumijevaju minimizaciju radnog opterećenja. Međutim, iako oni razmatraju isti cilj, temelje se na različitim matematičkim formulacijama s različitim funkcijama cilja. Cilj MMS-a je izravno minimiziranje radnog preopterećenja, dok CS problem minimiziranju radnog preopterećenja pristupa posrednim putem, odnosno minimiziranjem narušavanja određenih pravila. Pravila se definiraju korištenjem različitih pristupa, a cilj im je ograničiti uzastopnu pojavu varijanata čiji je montažni proces dugotrajan, odnosno radno intenzivan. Treći pristup (LS) bavi se balansiranjem korištenja komponenata, tj. dijelova proizvoda.

Negativan utjecaj kompleksnosti montaže uzrokovan raznolikošću proizvoda na performanse MMAL-a uočili su znanstvenici, ali i zaposlenici u industriji. Naime, osim ravnomjerne raspodjele opterećenja među radnim stanicama koja se postiže balansiranjem montažne linije, kao uzrok porasta kompleksnosti montaže kroz literaturu je u novije vrijeme istaknuta tematika određivanja slijeda proizvoda. Dostupan broj radova koji se bavi ovom tematikom je malen. Štoviše, većina dostupnih radova je novijeg datuma objave. Stoga je praćenje i analiza kompleksnosti tijekom rješavanja problema određivanja slijeda proizvoda još uvijek nedovoljno istražena tema [13].

Sun i Fan [13] istraživali su određivanje slijeda proizvoda u automobilske industriji. Problem su formulirali kao CS problem, tj. kao problem pronalaženja slijeda sklapanja varijanti proizvoda uz poštivanje ograničenja uzastopnog pojavljivanja iste varijante. Ograničenja su se odnosila na minimiziranje broja radno intenzivnih proizvoda koji slijede jedan drugog. Autori su CS problemu pridružili dodatni cilj, a to je minimiziranje kompleksnosti montaže. U ovom radu autori su istaknuli važnost minimiziranja kompleksnosti montaže prilikom određivanja slijeda montaže proizvoda. Kao glavni uzrok kompleksnosti montaže razmatrali su raznolikost proizvoda. Naime, što je više raznolikih varijanti komponenti i podsklopova proizvoda raspoloživo operateru prilikom odabira ispravne komponente (ili podsklopa), proces traženja i odabira prikladnog dijela zahtijeva više vremena, kao i veći mentalni napor. Sukladno tome, što je raznolikost proizvoda veća, mogućnost da će operater pogriješiti je veća. Osim raznolikosti proizvoda, autori su istaknuli kako velik utjecaj na kompleksnost montaže imaju česte promjene sadržaja rada operatera koje su izravna posljedica određivanja slijeda

proizvoda. Stoga su predložili mjeru koju su nazvali kompleksnost promjena (engl. *changeover complexity*) kojom se izražava nesigurnost operatera zbog česte promjene sadržaja rada. Mjera predstavlja umnožak binarne varijable kojom se identificira postojanje promjene sadržaja rada te Shannonove entropije kojom se izražava nesigurnost operatera prilikom odabira komponenata proizvoda. Zhong i ostali [83] također su istraživali određivanje slijeda proizvoda uzimajući u obzir kompleksnost montaže. U radu su autori definirali kompleksnost montaže slijeda proizvoda (engl. *sequencing complexity*) za promatrani problem MMAL-a trupa broda koju su izrazili preko entropije. Pošli su od pretpostavke da sustav čija stanja imaju više promjena u jedinici vremena ima i veću kompleksnost. Stoga su za definiranje kompleksnosti primjenom entropije, stanja sustava definirali kao izvođenje pripremnog vremena, vremena neaktivnosti i stanje preopterećenja na radnoj stanici. Ova stanja su izravna posljedica odabranog slijeda montaže proizvoda. Minimiziranjem predloženih mjera kompleksnosti, uzimajući u obzir i definirani rok isporuke, autori su primjenom IPSO algoritma (engl. *Improved Particle Swarm Optimization algorithm*, IPSO) odredili optimalan slijed proizvoda.

Busogi i ostali [84] nastojali su razviti mjeru kompleksnosti koja će integrirati raznolikost proizvoda, ali i njihov odgovarajući slijed montaže. Predloženom mjerom procjenjivali su učinak određivanja slijeda proizvoda na kompleksnost montaže. Mjeru naziva kompleksnost montažnog slijeda proizvoda autori su definirali kao vjerojatnost da će se na danoj poziciji slijeda proizvodnje nalaziti određena varijanta komponente proizvoda na promatranoj radnoj stanici. Ovu mjeru izrazili su primjenom Shannonove entropije i teorije vjerojatnosti (Markovljev lanac višeg reda). Eksperimentalno su pokazali povezanost razvijene mjere i vremena reakcije operatera. Provođenje eksperimenata podrazumijevalo je mjerenje reakcije čovjeka na stimulanse koji su se odnosili na slike koje moraju odabrati na prikazanom zaslonu. Naime, preko zaslona osjetljivog na dodir operater je u obliku slike dobio prikazanu varijantu komponente koju treba odabrati iz skupa preostalih ponuđenih slika varijanti komponenata. Pokazali su da razvijena mjera kompleksnosti bolje predviđa vrijeme reakcije operatera prilikom odabira komponenti nego mjera koju su predložili Hu i ostali [35] te Busogi i ostali [85]. Hu i ostali [35] svoju mjeru kompleksnosti definirali su na temelju raznolikosti proizvoda (engl. *product mix*) dok su Busogi i ostali [85] razvoj mjere kompleksnosti definirali pomoću fizičke sličnosti proizvoda i utjecaja njihove sličnosti na odabir operatera.

Iako se Shannonova entropija najčešće koristi za definiranje mjera kompleksnosti montaže, za problem planiranja slijeda varijanti proizvoda u literaturi se mogu pronaći i drugi pristupi. Kumar i ostali [86] bavili su se problemom pronalaženja optimalnog slijeda proizvoda u

prilagodljivom (rekonfigurabilnom) montažnom sustavu koji služi za montažu modularnih proizvoda. Karakteristika ovog sustava je ta da se montažne stanice moraju prilagoditi za montažu prilikom izmjene svakog proizvoda iz familije proizvoda. Prilagoditi u smislu reprogramiranja softvera, robota, automatiziranih vođenih vozila, zamjene alata i slično u ovisnosti o proizvodu koji slijedi za montažu. Jednostavnost montažnih operacija za određenu komponentu može varirati od proizvoda do proizvoda. Stoga, nakon što se određeni proizvod montira, sljedeći najbolji kandidat za montažu može biti onaj koji nudi najveću sličnost, ne samo u broju istih komponenti već i u montažnim operacijama. Na temelju ova dva aspekta, autori su predložili indeks ukupnog troška rekonfiguracije proizvoda kao prvi kriterij višeciljne optimizacije. Indeks ukupnog troška rekonfiguracije proizvoda iskazali su kao omjer indeksa sličnosti i indeksa kompleksnosti rekonfiguracije proizvoda. Kompleksnost rekonfiguracije autori su definirali kao omjer različitih potrebnih pripremno-završnih vremena između proizvoda. Što je broj različitih pripremno-završnih vremena dvaju uzastopnih proizvoda manji, manja je i kompleksnost rekonfiguracije proizvoda.

2.4. Osvrt na stanje istraživanja

U istraženj literaturi prisutni su različiti pristupi za definiranje kompleksnosti proizvodnog sustava i mjera kojima se ona nastoji kvantitativno opisati. U posljednjem desetljeću uočen je trend porasta broja radova koji se bave proučavanjem kompleksnosti montažne linije (MMAL). Kompleksnost se u tim radovima prvenstveno promatra kao posljedica porasta raznolikosti proizvoda koja se reflektira na performanse operatera (tj. brzinu reakcije operatera na odabir ispravne komponente među raznolikim ponuđenim) ili kao posljedica dizajna proizvoda. U literaturi prevladava istraživanje statičke domene kompleksnosti, dok je dinamička domena manje zastupljena. Poveznica između statičke i dinamičke domene kompleksnosti je također bitna stavka koja može biti dobar temelj za uvid u performanse montažnog sustava i njegove potencijalne probleme, a koja u literaturi još uvijek nije dovoljno istražena. Utjecaj kompleksnosti na performanse montažnog sustava kod većine autora uglavnom je praćen negativnom konotacijom. Međutim, još uvijek je nedorečeno koliko uistinu kompleksnost negativno utječe na promatrani sustav, kao i to ima li pozitivan utjecaj na sustav. Većina autora koji su predložili mjere kompleksnosti upotrebljavali su numeričke primjere kako bi pokazali funkcioniranje razvijenog pristupa. Mali broj radova orijentirao se na njihovu primjenu na stvarnom industrijskom primjeru. Štoviše, razvijene mjere opisane numeričkim primjerom

primjene, teško su primjenjive u stvarnom svijetu, čak i uz određene pretpostavke koje model nudi s obzirom da velik broj podataka koje one zahtijevaju nije jednostavno prikupiti [87].

Dva problema koja se u literaturi najčešće spominju vezana za MMAL su problemi balansiranja montažne linije i sekvencioniranja proizvoda. Ovi problemi se u većini radova promatraju pojedinačno prvenstveno zbog složenosti njihove prirode, iako su u novije vrijeme uočene težnje i naponi autora koji predlažu da se njihovom rješavanju pristupi zajedno. Međutim, malen je broj istraživanja koji je uspio povezati tematiku kompleksnosti montažne linije sa spomenutim problemima, kao i s ključnim pokazateljima uspješnosti (engl. *Key Performance Indicators*, KPI) montažne linije. Povećana kompleksnost zahtijeva alate za podršku odlučivanju koji mogu pružiti uvid u učinak promjena sustava na njegove performanse [88].

Prema [89] najznačajniji kriteriji koje je potrebno promatrati prilikom procesa donošenja odluka su kvaliteta, fleksibilnost, trošak, vrijeme procesa te proizvodnost sustava. Osim spomenutih kriterija, autori [4] su istaknuli mogućnost korištenja kompleksnosti kao dodatnog atributa čija procjena utječe na proces donošenja odluka. Korištenje kompleksnosti tijekom procesa donošenja odluka zahtijeva njezinu kvantitativnu procjenu, ali i identificiranje odnosa s prethodno spomenutim kriterijima. U pregledu literature Efthymiou i ostali [4] istaknuli su potrebu za uočavanjem mehanizma koji omogućuje bolje razumijevanje povezanosti kompleksnosti i proizvodnosti. Određivanjem ključnih parametara tog mehanizma, omogućilo bi se upravljanje kompleksnošću za koju se očekuje da će imati izravan utjecaj na proizvodnost.

Radovi koji se odnose na individualne tematike balansiranja, sekvencioniranja i kompleksnosti, a koji su u istraživanju promatrali ključne pokazatelje uspješnosti poput proizvodnosti, uglavnom su upotrebljavali simulaciju diskretnog događaja kako bi dobili rezultate traženih pokazatelja. Osim korištenja simulacije, pojedine pokazatelje uspješnosti moguće je predvidjeti matematičkim modelima. Na taj način, eliminirala bi se potreba za primjenom simulacija i ulaganja koje ona zahtijeva. Montažni sustav se do neke razine može opisati matematički, međutim kada sustav postane dovoljno kompleksan matematički izraz postaje velik i/ili nepregledan i tada se za predviđanje performansi montažne linije upotrebljavaju drugi pristupi poput simulacija.

3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

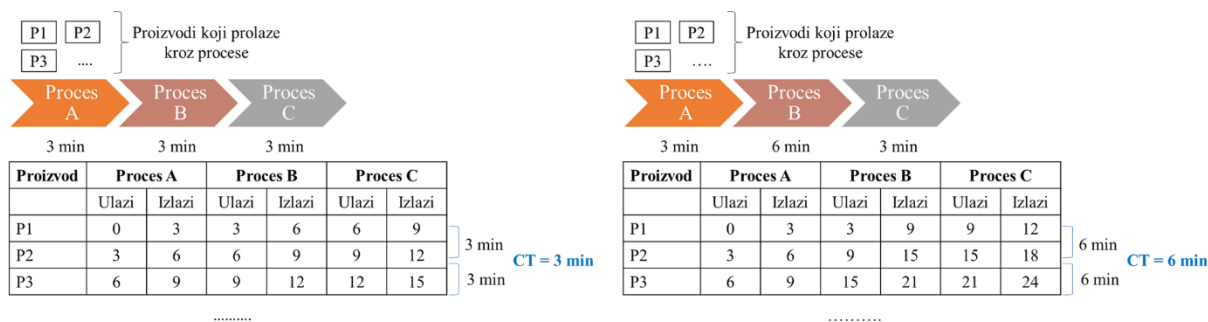
Ključni pokazatelji uspješnosti predstavljaju mjere koje pokazuju koliko poduzeće uspješno ispunjava svoje ključne poslovne ciljeve. U literaturi još uvijek ne postoji konsenzus o tome koji su to jedinstveni pokazatelji uspješnosti s obzirom da oni ovise o ciljevima koje poduzeće želi postići i načinu na koji poduzeće mjeri uspješnost njihovog ostvarivanja. Većina radova u prethodno opisanom pregledu literature koja je ključne pokazatelje uspješnosti koristila kao mjerilo uspješnosti predložene optimizacijske procedure balansiranja ili sekvencioniranja proizvoda, koristila se simulacijom diskretnog događaja. U literaturi o kompleksnosti je istaknuta potreba za povezivanjem kompleksnosti montažne linije s ključnim pokazateljima uspješnosti, pogotovo s proizvodnošću. Stoga, ovo poglavlje fokusira se na razvoj matematičkog modela za predviđanje proizvodnosti montažne linije koji će poslužiti kao osnova za uključivanje razvijenog pokazatelja kompleksnosti montaže te na razvoj modela za predviđanje vodećeg vremena proizvodnje.

3.1. Definiranje terminologije za matematički model

Ovo poglavlje opisuje bitne pojmove povezane s razvojem matematičkog modela za MMAL. Kako bi se omogućilo jasno razumijevanje problema i pristupa koji se koristi za razvoj matematičkog modela, kroz daljnji tekst dane su bitne definicije koje se oslanjaju na radove [90]–[95]:

Pripremno-završno vrijeme – vrijeme koje je potrebno za prilagodbu stroja, linije, radnog prostora između proizvodnje dvaju različitih proizvoda.

Takt proizvodnje (engl. *Cycle time*, CT) – takt proizvodnje je stvarna stopa proizvodnje koja govori koliko često se može proizvesti proizvod s danim resursima tj. ono predstavlja frekvenciju proizvodnje jedinice proizvoda, Slika 3.1



Slika 3.1. Takt proizvodnje na primjeru s tri procesa

Sukladno rečenome takt proizvodnje montažne linije (engl. *cycle time of assembly line*) je vrijeme koje pokazuje koliko često proizvod izlazi iz montažnog procesa, tj. vrijeme koje je potrebno najsporijoj radnoj stanici da proizvede proizvod. Najsporija radna stanica naziva se i usko grlo, a vrijeme trajanja procesa koji se odvija na njemu vrijeme procesa uskog grla.

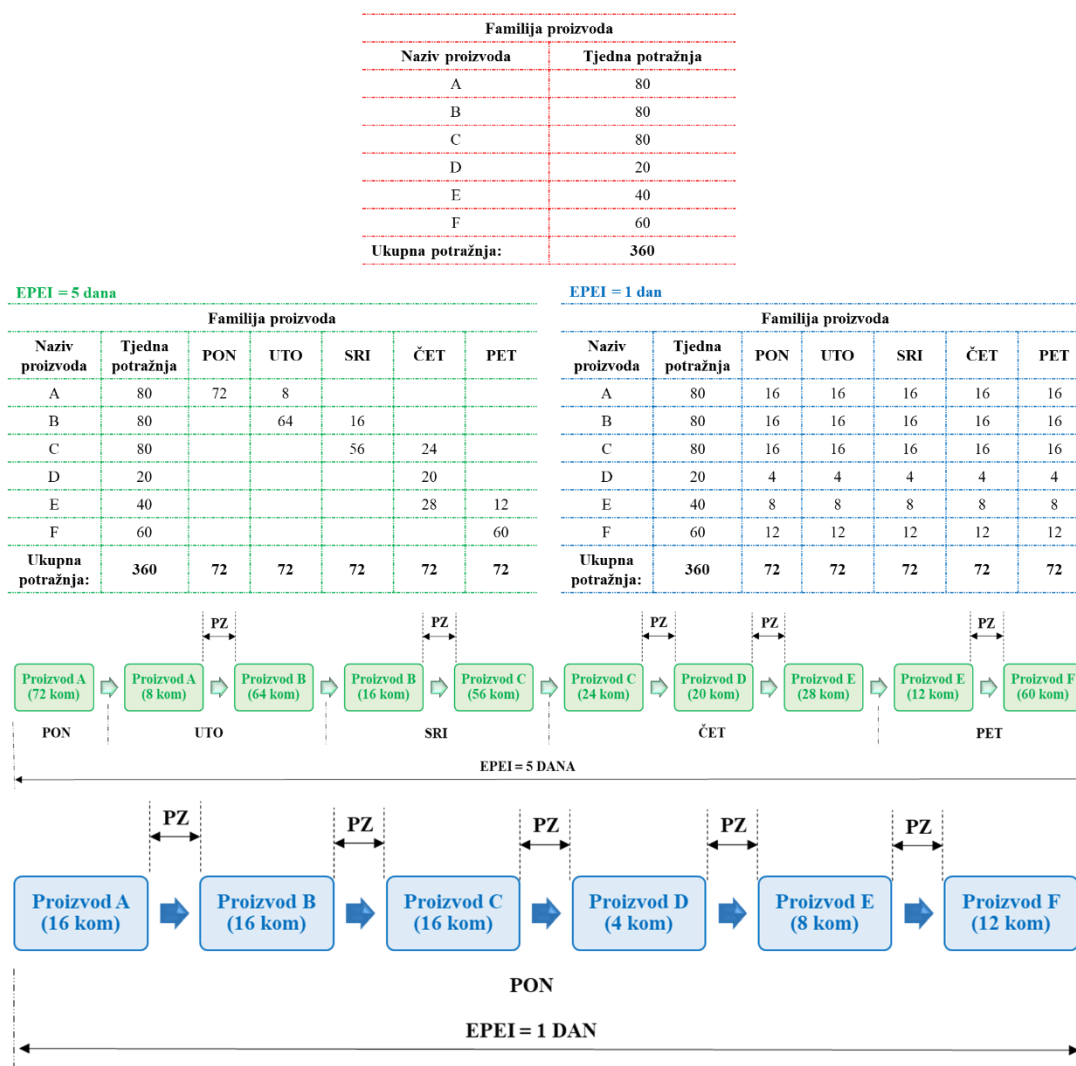
Taktno vrijeme (engl. *takt time*) – pojam taktno vrijeme najčešće se veže za potražnju kupca za proizvodima. Definira se kao tempo kojim kupac kupuje proizvode. Ono proizlazi iz stope proizvodnje utvrđene u planu prodaje i poslovanja te određuje koliko brzo proizvod treba biti proizveden da bi se zadovoljila potražnja kupaca. Klasična definicija taktnog vremena je da je ono omjer efektivno raspoloživog radnog vremena i potražnje kupaca. Drugim riječima, taktno vrijeme može se definirati kao maksimalna količina vremena koju proizvodni sustav ima na raspolaganju za proizvodnju jedinice proizvoda kako bi se zadovoljila potražnja kupca.

EPEI (engl. *Every Product, Every Interval*, EPEI) – se definira kao vrijeme koje je potrebno da se proizvedu svi članovi familije proizvoda, ili općenito sekvenca svih serija različitih proizvoda koji se planiraju proizvesti prije ponavljanja te iste sekvence, uključujući pripremno-završna vremena među serijama različitih proizvoda. Ili gledajući na drugi način, EPEI se može definirati i kao prosječan interval između dvije uzastopne serije istog proizvoda. Primjerice, na Slici 3.2. crvena tablica predstavlja tjednu potražnju (za pet radnih dana) za svim proizvodima iz familije proizvoda. S obzirom da je ukupna tjedna potražnja 360 jedinica proizvoda, a kako je pretpostavka da procesi za sve proizvode jednako traju, proizvodi se konstantnom stopom od 72 jedinice po danu. Zelena tablica predstavlja EPEI od jednog tjedna (EPEI = 5 dana) što znači da veličina serije koja se mora odraditi za svaki proizvod pokriva jednotjednu vrijednost potražnje za tim proizvodom. Pretpostavlja se da će se za svaki različiti proizvod proizvoditi samo jedna serija u cijelom EPEI periodu, jer bi u protivnom neopravdano rastao udio pripremno-završnih vremena u ukupnom vremenu rada. Stoga se može zaključiti da će broj pripremno-završnih vremena u jednom EPEI periodu uvijek biti jednak broju različitih

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

proizvoda koji se proizvode u tom EPEI periodu. Plava tablica predstavlja EPEI od jednoga dana, što znači da se svaki različiti proizvod u određenim količinama proizvodi svaki dan. Oznaka PZ na slici odnosi se na pripremno-završna vremena. Što je interval EPEI manji, to je manja veličina serije, što rezultira:

- smanjenjem vodećeg vremena narudžbe
- porastom fleksibilnosti proizvodnje (proizvodnja pravog proizvoda u pravo vrijeme)
- smanjenjem potrebnog međuskладиšnog prostora
- smanjenjem zaliha, pa tako i smanjenjem skladišnog prostora
- smanjivanjem razine škartu ili potrebe za ponovnim radom zbog mogućnosti ranijeg otkrivanja pogreške.

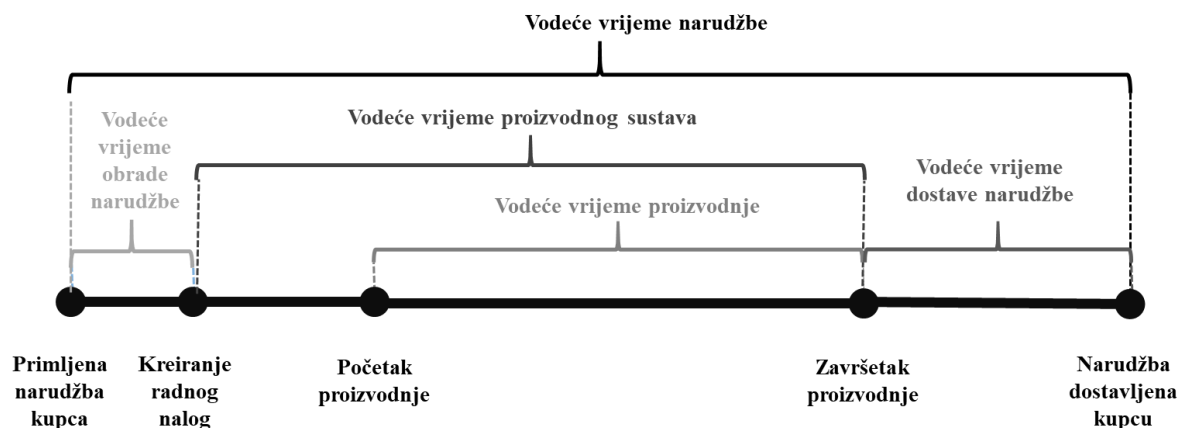


Slika 3.2. Raspored proizvodnje familije proizvoda za dvije različite vrijednosti EPEI-a

Vodeće vrijeme (engl. *Lead Time*) – je pojam koji se koristi u proizvodnji, a koje daje informaciju o tome koliko vremena je potrebno da nešto krene i završi. Prema [94] ovaj termin se u proizvodnji može promatrati kroz pet pojmova.

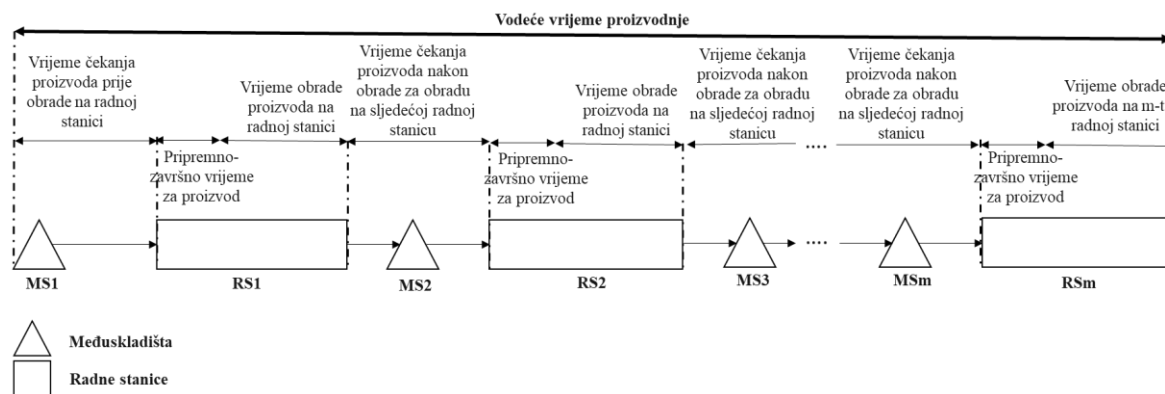
1. Vodeće vrijeme narudžbe (engl. *order lead time*) – vrijeme od primljene narudžbe kupca do njezine isporuke kupcu.
2. Vodeće vrijeme obrade narudžbe (engl. *order handling time*) – vrijeme od primljene narudžbe kupca do kreiranja radnog naloga.
3. Vodeće vrijeme proizvodnog sustava (engl. *manufacturing lead time*) – vrijeme od kreiranja radnog naloga do završetka proizvodnje (narudžba spremna za isporuku).
4. Vodeće vrijeme proizvodnje (engl. *production lead time*) – vrijeme od početka fizičke proizvodnje prvog podsklopa do završetka proizvodnje (spremnog za isporuku). Odnosno, ono predstavlja vremenski raspon od izdavanja proizvodnog naloga po *kanbanu* i sl., preko obrade, do skladištenja.
5. Vodeće vrijeme dostave narudžbe (engl. *delivery lead time*) – vrijeme od završetka proizvodnje do isporuke narudžbe kupca.

Značenje ovih pojmova grafički je prikazano na Slici 3.3.



Slika 3.3. Razine vodećeg vremena za proizvodni sustav, [94]

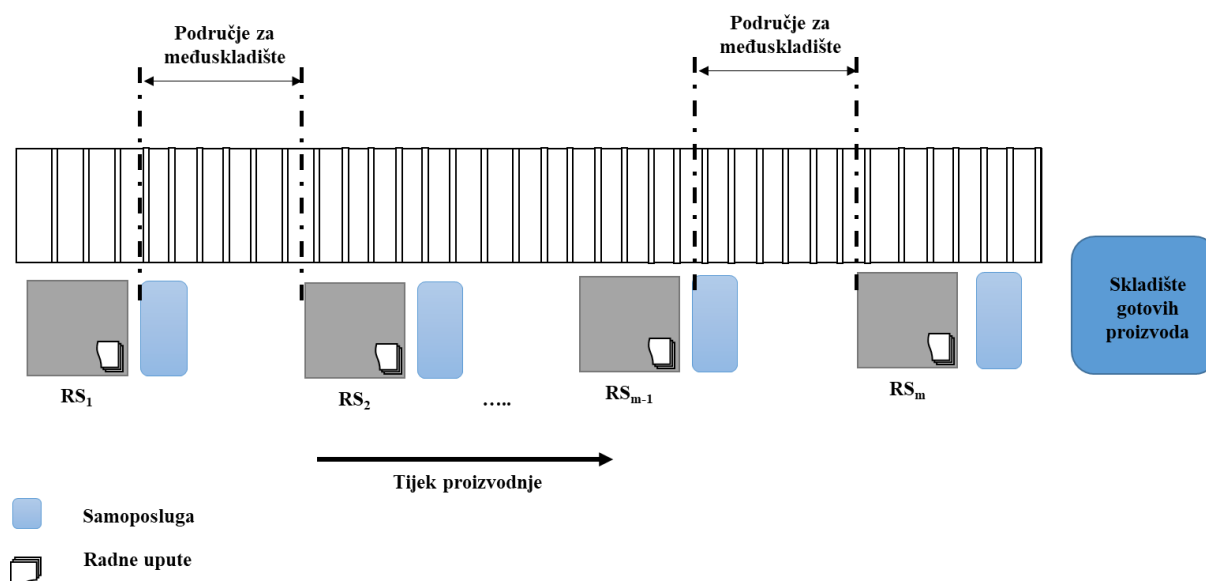
Tijekom razvoja modela, fokus će biti na vodećem vremenu proizvodnje. Vodeće vrijeme proizvodnje sastoji se od vremena čekanja prije obrade, pripremno-završnih vremena, vremena procesa, vremena čekanja nakon obrade i vremena kretanja. Komponente ciklusa vodećeg vremena proizvodnje prikazane su na Slici 3.4.



Slika 3.4. Komponente vodećeg vremena proizvodnje na montažnoj liniji

3.2. Matematički model za predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti

Predmet istraživanja ovog rada je montažna linija s transportnom vrpcom. U svrhu jednostavnosti prikaza utjecaja ulaznih veličina na izlazne veličine, promatra se „I“ linija s ručnom montažom. Shematski prikaz jedne takve montažne linije dan je na Slici 3.5. Broj radnih stanica može se varirati. Svaka radna stanica ima jednog operatera te je opremljena samoposlugom dijelova, radnim uputama i potrebnim alatima. Kod velike raznolikosti proizvoda ili kod posebnih modela organizacije rada postoje izuzeci kada broj operatera ne odgovara broju radnih stanica. Razmatranja o montaži s takvim postavkama dat će se kasnije u radu. Prijenos poluproizvoda ili podsklopova između radnih stanica ostvaruje se pomoću transportne vrpce, s ili bez transportnog držača ili odgovarajuće ploče. Pošto nije planirano skidanje i stavljanje podsklopova s transportne vrpce i na transportnu vrpcu između radnih stanica, dostupna duljina transportne vrpce među njima može se koristiti kao prostor za međuskladišta. Sukladno tome, količine međuskladišta koje je moguće zadržavati između radnih stanica ovise o duljini transportne vrpce. S druge strane, ukupna duljina podsklopova i transportnog držača također određuju količine u međuskladištu. Što je njihova duljina manja, to je moguće smjestiti više podsklopova na istu duljinu transportne vrpce dostupne za međuskladište.



Slika 3.5. Shematski prikaz "I" ručne montažne linije

Bez obzira na to što se istraživanja u ovom radu fokusiraju na montažnu liniju prikazanu na Slici 3.5., modeli i zaključci dobiveni ovim radom mogu se koristiti i za ostale konfiguracije montažnih linija, s ili bez transportne vrpce, uz minimalne modifikacije. Stoga će na kraju poglavlja biti dane smjernice o tome kako različite konfiguracije montažnih linija, a i upravljanje operaterima utječu na performanse montažne linije.

Svaki proizvod koji zahtjeva montažu sastoji se od više dijelova koji se moraju montirati na jednom ili više radnih mjesta u ovisnosti o ograničenjima prethodnosti dijelova. Što je veći broj dijelova od kojih se jedan proizvod montira, to je poželjnije imati veći broj radnih mjesta povezanih s transportnim sustavom na kojima će se izvršiti podjela ukupno potrebnog rada za montažu. Za organiziranu montažnu liniju s transportom vrpcom, radna mjesta nazivaju se radne stanice. Ukupno potrebnog rada za montažu jednog proizvoda planira se izvesti uzastopnim montažnim procesima elemenata rada na svim radnim stanicama.

Za potrebe matematičkog modeliranja, a kasnije i simulacijskog modeliranja uzeta je montažna linija s transportnom vrpcom s tri i više radnih stanica na kojima se mora izvesti ukupni potrebnog rada za montažu svakog promatranog proizvoda. Pomoću analize strukture proizvoda i grafa prethodnosti moguće je definirati elemente rada. Elementi rada predstavljaju dijelove montažnog procesa. Stoga je potrebnog rada za montažu jednog proizvoda i dan sljedećim izrazom:

$$TW_i = \sum_{k=1}^K p_{i,k} \quad (3.1)$$

gdje je:

TW_i - potrebni rad za montažu jednog proizvoda i , $i \in n$ gdje je n ukupan broj raznolikih proizvoda, pri čemu je $i = 1, 2, \dots, n$

$p_{i,k}$ - vrijeme procesa montaže elemenata rada i -tog proizvoda, $k \in K$ gdje je K ukupan broj identificiranih elemenata rada, pri čemu je $k = 1, 2, \dots, K$.

Kako bi se rad najbolje raspodijelio na sve montažne stanice koriste se različiti algoritmi za balansiranje montažne linije. Primjeri balansiranja MMAL mogu se pronaći u literaturi [61], [62], [64], [72], [79], [80]. Stoga, općenito vrijedi:

$$TW_i = \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^K p_{ij,k} \quad (3.2)$$

gdje je:

$p_{ij,k}$ - vrijeme procesa montaže k -tog elementa rada i -tog proizvoda na j -toj radnoj stanici, pri čemu je $j = 1, 2, \dots, m$ gdje je m broj radnih stanica.

Balansiranje montažne linije podrazumijeva smisleno grupiranje elemenata rada na radna mjesta u svrhu postizanja optimalne raspodjele rada među radnim stanicama. Optimalna raspodjela rada među radnim stanicama podrazumijeva raspodjelu elemenata rada na svaku radnu stanicu do postizanja jednolikog opterećenja između njih, koliko god je to moguće s obzirom na broj i trajanje procesa montaže pojedinih elemenata rada. Kada su elementi rada identificirani, definira se njihovo prosječno idealno vrijeme montaže koje se koristi za potrebe provođenja balansiranja montažne linije. Prosječno idealno vrijeme montaže elementa rada je vrijeme koje se dobije kada je operater upoznat s montažnim procesom kojeg obavlja te kada je on uvježban. Pri tome, radno mjesto na kojem se vrši montaža organizirano je na način da se ispred operatera na radnoj površini nalaze samo dijelovi koje je potrebno ugraditi te alati koji su potrebni za njihovu ugradnju. Kod procesa ručne montaže, vrijeme procesa montaže se podvrgava normalnoj razdiobi. Međutim, kod matematičkog modeliranja u ovom radu koriste se deterministički podaci, dok će se statistički obrađeni podaci razmatrati u nastavku rada kroz praktične primjere.

Kako bi se daljnje istraživanje i matematičko modeliranje moglo provesti, bilo je potrebno osmisliti primjer koji će se koristiti u ovoj fazi rada. Razmatrali su se proizvodi na montažnoj liniji čiji su elementi rada raspodijeljeni na 3, 5 ili 7 radnih stanica pomoću metode najvećeg kandidata (engl. *Largest Candidate Rule*, LCR). Opis LCR metode i njezina simulacija u Microsoft Excelu dana je u Prilogu A. Simulacija je razvijena modifikacijom rada [96] te uporabom informacija s Microsoft Support službene stranice [97], a ogleđni primjer za njezinu primjenu preuzet je iz rada [98]. Za predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti opisane montažne linije, promatran je uzorak proizvoda. Uzorak proizvoda je za potrebe razvoja matematičkog modela definiran kao termin koji se koristi za opisivanje udjela proizvoda među proizvodima koje je potrebno proizvesti na montažnoj liniji u promatranom periodu vremena za koji se definiraju zahtjevi tržišta, T (npr. mjesec ili godina). Primjerice, ako promatramo tri proizvoda A, B i C pri čemu je potrebno proizvesti $q_1 = 1540$ kom proizvoda A, $q_2 = 770$ kom proizvoda B te $q_3 = 770$ kom proizvoda C, udio svakog pojedinog proizvoda i računa se sljedećim izrazom:

$$w_i = \frac{q_i}{D_T} \quad (3.3)$$

gdje je:

w_i - udio proizvoda i u ukupnoj proizvodnji u promatranom periodu vremena T

q_i - količina proizvodnje proizvoda i za promatrani period vremena T

D_T - ukupna količina proizvodnje u promatranom periodu vremena T .

Pri tome vrijedi ograničenje:

$$0 < w_i < 1 \quad (3.4)$$

Stoga je suma svih udjela proizvoda:

$$\sum_i w_i = 1 \quad (3.5)$$

Ukupna količina proizvodnje u promatranom periodu vremena T dana je sljedećim izrazom:

$$D_T = \sum_{i=1}^n q_i \quad (3.6)$$

Sukladno dobivenom uzorku proizvoda izraženog preko odnosa udjela proizvoda, katkad je moguće odrediti odgovarajući minimalan stvarni uzorak s cijelim brojevima za svaki pojedini proizvod, tj. ukupnu minimalnu količinu proizvoda za uzorak, D_{min} . Naime, dijeljenjem udjela proizvoda s minimalnom vrijednošću udjela proizvoda, $\min w$, dobit će se minimalne količine svakog pojedinog proizvoda u uzorku, kod kojega proizvod s $\min w$ ima količinu 1. Ako količine svih ostalih proizvoda nisu cijeli brojevi, moguće je skalirati cijeli dobiveni niz količina, kako bi količine za sve proizvode bile cijeli brojevi u uzorku. Potpuno je svejedno hoće li se pristupiti modeliranju pomoću svih cijelih brojeva za količine proizvoda ili ne, ali zbog jednostavnijeg daljnjeg razmatranja metodologije rada, uzet je primjer s cijelim brojevima za sve w_i .

Općenito vrijedi:

$$\min w = \min w_i \quad (3.7)$$

Kod primjera s tri proizvoda, tj. proizvodima A ($q_1 = 1540$ kom), B ($q_2 = 770$ kom) i C ($q_3 = 770$ kom) slijedi:

$$D_T = \sum_{i=1}^3 q_i = 1540 + 770 + 770 = 3080 \text{ kom} \quad (3.8)$$

$$w_1 = \frac{q_1}{D_T} = \frac{1540 \text{ kom}}{3080 \text{ kom}} = 0,5; \quad w_2 = 0,25; \quad w_3 = 0,25 \quad (3.9)$$

Stoga, za promatrani primjer vrijedi odnos:

$$\frac{w_1}{\min w} : \frac{w_2}{\min w} : \frac{w_3}{\min w} \quad (3.10)$$

Ukupna minimalna količina proizvoda za uzorak:

$$D_{min} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} \quad (3.11)$$

Primjenom izraza od (3.3) do (3.11), u Tablici 3.1. prikazane su vrijednosti udjela proizvoda i minimalne količine u uzorku definirane cijelim brojevima. U promatranom primjeru se vrši montaža tri, šest i devet razolikih proizvoda.

Tablica 3.1. Vrijednosti udjela proizvoda i minimalne količine u uzorku

n	Niz raznolikih proizvoda	w_i	$\frac{w_i}{\min w}$ / kom	D_{\min} / kom
3	A, B, C	0,5, 0,25, 0,25	2, 1, 1	4
6	A, B, C, D, E, F	0,22, 0,11, 0,11, 0,22, 0,11, 0,22	2, 1, 1, 2, 1, 2	9
9	A, B, C, D, E, F, G, H, I	0,133, 0,067, 0,067, 0,133, 0,067, 0,133, 0,2, 0,133, 0,067	2, 1, 1, 2, 1, 2, 3, 2, 1	15

Poznavanjem udjela proizvoda moguće je izračunati vrijeme rada svake radne stanice za promatrani uzorak proizvoda prema izrazu:

$$t_{rs,j} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij} \quad (3.12)$$

gdje je:

$t_{rs,j}$ - ukupno vrijeme montaže radne stanice j za uzorak proizvoda

p_{ij} - ukupno vrijeme procesa montaže proizvoda i na radnoj stanici j .

Pri čemu se ukupno vrijeme montaže proizvoda i na radnoj stanici j dobiva sljedećim izrazom:

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^K V_{ij,k} * p_{ij,k} \quad (3.13)$$

gdje je:

$V_{ij,k}$ - varijabla odlučivanja za koju vrijedi:

$$V_{ij,k} = \begin{cases} 1, & \text{ako je element rada } k \text{ proizvoda } i \text{ dodijeljen radnoj stanici } j \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (3.14)$$

Vrijednost ukupno potrošenog vremena montaže svake radne stanice za minimalni uzorak proizvoda može se skalirati za različite vrijednosti intervala izmjene proizvoda, EPEI perioda, za svaku radnu stanicu. EPEI sadržava i ukupno pripremno-završno vrijeme za EPEI, a to je suma pripremno-završnih vremena koja su potrebna za jednu izmjenu na sve serije planiranih raznolikih proizvoda. Maksimalna vrijednost ukupno utrošenog vremena procesa montaže za uzorak proizvoda, koja se pojavi na radnoj stanici uskog grla, definira se kao takt uzorka montažne linije, tj. kao minimalna vrijednost vremena potrebna za izmjenu minimalnog uzorka proizvoda. Drugim riječima, ova vrijednost predstavlja takt za period izmjene proizvoda jednog uzorka, a ako dodamo i ukupno pripremno-završno vrijeme za EPEI, tako možemo dobiti EPEI

koji je minimalan. Taj minimalni EPEI je vrijeme trajanja procesa montaže jednog uzorka, uz dodatak pripremno-završnih vremena, što gotovo nikada nije slučaj u praksi. Udio vremena utrošenog na pripremno-završno vrijeme bi bio prevelik, što bi rezultiralo malom proizvodnošću. Za EPEI se uvijek izabire duži vremenski period, prvenstveno iz razloga kako bi se smanjio udio pripremno-završnih vremena u ukupnom raspoloživom vremenu rada. Bez obzira na to, dobivena vrijednost takta uzorka montažne linije može se koristiti za balansiranje radnog opterećenja radnih stanica te za izračun ukupne balansiranosti montažne linije. Takt uzorka montažne linije dan je izrazom:

$$TAKT_{uzorak} = \max_j(t_{rs,j}) = \max_j \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij} \quad (3.15)$$

gdje je:

$TAKT_{uzorak}$ - takt uzorka montažne linije.

Ukupna balansiranost montažne linije predstavlja efikasnost raspodjele elemenata rada po radnim stanicama, a izračunava se kao prosječna vrijednost učinkovitosti (tj. iskoristivosti) pojedinačnih radnih stanica montažne linije. Učinkovitost svake pojedinačne radne stanice ovisit će o uskom grlu unutar montažne linije, odnosno usko grlo će diktirati njihovu proizvodnju. Uzvodne radne stanice, tj. radne stanice koje se nalaze prije uskog grla karakterizirat će potpuna popunjenost njihovih međuskladišta s obzirom da su procesi montaže na njima brži nego kod uskog grla. Sukladno tome, u ovim međuskladištima će se pojavljivati samo jedan tip događaja, a to je istovremeno izuzimanje podsklopa iz međuskladišta od nizvodne radne stanice i uvođenje podsklopa u isto međuskladište od strane uzvodne radne stanice. S druge strane, nizvodne radne stanice, tj. radne stanice smještene nakon uskog grla, poprimit će stanja da su sva njihova međuskladišta uvijek prazna jer svaki dolazak proizvoda u međuskladište istovremeno predstavlja i njegov izlazak iz međuskladišta i obradu na nizvodnoj radnoj stanici. Iz svega rečenoga slijedi da će sve uzvodne radne stanice jedan period vremena provesti blokirane proizvodima, dok će nizvodne radne stanice jedan period vremena provesti u čekanju. Spomenuta stanja blokiranja i čekanja na radnim stanicama smanjuju njihovu učinkovitost (tj. iskoristivost operatera na radnim stanicama). Stoga se učinkovitost radne stanice j za uzorak proizvoda može iskazati izrazom:

$$\eta_{rs,j} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}}{TAKT_{uzorak}} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}}{\max_j \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}} \quad (3.16)$$

Učinkovitost radne stanice j istovremeno predstavlja iskoristivost operatera na radnoj stanici, s obzirom da je u ovom modelu pretpostavka da jedan operater radi na jednoj radnoj stanici. Izračun ukupne balansiranosti montažne linije proizlazi iz izraza (3.16) te je ukupna balansiranost montažne linije definirana izrazom:

$$\begin{aligned} \eta_{AL} &= \frac{\sum_{j=1}^m \eta_{rs,j}}{m} = \frac{\sum_{j=1}^m ((\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}) / TAKT_{uzorak})}{m} \\ &= \frac{\sum_{j=1}^m ((\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}) / \max_j \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij})}{m} = \\ &= \frac{\sum_{j=1}^m ((\sum_{i=1}^n \frac{\frac{q_i}{D_T}}{\min \frac{q_i}{D_T}} * p_{ij}) / \max_j \sum_{i=1}^n \frac{\frac{q_i}{D_T}}{\min \frac{q_i}{D_T}} * p_{ij})}{m} \end{aligned} \quad (3.17)$$

Izraz (3.17) podrazumijeva izračun ukupne balansiranosti montažne linije kada se balansiranost montažne linije računa prema taktu uskog grla kada je dostupan maksimalan kapacitet međuskладиšta da se osigura njegova 100 %-tna učinkovitost. U slučaju da su kapaciteti međuskладиšta kod svih radnih stanica neograničeni te da se balansiranost montažne linije mjeri kao suma pojedinačnih učinkovitosti radnih stanica, neovisno o uskom grlu, sve uzvodne radne stanice imale bi 100 %-tnu učinkovitost, te bi kapaciteti njihovih međuskладиšta kontinuirano rasli. Prema izrazu (3.17) uočljivo je da će bilo koji slijed proizvoda koji se planira proizvesti s definiranim udjelima svih proizvoda, tj. prema definiranom uzorku u proizvodnom planu, imati jednaku balansiranost kao i kada se koristi samo jedan uzorak.

Osim prema izrazu (3.17), ukupna balansiranost montažne linije može se dobiti i primjenom izraza (3.18):

$$\eta_{AL} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}}{m * TAKT_{uzorak}} \quad (3.18)$$

Iz izraza (3.18) slijedi da je $TAKT_{uzorak}$:

$$TAKT_{uzorak} = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}}{m * \eta_{AL}} \quad (3.19)$$

Svaka raspodjela elemenata rada rezultira određenim postotkom ukupne balansiranosti montažne linije. U ovom primjeru promatrane su vrijednosti ukupne balansiranosti od 85 %, 90 % i 95 %. Ukupna vremena trajanja procesa montaže svakog raznolikog proizvoda na

pojedininim radnim stanicama za uzorak proizvoda, nastalih kao rezultat balansiranja montažnih linija uz prethodno spomenute vrijednosti ukupne balansiranosti prikazane su od Tablice 3.2. do Tablice 3.10. U spomenutim tablicama, s oznakom i , $i = A, B, C, D, E, F, G, H, I$, označeno je sveukupno 9 raznolikih proizvoda koji se promatraju za montažu, dok se oznaka RS odnosi na radne stanice, od radne stanice jedan (RS1) do radne stanice sedam (RS7).

Sveukupno, u primjeru su razmatrana tri različita broja raznolikih proizvoda ($n = 3, 6$ i 9), tri različite vrijednosti ukupne balansiranosti ($\eta_{AL} = 85 \%, 90 \%$ i 95%) i tri različita broja radnih stanica na koje je rad raspodijeljen ($m = 3, 5, 7$).

Tablica 3.2. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranosti montažne linije za uzorak s tri raznolika proizvoda na tri radne stanice

$\eta_{AL} = 85 \%$				$\eta_{AL} = 90 \%$				$\eta_{AL} = 95 \%$			
i	RS1	RS2	RS3	i	RS1	RS2	RS3	i	RS1	RS2	RS3
A	205	249	190	A	205	249	190	A	205	249	190
B	210	251	195	B	234	199	223	B	240	152	264
C	103	190	157	C	103	190	157	C	103	190	157
$t_{rs,j}$	723	939	732	$t_{rs,j}$	747	887	760	$t_{rs,j}$	753	840	801

Tablica 3.3. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne
balansiranosti montažne linije za uzorak s tri raznolika proizvoda na pet radnih stanica

$\eta_{AL} = 85\%$						$\eta_{AL} = 90\%$					
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
A	105	110	140	150	139	A	105	110	140	150	139
B	100	120	110	162	164	B	120	140	100	131	165
C	90	80	95	101	84	C	90	80	95	101	84
$t_{rs,j}$	400	420	485	563	526	$t_{rs,j}$	420	440	475	532	527

$\eta_{AL} = 95\%$					
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
A	105	110	140	150	139
B	170	150	100	103	133
C	90	80	95	101	84
$t_{rs,j}$	470	450	475	504	495

Tablica 3.4. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne
balansiranosti montažne linije za uzorak s tri raznolika proizvoda na sedam radnih
stanica

$\eta_{AL} = 85\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	95	83	95	98	88	112
C	50	60	67	75	84	55	59
$t_{rs,j}$	325	329	340	330	402	337	331
$\eta_{AL} = 90\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	95	111	95	75	88	107
C	50	60	67	75	84	55	59
$t_{rs,j}$	325	329	368	330	379	337	326
$\eta_{AL} = 95\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	97	101	99	101	56	92	110
C	50	60	67	75	84	55	59
$t_{rs,j}$	337	335	356	336	360	341	329

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

Tablica 3.5. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranoosti montažne linije za uzorak sa šest raznolikih proizvoda na tri radne stanice

$\eta_{AL} = 85\%$				$\eta_{AL} = 90\%$				$\eta_{AL} = 95\%$			
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3
A	205	249	190	A	205	249	190	A	205	249	190
B	234	199	223	B	234	145	277	B	243	124	289
C	103	190	157	C	103	190	157	C	103	190	157
E	165	198	212	E	171	168	236	E	182	127	266
E	229	226	135	E	229	226	135	E	229	226	135
F	117	285	183	F	117	285	183	F	117	285	183
$t_{rs,j}$	1540	2079	1685	$t_{rs,j}$	1552	1965	1787	$t_{rs,j}$	1583	1862	1859

Tablica 3.6. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranoosti montažne linije za uzorak sa šest raznolikih proizvoda na pet radnih stanica

$\eta_{AL} = 85\%$						$\eta_{AL} = 90\%$					
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
A	157	101	142	152	92	A	157	101	142	152	92
B	114	123	117	178	124	B	114	123	117	145	157
C	80	98	85	95	92	C	80	98	85	95	92
E	103	115	101	148	108	E	103	115	101	130	126
E	110	98	112	153	117	E	110	98	112	153	117
F	95	125	120	111	134	F	95	125	120	111	134
$t_{rs,j}$	1014	1001	1040	1248	1001	$t_{rs,j}$	1014	1001	1040	1179	1070

$\eta_{AL} = 95\%$					
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
A	157	101	142	152	92
B	114	137	115	131	159
C	80	98	85	95	92
E	103	115	127	106	124
E	110	98	112	153	117
F	95	125	120	111	134
$t_{rs,j}$	1014	1015	1090	1117	1068

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH
POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

Tablica 3.7. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne
balansiranosti montažne linije za uzorak sa šest raznolikih proizvoda na sedam radnih
stanica

$\eta_{AL} = 85\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	95	83	95	98	88	112
C	50	60	67	75	84	55	59
E	85	80	75	78	98	85	74
E	95	63	75	81	97	95	84
F	85	75	70	65	98	85	107
$t_{rs,j}$	760	702	705	697	891	772	777
$\eta_{AL} = 90\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	95	83	95	83	88	127
C	50	60	67	75	84	55	59
E	85	87	75	78	81	85	84
E	95	63	75	81	97	95	84
F	85	75	70	65	98	85	107
$t_{rs,j}$	760	716	705	697	842	772	812
$\eta_{AL} = 95\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	104	102	95	73	88	109
C	50	60	67	75	84	55	59
E	85	93	75	91	64	85	82
E	95	63	75	81	97	95	84
F	85	75	70	65	98	85	107
$t_{rs,j}$	760	737	724	723	798	772	790

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

Tablica 3.8. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranoosti montažne linije za uzorak s devet raznolikih proizvoda na tri radne stanice

$\eta_{AL} = 85\%$				$\eta_{AL} = 90\%$				$\eta_{AL} = 95\%$			
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3
A	205	249	190	A	205	249	190	A	205	249	190
B	234	199	223	B	234	153	269	B	234	132	290
C	103	190	157	C	103	190	157	C	103	190	157
D	165	198	212	D	165	167	243	D	154	142	279
E	229	226	135	E	229	226	135	E	229	226	135
F	117	285	183	F	117	242	226	F	117	192	276
G	215	252	103	G	215	252	103	G	215	252	103
H	223	192	135	H	223	192	135	H	223	192	135
I	229	217	184	I	229	217	184	I	229	217	184
$t_{rs,j}$	2866	3461	2497	$t_{rs,j}$	2866	3267	2691	$t_{rs,j}$	2844	3096	2884

Tablica 3.9. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne balansiranoosti montažne linije za uzorak s devet raznolikih proizvoda na pet radnih stanica

$\eta_{AL} = 85\%$						$\eta_{AL} = 90\%$					
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
A	157	101	142	152	92	A	157	101	142	152	92
B	114	123	117	178	124	B	114	123	125	145	149
C	80	98	85	95	92	C	80	98	85	95	92
D	103	115	101	148	108	D	103	125	101	122	124
E	110	98	112	153	117	E	110	98	112	153	117
F	95	125	120	111	134	F	111	130	120	97	127
G	97	107	112	124	130	G	97	107	112	124	130
H	98	113	117	115	107	H	98	113	117	115	107
I	117	123	109	169	112	I	117	123	109	169	112
$t_{rs,j}$	1637	1681	1711	2073	1722	$t_{rs,j}$	1669	1711	1719	1960	1765

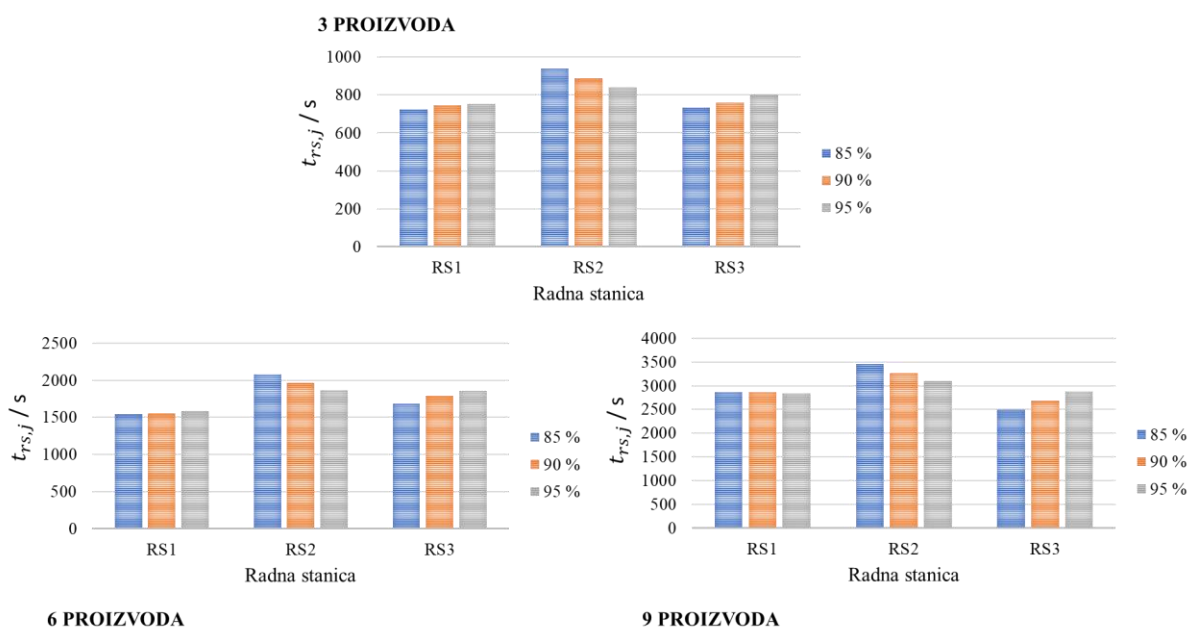
$\eta_{AL} = 95\%$					
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
A	157	101	142	152	92
B	114	123	125	97	197
C	80	98	85	95	92
D	103	125	101	98	148
E	110	98	112	153	117
F	132	130	120	97	106
G	97	107	112	124	130
H	98	113	117	115	107
I	117	123	109	169	112
$t_{rs,j}$	1711	1711	1719	1864	1819

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH
POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

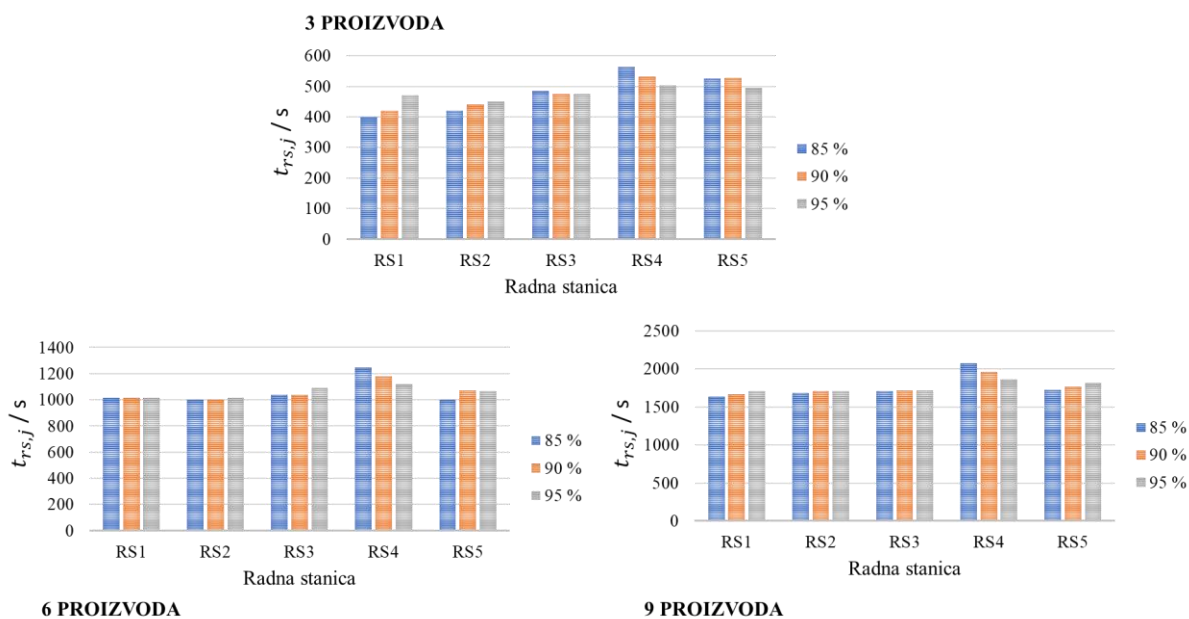
Tablica 3.10. Vremena trajanja procesa montaže s obzirom na različite vrijednosti ukupne
balansiranosti montažne linije za uzorak s devet raznolikih proizvoda na sedam radnih
stanica

$\eta_{AL} = 85\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	95	83	95	98	88	112
C	50	60	67	75	84	55	59
D	85	80	75	78	98	85	74
E	95	63	75	81	97	95	84
F	85	75	70	65	98	85	107
G	65	75	85	87	98	92	68
H	75	80	75	95	72	85	68
I	90	95	87	89	113	85	71
$t_{rs,j}$	1210	1197	1209	1231	1483	1303	1191
$\eta_{AL} = 90\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	85	95	83	95	98	88	112
C	50	60	67	75	84	55	59
D	85	80	75	78	81	85	91
E	95	63	75	81	97	95	84
F	85	75	70	65	74	85	131
G	65	75	85	87	98	92	68
H	75	80	75	95	72	85	68
I	90	95	87	89	113	85	71
$t_{rs,j}$	1210	1197	1209	1231	1401	1303	1273
$\eta_{AL} = 95\%$							
<i>i</i>	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	RS6	RS7
A	95	87	95	80	110	97	80
B	117	105	83	95	69	85	102
C	50	60	67	75	84	55	59
D	85	80	94	78	62	77	99
E	95	63	75	81	97	95	84
F	85	89	87	94	71	85	74
G	65	75	85	87	98	92	68
H	75	80	75	95	72	85	68
I	90	95	87	89	113	85	71
$t_{rs,j}$	1242	1235	1281	1289	1328	1284	1165

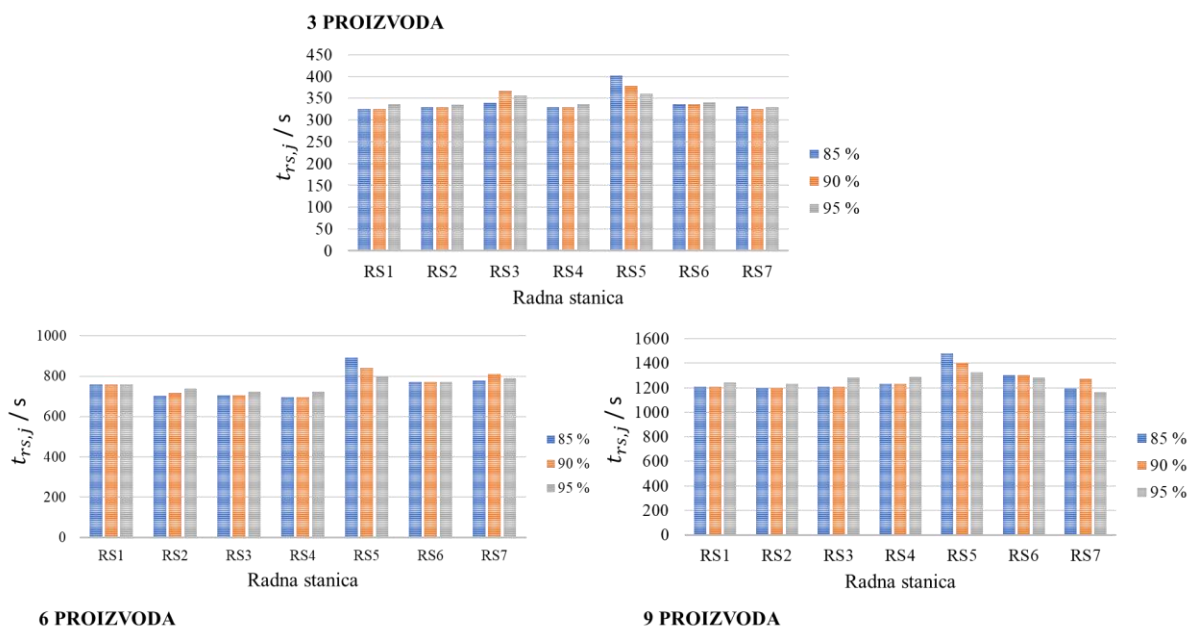
Grafovi vremena procesa montaže svake radne stanice na montažnoj liniji dobiveni su iz ukupnih vremena montaže svake radne stanice za uzorak raznolikih proizvoda. Dobiveni grafovi prikazani su na slikama od Slike 3.6. do Slike 3.8. Kao što je uočljivo iz Slike 3.6. do Slike 3.8. koja je nastala prema podacima iz Tablice 3.2. do Tablice 3.10., iz ukupnih vremena montaže radnih stanica za minimalan uzorak proizvoda može se identificirati usko grlo montažne linije. Usko grlo montažne linije predstavlja ona radna stanica koja za promatrani uzorak ima najveće vrijeme procesa montaže. To vrijeme predstavlja takt uzorka koji je zapravo takt montažne linije za taj uzorak, te će proizvodnost montažne linije ovisiti o njemu, bez obzira na vremena montaže na ostalim radnim stanicama. Kao primjer, ako uzmemo tri različita proizvoda iz Tablice 3.2., prema unaprijed definiranim udjelima (Tablica 3.1.), u jednom taktu montažne linije idealno se mogu proizvesti četiri proizvoda, tj. dva proizvoda A i po jedan proizvod B i C. U danom primjeru, za sve varijante raznolikih proizvoda ($n = 3, 6$ ili 9), kod raspodjele elemenata rada na tri radne stanice, RS2 je predstavljala usko grlo. Kod raspodjele elemenata rada na pet radnih stanica RS4 je predstavljala usko grlo, dok je kod raspodjele elemenata rada na sedam radnih stanica, usko grlo predstavljala RS5.



Slika 3.6. Grafovi vremena procesa montažne linije s tri radne stanice za različit broj varijanti raznolikih proizvoda za definirani uzorak proizvoda



Slika 3.7. Grafovi vremena procesa montažne linije s pet radnih stanica za različit broj varijanti raznolikih proizvoda za definirani uzorak proizvoda



Slika 3.8. Grafovi vremena procesa montažne linije sa sedam radnih stanica za različit broj varijanti raznolikih proizvoda za definirani uzorak proizvoda

3.2.1. Predviđanje proizvodnosti montažne linije

Poznavanjem vrijednosti takta uzorka za promatrani period vremena T moguće je predvidjeti proizvodnost. U danom primjeru, neka je period vremena za koji se planira proizvodnja raznolikih proizvoda jedan mjesec, $T = 1$ mjesec. Godišnji prosjek radnih dana za tekuću godinu iznosi 22 radna dana. Stoga, ta vrijednost uzeta je i u primjeru prikazanom u ovom dijelu poglavlja. Prosječno vrijeme rada operatera po danu iznosi osam radnih sati, međutim operater ne radi na radnoj stanici svo to vrijeme. Od tih osam radnih sati, 30 minuta operater ne radi zbog propisanog odmora. Stoga, vrijeme efektivnog rada operatera iznosi 7,5 h. Poznajući vremenski period promatranja, uočljivo je da jedna radna stanica ima 165 radnih sati, odnosno 594 000 s raspoloživog rada na mjesečnoj razini. Ovisno o definiranom periodu izmjene, tj. EPEI-u, moguće je odrediti produktivnost na bilo kojoj, pa tako i mjesečnoj razini. Vrijednosti EPEI-a, koje možemo definirati kao T_{EPEI} periodi, a koji se razmatraju u ovom modeliranju su:

$$T_{EPEI} = 1 \text{ dan} = 27\,000 \text{ s} \quad (3.20)$$

$$T_{EPEI} = 3 \text{ dana} = 81\,000 \text{ s} \quad (3.21)$$

$$T_{EPEI} = 5 \text{ dana} = 135\,000 \text{ s} \quad (3.22)$$

Vrijednosti perioda izmjene (T_{EPEI}) predstavljaju raspoloživo vrijeme u kojem se skalirani uzorak proizvoda proizvodi. S obzirom da za prelazak na svaki drugačiji proizvod na svakoj radnoj stanici postoji pripremno-završno vrijeme, koje je dio T_{EPEI} -a, i ono se mora uzeti u obzir kod razmatranja raspoloživog vremena za rad. Pripremno-završno vrijeme radne stanice j za proizvod i označava se s $t_{pz_{ij}}$. U razmatranom primjeru ručne montažne linije s radnim stanicama koje sadrže upute za rad i različite alate, preliminarnim istraživanjima je dobiveno da je prosječno vrijeme potrebno za pripremno-završne aktivnosti $t_{pz} = 47\text{s}$. To vrijeme se troši na evidentiranje završene serije, izbor uputa za rad za novi proizvod, pregled dostupnih alata za rad i upoznavanje s načinom montaže. Pošto nisu uočena značajna odstupanja u pripremno-završnim vremenima pri prijelazu s jednog proizvoda na drugi, pretpostavlja se da su sva pripremno-završna vremena iste vrijednosti. Stoga se u daljnjem tekstu za pripremno-završna vremena koristi oznaka t_{pz} . Sukladno tome ukupno pripremno-završno vrijeme za bilo koju T_{EPEI} vrijednost bit će jednako umnošku broja raznolikih proizvoda u uzorku i pripremno-završnog vremena, tj.:

$$T_{pz_EPEI} = n * t_{pz} \quad (3.23)$$

gdje je:

T_{pz_EPEI} - ukupno pripremno-završno vrijeme za T_{EPEI} .

Prema izrazu (3.23) za promatrana tri uzorka proizvoda, vrijednosti ukupnih pripremno-završnih vremena prikazani su u Tablici 3.11:

Tablica 3.11. Ukupna vrijednost pripremno-završnih vremena za promatrani uzorak

	3 proizvoda	6 proizvoda	9 proizvoda
T_{pz_EPEI}	141 s	282 s	423 s

Poznavanjem ukupnog pripremno-završnog vremena za T_{EPEI} , moguće je odrediti efektivno vrijeme za promatrani EPEI period, $T_{efektivno}$, prema izrazu:

$$T_{efektivno} = T_{EPEI} - T_{pz_EPEI} \quad (3.24)$$

Određivanjem efektivnog vremena za svaki promatrani T_{EPEI} , moguće je definirati izraz za ukupnu proizvodnost za EPEI period (po ukupnom broju komada proizvoda), prema sljedećoj jednadžbi:

$$PR_{EPEI} = \frac{T_{efektivno}}{TAKT_{uzorak}} * \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} \quad (3.25)$$

Dok se ukupna proizvodnost za promatrani period vremena T računa prema sljedećem izrazu:

$$PR_T = PR_{EPEI} * \pi_T = \frac{T_{efektivno}}{TAKT_{uzorak}} * \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * \pi_T \quad (3.26)$$

gdje je:

π_T - ukupni broj T_{EPEI} perioda u promatranom periodu vremena T .

Stoga se vrijednost π_T kada su vrijednosti T_{EPEI} i T izražene u istim vremenskim jedinicama računa na sljedeći način:

$$\pi_T = \frac{T}{T_{EPEI}} \quad (3.27)$$

Za uzorak s tri raznolika proizvoda na tri radne stanice mjesečna proizvodnost prikazana je u Tablici 3.12.

Tablica 3.12. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri raznolika proizvoda koji se montiraju
na tri radne stanice

UZORAK: 3 proizvoda na 3 radne stanice		
$\eta_{AL} = 85\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjesecu
1 dan	26859	2517
3 dana	80859	2525
5 dana	134859	2527
$\eta_{AL} = 90\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjesecu
1 dan	26859	2664
3 dana	80859	2674
5 dana	134859	2675
$\eta_{AL} = 95\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjesecu
1 dan	26859	2813
3 dana	80859	2823
5 dana	134859	2825

Iz Tablice 3.12. vidljivo je da mjesečna proizvodnost ne odstupa značajno za različite EPEI vrijednosti jer je, kao i u ovom primjeru, kod ručnih montažnih procesa vrijeme samog procesa montaže na radnim stanicama u većini slučajeva duže od pripremno-završnog vremena. Odnosno, pripremno-završna vremena su zanemarivog udjela u ukupnom raspoloživom vremenu rada i stoga nije ni za očekivati značajan pad u mjesečnoj proizvodnosti kod smanjivanja T_{EPEI} perioda.

Izračun udjela pripremno-završnog vremena u ukupnom raspoloživom vremenu rada za pojedini T_{EPEI} , $T_{pz_EPEI}^{udio}$, je kako slijedi:

$$T_{pz_EPEI}^{udio} = \frac{T_{pz_EPEI}}{T_{EPEI}} \quad (3.28)$$

Vrijednosti za promatrani primjer s tri raznolika proizvoda prikazane su u Tablici 3.13.

Tablica 3.13. Udio pripremno-završnog vremena u ukupnom raspoloživom vremenu za
uzorak od tri raznolika proizvoda na tri radne stanice

T_{EPEI}	$T_{pz_EPEI}^{udlo} / \%$
1 dan	0,5
3 dana	0,17
5 dana	0,1

Na jednak način dobivene su proizvodnosti za sve preostale veličine uzoraka i broja radnih stanica na montažnoj liniji. Štoviše, na jednak način moguće je dobiti i podatke o količinama svakog pojedinog proizvoda u slijedu proizvoda u promatranom vremenu izmjene proizvoda, T_{EPEI} . Količine svakog pojedinog proizvoda uvijek će imati isti udio u ukupnoj proizvodnji koji je definiran zahtjevom tržišta.

Količine svakog pojedinog proizvoda u slijedu proizvoda u promatranom vremenu izmjene, T_{EPEI} , računaju se modifikacijom izraza (3.25) kako slijedi:

$$PR_{EPEI}^i = \frac{T_{efektivno}}{TAKT_{uzorak}} * \frac{w_i}{\min w} \quad (3.29)$$

gdje je:

PR_{EPEI}^i - ukupna proizvodnost proizvoda i za T_{EPEI} .

Dok se ukupna proizvodnost proizvoda i za promatrani period vremena T , PR_T^i , dobiva prilagodbom izraza (3.26) kako slijedi:

$$PR_T^i = PR_{EPEI}^i * \pi_T = \frac{T_{efektivno}}{TAKT_{uzorak}} * \frac{w_i}{\min w} * \pi_T \quad (3.30)$$

Dobivene vrijednosti proizvodnosti pojedinačnog proizvoda primjenom razvijenog modela za uzorak s tri raznolika proizvoda na tri radne stanice prikazane su u Tablici 3.14.

Tablica 3.14. Pojedinačna proizvodnost proizvoda za uzorak s tri raznolika proizvoda koji se montiraju na tri radne stanice

UZORAK: 3 proizvoda na 3 radne stanice						
$\eta_{AL} = 85\%$						
T_{EPEI}	PR_{EPEI}^i kom/EPEI			PR_T^i kom/mjesecu		
	$i = 1$ (A)	$i = 2$ (B)	$i = 3$ (C)	$i = 1$ (A)	$i = 2$ (B)	$i = 3$ (C)
1 dan	57,2	28,6	28,6	1258,6	629,2	629,2
3 dana	172,2	86,1	86,1	1262,8	631,4	631,4
5 dana	287,2	143,6	143,6	1263,7	631,8	631,8
$\eta_{AL} = 90\%$						
T_{EPEI}	PR_{EPEI}^i kom/EPEI			PR_T^i kom/mjesecu		
	$i = 1$ (A)	$i = 2$ (B)	$i = 3$ (C)	$i = 1$ (A)	$i = 2$ (B)	$i = 3$ (C)
1 dan	60,5	30,3	30,3	1331,0	666,6	666,6
3 dana	182,3	91,2	91,2	1336,9	668,8	668,8
5 dana	304,1	152,0	152,0	1338,0	668,8	668,8
$\eta_{AL} = 95\%$						
T_{EPEI}	PR_{EPEI}^i kom/EPEI			PR_T^i kom/mjesecu		
	$i = 1$ (A)	$i = 2$ (B)	$i = 3$ (C)	$i = 1$ (A)	$i = 2$ (B)	$i = 3$ (C)
1 dan	63,9	32,0	32,0	1405,8	704,0	704,0
3 dana	192,5	96,3	96,3	1411,6	706,2	706,2
5 dana	321,1	160,5	160,5	1412,8	706,2	706,2

U Tablici 3.14. dane su vrijednosti ukupno proizvedenih proizvoda kao decimalni brojevi koji su dobiveni predloženim matematičkim izrazima.

Za promatrani primjer u kojem su razmatrana tri različita broja raznolikih proizvoda ($n = 3, 6, 9$), tri različite vrijednosti ukupne balansiranosti ($\eta_{AL} = 85\%, 90\%$ i 95%) i tri različita broja radnih stanica na koje je rad raspodijeljen ($m = 3, 5, 7$) rezultati ukupne mjesečne proizvodnosti prikazane su od Tablice 3.15. do Tablice 3.17. U danim tablicama, vrijednosti proizvodnosti u periodu promatranja T dani su kao cijeli brojevi.

Tablica 3.15. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri, šest i devet raznolikih proizvoda koji se montiraju na tri radne stanice

UZORAK: 3 proizvoda			UZORAK: 6 proizvoda			UZORAK: 9 proizvoda		
$\eta_{AL} = 85\%$			$\eta_{AL} = 85\%$			$\eta_{AL} = 85\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	2517	1 dan	26859	2544	1 dan	26859	2534
3 dana	80859	2525	3 dana	80859	2562	3 dana	80859	2560
5 dana	134859	2527	5 dana	134859	2566	5 dana	134859	2566
$\eta_{AL} = 90\%$			$\eta_{AL} = 90\%$			$\eta_{AL} = 90\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	2664	1 dan	26859	2692	1 dan	26859	2684
3 dana	80859	2674	3 dana	80859	2711	3 dana	80859	2713
5 dana	134859	2675	5 dana	134859	2714	5 dana	134859	2718
$\eta_{AL} = 95\%$			$\eta_{AL} = 95\%$			$\eta_{AL} = 95\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	2813	1 dan	26859	2841	1 dan	26859	2832
3 dana	80859	2823	3 dana	80859	2861	3 dana	80859	2862
5 dana	134859	2825	5 dana	134859	2865	5 dana	134859	2868

Tablica 3.16. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri, šest i devet razolikih proizvoda koji se montiraju na pet radnih stanica

UZORAK: 3 proizvoda			UZORAK: 6 proizvoda			UZORAK: 9 proizvoda		
$\eta_{AL} = 85\%$			$\eta_{AL} = 85\%$			$\eta_{AL} = 85\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	4198	1 dan	26859	4238	1 dan	26859	4230
3 dana	80859	4212	3 dana	80859	4268	3 dana	80859	4275
5 dana	134859	4215	5 dana	134859	4274	5 dana	134859	4284
$\eta_{AL} = 90\%$			$\eta_{AL} = 90\%$			$\eta_{AL} = 90\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	4442	1 dan	26859	4486	1 dan	26859	4474
3 dana	80859	4458	3 dana	80859	4518	3 dana	80859	4522
5 dana	134859	4461	5 dana	134859	4524	5 dana	134859	4531
$\eta_{AL} = 95\%$			$\eta_{AL} = 95\%$			$\eta_{AL} = 95\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	4689	1 dan	26859	4736	1 dan	26859	4705
3 dana	80859	4706	3 dana	80859	4769	3 dana	80859	4755
5 dana	134859	4709	5 dana	134859	4776	5 dana	134859	4765

Tablica 3.17. Mjesečna proizvodnost za uzorak od tri, šest i devet raznolikih proizvoda koji se montiraju na sedam radnih stanica

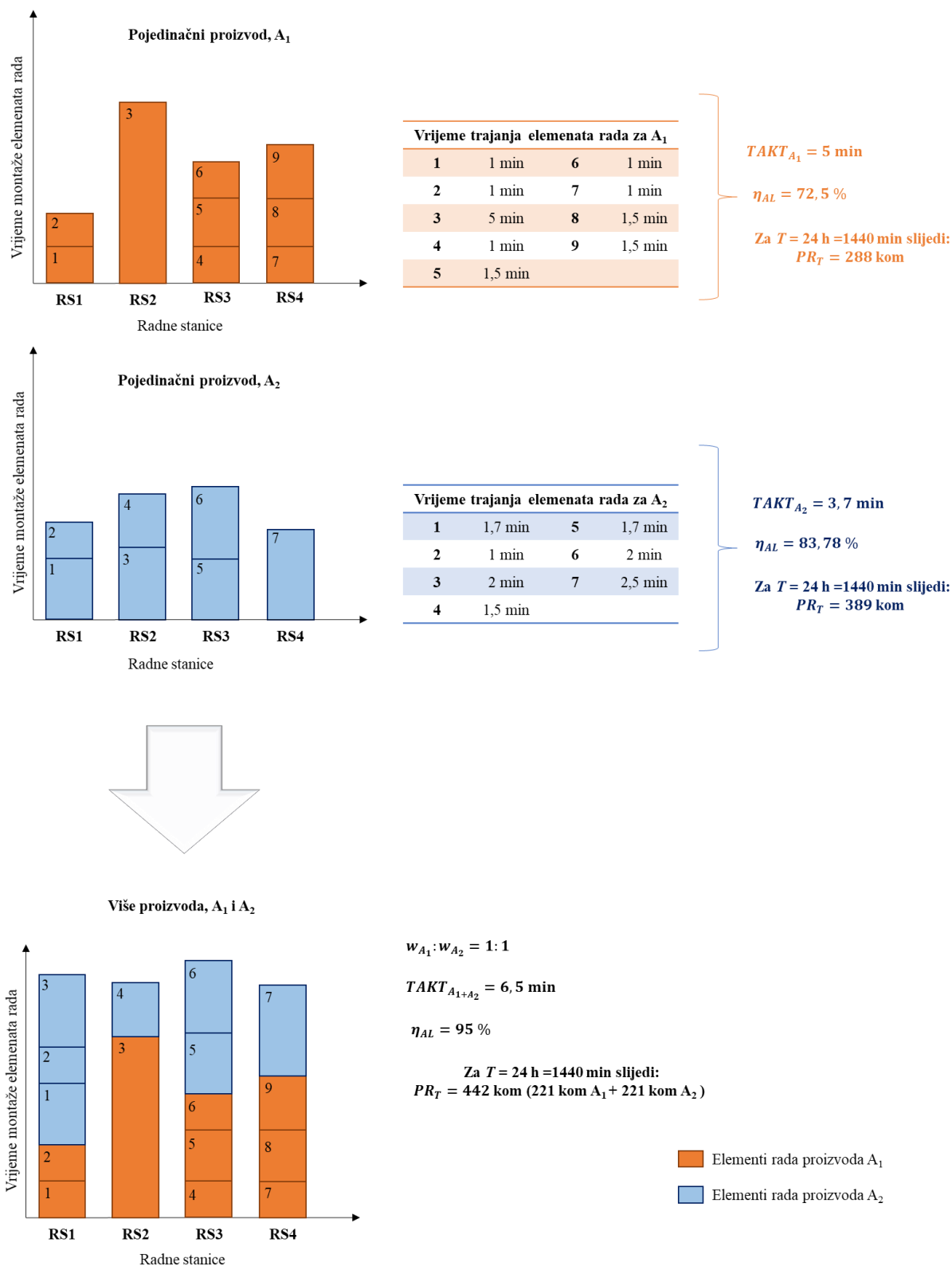
UZORAK: 3 proizvoda			UZORAK: 6 proizvoda			UZORAK: 9 proizvoda		
$\eta_{AL} = 85\%$			$\eta_{AL} = 85\%$			$\eta_{AL} = 85\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	5879	1 dan	26859	5937	1 dan	26859	5913
3 dana	80859	5900	3 dana	80859	5979	3 dana	80859	5976
5 dana	134859	5904	5 dana	134859	5987	5 dana	134859	5989
$\eta_{AL} = 90\%$			$\eta_{AL} = 90\%$			$\eta_{AL} = 90\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	6236	1 dan	26859	6282	1 dan	26859	6260
3 dana	80859	6258	3 dana	80859	6327	3 dana	80859	6326
5 dana	134859	6262	5 dana	134859	6335	5 dana	134859	6339
$\eta_{AL} = 95\%$			$\eta_{AL} = 95\%$			$\eta_{AL} = 95\%$		
T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću	T_{EPEI}	$T_{efektivno} / s$	PR_T kom/mjeseću
1 dan	26859	6565	1 dan	26859	6629	1 dan	26859	6604
3 dana	80859	6588	3 dana	80859	6675	3 dana	80859	6674
5 dana	134859	6593	5 dana	134859	6685	5 dana	134859	6688

3.2.2. Osvrt na razvijeni matematički model za predviđanje proizvodnosti

Kao što je prikazano kroz primjer, matematičkim modelom moguće je predvidjeti proizvodnost montažne linije za definirane ulazne podatke: broj radnih stanica, broj razolikih proizvoda, udio svakog raznolikog proizvoda u ukupnoj proizvodnji, EPEI vrijednosti, vremena procesa montaže elemenata rada i period vremena za koji se promatra radni nalog (T). Prvi korak za predviđanje proizvodnosti podrazumijeva analiziranje podataka o vremenima montaže proizašlih iz balansiranja montažne linije primjenom LCR metode. Analiziranjem podataka o planiranoj ukupnoj količini vremena montaže na pojedinačnim radnim stanicama, moguće je uočiti proces uskog grla i na temelju njega pristupiti predviđanju proizvodnosti cijele montažne linije.

Općenito, LCR metoda kao i ostale metode balansiranja, koriste se za balansiranje montažne linije za montažu samo jednog proizvoda te rezultiraju raspodjelom radnih elemenata s određenom vrijednošću ukupne balansiranosti. Međutim, kada se više raznolikih proizvoda planira montirati na montažnoj liniji, moguće je dodatno povećati postotak ukupne balansiranosti jer se za različite proizvode može postaviti raznolika količina rada na pojedine radne stanice. Primjerice, ukoliko je velika količina rada za većinu proizvoda smještena na određenoj radnoj stanici, za preostale proizvode na ovoj radnoj stanici moguće je planirati manju količinu rada kako bi se ukupna količina rada na promatranoj radnoj stanici približila prosječnoj količini rada na svim radnim stanicama. Što su ukupno dobivene vrijednosti količine rada za sve radne stanice ujednačenije, odnosno što vrijednosti količine rada za sve radne stanice manje odstupaju jedna od druge, to je ukupna balansiranost veća, a time je veća i proizvodnost. Stoga se, u uvjetima kada LCR metoda daje ograničene rezultate zbog primjerice relativno malog broja elemenata rada za efikasno raspoređivanje na relativno veliki broj radnih stanica ili postojanja nekog elementa rada s relativno velikim vremenom procesa montaže, može pristupiti zbirnom balansiranju gdje se s raspodjelom elemenata rada preostalih raznolikih proizvoda može znatno uvećati ukupna balansiranost montažne linije. Primjer balansiranja pojedinačnog proizvoda i zbirnog balansiranja prikazan je na Slici 3.9.

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE



Slika 3.9. Primjer raspodjele opterećenja nakon balansiranja za pojedinačne proizvode te kod zbirnog balansiranja, odnosno kada se više proizvoda montira na istoj montažnoj liniji

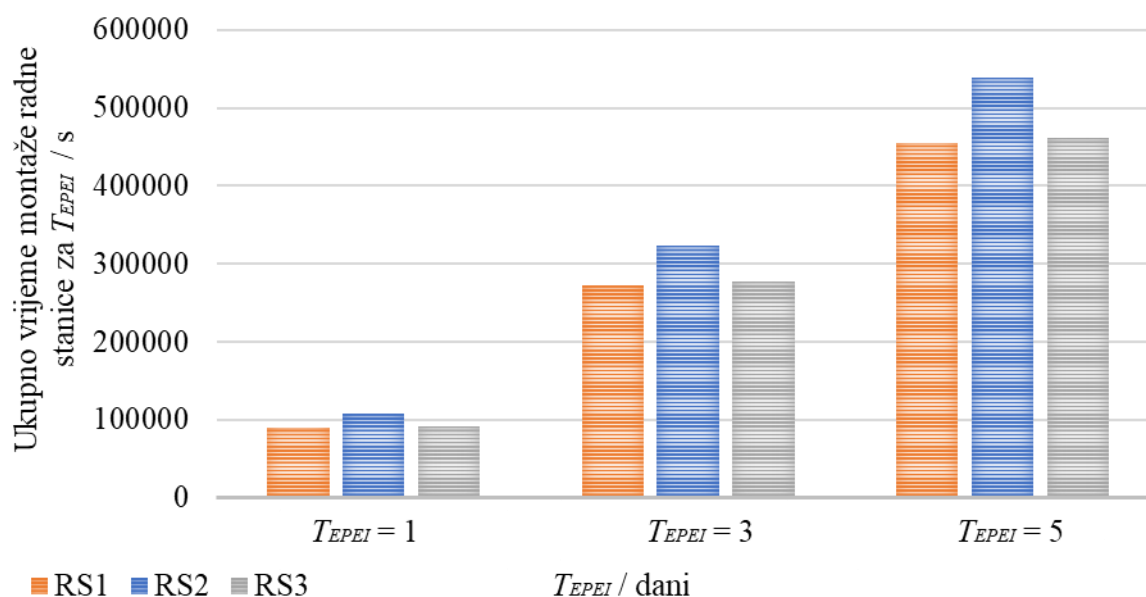
Dodatni preduvjet za uspješnu raspodjelu elemenata rada po ovakvom modelu je poznavanje udjela svakog proizvoda u ukupnoj količini proizvodâ koji se montiraju u nekom vremenskom periodu T za koji se vrši balansiranje. Primjerice, na Slici 3.9. prikazana su dva proizvoda koji imaju jednake udjele proizvodnje (uzorak proizvoda je 1:1). Vremena montaže elemenata rada svakog pojedinog proizvoda i njihova raspodjela po radnim stanicama nakon provođenja balansiranja prikazani su tablicama (narančasta i plava tablica) i grafovima. Iz primjera je vidljivo kako je učinkovitost montažne linije, a time i njezina ukupna proizvodnost, u uvjetima neograničenog kapaciteta skladišta, veća kod zbirnog balansiranja nego kod pojedinačnog. U promatranom vremenskom periodu T na montažnoj liniji izmjenjuju se serije raznolikih proizvoda na način da se kroz određeno vrijeme (EPEI period) planiraju poništavati primjerice zagušenja pojedinih radnih stanica s velikom količinom rada (kada ta radna stanica predstavlja usko grlo) s montažom serije proizvoda s manjom količinom rada na promatranjoj radnoj stanici, kako bi radna stanica postigla takt procesa sličan onome na ostalim radnim stanicama, te eventualno čak i prestala biti usko grlo do ponovnog ponavljanja EPEI perioda. Ovakav efekt moguć je na svim radnim stanicama, odnosno sve radne stanice tijekom EPEI perioda jedan dio vremena mogu predstavljati proces uskog grla.

Kako se unutar jednog EPEI perioda može dogoditi izmjena radne stanice koja predstavlja proces uskog grla (ovisno o seriji proizvoda koja se montira), tako se i proizvodnost montažne linije unutar tog istog EPEI perioda može mijenjati. Naime, za očekivati je da se s pojavom procesa uskog grla na nekoj drugoj stanici u odnosu na prvotnu radnu stanicu uskog grla, mijenja vrijeme procesa montaže uskog grla. Sukladno tome, mijenja se i proizvodnost linije pošto je proizvodnost linije ograničena vremenom procesa uskog grla.

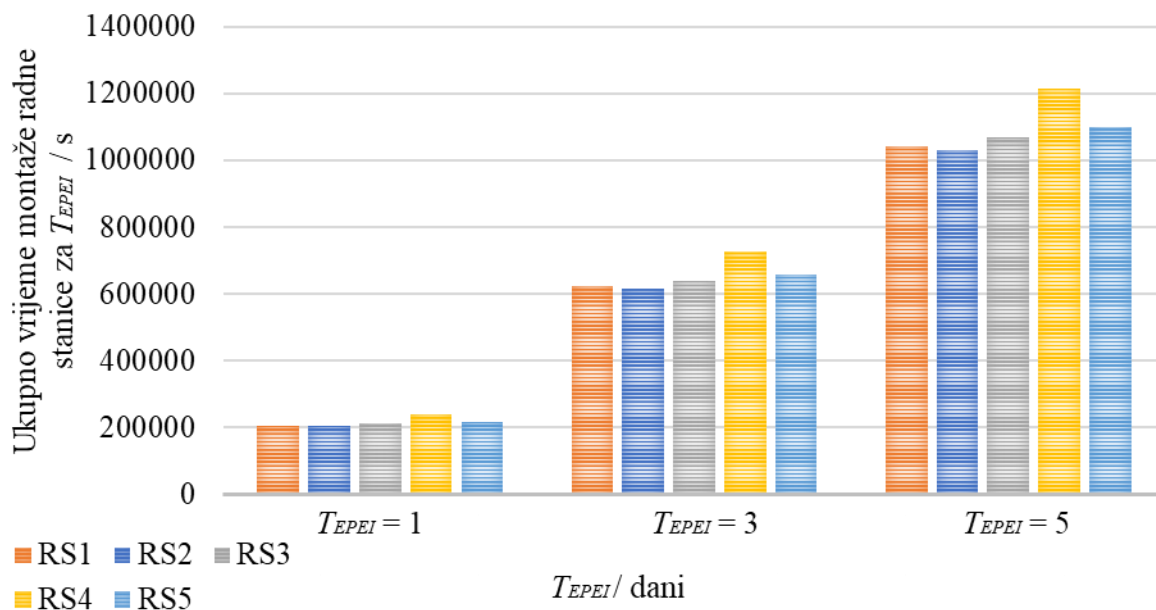
U slučaju promjene radne stanice procesa uskog grla, mijenja se i trend nakupljanja i pražnjenja uzvodnih i nizvodnih međuskladišta oko prvotne radne stanice procesa uskog grla. Trend nakupljanja i pražnjenja uzvodnih i nizvodnih međuskladišta opisan je na početku poglavlja 3.2. S obzirom na promjenu radne stanice procesa uskog grla, isti trend sada se događa oko neke druge radne stanice koja je u određenom trenutku promatranja postala proces uskog grla. Stoga je za očekivati da će se u pojedinim intervalima unutar svakog EPEI perioda događati izmjena količine proizvoda u međuskladištima, koja tijekom svake serije istih proizvoda teži odgovarajućoj vrijednosti. Za uzvodne radne stanice od trenutne radne stanice procesa uskog grla ta vrijednost će biti maksimalna moguća, dok će za nizvodne procese ta vrijednost biti jednaka nuli.

U cijelom procesu matematičkog modeliranja prikazanog na početku ovog poglavlja, za predviđanje proizvodnosti korištena je objedinjena opterećenost radnih stanica za sve raznolike proizvode prema njihovim udjelima u ukupnoj količini za montažu. Raspodjela elemenata rada izvršena je za sve proizvode na način da je ukupno opterećenje za uzorak proizvoda na svakoj radnoj stanici približno jednako. Ovisno o ujednačenosti raspodjele ukupnog opterećenja razlikuje se i balansiranost montažne linije. Primjerice, ako je u EPEI vremenskom periodu potrebno montirati određen broj svih raznolikih proizvoda, tada se za objedinjenu opterećenost radne stanice uzima suma umnoška vremena procesa montaže proizvoda i broja pripadajućih raznolikih proizvoda planiranih za proizvodnju unutar EPEI perioda, kao što je prikazano izrazom (3.15).

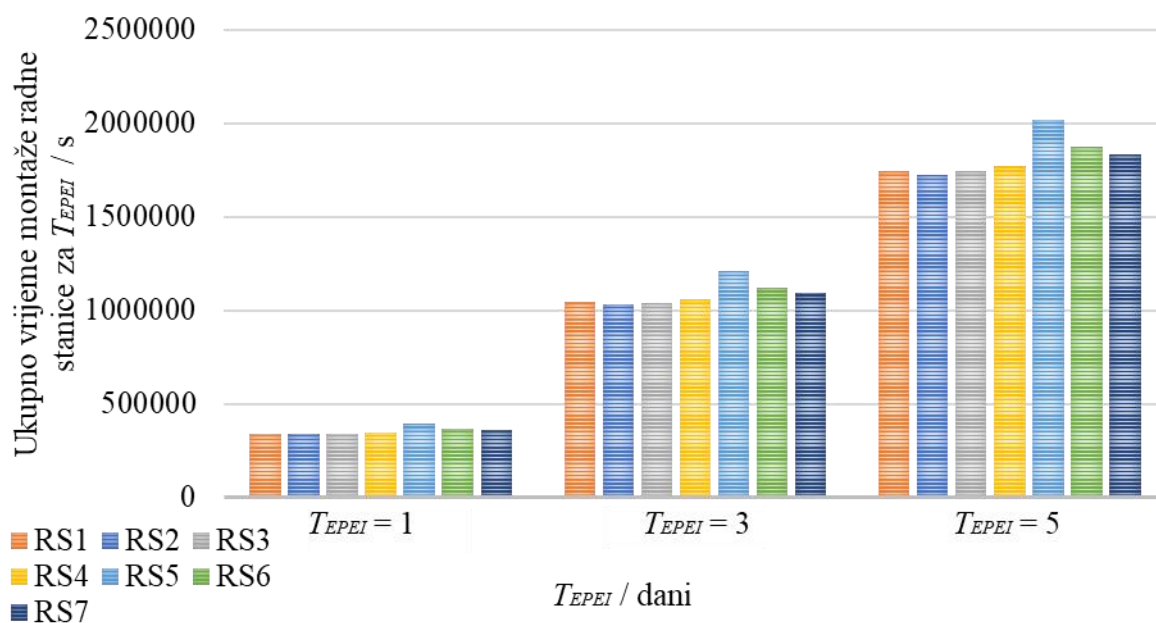
Ovakav pristup rezultirao je balansiranošću prema grafovima prikazanim od Slike 3.10. do Slike 3.12. iz kojih se jednostavno može uočiti koja radna stanica predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda.



Slika 3.10. Ukupno vrijeme montaže kod T_{EPEI} kada je $n = 3$, $m = 3$, $\eta_{AL} = 90\%$



Slika 3.11. Ukupno vrijeme montaže kod T_{EPEI} kada je $n = 6$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$



Slika 3.12. Ukupno vrijeme montaže kod T_{EPEI} kada je $n = 9$, $m = 7$, $\eta_{AL} = 90\%$

Vrijeme procesa uskog grla definira prosječnu proizvodnost tijekom EPEI perioda (T_{EPEI}), pa tako i T perioda. Mogući pad proizvodnosti nastaje zbog spomenute izmjene radne stanice procesa uskog grla tijekom montaže raznolikih proizvoda. Međutim, iako se proizvodnost tijekom EPEI perioda može mijenjati, maksimalna vrijednost proizvodnosti uvijek je definirana prosječnom proizvodnošću tijekom EPEI perioda.

U vremenskim intervalima unutar EPEI perioda kada proces uskog grla postane radna stanica koja je smještena uzvodno od radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda, može doći do smanjenja proizvodnosti. Smanjenje proizvodnosti rezultat je toga što međuskladište ispred radne stanice uskog grla kod EPEI perioda u spomenutom slučaju ima tendenciju biti prazno što uzrokuje da radna stanica koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda jedan dio vremena mora čekati na podsklop. Stoga, u nekim trenucima radna stanica koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda neće imati mogućnost raditi. Sukladno tome, njena učinkovitost će padati, a time će padati i proizvodnost cijele montažne linije. S druge strane, do smanjenja proizvodnosti može doći i u vremenskim intervalima unutar EPEI perioda kada proces uskog grla postane radna stanica koja je smještena nizvodno od radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. Smanjenje proizvodnosti rezultat je toga što međuskladište nakon radne stanice uskog grla kod EPEI perioda u spomenutom slučaju ima tendenciju biti popunjeno što uzrokuje da je radna stanica koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda jedan dio vremena blokirana. Stoga, u nekim trenucima radna stanica koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda neće imati mogućnost raditi. Sukladno tome, njena učinkovitost će padati, a time će padati i proizvodnost cijele montažne linije. Jedan od mogućih pristupa za rješavanje ovog problema je formiranje međuskladišta između radnih stanica dovoljno velikog kapaciteta kako bi se dugotrajnije amortizirala veća potražnja za podsklopovima od strane radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. U slučaju kada nema međuskladišta ili je kapacitet međuskladišta minimalan, pad produktivnosti može se očekivati odmah ili već kod relativno male serije raznolikih proizvoda, tj. kod relativno malog EPEI perioda. Ovo je općenito slučaj kod montažnih linija s transportnom vrpcom kada se na vrpce može skladištiti samo nekoliko komada podsklopova u ovisnosti o duljini slobodne površine transportne vrpce.

Matematičko modeliranje opisano u poglavlju 3.2. napravljeno je uz pretpostavku da je količina koja se može smjestiti u međuskladišta neograničena. U tom slučaju, gomilanje podsklopova ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda je ono što će se sigurno dogoditi, te se efekt smanjenja proizvodnosti, osim eventualno u samom početku montaže kod praznih međuskladišta, neće nikada pojaviti. Međutim, u stvarnom industrijskom okruženju situacija je drugačija. Međuskladišta su ograničenog kapaciteta te se pad proizvodnosti montažne linije može očekivati kada se ostvare pojedini preduvjeti:

- Prvi preduvjet je da su barem pojedini proizvodi, kada ih se gleda zasebno, balansirani na način da se njihov proces uskog grla nalazi na radnoj stanici koja je smještena uzvodno od radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda.
- Drugi preduvjet je da su barem pojedini proizvodi, kada ih se gleda zasebno, balansirani na način da se njihov proces uskog grla nalazi na radnoj stanici koja je smještena nizvodno od radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda.
- Treći preduvjet je da je međuskladište ograničenog kapaciteta.
- Četvrti preduvjet je da je EPEI period dovoljno dug da postojeće međuskladište ne može amortizirati izmjenu radne stanice procesa uskog grla i zadovoljiti zahtjeve s radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda.

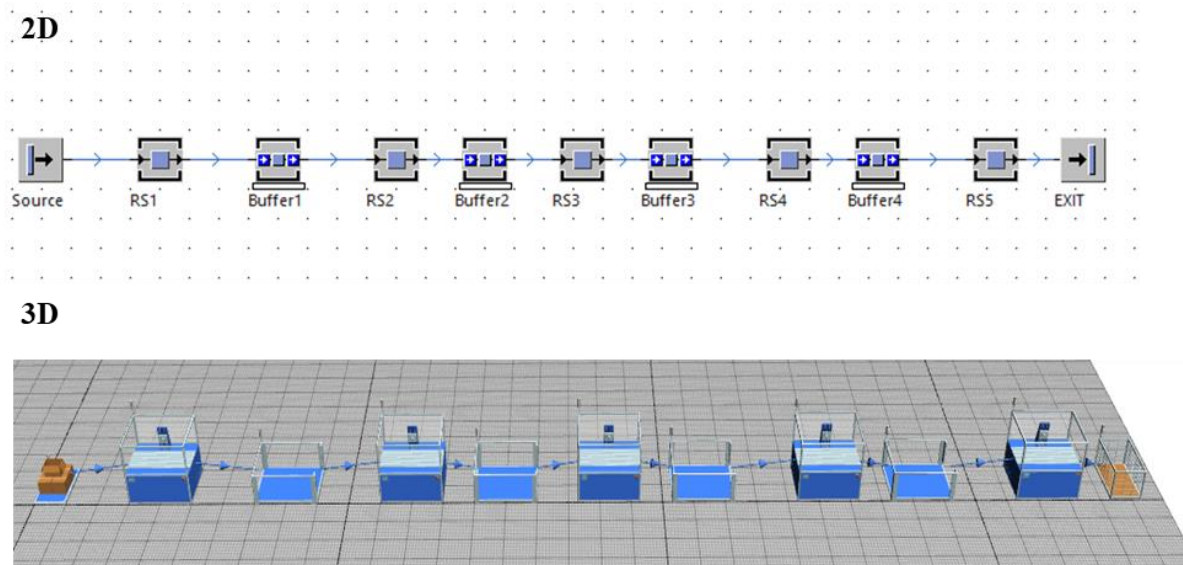
Kako je za matematičko modeliranje proizvodnosti potrebno uvesti i sve spomenute utjecajne veličine koje ovise o velikom broju podataka koji se mijenjaju s vremenom, pristupilo se simulacijskom modeliranju kako bi se na primjerima opisalo dinamičko funkcioniranje montažne linije te kako bi se izračunala pripadajuća proizvodnost za pojedine slučajeve.

3.2.3. Uporaba simulacijskog softvera za dinamičko predviđanje proizvodnosti

Za simuliranje montažne linije korišten je softver Tecnomatix Plant Simulation 16, a provjera točnosti dobivenih rezultata pojedinih simulacijskih modela, izvršena je primjenom Microsoft Excel tablične simulacije. Primjenom Microsoft Excel tablične simulacije dobivene su maksimalne vrijednosti proizvodnosti koje se ostvaruju u uvjetima neograničenog kapaciteta međuskladišta kada se učinkovitost montažne linije definira na temelju procesa uskog grla kod EPEI perioda. Zbog pada proizvodnosti nastalih kao posljedica efekta pojašnjenog u podpoglavlju 3.2.2. očekuje se da će rezultati za proizvodnost dobiveni simulacijskim softverom odstupati od rezultata dobivenih primjenom tablične simulacije.

Simulacijski softveri pružaju priliku za testiranje novih ideja za dizajn ili poboljšanje procesa i sustava prije nego što se ulože vrijeme i resursi za izgradnju ili promjenu stvarnog sustava. Tecnomatix Plant Simulation razvijen je od strane Siemens PLM korporacije i koristi se za dinamičko modeliranje, simuliranje, analiziranje, vizualizaciju te optimizaciju svih vrsta proizvodnih sustava i procesa, odnosno njihovih tokova materijala i korištenih resursa [99]. Razvoj modela je grafički i objektno orijentiran u onoj mjeri u kojoj je to moguće. To znači da se model većinom gradi na temelju grafičkih objekata te kroz definiranje protoka elemenata i logike rada sustava koji se promatra. Značajke svake pojedine vrste objekta definiraju se

unošenjem potrebnih informacija unutar pripadajućeg formata za njihov unos. Softver omogućuje 2D i 3D grafičku animaciju sustava koji se modelira. 2D i 3D grafički prikaz montažne linije s pet radnih stanica koja je konstruirana za simulaciju predstavljenog primjera dan je na Slici 3.13. Oznake od RS1 do RS5 predstavljaju radne stanice, dok se s oznakama Buffer1 do Buffer 4 označavaju međuskladišta između radnih stanica.

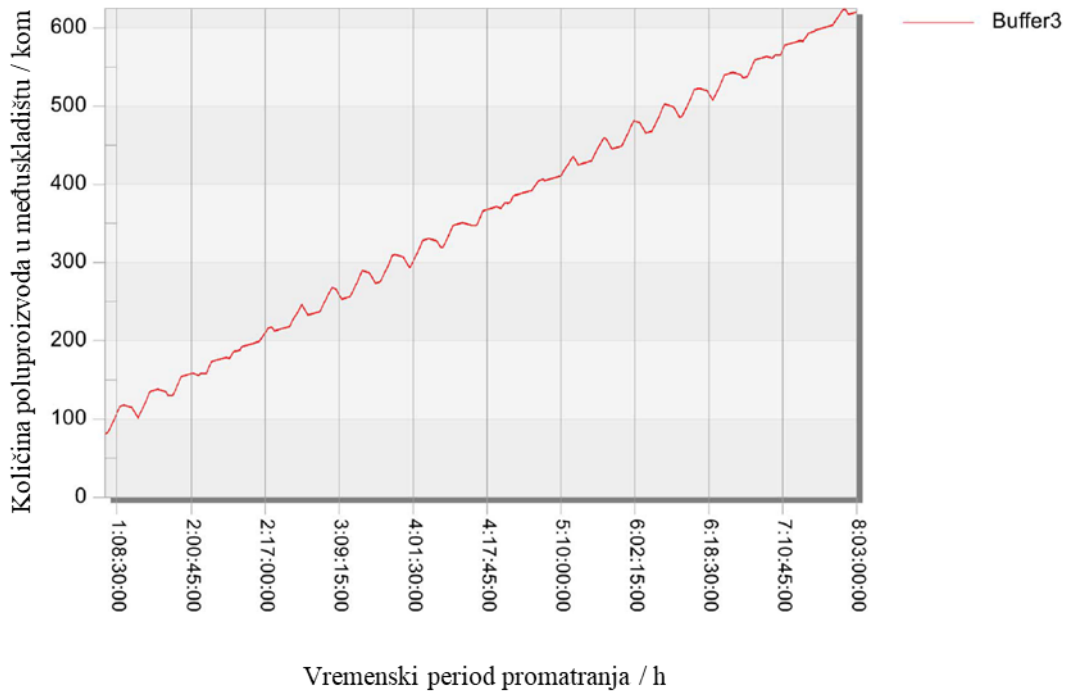


Slika 3.13. Montažna linija s pet radnih stanica

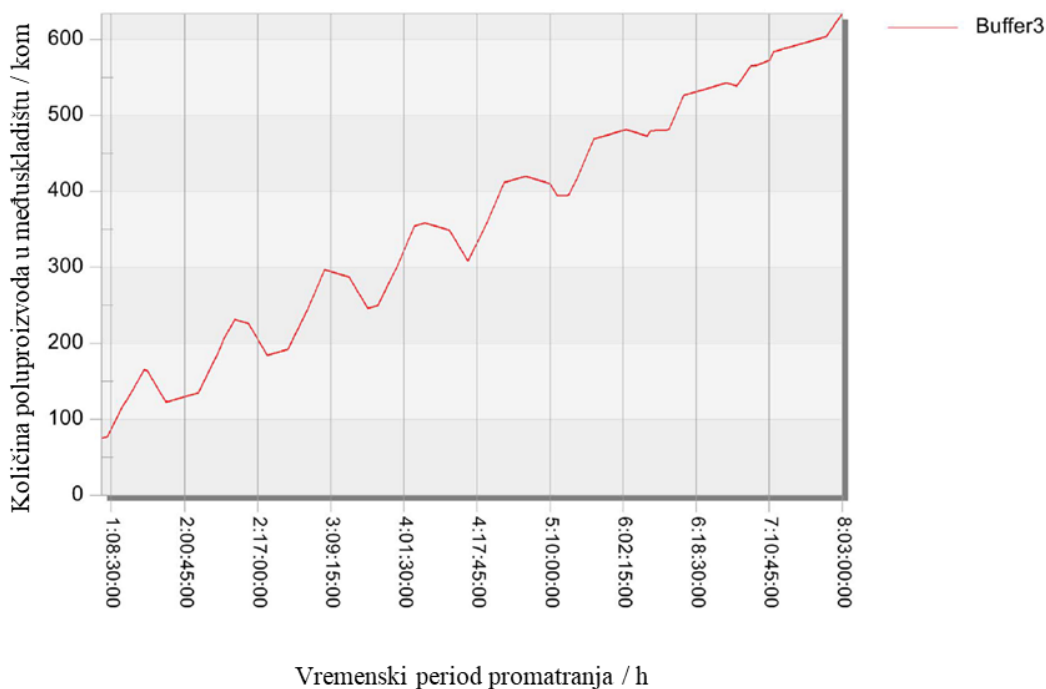
U simulacijama montažne linije, svaki EPEI period definiran je pripadajućim količinama svakog pojedinog proizvoda kojeg je potrebno proizvesti unutar njega poštujući uzorak proizvoda, tj. omjere definirane uzorkom. S obzirom da su primjenom prethodnih izraza, vrijednosti proizvodnosti pojedinačnih proizvoda u pojedinim EPEI periodima dobivene u decimalnim iznosima, vrijednosti unesene u simulacijski softver su prilagođene na način da se održao udio proizvoda unutar promatranog uzorka proizvoda. Primjerice, ako su za uzorak od $n = 3, m = 3, \eta_{AL} = 85 \%$ dobivene vrijednosti za EPEI period od jednog dana $PR_{EPEI}^1 = 57,2$, $PR_{EPEI}^2 = 28,6$ te $PR_{EPEI}^3 = 28,6$, Tablica 3.14., u simulaciju su unesene vrijednosti $PR_{EPEI}^1 = 56$, $PR_{EPEI}^2 = 28$ te $PR_{EPEI}^3 = 28$. Simulacije su provedene za vremenski period (T) od mjesec dana, tj. 165 radnih sati uz dodano određeno vrijeme koje je potrebno za uhodavanje montažne linije. Statistički podaci prikupljeni su samo za spomenute radne sate.

Kao što je već rečeno, kada je kapacitet međuskladišta ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda neograničen, dolazi do nagomilavanja podsklopova u njemu pri čemu je učinkovitost radne stanice maksimalna (100 %). Trend nagomilavanja

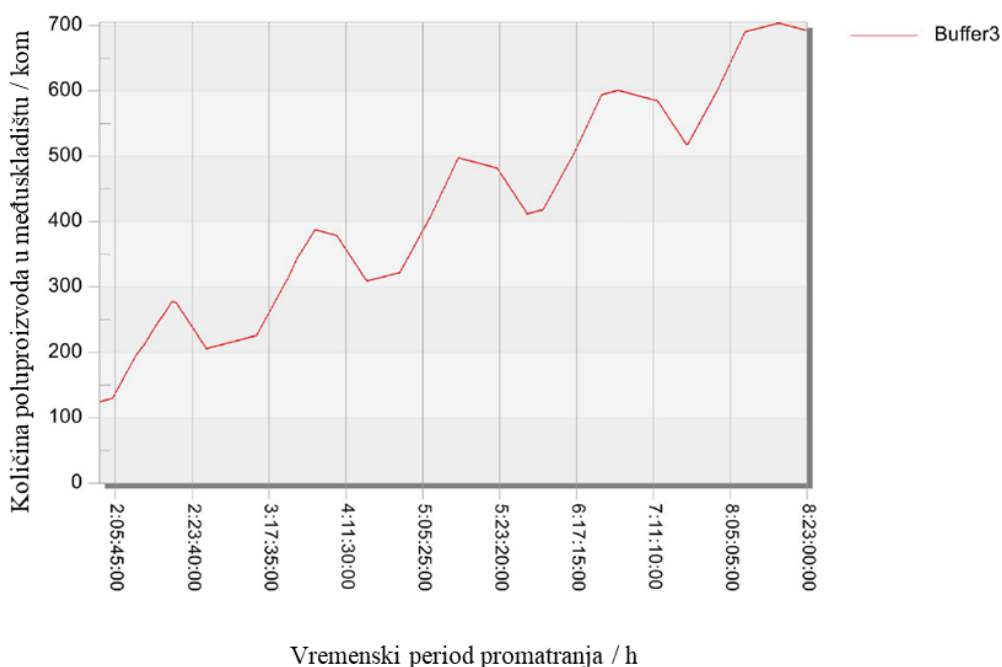
podsklopova ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda uočljiv je na slikama od Slike 3.14. do Slike 3.16. Slike prikazuju popunjenost međuskladišta ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda za $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, dok su vrijednosti EPEI perioda varirane.



Slika 3.14. Trend nagomilavanja podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI}=1$ dan



Slika 3.15. Trend nagomilavanja podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI} = 3$ dana



Slika 3.16. Trend nagomilavanja podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI} = 5$ dana

Kao što je uočljivo iz Slike 3.14. do Slike 3.16. s porastom vrijednosti EPEI perioda (porastom T_{EPEI}), tj. s porastom serije svakog raznolikog proizvoda izraženiji je porast varijacija u količinama podsklopova unutar međuskladišta koji je nastao kao rezultat njihovog kontinuiranog nagomilavanja. Porastom EPEI perioda, u uvjetima ograničenog kapaciteta međuskladišta, smanjuje se učinkovitost radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. Sukladno tome, raste kapacitet međuskladišta potreban da bi radna stanica koja predstavlja usko grlo kod EPEI perioda radila s najvećim postotkom učinkovitosti (100%). Ovaj trend je logičan s obzirom da s porastom EPEI perioda raste i serija svakog raznolikog proizvoda. To znači da će izmjene uskog grla koje su smještene uzvodno od uskog grla kod EPEI perioda biti dužeg vremena trajanja tijekom perioda promatranja, pa će učinkovitost uskog grla kod EPEI perioda opadati kao i proizvodnost. U Tablici 3.18. do Tablice 3.20. prikazana je proizvodnost i učinkovitost radnih stanica u uvjetima ograničenog kapaciteta međuskladišta za slučaj kada je $n = 3, 6$ ili 9 , $m = 5$, $\eta_{AL} = 90 \%$, dok su EPEI vrijednosti varirane. U primjeru s pet radnih stanica, RS4 predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. Oznaka c' odnosi se na potreban kapacitet međuskladišta kojim se postiže 100 %-tna učinkovitost radne stanice uskog grla kod EPEI perioda. Kapaciteti svih međuskladišta su jednaki.

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH
POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

Tablica 3.18. Učinkovitost radnih stanica pri ograničenim kapacitetima međuskladišta, $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$

$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjeseću
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	74,71	78,25	84,42	94,5	93,61	4198
$c = 4$	75,33	78,80	85,08	95,19	94,28	4242
$c = 6$	75,89	79,40	85,81	95,92	94,94	4272
$c' = 18$	79,02	82,76	89,44	100,00	99,07	4442
$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjeseću
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	74,26	77,89	84,02	94,12	93,35	4186
$c = 4$	74,48	78,08	84,24	94,36	93,55	4200
$c = 6$	74,69	78,27	84,46	94,59	93,74	4214
$c' = 52$	78,95	82,59	89,85	100,00	99,11	4458
$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom / mjeseću
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	74,72	77,88	84,4	94,3	92,91	4243
$c = 4$	74,81	77,99	84,54	94,44	93,05	4247
$c = 6$	74,91	78,11	84,68	94,58	93,18	4251
$c' = 86$	78,88	82,49	90,24	100,00	99,15	4464

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH
POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

Tablica 3.19. Učinkovitost radnih stanica pri ograničenim kapacitetima međuskladišta, $n = 6$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$

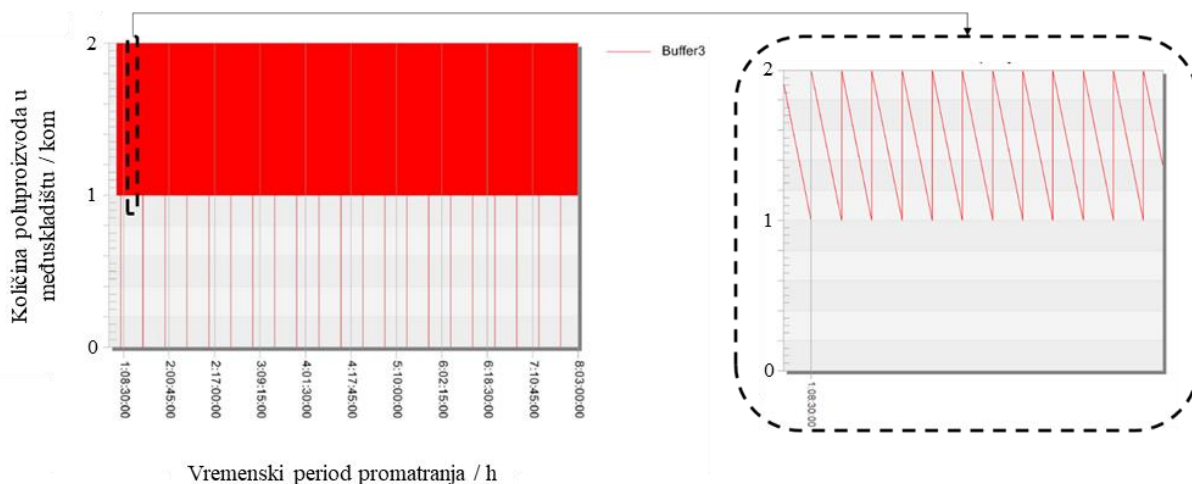
$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjeseću
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	83,24	82,04	85,25	96,62	87,65	4330
$c = 4$	84,70	83,33	86,75	98,15	88,93	4400
$c = 6$	85,48	84,28	87,55	99,14	89,94	4447
$c' = 8$	86,14	85,05	88,22	100,00	90,79	4485
$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjeseću
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	82,26	81,42	84,52	95,59	87,02	4326
$c = 4$	82,86	81,78	85,03	96,11	87,49	4352
$c = 6$	83,48	82,08	85,55	96,67	87,81	4374
$c' = 24$	86,32	84,50	88,37	100,00	90,41	4507
$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjeseću
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	82,16	80,77	84,34	95,05	86,20	4304
$c = 4$	82,90	81,11	85,00	95,72	86,53	4329
$c = 6$	83,29	81,27	85,30	96,05	86,70	4343
$c' = 40$	86,58	84,21	88,46	100,00	90,21	4509

*Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH
POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE*

Tablica 3.20. Učinkovitost radnih stanica pri ograničenim kapacitetima međuskladišta, $n = 9$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$

$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjesecu
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	82,83	84,78	85,28	97,02	87,38	4335
$c = 4$	83,48	85,64	85,98	97,87	88,23	4375
$c = 6$	84,20	86,52	86,83	98,69	89,15	4414
$c' = 9$	85,47	87,53	87,90	100,00	90,30	4473
$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjesecu
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	81,97	83,97	84,30	96,31	86,52	4344
$c = 4$	82,48	84,22	84,73	96,75	86,78	4361
$c = 6$	82,81	84,39	85,02	97,02	86,94	4373
$c' = 28$	84,65	87,13	87,63	100,00	89,71	4516
$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$						
Učinkovitost radnih stanica / %						Proizvodnost kom/mjesecu
Kapacitet međuskladišta / kom	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5	PR_T
$c = 2$	82,02	82,9	83,92	96,24	85,04	4310
$c = 4$	82,58	83,36	84,47	96,72	85,53	4330
$c = 6$	82,71	83,51	84,64	96,88	85,74	4337
$c' = 47$	84,50	87,38	87,35	100,00	89,64	4523

Primjer kretanja zaliha podsklopova u međuskladištu ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda kada je kapacitet međuskladišta ograničen i iznosi $c = 2$, dan je na Slici 3.17. Iz slike je uočljivo da je međuskladište ograničenog kapaciteta ispred radne stanice uskog grla kod EPEI perioda gotovo uvijek maksimalno popunjeno.



Slika 3.17. Popunjenost međuskладиšta kada je $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$, $T_{EPEI} = 1$ dan za vremenski period promatranja od 165 h

Potreban minimalan kapacitet međuskладиšta da bi se ostvarila maksimalna proizvodnost montažne linije za sve promatrane kombinacije raznolikih proizvoda, radnih stanica i EPEI perioda iz poglavlja 3.2. prikazane su od Tablice 3.21. do Tablice 3.23. Ono što je jednako za sve kombinacije je da porastom EPEI perioda za konstantu vrijednost raznolikih proizvoda i broja radnih stanica, potreban kapacitet međuskладиšta raste, osim u slučaju kada je $n = 3$, $m = 3$, $\eta_{AL} = 85\%$. Tada, minimalan kapacitet za sve vrijednosti EPEI perioda je iste vrijednosti i iznosi jedan. Razlog tome je što u ovom konkretnom primjeru svi promatrani raznoliki proizvodi imaju proces uskog grla na radnoj stanici koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. Sukladno tome, usko grlo uvijek će raditi s punom učinkovitošću (tj. iskoristivošću), neovisno o tome je li kapacitet svih međuskладиšta jedan ili više. Ono što će se razlikovati je učinkovitost uzvodnih radnih stanica koje će se s porastom kapaciteta međuskладиšta povećavati, ali proizvodnost montažne linije i dalje će ostati jednaka s obzirom da je određena procesom uskog grla.

Iz Tablice 3.21. do Tablice 3.23., može se zaključiti da se potreban kapacitet međuskладиšta mijenja ovisno o broju raznolikih proizvoda i broju radnih stanica. Međutim, općeniti zaključak o povezanosti broja radnih stanica i broja raznolikih proizvoda s potrebnim kapacitetom međuskладиšta, nije moguće donijeti s obzirom da su rezultati drugačiji za svaki pojedinačni promatrani slučaj. U promatranom primjeru predstavljenom u poglavlju 3.2., montažne linije s tri i s pet radnih stanica imale su proces uskog grla kod EPEI perioda na predzadnjoj radnoj stanici, tj. na radnoj stanici 2, odnosno na radnoj stanici 4. S druge strane, montažna linija sa sedam radnih stanica proces uskog grla kod EPEI perioda imala je na petoj radnoj stanici.

Porastom broja radnih stanica za isti uzorak raznolikih proizvoda, ali drugačije učinkovitosti montažne linije, potreban kapacitet međuskладиšta za postizanje maksimalne proizvodnosti nekad doživljava trend rasta, a ponekad trend pada. Ovaj suprotan trend može se uočiti primjerice u Tablici 3.21., kada se usporede kapaciteti za $m = 5$ i $m = 7$ ili primjerice u Tablici 3.22. kada se usporede kapaciteti za $m = 3$ i $m = 5$.

Tablica 3.21. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskладиšta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} perioda za $n = 3$

$c' / \text{kom} (\eta_{AL} = 85 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	1	1	1
5	RS4	2	4	6
7	RS5	7	18	29
$c' / \text{kom} (\eta_{AL} = 90 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	6	14	24
5	RS4	18	52	86
7	RS5	15	45	75
$c' / \text{kom} (\eta_{AL} = 95 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	19	58	95
5	RS4	17	48	80
7	RS5	33	100	167

Poglavlje 3. RAZVOJ MATEMATIČKOG MODELA ZA PREDVIĐANJE KLJUČNIH POKAZATELJA USPJEŠNOSTI MONTAŽNE LINIJE

Tablica 3.22. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} perioda za $n = 6$

$c' / \text{kom } (\eta_{AL} = 85 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	2	6	10
5	RS4	8	23	37
7	RS5	4	8	14
$c' / \text{kom } (\eta_{AL} = 90 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	14	43	71
5	RS4	8	24	40
7	RS5	9	26	43
$c' / \text{kom } (\eta_{AL} = 95 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	24	73	122
5	RS4	13	39	64
7	RS5	24	72	119

Tablica 3.23. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} za $n = 9$

$c' / \text{kom } (\eta_{AL} = 85 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	3	6	10
5	RS4	7	22	36
7	RS5	5	14	22
$c' / \text{kom } (\eta_{AL} = 90 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	8	25	43
5	RS4	9	28	47
7	RS5	13	38	64
$c' / \text{kom } (\eta_{AL} = 95 \%)$				
m	Usko grlo	$T_{EPEI} = 1 \text{ dan}$	$T_{EPEI} = 3 \text{ dana}$	$T_{EPEI} = 5 \text{ dana}$
3	RS2	15	49	82
5	RS4	25	73	113
7	RS5	17	50	85

Od Tablice 3.24. do Tablice 3.26. dana je usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih vrijednosti EPEI perioda za $n = 3, 6$ ili 9 , kada je $\eta_{AL} = 90\%$.

Tablica 3.24. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} za $n = 3, \eta_{AL} = 90\%$

$T_{EPEI} = 1$ dan			$T_{EPEI} = 3$ dana		
m	Usko grlo	c' / kom	m	Usko grlo	c' / kom
3	RS2	6	3	RS2	14
5	RS4	18	5	RS4	52
7	RS5	15	7	RS5	45
7'	RS6	27	7'	RS6	82

$T_{EPEI} = 5$ dana		
m	Usko grlo	c' / kom
3	RS2	24
5	RS4	86
7	RS5	75
7'	RS6	97

Tablica 3.25. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitosti uskog grla kod različitih T_{EPEI} za $n = 6, \eta_{AL} = 90\%$

$T_{EPEI} = 1$ dan			$T_{EPEI} = 3$ dana		
m	Usko grlo	c' / kom	m	Usko grlo	c' / kom
3	RS2	14	3	RS2	43
5	RS4	8	5	RS4	24
7	RS5	9	7	RS5	26
7'	RS6	17	7'	RS6	50

$T_{EPEI} = 5$ dana		
m	Usko grlo	c' / kom
3	RS2	71
5	RS4	40
7	RS5	43
7'	RS6	84

Tablica 3.26. Usporedba potrebnog kapaciteta međuskladišta za postizanje maksimalne učinkovitost uskog grla kod T_{EPEI} za $n = 9$, $\eta_{AL} = 90\%$

$T_{EPEI} = 1$ dan			$T_{EPEI} = 3$ dana		
m	Usko grlo	c' / kom	m	Usko grlo	c' / kom
3	RS2	8	3	RS2	25
5	RS4	9	5	RS4	28
7	RS5	13	7	RS5	38
7'	RS6	23	7'	RS6	71

$T_{EPEI} = 5$ dana		
m	Usko grlo	c' / kom
3	RS2	43
5	RS4	47
7	RS5	64
7'	RS6	119

Iz Tablice 3.24. do Tablice 3.26. uočljivo je da što je proces uskog grla kod EPEI perioda smješten bliže posljednjoj radnoj stanici montažne linije, to je potreban veći kapacitet međuskladišta kako bi montažna linija imala maksimalno moguću proizvodnost. U hipotetskom slučaju, kada bi radna stanica 5 i radna stanica 6 kod montažne linije sa sedam radnih stanica zamijenile mjesta, tj. kada bi radna stanica 6 predstavljala proces uskog grla kod EPEI perioda, za jednaku proizvodnost montažne linije, potreban kapacitet međuskladišta bi se povećao. Ovaj slučaj je u Tablici 3.24. do Tablice 3.26. označen s oznakom 7'. Jedan od mogućih uzroka koji utječu na porast potrebnog kapaciteta međuskladišta kako se usko grlo kod EPEI perioda približava posljednjoj radnoj stanici je utjecaj izmjena lokalnih uskih grla koji se mogu pojaviti na montažnoj liniji u odnosu na proces uskog grla kod EPEI perioda te njihov smještaj u odnosu na proces uskog grla kod EPEI perioda. Spomenuti uzroci također su razlog zašto se u pojedinim slučajevima rastom broja radnih stanica događa rast potrebnog kapaciteta međuskladišta. Pod pojmom lokalnih uskih grla podrazumijevaju se uska grla pojedinih raznolikih proizvoda koja se razlikuju od procesa uskog grla kod EPEI perioda. Utjecaj lokalnih uskih grla može biti dvojak, ali u promatranom slučaju uvijek rezultira istom posljedicom, tj. porastom potrebnog kapaciteta međuskladišta. Prvi utjecaj podrazumijeva da dovoljan broj raznolikih proizvoda ima proces uskog grla ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. Tada, radna stanica uskog grla kod EPEI perioda jedan dio vremena provede bez rada jer mora čekati da uzvodne radne stanice koje predstavljaju proces uskog grla dostave proizvod u međuskladište. Stoga je potreban porast kapaciteta

međuskладиšta kako bi se utjecaj izmjena radnih stanica koje predstavljaju usko grlo amortizirao. S druge strane, ako je dovoljno raznolikih proizvoda dovoljno visokog vremena montaže koji imaju proces uskog grla nakon procesa uskog grla kod EPEI perioda, može se dogoditi da će radna stanica koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda jedan dio vremena provesti blokirana, tj. neće moći u međuskладиšte nizvodne radne stanice isporučiti gotov podsklop zbog malog kapaciteta međuskладиšta. I u tom slučaju kako bi se amortizirao utjecaj različitih uskih grla raznolikih proizvoda, kapacitet međuskладиšta se povećava do određene vrijednosti.

Trend u kojem porastom broja radnih stanica, kapacitet međuskладиšta nije porastao nego pao pokazao se primjerice u Tablici 3.21. za $\eta_{AL} = 95\%$ kod $m = 3$ i $m = 5$. U ovom slučaju, trend pada također je rezultat smještaja lokalnih uskih grla svih promatranih proizvoda. Konkretno u ovom primjeru, unatoč većem broju svakog pojedinačnog proizvoda koji se proizvodi za isti EPEI period na većem broju radnih stanica, utjecaj raspodjele uskih grla promatranih proizvoda prevladava i povoljniji je u slučaju kada je $m = 5$. Povoljniji u smislu da rezultira s manjim kapacitetom međuskладиšta koji je potreban da bi usko grlo kod EPEI perioda radilo s maksimalnom proizvodnošću. Kada je $m = 3$, prvi i treći proizvod koji se proizvode imaju usko grlo na radnoj stanici koja predstavlja usko grlo kod EPEI perioda dok drugi proizvod ima usko grlo na posljednjoj radnoj stanici. Kada je $m = 5$, prvi i treći proizvod koji se proizvode imaju usko grlo na radnoj stanici koja predstavlja usko grlo kod EPEI perioda dok drugi proizvod ima usko grlo na prvoj radnoj stanici. Ovo usko grlo na prvoj radnoj stanici omogućuje da se količine nakupljene u međuskладиštu ispred uskog grla kod EPEI perioda potroše dok se taj proizvod montira. Stoga, smještaj uskog grlo u ovom slučaju djeluje na sporije popunjavanje međuskладиšta ispred radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda. Dok se u slučaju kada je $m = 3$ kapacitet uskog grla povećava zbog stanja blokiranosti koje radna stanica koja je usko grlo kod EPEI perioda doživljava zbog proizvoda čije je usko grlo na posljednjoj radnoj stanici.

Sukladno svemu rečenome slijedi da nije moguće napraviti općeniti matematički model koji će integrirati izmjene radnih stanica procesa uskog grla i njihov utjecaj na proizvodnost montažne linije. Također, nije jednostavno matematički izraziti i dovesti u vezu broj raznolikih proizvoda, očekivane izmjene procesa uskih grla tijekom vremena, broj radnih stanica, kapacitet međuskладиšta te učinkovitost montažne linije. Ovisno o svakom pojedinačnom slučaju, rezultati će se razlikovati i uporaba simulacije će biti neizbježna. Neovisno o tome

imaju li svi raznoliki proizvodi proces uskog grla na istoj radnoj stanici (tzv. globalno usko grlo) ili su pak prisutne izmjene uskih grla (lokalna uska grla pojedinih proizvoda razlikuju se od procesa uskog grla kod EPEI perioda), takt uzorka za jednaku iskorištenost montažne linije uvijek će biti jednak. Usporedba podataka o proizvodnosti montažne linije dobivene primjenom predloženog matematičkog modela (Tablica 3.16.) i primjenom simulacije (Tablica 3.18. do Tablica 3.20.) prikazana je u Tablici 3.27. Iz spomenute tablice vidljivo je da matematički model dobro opisuje proizvodnost montažne linije kada se pretpostavi da radna stanica uskog grla kod promatranog EPEI perioda ima dovoljan kapacitet međuskladišta da može raditi sa 100 %-tnom učinkovitošću. Razlike koje se javljaju između pojedinih vrijednosti unutar tablice su neznatne, a jedan od mogućih razloga tome je što u simulaciju nisu mogle biti unesene vrijednosti u decimalnim iznosima, stoga su unesene približne vrijednosti kao što je već ranije spomenuto.

Tablica 3.27. Usporedba rezultata proizvodnosti za $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$ za različite vrijednosti T_{EPEI}

	Matematički model			Simulacija		
	PR_T kom/mjesecu			PR_T kom/mjesecu		
T_{EPEI}	1 dan	3 dana	5 dana	1 dan	3 dana	5 dana
$n = 3$	4442	4458	4461	4442	4458	4464
$n = 6$	4486	4518	4524	4486	4518	4524
$n = 9$	4474	4522	4531	4473	4516	4523

Iz svega rečenoga slijedi da je pomoću predloženog matematičkog modela za predviđanje proizvodnosti moguće dobiti informacije o maksimalnoj proizvodnosti montažne linije. Razvijeni matematički izraz stoga može poslužiti kao dobar pokazatelj sposobnosti proizvodnje montažne linije za promatrani period T u ovisnosti o ulaznim parametrima.

3.2.4. Predviđanje vodećeg vremena proizvodnje (montaže)

Pod pojmom vodeće vrijeme proizvodnje (tj. montaže) podrazumijeva se prosječno najduže vrijeme proizvodnje proizvoda unutar montažne linije. Kao što je već rečeno kroz ovo poglavlje, nakon početnog perioda uhodavanja montažne linije svaka radna stanica proizvodit će prema tempu koji joj diktira najsporija radna stanica, odnosno usko grlo montažne linije, tj. radna stanica koja predstavlja usko grlo kod EPEI perioda. Na uzvodnim radnim stanicama od

radne stanice koja predstavlja usko grlo kod EPEI perioda pojavljivat će se samo jedan tip događaja, a to je potpuna popunjenost s obzirom da su one smještene prije procesa uskog grla kod EPEI perioda. S druge strane, nizvodne radne stanice od radne stanice koja predstavlja proces uskog grla kod EPEI perioda poprimit će također samo jedan tip događaja, a to je da su njihova međuskladišta uvijek prazna. Stoga, uzvodne stanice jedan period vremena će provesti blokirane, dok će nizvodne stanice jedan period vremena provesti u stanju mirovanja. Ako se pretpostavi da sva međuskladišta imaju jednaki kapacitet, vodeće vrijeme montaže moguće je izračunati prema sljedećem izrazu:

$$T_v = C_{AL} * TAKT_{proizvod}^{prosječni} + m * TAKT_{uzorak}^{prosječni} \quad (3.31)$$

gdje je:

- T_v - prosječno vodeće vrijeme montaže jedinice proizvoda iz uzorka
- C_{AL} - ukupan kapacitet međuskladišta na uzvodnim radnim stanicama
- $TAKT_{proizvod}^{prosječni}$ - prosječno vrijeme montaže jedne jedinice proizvoda iz uzorka na radnoj stanici koja je usko grlo.

Ovako izračunato maksimalno prosječno vodeće vrijeme montaže bit će jednako za bilo koju vrijednost EPEI-a.

Ukupan kapacitet međuskladišta na uzvodnim radnim stanicama, kada prva radna stanica nema međuskladište ispred, Slika 3.5., dan je sljedećim izrazom:

$$C_{AL} = c * (u_{grlo} - 1) \quad (3.32)$$

gdje je:

- c - kapacitet jednog međuskladišta
- u_{grlo} - varijabla koja pamti poziciju radne stanice na kojoj se javlja usko grlo, pozicija je jednaka broju radne stanice unutar montažne linije.

Ako je $max_j(t_{rs,j}) = max_j \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{ij}$ onda je $u_{grlo} = j$.

Prosječno vrijeme montaže jedne jedinice proizvoda na uskom grlu definirano je izrazom:

$$TAKT_{uzorak}^{prosječni} = \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} \quad (3.33)$$

Stoga, prošireni izraz za izračun prosječnog vodećeg vremena montaže ima sljedeći oblik:

$$T_v = c * (u_{grlo} - 1) * \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} + m * \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} \quad (3.34)$$

U prethodno spomenutom izrazu (3.34), zanemaren je utjecaj pripremno-završnih vremena na vodeće vrijeme proizvodnje. Razlog tome je jer su u promatranom primjeru pripremno-završna vremena zanemarivog udjela u ukupnom raspoloživom vremenu rada i stoga nije ni za očekivati njihov značajan utjecaj na vodeće vrijeme proizvodnje. Ako je utjecaj pripremno-završnih vremena značajan, izraz (3.34) može se modificirati kako slijedi:

$$T_v = \frac{\left[c * (u_{grlo} - 1) * \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} + m * \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} \right] * PR_T + (n * t_{pz} * \pi_T)}{PR_T} =$$

$$\frac{\left[c * (u_{grlo} - 1) * \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} + m * \frac{TAKT_{uzorak}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} \right] * \frac{T_{efektivno}}{TAKT_{uzorak}} * \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * \pi_T + (n * t_{pz})}{\frac{T_{efektivno}}{TAKT_{uzorak}} * \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} \quad (3.35)$$

Predloženom matematičkom jednadžbom moguće je predvidjeti vodeće vrijeme proizvodnje (tj. montaže) pod spomenutim pretpostavkama. Nazovimo ovo vodeće vrijeme proizvodnje statičko vodeće vrijeme proizvodnje. Međutim, u dinamičkom obliku vodeće vrijeme proizvodnje izrazito je teško je predvidjeti matematičkim modelom zbog prethodno opisanog utjecaja izmjena lokalnih procesa uskih grla u poglavlju 3.2.3., kada se mijenja trend punjenja međuskладиšta, odnosno kada se određena međuskладиšta neočekivano prazne, dok se s druge strane određena međuskладиšta neočekivano pune. Stoga će vrijednosti vodećeg vremena ovisiti o trenutku promatranja proizvodnje. Štoviše, ako se u simulaciju postavi jednak kapacitet međuskладиšta za sve radne stanice te se promatra isti period T , pojavit će razlike u vodećim vremenima proizvodnje T u odnosu na rezultat dobiven izrazom za vodeće vrijeme proizvodnje. Usporedba vodećih vremena proizvodnje dobivenih izrazom (3.34) te primjenom simulacije za raznolikost proizvoda $n = 3$, $m = 5$, $\eta_{AL} = 90\%$ iz primjera predstavljenog poglavljem 3.2.1. dane su u Tablici 3.28. i Tablici 3.29.. Rezultati za preostale raznolikosti ($n = 6$ i $n = 9$) slijede jednaki trend. Prosječne pojedinačne vrijednosti vodećeg vremena proizvodnje svakog proizvoda dobivene primjenom simulacija u tablicama su prikazane oznakom T_v^i . Simulacije su provedene za 165 h radnih sati uz dodano određeno vrijeme koje je potrebno za uhodavanje montažne linije.

Tablica 3.28. Usporedba rezultata vodećeg vremena proizvodnje za $n = 3, m = 5, \eta_{AL} = 90\%$ za različite vrijednosti T_{EPEI}

Simulacija	$T_{EPEI} = 1$ dan				$T_{EPEI} = 3$ dana			
	c / kom		c' / kom		c / kom		c' / kom	
	2	4	6	18	2	4	6	52
T_v^1 / s	1006	2598	3411	8206	1777	2658	3531	22304
T_v^2 / s	2137	3226	4110	9337	2272	3496	4661	25370
T_v^3 / s	1258	2221	3179	8458	1200	1942	2678	22749
T_v / s	1467	2681	3566	8667	1463	2261	3059	21413
Matematički model, izraz (3.4)								
T_v / s	1463	2261	3059	7847	1463	2261	3059	21413
Odstupanje / %	0,27	15,69	14,23	9,46	16,38	16,22	15,57	8,78

Tablica 3.29. Usporedba rezultata vodećeg vremena proizvodnje za $n = 3, m = 5, \eta_{AL} = 90\%$ za $T_{EPEI} = 5$ dana

Simulacija	$T_{EPEI} = 5$ dana			
	c / kom		c' / kom	
	2	4	6	86
T_v^1 / s	1780	2666	3547	36401
T_v^2 / s	2287	3550	4777	41396
T_v^3 / s	1221	1872	2545	36960
T_v / s	1762	2696	3623	38252
Matematički model, izraz (3.4)				
T_v / s	1463	2261	3059	34979
Odstupanje / %	17,00	16,13	15,57	8,56

Sukladno svemu rečenome, proizlazi da je za potrebe preciznog predviđanja vodećeg vremena proizvodnje, bilo da je riječ o prosječnom vremenu svih proizvoda ili prosječnom vremenu pojedinačno po proizvodu, potrebna uporaba simulacija. Korištenjem simulacija, moguće je dobiti podatke o vodećem vremenu proizvodnje u točno određenom željenom periodu vremena. Sukladno svemu rečenom, vodeće vrijeme neće biti predmet daljnjeg razmatranja u radu već će se osvrtni dati na razvijeni model za predviđanje proizvodnosti.

3.2.5. Optimalan slijed upućivanja radnih naloga za montažu proizvoda primjenom razvijenog matematičkog modela za predviđanje proizvodnosti

Razvijeni matematički model za predviđanje proizvodnosti daje podatke o maksimalnoj proizvodnosti montažne linije za određene ulazne parametre. Ako su ulazni parametri poznati, predloženi matematički model kao takav može poslužiti kao dobar indikator menadžerima prilikom određivanja optimalnog slijeda upućivanja radnih naloga za montažu proizvoda. Kako bi se razvijeni model mogao koristiti, a priori podaci koje menadžer treba definirati su sljedeći:

- broj raznolikih proizvoda koji se žele montirati na montažnoj liniji
- broj radnih stanica na kojima se vrši montaža
- ukupna količina svakog raznolikog proizvoda koje tržište zahtjeva za promatrani period T
- prosječna vremena montaže proizvoda i raspored njihovih elemenata rada po radnim stanicama u montažnoj liniji
- pripremno-završna vremena proizvoda
- vrijednosti EPEI perioda koji se želi uzeti u razmatranje.

Primjenom razvijenog matematičkog modela, menadžer će dobiti podatke o maksimalnoj proizvodnosti montažne linije, njenoj balansiranosti te prijedlog optimalnog slijeda upućivanja radnih naloga za montažu proizvoda u ovisnosti o definiranim podacima i preferencijama. Štoviše, korištenjem predloženog modela, donositelj odluke može vidjeti na koji se način promjena u ulaznim podacima reflektira na izlazne vrijednosti. Promjena ulaznih podataka može značiti ispitivanje različitih mogućih raspodjela elemenata rada raznolikih proizvoda po radnim stanicama primjenom neke od metoda balansiranja. Na taj način, donositelj odluke može dobiti brze podatke o maksimalnim proizvodnostima montažne linije, ali i o njenoj ukupnoj učinkovitosti, bez provođenja simulacije.

Ako podaci o proizvodnosti nisu dovoljni da bi se donijela odluka o optimalnom slijedu upućivanja radnih naloga, moguće je razvijeni model koristiti kao ulazni model za definiranje informacija o proizvodnostima za različite definirane ulazne parametre. Dobiveni rezultati mogu se potom upotrijebiti u nekoj od metoda za višekriterijsko donošenje odluka, poput PROMETHEE-ja [100], HUMANT algoritma [101], AHP metode.

3.2.6. Zaključak o razvijenom matematičkom modelu za predviđanje proizvodnosti

Kod velike raznolikosti proizvoda ili kod posebnih modela organizacije rada postoje izuzeci kada broj operatera ne odgovara broju radnih stanica. Tada je moguće promatrati nekoliko situacija. Prvi slučaj odnosi se na situaciju kada je broj operatera veći od broja radnih stanica, tj. kada više operatera radi na istoj radnoj stanici. Tada, fizičko i mentalno opterećenje operatera je manje s obzirom da svaki operater obavlja dio montaže elemenata rada za koji je zadužen. U tom slučaju, vrijeme montaže na radnoj stanici će se smanjiti, čime će se povećati efikasnost radne stanice, a time i njezina proizvodnost.

Drugi slučaj odnosi se na situaciju kada je broj operatera manji od broja radnih stanica, što znači da se određeni operateri moraju kretati među radnim stanicama na kojima rade. U tom slučaju mentalno i fizičko opterećenje radnika je veće u odnosu na prvi slučaj te će vrijeme montaže biti veće nego da je na svakoj radnoj stanici prisutan po jedan ili više operatera. Treći slučaj odnosi se na situaciju kada jedan operater radi na jednoj ili više radnih stanica, po potrebi. U tom slučaju mentalno i fizičko opterećenje „putujućeg“ operatera je veće s obzirom da se mora brzo prilagoditi novonastaloj situaciji. Posljednji slučaj odnosi se na situaciju kada je određeni element rada radno intenzivan i zahtjeva dugo vrijeme montaže, stoga se montira na više radnih stanica. Predloženi matematički model za previđanje proizvodnosti se uz određene preinake može prilagoditi za sva četiri spomenuta slučaja.

Na proces ručne montaže djeluje još čitav niz čimbenika koje treba uzeti u obzir tijekom predviđanja ključnih pokazatelja uspješnosti, a koji nisu obuhvaćeni ovim poglavljem. Zasiurno najznačajniji čimbenik u procesu ručne montaže je čovjek koji ne može izvoditi zadatke kao stroj, automatizirano i uvijek na jednak način, uvijek s istim vremenom montaže. Čovjeku je potrebno određeno vrijeme kako bi se priviknuo novonastaloj situaciji, posebice u uvjetima izmjene sadržaja rada, neovisno o tome je li riječ o intenzivnim ili periodičkim izmjenama. Zbog perioda prilagodbe, učinkovitost, odnosno iskoristivost operatera na radnoj stanici varira. Spomenuto neizbježno utječe na pokazatelje uspješnosti montažnog sustava. Stoga, u svrhu uključivanja utjecaja čovjeka na montažni sustav, javlja se potreba za korekcijom prethodno dobivenog matematičkog modela proizvodnosti.

Učinkovitosti radnih stanica, tj. iskoristivosti operatera koje su razmatrane tijekom kreiranja matematičkog modela kreću se od razine od 85 % ili više. Prema literaturi [102]–[104] ove vrijednosti predstavljaju visoku razinu učinkovitosti koja se može postići u stvarnom

industrijskom okruženju. Općenito govoreći, jedan od načina povećanja iskoristivosti operatera je uvođenje međuskладиšta između radnih stanica. Međuskладиšta se primjenjuju za privremeno sakupljanje gotovih podsklopova kada je to svrsishodno, ali i za trošenje uskladištenih podsklopova od strane slijedeće radne stanice. Postojanje međuskладиšta omogućuje operateru na radnoj stanici odrađivanje nekih drugih aktivnosti van radnog mjesta ili predah. Međutim, kod montaže proizvoda, montažni procesi općenito nisu dovoljno dugotrajni da bi se s realnom količinom međuzaliha postiglo dovoljno slobodnog vremena kako bi operater mogao biti zaposlen na nekoj drugoj dugotrajnoj aktivnosti. Jedini način kako bi se postigla veća količina vremena za izvršavanje ozbiljnijih aktivnosti bila bi integracija međuskладиšta koja mogu primiti veću količinu gotovih podsklopova, tj. međuskладиšta koja mogu primiti desetke ili stotine podsklopova između radnih stanica. Općenito, tu situaciju je nemoguće ostvariti kada je riječ o montažnim linijama s pokretnim vrpčama. Štoviše, uvođenje većih količina proizvoda u međuskладиšta je ostvarivo na radnim stanicama koje nisu povezane transportnom vrpcom, ali je protivno smjernicama *lean* proizvodnje s obzirom da veće količine podrazumijevanju porast zamrznutog kapitala, porast vodećeg vremena proizvodnje, ali i smanjenje fleksibilnosti odgovora montažnog sustava na promjenjive zahtjeve tržišta. Stoga se neiskorišteno vrijeme ostavlja radnicima kao slobodno vrijeme, a radnici se ohrabruju da to slobodno vrijeme iskoriste za održavanje svog radnog mjesta urednim, za dodatnu kontrolu kvalitete podsklopova te za uočavanje bilo kakvih unaprjeđenja koja bi se mogla uvesti na njihovo radno mjesto ili na cijelu montažnu liniju. Unaprjeđenja se mogu uvoditi u procese, alate, naprave, pa eventualno i u sam dizajn proizvoda. Sve aktivnosti u slobodno vrijeme mogu biti svrsishodne, ali nisu mjerljive te se i dalje stječe dojam da je iskoristivost operatera na nekoj izračunatoj razini. Cilj svakog menadžera ili voditelja je maksimalno povećati iskoristivost pa će se tako dodatni naponi usmjeravati dalje na dijeljenje elemenata rada na još manje elemente rada što katkad nije opravdano, i može imati negativan utjecaj na kvalitetu proizvoda. Primjerice, ako se mora montirati poklopac s četiri vijka i podloške na neko kućište, dijeljenje tog elementa rada na način da se na jednoj radnoj stanici montira poklopac i vijčaju dva vijka, a da se na drugoj radnoj stanici vijčaju preostala dva vijka može dovesti do više problema poput: zaboravljanje vijčanja dva preostala vijka na slijedećoj radnoj stanici, pritezanje na različite momente pritezanja, mogući problemi sa savijanjem poklopca koji će onemogućiti uspješno sastavljanje preostala dva vijka ili čak onemogućiti nepropusnost spoja. Postoje prakse gdje se definiraju sekvence vijčanja i pritezanja vijaka kod većeg broja vijaka, kao preporuka konstruktora ili proizvođača, te se takvih sekvenci teško držati ako je to podijeljeno na više elemenata rada.

Ono što je u praksi izvedivo je uvođenje i vremenske dimenzije u postupak balansiranja montažne linije. Naime, LCR i ostale metode rezultiraju statičkom raspodjelom elemenata rada koja se ponavlja kako vrijeme prolazi i konstantno rezultira istom razinom ukupne balansiranosti. To bi se mogla nazvati statička balansiranost. Ako bi se uvela vremenska dimenzija, tj. da se elementi rada naknadno tijekom odvijanja procesa montaže prebacuju s jedne radne stanice na drugu, u određenim periodima i u određenim intervalima, tada bi se uz pomoć međuskladišnih kapaciteta, operatere na svim radnim stanicama moglo bolje iskoristiti. Međutim, promjena elemenata rada, tj. dodavanje ili oduzimanje elemenata rada na radnim stanicama u pojedinim trenucima procesa montaže, mora biti dobro iskomunicirano s operaterima kako se ne bi dogodila situacija da se odrađuje nešto što nije bilo potrebno ili kako se ne bi dogodilo da se ne odradi nešto što je bilo potrebno. Primjerice, reorganizacija radnog mjesta u određenim trenucima vremena u smislu uklanjanja pojedinih dijelova i stavljanja novih dijelova na radnu stanicu koji su potrebni za novi podsklop koji im je dodijeljen, zasigurno bi doprinijela smanjenju broja grešaka kod operatera. Ali, ove aktivnosti zahtijevaju dodatno vrijeme rada koje ne dodaje vrijednost, a moglo bi se svrstati u pripremno vrijeme. Stoga se pristupa samo boljom komunikacijom kroz jasnije i nedvosmislene upute za rad, koje operater mora pratiti, dok je centralni sustav planiranja zadužen da na vrijeme dostavlja radne zadatke svakom operateru i da eventualno kontrolira odrađeni posao. S opisanim pristupom i dovoljno velikim međuskladištima moguće je postići zavidne razine ukupne balansiranosti, i do 100 % uz korištenje matematičkih algoritama i sveobuhvatnog pristupa planiranju, upravljanju i kontroli odvijanja procesa.

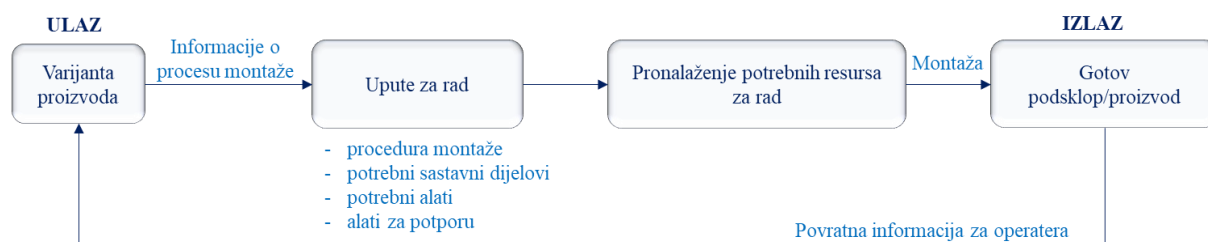
Međutim, u ručnoj montaži prisutna je varijacija vremena izvođenja procesa montaže. Ta varijacija vremena ovisi o mnogim ulaznim čimbenicima, a stalne izmjene raznih radnih zadataka, tj. sadržaja rada su jedne od njih. Kod malog broja izmjena sadržaja rada, proizvodnja će se ustaliti i operater će postići rutinu i uvježbanost koja se očituje stabilizacijom vremena trajanja procesa. S druge strane, kod većeg broja izmjena sadržaja rada, operater ne može postići rutinu te su varijacije vremena trajanja procesa veće. Štoviše, povećanje raznolikosti sadržaja rada uzrokuje i porast broja raznolikih proizvoda na radnoj stanici, porast broja raznolikih alata i različitih uputa. Što je raznolikost veća, veći je broj dijelova od kojih se moraju birati odgovarajući dijelovi, alati, naprave, tražiti prikladne upute i slično. Sukladno tome, prosječno vrijeme izvođenja procesa montaže je veće. Sve navedeno ide u prilog rasta kompleksnosti procesa montaže na radnoj stanici. Kada se na to pridoda i kompleksnost samog proizvoda na koju se operater ne može priviknuti jer zbog stalne izmjene elemenata rada ne

može steći dovoljnu vještinu i rutinu, u slučaju dinamičkog pristupa balansiranju postižu se znatno lošija vremena montaže. Stoga je postizanje idealnog balansiranja ručne montažne linije matematičkim pristupom teško primjenjivo i gotovo nemoguće ostvariti u praksi.

Svi nabrojeni uzroci kompleksnosti u uvjetima dinamičkog balansiranja djeluju i na vremena montaže kod statičkog balansiranja, samo u manjoj mjeri s obzirom da je prisutna raznolikost ukupne izmjene sadržaja rada manja. Kako bi se idealno vrijeme izvođenja operacija moglo svesti na očekivano vrijeme izvođenja operacija u stvarnom okruženju, potrebno je provesti daljnja istraživanja koja će u obzir uzeti spomenute uzroke kompleksnosti procesa montaže. Daljnje istraživanje provest će se za statičko balansiranje montažne linije, s obzirom da se elementi rada na radnoj stanici neće dinamično izmjenjivati između radnih stanica tijekom procesa montaže u ovisnosti o stvarnim opterećenjima koja se na montažnoj liniji odvijaju u trenutku promatranja. U promatranom slučaju, izmjena sadržaja rada na pojedinim radnim stanicama bit će rezultat uzorka proizvoda, koji je određen raznolikošću proizvoda i njihovom količinom, a koji se montiraju na montažnim linijama te rezultat balansiranja montažne linije.

4. RAZVOJ POKAZATELJA KOMPLEKSNOSTI MONTAŽE U MMAL

Montaža se može opisati kao sustav u kojem se odvija proces transformacije informacija i ugradbenih dijelova (tj. materije) dobivenih kroz ulaz, a kojim se ostvaruje određeni izlaz, odnosno gotov podsklop/proizvod. Odvijanje montaže u slučaju kada na jednoj radnoj stanici radi jedan operater, prikazan je na Slici 4.1. Prema Slici 4.1., operater prima podatke o varijanti podsklopa/proizvoda kojeg je potrebno montirati. Informacije o tome na koji način montirati podsklop/proizvod i koji su alati potrebni za rad, operater dobiva kroz upute za rad. Kada je proučio upute za rad i uočio način montaže te pronašao potrebne alate te sastavne dijelove, operater montira podsklop/proizvod te ga šalje na sljedeću radnu stanicu/skladište gotovih proizvoda. Kao povratnu informaciju nakon izvršene montaže, operater dobiva nove podatke o podsklopu/proizvodu koji slijedi za montažu.



Slika 4.1. Odvijanje montaže

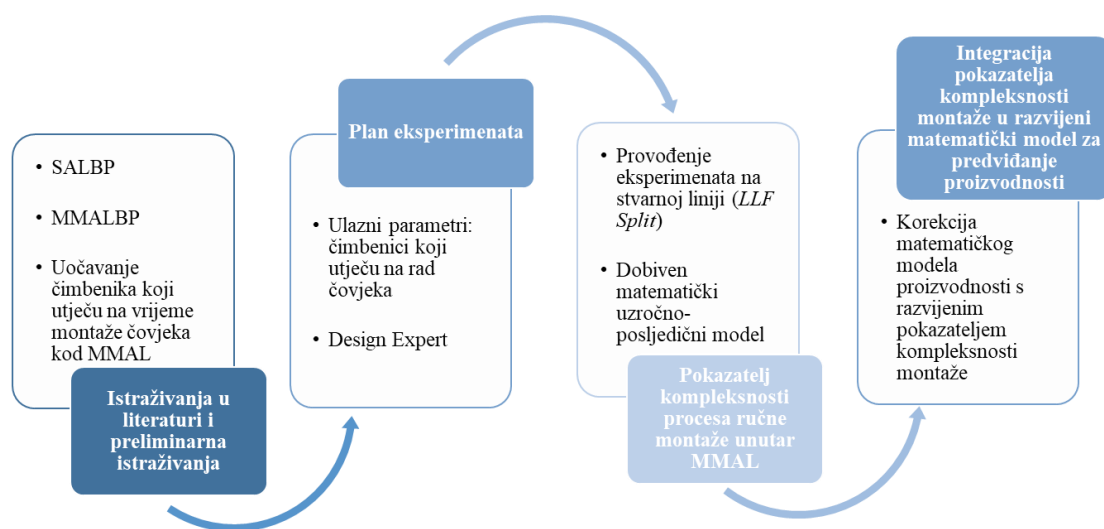
U slučaju MMAL operater se na svom radnom mjestu susreće s velikim brojem raznolikih proizvoda. Kao što je rečeno kroz prošlo poglavlje, porastom raznolikosti proizvoda raste i raznolikost sadržaja rada na radnoj stanici. Porast sadržaja rada na radnoj stanici reflektira se kroz porast količine raznolikih ugradbenih dijelova koji primjerice zauzimaju prostor samoposluge na radnoj stanici, a koje operater koristi za montažu. Također, odražava se i na porast broja raznolikih uputa za rad kojima se opisuje montaža pripadajućih raznolikih elemenata rada kao i na porast količine raznolikih alata kojima operater mora rukovati na radnom mjestu. Porast sadržaja rada povezan je i s učestalošću izmjene sadržaja rada. Naime, što je broj raznolikih proizvoda koje je potrebno montirati veći, to je vjerojatnije da će i učestalost izmjene sadržaja rada biti izraženija. Nabrojani čimbenici zasigurno uvelike utječu na vještine i rutinu operatera tijekom izvođenja ručne montaže. Međutim, osim spomenutih čimbenika na kompleksnost ručne montaže djeluje još čitav niz parametara. Prema [13], [14], [34], [58] neki od parametara koji utječu na kompleksnost ručne montaže u MMAL su:

- politika opskrbe radnih stanica dijelovima (npr. je li riječ o samoposluzi dijelova na radnim stanicama, je li se dijelovi dostavljaju u kompletima pri čemu komplet može sadržavati sve sastavne dijelove za proizvod koji se montira, je li se dijelovi dostavljaju u pakiranjima po vrstama dijelova i slično)
- broj raznolikih korištenih procedura montaže
- udaljenost operatera od prostora gdje su smješteni ugradbeni dijelovi
- broj korištenih strojeva kojima operater rukuje
- izgled i organizacija radne stanice
- sličnost ugradbenih dijelova
- sličnost proizvoda
- sličnost procedura montaže
- raznolikost alata za potporu procesa montaže
- način prikazivanja radnih uputa (npr. upute su prikazane na zaslonu osjetljivom na dodir, upute su prikazane u papirnatom obliku, itd.)
- vremenski pritisak na operateru da se dijelovi što brže montiraju
- preopterećenje radnika na radnoj stanici zbog raznolikosti (npr. raznolikih ugradbenih dijelova, raznolikih uputa, raznolikih alata i slično)
- nejednaka raspodjela opterećenja među radnim stanicama
- slijed proizvoda i količine proizvoda u slijedu, odnosno učestalost izmjene vrsta proizvoda
- vanjski čimbenici (npr. zahtjevi tržišta, kašnjenje isporuke od strane dobavljača...)
- ostali čimbenici.

Zbog djelovanja spomenutih čimbenika, u montaži se javljaju varijabilnosti vremena montaže operatera. Varijabilnosti dovode do oscilacija prilikom predviđanja učinkovitosti montažne linije i ostalih pokazatelja uspješnosti. Stoga se ovo poglavlje orijentira na razvoj pokazatelja kompleksnosti montaže na radnim stanicama. Njime se opisuje utjecaj operatera na vrijeme montaže u svrhu uključivanja doze nesigurnosti koju operater uzrokuje na montažni sustav.

Na temelju proučavanja dostupne literature te provođenja preliminarnih istraživanja o balansiranju MMAL, odlučeno je da će se za definiranje pokazatelja kompleksnosti montaže promatrati dva čimbenika koja uvelike diktiraju opseg sadržaja rada i utječu na raspodjelu opterećenja unutar montažne linije. Riječ je o broju raznolikih proizvoda koji se montiraju te o broju raznolikih ugradbenih dijelova koji su na radnoj stanici dostupni za montažu potrebnih

elemenata rada. Broj raznolikih ugradbenih dijelova povezan je s elementima rada od kojih se proizvod sastoji, a koji definiraju radno opterećenje. Na temelju ulaznih čimbenika definiran je plan eksperimenata za dobivanje matematičkog modela kompleksnosti montaže. Dobiveni matematički izraz integriran je u razvijeni matematički model za predviđanje proizvodnosti s ciljem njegove korekcije, a u svrhu točnijeg predviđanja. Prethodno spomenuti koraci prikazani su na Slici 4.2.



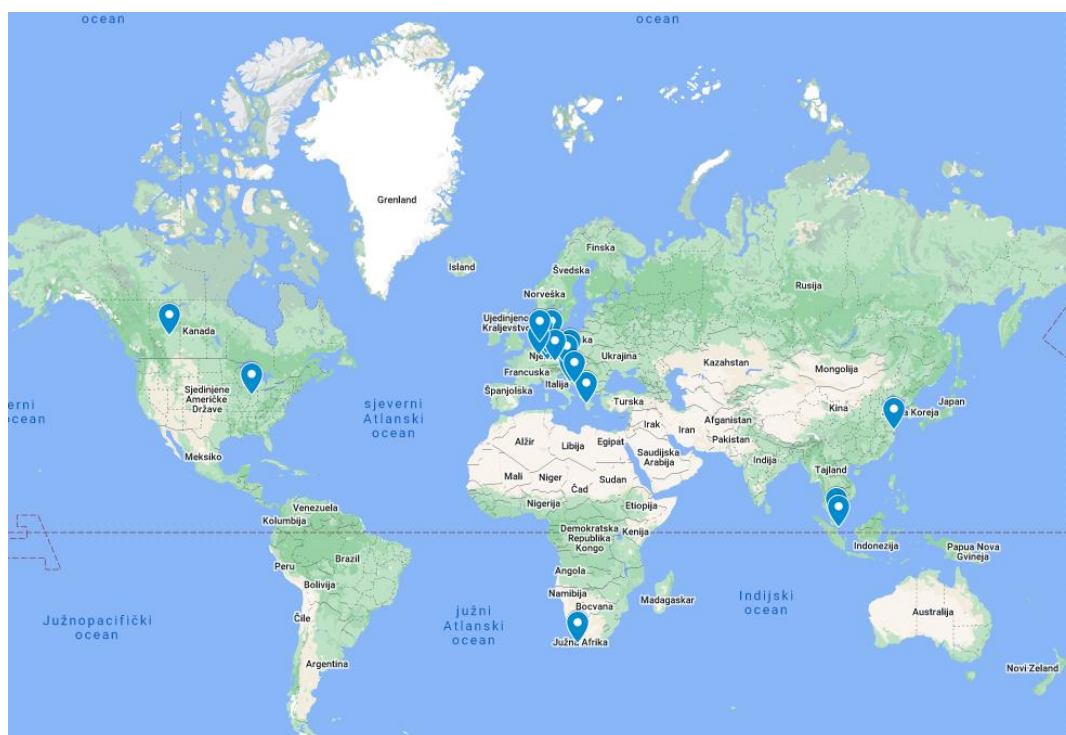
Slika 4.2. Struktura poglavlja za razvoj pokazatelja kompleksnosti montaže

Razvoj pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice te njegova primjena na stvarnim proizvodima provedene su kroz studije slučaja u sklopu LF-a smještenog u laboratoriju Fakulteta elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu (FESB). Sukladno tome, kroz sljedeće poglavlje bit će objašnjena relevantnost istraživanja te mogućnosti primjene stečenih spoznaja koje su dobivene u LF okruženju, na stvarne industrijske proizvodne linije.

4.1. Koncept tvornice za učenje i njezina važnost u svijetu

Integracija novih tehnologija, demografske promjene te nestabilno poslovno okruženje izazovi su s kojima se poduzeća već desetljećima neminovno susreću i kojima se trebaju brzo prilagoditi ako žele opstati na tržištu. Sposobnost prilagodbe svakog poduzeća uvelike ovisi o sposobnostima zaposlenika na svim razinama hijerarhijske strukture da se samostalno snađu u novim nepoznatim okolnostima i da pronađu kreativna rješenja [105]–[107]. Međutim,

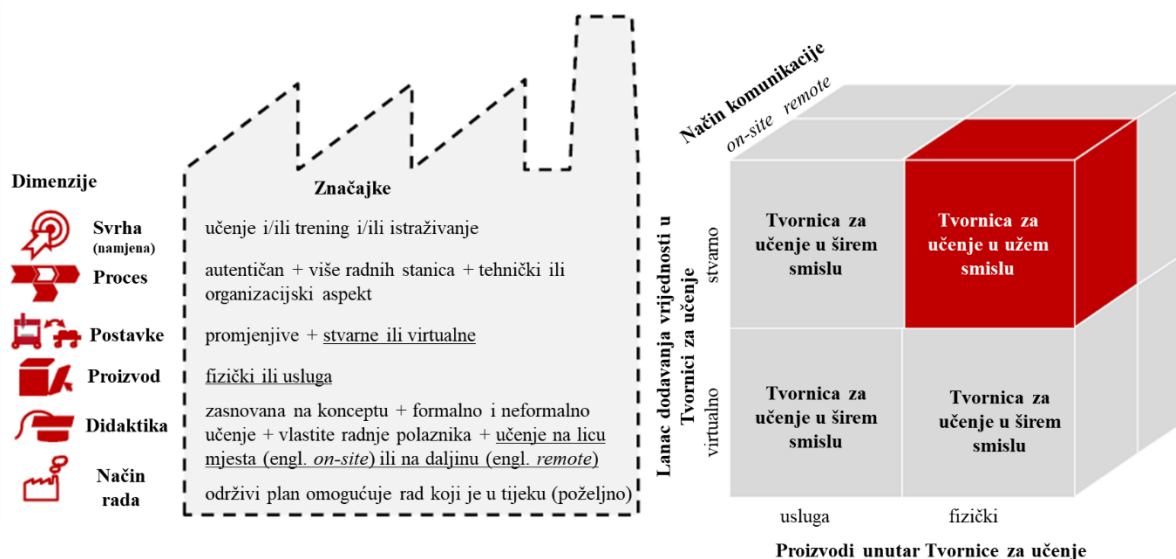
tradicionalne metode učenja pokazale su ograničene učinke na razvoj kompetencija zaposlenika za proizvodna okruženja [108]. Štoviše, istraživanja u znanosti i obrazovanju ukazuju da je prijenos znanja kroz praktično iskustvo najučinkovitiji način stjecanja znanja. Uslijed potrebe za što boljim povezivanjem teoretskog i praktičnog znanja, 1995. godine pojavljuje se novi koncept za učenje, tj. LF koncept [107]. Od tada pa do danas, u svijetu je zabilježen znatan porast broja LF-a, posebice u Europi, a očekuje se i njihov daljnji rast [109]. Rasprostranjenost LF-ova diljem svijeta prikazana je na Slici 4.3.



Slika 4.3. Koncept LF diljem svijeta, [67]

Koncept LF-a djelomično oponaša industrijsko okruženje. Koristi se za obrazovanje i trening zaposlenika u industriji, ali i kao poligon za istraživanje i pronalaženje novih prikladnih rješenja postojećih problema unutar industrije. LF sudionicima omogućuje razumijevanje ponašanja stvarnog proizvodnog sustava, kao i priliku za primjenu različitih scenarija poboljšanja kako bi se istražili njihovi mogući ishodi, bez troškovnog pritiska koji se pojavljuje u stvarnom industrijskom okruženju [110]. Može se reći da su LF-ovi oblikovani na način koji najbolje odgovara planiranom procesu iskustvenog učenja koje je prepoznato kao učinkovit način prenošenja znanja, vještina i ponašanja potrebnih za usvajanje novih pristupa u industriji [105], [111]. U međunarodnoj akademskoj literaturi prihvaćena je sveobuhvatna tehnička

definicija LF-a koju su dali Abele i ostali [112]. U njoj se, ovisno o raznolikosti dimenzija koje LF posjeduje, LF definira u užem i širem smislu, Slika 4.4.



Slika 4.4. Ključne značajke Tvornica za učenje i razlika između Tvornica za učenje u užem (crvena kocka) i u širem smislu (sive kocke), [112]

Dimenzije se definiraju kao ključne značajke po kojima se LF-ovi razlikuju. One su podijeljene u sedam grupa [1], [112]:

- Svrha (namjena) – svake LF je stjecanje znanja kroz proces učenja koji se ostvaruje poučavanjem, obukom (treningom) i/ili istraživanjem. Posljedično, ishodi učenja mogu biti razvoj kompetencija i/ili inovacija u odabranom području sadržaja učenja unutar ciljanog sektora istraživanja.
- Procesi – unutar svakog LF-a trebaju biti realistični.
- Postavke – opisuju okruženje za učenje i njegove karakteristike. Postavke tvornice moraju biti promjenjive i fleksibilne. Promjenjive znači da su LF-ovi sposobni prilagoditi tvorničko okruženje raznim nepredviđenim promjenama i idejama sudionika, dok fleksibilnost omogućuje brzu planiranu promjenu tvorničkog okruženja unutar treninga (u odnosu na planirani put učenja).
- Proizvod – opisuje vrstu proizvoda koja se koristi/razvija u sklopu LF-a. Općenito, razlikuju se dvije vrste proizvoda: fizički (realni, opipljivi proizvod) ili nematerijalni proizvod (usluga).

- Didaktika – podrazumijeva da se LF mora temeljiti na didaktičkom konceptu. U ovoj dimenziji bitno je definirati svrhu učenja i način stjecanja znanja. U didaktičkom smislu tvornica za učenje integrira formalno i neformalno učenje. Formalno učenje podrazumijeva fizičku prisutnost sudionika, dok neformalno učenje podrazumijeva učenje na daljinu, tj. putem *online* platforme (korištenje informacijsko-komunikacijske tehnologije).
- Način rada – opisuje kako organizacije koje ih vode (npr. akademske institucije) uspijevaju osigurati održiv rad Tvornice za učenje i time postižu kontinuirani razvoj kompetencija na svim razinama hijerarhije društva kao i inovacije u tehnološkim i organizacijskim područjima. Za održivi način rada osim proizvodne opreme i pogona, potrebno je voditi računa o ekonomskom aspektu, sadržajnom (tematskom) aspektu koji mora biti u skladu s potrebama tržišta, kao i o obrazovanju osoblja Tvornice za učenje.
- Metrika – opisuje kvantitativne karakteristike LF-a, poput: broja sudionika, površinskog tlocrta kojeg LF zauzima, prosječnog trajanja modula za učenje, itd.

U užem i u šire smislu LF se definira kao okruženje za učenje u kojem se učenje odvija kroz proces poučavanja, obuku (trening) i/ili istraživanje, a koje je određeno procesima koji su autentični, koji uključuju više radnih stanica te tehničke i organizacijske aspekte, postavkama koje su promjenjive te nalikuju stvarnom lancu dodavanja vrijednosti, te načinom rada koji osigurava održivi rad LF-a. Razlika između LF u užem i širem smislu prikazana je u Tablici 4.1.

Tablica 4.1. Razlike između definicija LF-a u užem i širem smislu

RAZLIKE između definicija LF-a		
Dimenzije	LF u užem smislu	LF u širem smislu
Postavke	Stvarni (realni) lanac dodavanja vrijednosti	Virtualni lanac dodavanja vrijednosti
Proizvod	Fizički (realni)	Uslužni
Didaktički koncept	Učenje na licu mjesta	Učenje na daljinu

Podjela LF-ova s obzirom na namjenu (svrhu) sažeta je prema literaturi [1] te je dana u Tablici 4.2.

Tablica 4.2. Podjela LF-ova s obzirom na namjenu

	Naziv LF-a	Lokacija LF-a	Namjena LF-a			
			I	T	E	TZ
1	AAU Smart Production Laboratory	Aalborg, Danska		+	+	
2	Alberta Learning Factory	Edmonton, Kanada	+			+
3	AM model factory	Nuremberg, Njemačka	+	+		+
4	Anglo American Training Center	Johannesburg, Južna Afrika		+		
5	AutoFab	Darmstadt, Njemačka	+	+	+	+
6	Bernard M. Gordon Learning Factory	State College, Pennsylvania, USA				+
7	CETPM Akademie	Ansbach, Njemačka				
8	CubeFactory	nema fiksnu lokaciju				
9	DFA Demonstration Factory	Aachen, Njemačka	+	+		+
10	Die Lernfabrik	Braunschweig, Njemačka	+	+	+	+
11	E Drive-Center	Nürnberg, Njemačka	+	+	+	+
12	EDF (Experimentier- und Digitalfabrik)	Chemnitz, Njemačka	+	+	+	
13	ESB Logistics Learning Factory	Reutlingen, Njemačka	+	+	+	+
14	ETA-Factory	Darmstadt, Njemačka	+	+	+	+
15	MPS, iCIM, CP Factory	Festo Didactic Learning Factories	+	+	+	
16	Festo Learning Factory Scharnhausen	Scharnhausen, Njemačka	+	+		
17	Green Factory Bavaria	Amberg; Ansbach; Augsburg; Bayreuth; Coburg; Erlangen; Fürth; Hof; Ingolstadt; Munich; Nuremberg; Schweinfurt, Njemačka	+	+		+
18	iFactory, iDesign, iPlan	Windsor, Canada,	+	+	+	+
19	IFA-Learning Factory	Hannover, Njemačka	+	+	+	

(skraćeno: I = istraživanje, T = trening (obuka), E = edukacija (poučavanje), TZ = transfer znanja)

Tablica 4.2. (nastavak) Podjela LF-ova s obzirom na namjenu

	Naziv LF-a	Lokacija LF-a	Namjena LF-a			
			I	T	E	TZ
20	Industrial Engineering Laboratory	Dortmund, Njemačka			+	
21	Integrated Learning Factory	Seattle, Washington, USA				+
22	Integrated Learning Factory	Bochum, Njemačka	+		+	
23	Laboratory for flexible industrial automation	Paderborn, Njemačka	+		+	
24	Lean Academy	Winnenden, Njemačka i mnogo lokacija širom svijeta		+		
25	Lean Laboratory	Gjøvik, Norveška		+	+	
26	Lean Manufacturing Laboratory	Luksemburg, Luksemburg	+		+	
27	LEAN-Factory for a pharmaceutical company in Berlin	Berlin, Njemačka		+	+	
28	LeanLaboratory	Graz, Austria	+	+	+	
29	Learning and Innovation Factory	Vienna, Austria			+	
30	Learning Factory aIE	Stuttgart, Njemačka	+	+	+	+
31	Electronics Production	Nürnberg, Njemačka	+	+	+	+
32	Learning Factory na sveučilištu Velbert/ Heiligenhaus	Heiligenhaus, Njemačka		+	+	
33	Learning Factory for Innovation, Manufacturing, and Cooperation	Heilbronn, Njemačka	+		+	+
34	Learning Factory for Global Production	Karlsruhe, Njemačka	+	+	+	+
35	Lean Learning Factory	Split, Hrvatska	+	+	+	
36	Lernfabrik 4.0	16 lokacija u Baden-Württemberg, Njemačka			+	
37	Lernfabrik für Schlanke Produktion (LSP)	München, Njemačka		+	+	+
38	Lernfabrik für vernetzte Produktion	Augsburg, Njemačka		+		
39	Live Training Center	Bruchsal, Njemačka		+	+	+

(skraćenice: I = istraživanje, T = trening (obuka), E = edukacija (poučavanje), TZ = transfer znanja)

Tablica 4.2. (nastavak) Podjela LF-ova s obzirom na namjenu

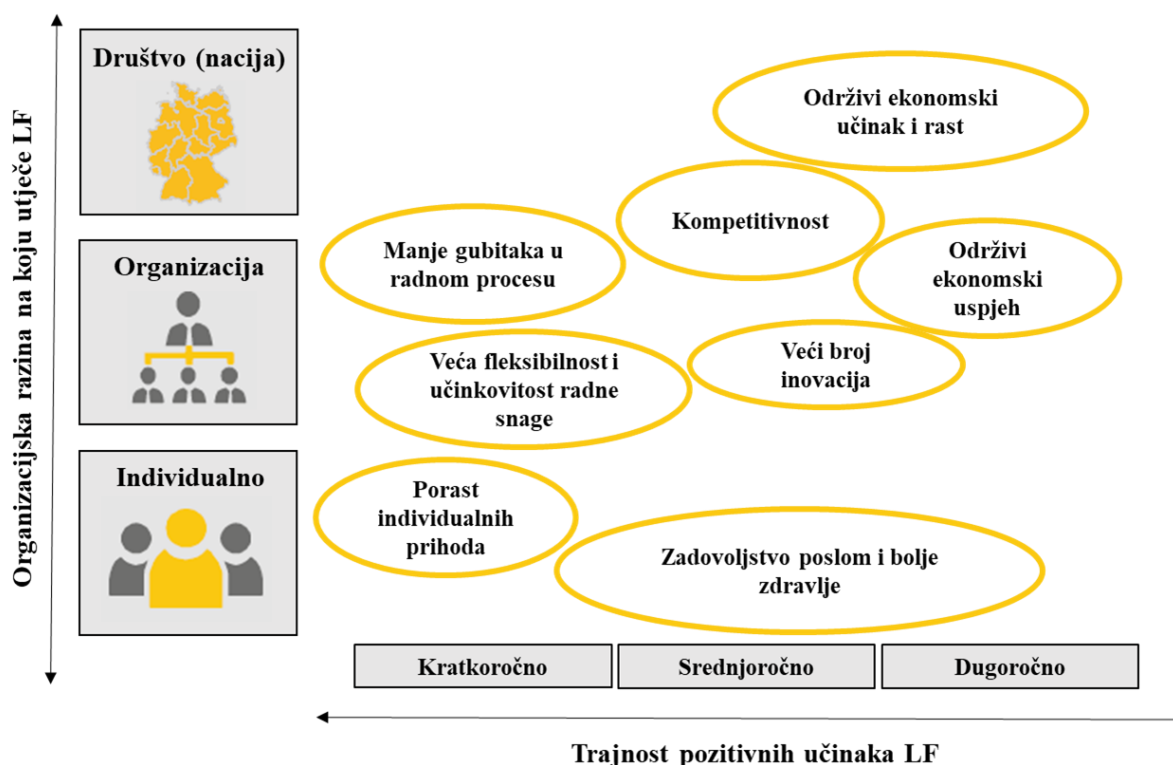
	Naziv LF-a	Lokacija LF-a	Namjena LF-a			
			I	T	E	TZ
40	LMS Factory	Patras, Grčka		+	+	+
41	LPS Learning Factory	Bochum, Njemačka	+	+	+	+
42	MAN Learning Factory at MAN Diesel & Turbo SE	Berlin, Njemačka		+	+	
43	Model Factories	Približno 30 lokacija širom svijeta		+		
44	Move academy	Herzogenaurach, Njemačka		+		
45	MPS Lernplattform	Sindelfingen, Njemačka		+	+	+
46	MTA SZTAKI Learning Factory Győr	Győr, Mađarska	+	+	+	+
47	Pilot Factory Industrie 4.0	Beč, Austrija	+	+		+
48	Process Learning Factory CiP	Darmstadt, Njemačka	+	+	+	+
49	Product Development Process Learning Factory	Piracicaba, Brazil			+	
50	SEPT Learning Factory	Hamilton, Kanada	+	+	+	
51	Smart Factory MTA SZTAKI	Budimpešta, Mađarska	+		+	+
52	Smart Factory	Kaiserslautern, Njemačka	+			+
53	Smart Mini Factory	Bolzano, Italija	+	+	+	+
54	Teaching Factory	Patras, Grčka	+	+	+	+
55	Textile Learning Factorie 4.0	Aachen, Njemačka	+	+		+
56	The PuLL®Learning Factory	Landshut, Njemačka	+		+	
57	Value Stream Academy	Nekoliko lokacija u širom svijeta		+		
58	VPS Center of the Production Academy	München, Njemačka	+	+		+
59	World Class Manufacturing Academy	Michigan, USA		+		

(skraćene: I = istraživanje, T = trening (obuka), E = edukacija (poučavanje), TZ = transfer znanja)

Edukacija i trening sudionika unutar LF-a donose brojne pozitivne učinke na svim razinama organizacijske strukture društva. Različiti pozitivni učinci LF koncepta podrazumijevaju [1]:

- poboljšanje kvalitete obrazovanja i osposobljavanja općenito
- stvaranje mogućnosti za istraživanje, inovacije i transfer tehnologije
- pokretač i posrednik za stvaranje poslovanja
- razvoj stručnih vještina i interdisciplinarnih kompetencija
- jačanje filozofije rada
- motivacija za učenje te motivacija i samopouzdanje za prijavu na poslove
- prevladavanje problema tradicionalnih metoda poučavanja
- jačanje veze između industrije i akademske zajednice
- jačanje veze između obrazovanja i istraživanja
- poboljšanje prestiža industrije i obrazovanja za proizvodnju i dizajn.

Utjecaj pozitivnih učinaka edukacije i treninga na nacionalnoj, organizacijskoj i individualnoj razini prikazan je na Slici 4.5.



Slika 4.5. Utjecaj edukacije i treninga na nacionalnoj, organizacijskoj i individualnoj razini,

[1]

Svaka LF predstavlja dio složenog industrijskog okruženja na koji se želi staviti fokus. Iako je pristup i koncept svake od njih sličan, orijentacija i dizajn svake individualne tvornice su različiti [106]. Sukladno tome, svaka LF je jedinstvena i kreirana ovisno o potrebama ustanove koja je stvara. Većina LF-ova danas, konkretno više od dvije trećine LF-ova, nalazi se u sklopu akademskih institucija dok se preostali dio nalazi u stručnim/srednjim školama, te u profitno orijentiranim poduzećima poput konzultantskih tvrtki i proizvodnih poduzeća (uglavnom u automobilskoj industriji) [1]. Neke od poznatijih industrijskih proizvodnih poduzeća koja su prepoznala prednosti LF-ova te ih integrirali u svoj način treninga zaposlenika i/ili istraživanja su proizvođači automobila poput BMW-a [113] i Mercedesa [114], proizvođač tehnike za čišćenje Kärcher [115], proizvođač pneumatskih i električnih upravljačkih sustava i pogonske tehnike za tvornice i automatizaciju procesa Festo [116], te ostali [117]–[119]. Iako je ideja o LF-u krenula u proizvodnoj domeni, sve je češći slučaj da i ostale industrije usvajaju ovaj koncept, primjerice poput kemijske ili farmaceutske industrije [120] ili pak uslužnog sektora [121]. LF-ovi mogu biti usredotočeni na jedan ili više specifičnih aspekata znanja potrebnih u proizvodnji poput određenih procesa i tehnologije, *lean* proizvodnje, Industrije 4.0, energetske potrošnje, održivosti itd. Podjela LF-ova prema glavnom području (temi) istraživanja sažeta je prema literaturi [1] te je prikazana u Tablici 4.3.

Tablica 4.3. Glavno područje (tema) istraživanja unutar LF-a

		Glavno područje (tema) istraživanja LF-a													
	Naziv LF	L	I4.0	R&E	II	RP	AP	A	P	CP KP	GP	I&L	O	SR	S
1	AAU Smart Production Laboratory		+												
2	Alberta Learning Factory	+	+												
3	AM model factory						+								
4	Anglo American Training Center	+													
5	AutoFab		+	+				+				+			
6	Bernard M. Gordon Learning Factory				+										
7	CETPM Akademie	+													
8	CubeFactory													+	
9	DFA Demonstration Factory		+									+			
10	Die Lernfabrik		+											+	
11	E Drive-Center											+			+
12	EDF (Experimentier- und Digitalfabrik)								+						
13	ESB Logistics Learning Factory	+	+		+										
14	ETA-Factory		+	+								+			
15	MPS, iCIM, CP Factory		+									+			
16	Festo Learning Factory Scharnhausen	+	+	+								+			
17	Green Factory Bavaria			+											
18	iFactory, iDesign, iPlan				+	+			+						
19	IFA-Learning Factory	+			+							+			
20	Industrial Engineering Laboratory				+										
21	Integrated Learning Factory				+										
22	Integrated Learning Factory						+								

(skraćeno: L = lean proizvodnja; I4.0 = Industrija 4.0; R&E = istraživanje i razvoj; II = industrijsko inženjerstvo; RP = razvoj proizvoda; AP = aditivna proizvodnja; P = promjenjivost; CPKP = cjelokupan proces kreiranja proizvoda; GP = globalna proizvodna mreža; I&L = intralogistika i logistika; O = održivost; WP = sudjelovanje operatera, S = specifične grane industrije ili proizvodi)

Tablica 4.3. (nastavak) Glavno područje (tema) istraživanja unutar LF-a

		Glavno područje (tema) istraživanja LF-a													
	Naziv LF	L	I4.0	R&E	II	RP	AP	A	P	CP KP	GP	I&L	O	SR	S
23	Laboratory for flexible industrial automation					+		+							
24	Lean Academy	+	+												
25	Lean Laboratory	+													
26	Lean Manufacturing Laboratory	+													
27	LEAN-Factory for a pharmaceutical company in Berlin	+										+	+		+
28	LeanLaboratory	+	+		+							+			
29	Learning and Innovation Factory	+			+	+				+					
30	Learning Factory aIE	+			+				+			+			
31	Electronics Production														+
32	Learning Factory at the Campus Velbert/Heiligenhaus		+	+				+							
33	Learning Factory for Innovation, Manufacturing, and Cooperation				+					+		+			
34	Learning Factory for Global Production	+	+		+						+	+			
35	Lean Learning Factory Split	+	+												
36	Lernfabrik 4.0		+												
37	Lernfabrik für Schlanke Produktion (LSP)	+										+			
38	Lernfabrik für vernetzte Produktion		+	+								+			
39	Live Training Center	+													
40	LMS Factory					+									
41	LPS Learning Factory	+	+	+	+							+		+	
42	MAN Learning Factory at MAN Diesel & Turbo SE												+		+

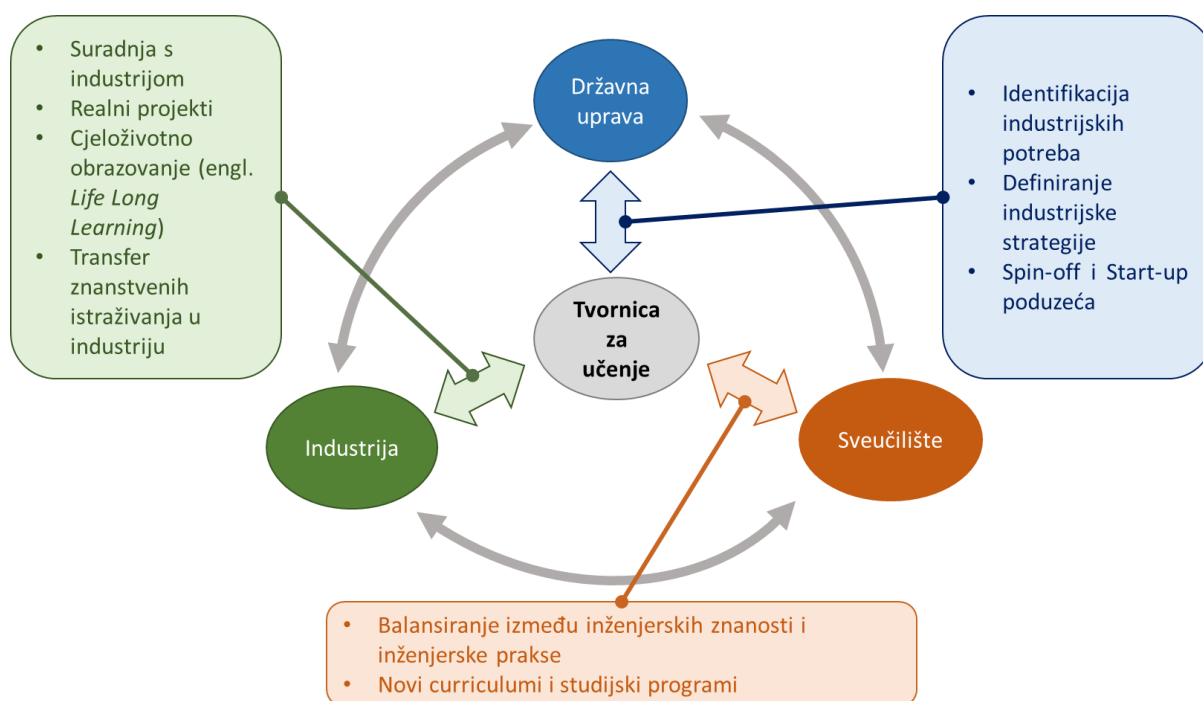
(skraćeno: L = lean proizvodnja; I4.0 = Industrija 4.0; R&E = istraživanje i razvoj; II = industrijsko inženjerstvo; RP = razvoj proizvoda; AP = aditivna proizvodnja; P = promjenjivost; CPKP = cjelokupan proces kreiranja proizvoda; GP = globalna proizvodna mreža; I&L = intralogistika i logistika; O = održivost; WP = sudjelovanje radnika, S = specifične grane industrije ili proizvodi)

Tablica 4.3. (nastavak) Glavno područje (tema) istraživanja unutar LF-a

		Glavno područje (tema) istraživanja LF-a													
	Naziv LF	L	I4.0	R&E	II	RP	AP	A	P	CP KP	GP	I&L	O	SR	S
43	Model Factories	+	+	+											
44	Move academy	+													
45	MPS Lernplattform	+										+			+
46	MTA SZTAKI Learning Factory Győr											+			
47	Pilot Factory Industrie 4.0		+									+			
48	Process Learning Factory CiP		+									+			
49	Product Development Process Learning Factory						+								
50	SEPT Learning Factory		+												
51	Smart Factory MTA SZTAKI		+									+			
52	Smart Factory		+					+							
53	Smart Mini Factory		+						+			+			
54	Teaching Factory				+							+			
55	Textile Learning Factorie 4.0		+												
56	The PuLL® Learning Factory	+										+			
57	Value Stream Academy	+													
58	VPS Center of the Production Academy											+			
59	World Class Manufacturing Academy	+													

(skraćeno: L = lean proizvodnja; I4.0 = Industrija 4.0; R&E = istraživanje i razvoj; II = industrijsko inženjerstvo; RP = razvoj proizvoda; AP = aditivna proizvodnja; P = promjenjivost; CPKP = cjelokupan proces kreiranja proizvoda; GP = globalna proizvodna mreža; I&L = intralogistika i logistika; O = održivost; WP = sudjelovanje radnika, S = specifične grane industrije ili proizvodi)

Dodatna važnost LF-a leži i u tome što je ona prepoznata kao ključan čimbenik za uspostavu odnosa unutar *Triple helix* modela, Slika 4.6. *Triple helix* model je empirijski model koji povezuje gospodarstvo, istraživačke institucije i regionalnu upravu. On podrazumijeva da je potencijal za inovacije i gospodarski razvoj u istaknutijoj ulozi sveučilišta (kao istraživačke institucije) i u hibridizaciji elemenata sa sveučilišta, industrije (kao gospodarstva) i vlade (kao regionalne uprave) kako bi se stvorili novi institucionalni i društveni formati za proizvodnju, prijenos i primjenu znanja [122]. Primjer LF kao mjesta gdje se susreću sveučilište, gospodarstvo i državna uprava je Tvornica za učenje smještena na FESB-u, tzv. *Lean Learning Factory*, LLF Split.

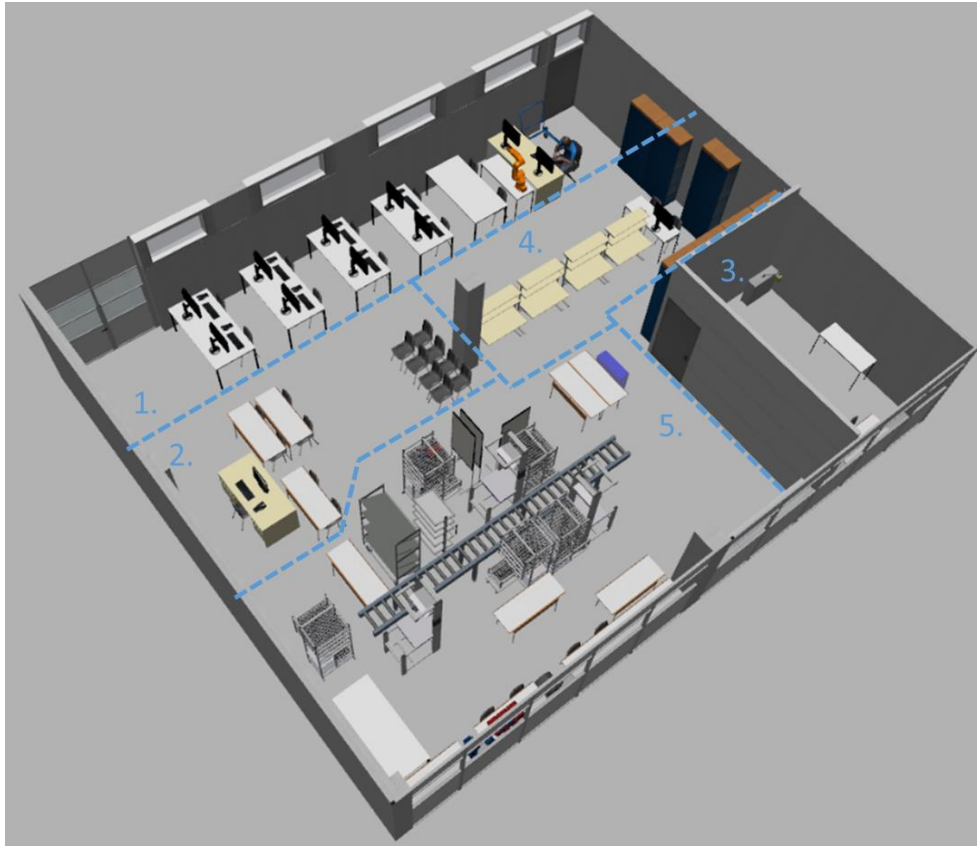


Slika 4.6. LLF kao poveznica u Triple helix modelu, [123]

4.1.1. Tvornica za učenje na FESB-u - LLF

LLF na FESB-u je edukacijski laboratorij smješten na Katedri za industrijsko inženjerstvo koji se prostire na približno 300 m². Razvoj tvornice za učenje započeo je 2011. godine i još uvijek je aktualan. Primarna svrha LLF-a je edukacija i obuka njezinih sudionika kroz praktičan rad i cjeloživotno učenje, kao i transfer znanja i najnovijih istraživanja i inovacija proizašlih iz rada na zajedničkim projektima u industriju. LLF predstavlja sponu između državne uprave i industrije koja državnoj upravi pomaže u bržem i boljem shvaćanju i identificiranju zahtjeva i potreba industrijskih poduzeća [123]. Glavna tematika, tj. sadržaj učenja koji je zastupljen u

LLF-u odnosi se na vitku proizvodnju (engl. *Lean production*) te Industriju 4.0/5.0. Prostorni raspored LLF-a podijeljen na funkcionalne dijelove prikazan je na Slici 4.7. dok je na Slici 4.8. prikazan prostorni raspored LLF-a zajedno s pripadajućom opremom.



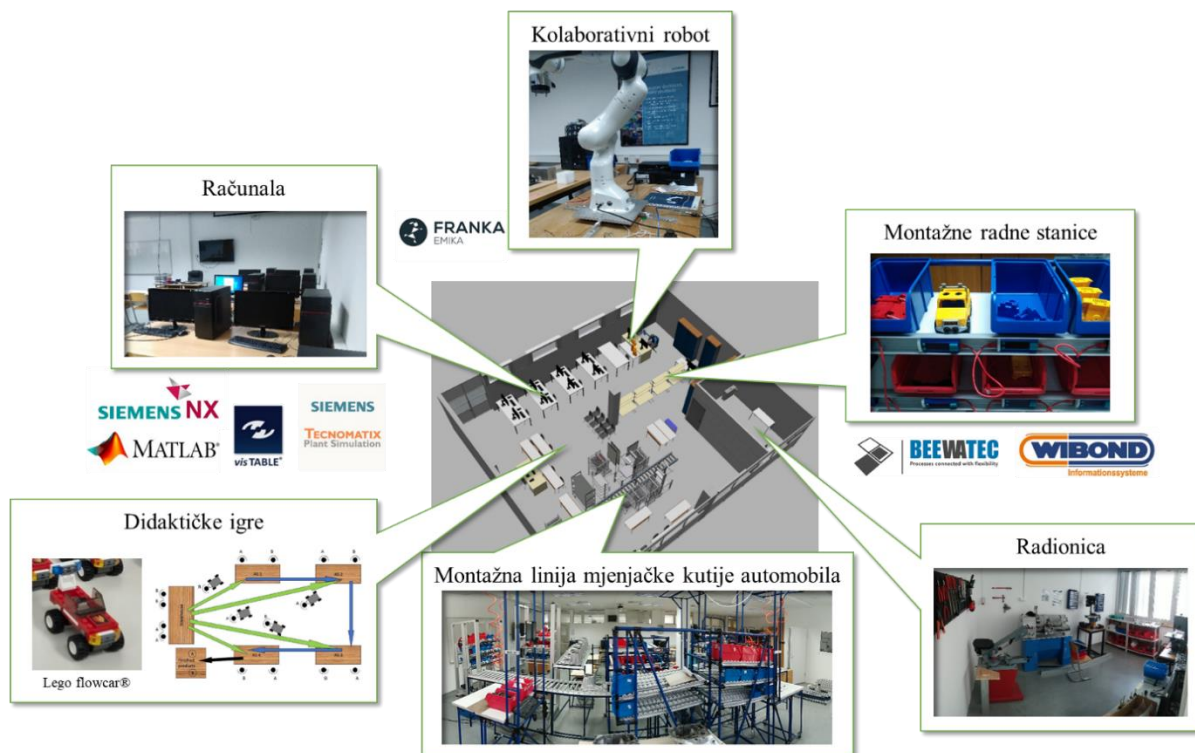
Slika 4.7. Prostorna raspodjela LLF-a na FESB-u

Kao što se može vidjeti na Slici 4.7. prostor LLF-a podijeljen je u pet funkcionalnih dijelova:

1. Server s računalima (Siemens PLM, Matlab, VisTABLE)
2. Prostor za edukaciju (*lean* alati i simulacije)
3. Radionica
4. Montažna linija s četiri radne stanice
5. Montažna linija mjenjačke kutije automobila

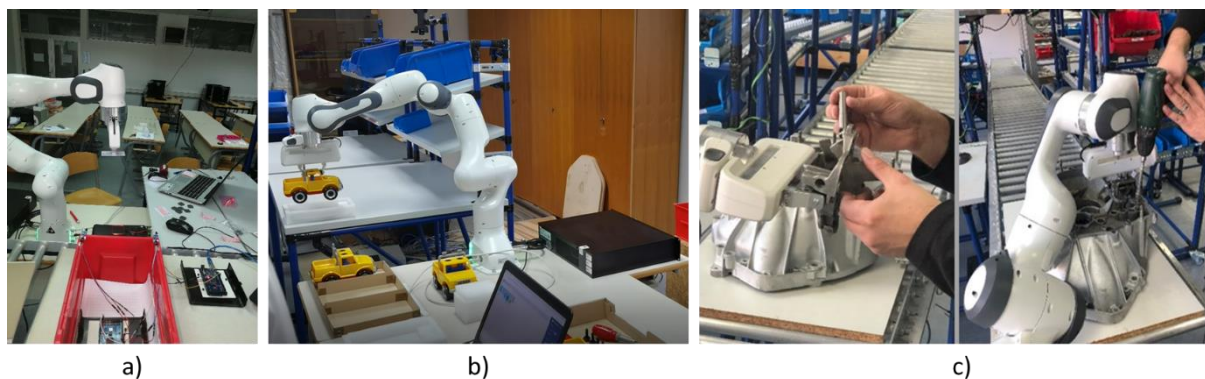
Prvi funkcionalni dio sastoji se od servera s osam računala na kojima je instaliran PLM (engl. *Product Lifecycle Management*, PLM) softver tvrtke Siemens čija platforma pokriva cijeli životni ciklus proizvoda. On obuhvaća čitav niza alata koji podržavaju razvoj i konstrukciju proizvoda (*Siemens NX*) te digitalnu simulaciju diskretnog događaja proizvodnih sustava (*Tecnomatix Plant Simulation*). Spomenuti *Tecnomatix Plant Simulation* softver omogućuje

modeliranje, simulaciju, istraživanje i optimiziranje logističkih sustava i njihovih procesa. Osim njega, za simulaciju proizvodnih sustava u sklopu LLF-a koristi se i ProModel softver. Na računalima je također dostupan i VisTABLE programski alat koji je primarno namijenjen optimizaciji rasporeda unutar tvornice.



Slika 4.8. Prostorni raspored LLF-a s pripadajućom opremom

U ovom dijelu također je smještena i kolaborativna robotska ruka PANDA, tvrtke FRANKA EMIKA, međutim njezina lokacija nije fiksna već se robotska ruka transportira ovisno o potrebi. Ovaj kolaborativni robot koristi se za različite namjene unutar Tvornice za učenje. Kolaborativni roboti (coboti) dizajnirani su za dijeljenje radnog prostora i fizičku interakciju s ljudima. Oni ne zahtijevaju napredne vještine programiranja i pomažu ljudima u izvršavanju jednostavnih, ponavljajućih, pa čak i opasnih zadataka [124]. Primjeri primjene robotske ruke za različite namjene prikazani su na Slici 4.9.



Slika 4.9. Primjer primjene robotske ruke za različite namjene: a) testiranje performansi RFID sustava, b) prijenos elemenata s radne stanice, c) kao pomoć čovjeku prilikom montaže mjenjačke kutije automobila

Drugi funkcionalni dio podrazumijeva prostor za obuku sudionika o *lean* alatima i metodama kroz praktične simulacije (didaktičke igre), poput *Pivske igre* koja se koristi za primjenu *lean* alata u dobavljačkom lancu ili simulacijske igre *Lean Lego Flowcar* koja podrazumijeva korištenje *lean* metoda u skladišnim i logističkim sustavima, kao i metode za balansiranje radnog opterećenja montažne linije. Treći funkcionalni dio odnosi se na prostor u kojem je smještena radionica. Radionica je dio koji je opremljen strojevima za obradu odvajanjem čestica te ostalim alatima koji su nužni za funkcioniranje Tvornice za učenje.

Najveći dio tlocrtnne površine Tvornice za učenje obuhvaćaju dvije montažne linije. Ove montažne linije nastoje oponašati stvarno industrijsko okruženje što je bliže moguće. To znači da su razvijane imajući na umu korištenje opreme koja se koristi u stvarnim industrijskim postrojenjima za proizvodnju stvarnog proizvoda, opreme poput stvarnih ručnih alata i pribora, transportne vrpce, samoposluga, transportera itd. Stoga se studije slučaja primijenjene u njima mogu smatrati vrijednim studijama slučaja za industriju [125]. Spomenute dvije linije korisne su kako bi se uočile glavne razlike između učinkovitosti montažnih sustava iz organizacijskog, tehničkog i ergonomskog aspekta. Prva montažna linija obuhvaća funkcionalno područje četiri, Slika 4.7. Na ovom području nalaze se montažne radne stanice. Njihov broj i razmještaj ovise o vrsti proizvoda koji se na njima sklada. Primjeri montaže različitih proizvoda (didaktičkih ili stvarnih industrijskih) koji se koriste na ovom području prikazani su na Slici 4.10.



Slika 4.10. Dio proizvoda koji se montiraju na četvrtom funkcionalnom području LLF-a na FESB-u

Druga montažna linija, funkcionalno područje pet na Slici 4.7., koristi se za montažu ručne mjenjačke kutije automobila. Ručna mjenjačka kutija automobila je složena mehanička naprava koja se sastoji od relativno velikog broja dijelova. Promjenom stupnja prijenosa, mjenjačka kutija vozilu osigurava vučnu silu i promjenu brzine. Mjenjačka kutija automobila potječe iz dva modela automobila koji su se proizvodili u tvornici „Zastava automobili“. Moguće je montirati više od 20 različitih finalnih proizvoda. Raznolikost finalnih proizvoda rezultat je dviju verzija kućišta mjenjačke kutije te raznolikih ugradbenih dijelova koji su posljedica utjecaja različitih snaga motora korištenih u vozilima, različitih planiranih funkcija vozila te niza unaprjeđenja u dizajnu proizvoda tijekom desetljeća njegovog razvoja u sklopu LLF-a. Razvijena montažna linija predstavlja „I“ liniju s ručnom montažom i transportnom vrpcom. Zbog ograničenja dužine kod smještaja transportne vrpce u LLF-u, montažna linija sastoji se od sveukupno pet radnih stanica. Svaka radna stanica namijenjena je za rad jednog operatera te je opremljena radnim uputama (digitalne ili ispisane na papiru) te samoposlugom dijelova i potrebnim alatima. Ova montažna linija uključuje elemente Industrije 4.0 poput RFID čitača, digitalnog zaslona osjetljivog na dodir te AGV transporter koji preko RPLidar laserskog skenera neovisno dostavlja ugradbene dijelove za mjenjačke kutije u samoposluge dijelova, ovisno o potrebama. Prikaz montažne linije mjenjačke kutije automobila dan je na Slici 4.11.



Slika 4.11. Montažna linija mjenjačke kutije automobila

Spomenute montažne linije korištene su kao okruženje za provođenje studija slučaja. Zbog sličnosti sa stvarnim industrijskim pogonom, studije slučaja napravljene u ovakvom okruženju smatraju se vrijednim istraživanjima koja se, uz određene prilagodbe, jednostavno mogu preslikati u industrijsko okruženje. Upravo smještaj ovih montažnih linija u LF-u, koja nije zamišljena kao profitabilna institucija, te nema ustaljenu proizvodnju i montažu, omogućava opsežna preliminarna istraživanja prema planovima pokusa, kao i korištenje različitih scenarija s organizacijskog i tehničkog aspekta s neistraženim ishodima. Sama sličnost LF-a i stvarnog industrijskog okruženja omogućuje da se dobiveni rezultati istraživanja, modeliranja i optimiziranja procesa unutar nje analogno primijene u stvarnom industrijskom okruženju. Štoviše, korištenjem LF-a eliminiraju se negativni utjecaji i ishodi eksperimentiranja na stvarnim montažnim linijama u industriji, kao što je pad produktivnosti te rast postotka škarta kao i potrebne dorade kroz organizacijske promjene i promjene različitih aspekata kompleksnosti bez jasnih ishoda.

4.2. Definicija pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice

U ovom radu pokazatelj kompleksnosti montaže definira se kao čimbenik povećanja prosječnog vremena montaže proizvoda zbog različitih konfiguracija montažnih radnih stanica. Različite konfiguracije radnih stanica odnose se na različite podjele odabranih elemenata rada, kao zatvorene logičke cjeline, na više manjih i jednostavnijih elemenata rada, a u svrhu što boljeg balansiranja montažne linije. Detaljnijom podjelom rada i omogućavanjem izvođenja istih elemenata rada na više susjednih radnih stanica, kompleksnost montaže na pojedinim radnim stanicama montažne linije će porasti. Stoga će izvođenje bilo kojeg elementa rada zahtijevati znatno više vremena kada se izvodi na tako balansiranoj liniji, nego da se izvodi na izdvojenoj radnoj stanici, bez suvišnih dijelova, alata i informacija za taj element rada.

Predloženi pokazatelj kompleksnosti montaže bit će izražen kao funkcija broja raznolikih proizvoda koji se montiraju na radnoj stanici te broja raznolikih ugradbenih dijelova koji su dostupni za njihovu montažu, (4.1).

$$\lambda_j = f(n, n_j^{RD}) \quad (4.1)$$

gdje je:

- λ_j - pokazatelj kompleksnosti montaže radne stanice j
- n_j^{RD} - ukupan broj raznolikih ugradbenih dijelova na promatranoj radnoj stanici j .

Pokazatelj kompleksnosti montaže pokazuje porast prosječnog vremena montaže proizvoda, s obzirom na definirane ulazne čimbenike, u odnosu na idealno prosječno vrijeme montaže proizvoda. Kako bi se dobio matematički model kompleksnosti montaže u ovisnosti o spomenutim ulaznim parametrima, provedeni su eksperimenti. Pokazatelj kompleksnosti montaže za poznate vrijednosti ulaznih parametara eksperimenata dan je sljedećim izrazom:

$$\lambda_j^{n, n_j^{RD}} = \frac{p_j^{n, n_j^{RD}}}{p_{idealno, j}^n} \quad (4.2)$$

gdje je:

- $\lambda_j^{n, n_j^{RD}}$ - pokazatelj kompleksnosti montaže radne stanice j za poznate vrijednosti ulaznih parametara n, n_j^{RD} unutar promatranog EPEI perioda (T_{EPEI})

$p_j^{n, n_j^{RD}}$ - prosječno vrijeme montaže proizvoda na radnoj stanici j u ovisnosti o definiranim ulaznim parametrima n , n_j^{RD}

$p_{idealno, j}^n$ - idealno prosječno vrijeme montaže proizvod na radnoj stanici j s obzirom na broj raznolikih proizvoda, n , za promatrani EPEI period (T_{EPEI})

Definiranjem izraza (4.2) te provođenjem eksperimenata na stvarnoj montažnoj liniji, moguće je matematički modelirati odzivnu površinu kompleksnosti. Tri studije slučaja napravljene su u sklopu LLF-a. Prva studija slučaja odnosi se na razvoj pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice te potvrđuje njegove ispravnosti. Druga studija slučaja odnosi se na promatranje utjecaja različitih operatera na kompleksnost montaže. Treća studija slučaja podrazumijeva primjenu razvijenog modela kompleksnosti montaže na stvarnom primjeru te njegovu validaciju.

4.2.1. Modeliranje pokazatelja kompleksnosti montaže proizvoda na razini radne stanice

Sustavni istraživački postupak pomoću kojeg se izgrađuje matematički, fizikalni, računalni ili neki drugi model kako bi se zamijenio stvarni predmet koji se istražuje naziva se metoda modeliranja. Stoga, model predstavlja približan prikaz predmeta koji se istražuje i služi za njegovo razumijevanje. Osnovni cilj metode modeliranja je što točnija i potpunija spoznaja pojave, postupaka i stvari koje se istražuju [126]. Primjenom modeliranja, postupak analize i ispitivanja istraživanog predmeta postaje brži i jeftiniji nego da se ono vrši na stvarnom realnom predmetu. Matematičkim modeliranjem identificiraju se uzročno-posljedične veze između ulaznih veličina i izlaznih veličina (odziva) koji se modeliraju. U literaturi su prisutne različite metode za dobivanje statističkih matematičkih modela. Jedna od njih je i regresijska analiza koja se koristi za izradu empirijskog modela pronalaženjem funkcijskog odnosa između nezavisnih (ulaznih) i zavisnih (odzivi ili izlazi) promjenjivih veličina sustava metodom statističkog prilagođavanja.

S obzirom da je u montažnom procesu prisutno više utjecajnih čimbenika i njihovih interakcija, teško je pouzdano odrediti promatrane izlazne veličine sustava u ovisnosti o ulaznim čimbenicima teorijskim pristupom istraživanju. Zbog toga, primjena eksperimentiranja i analiza dobivenih rezultata imaju prednost pred njim. Kako bi se eksperimenti provodili što učinkovitije u smislu i troškova i vremena, potrebno je njihovom planiranju pristupiti sa znanstvene strane. Dizajn eksperimenata (engl. *Design of Experiment*, DOE) je inženjerska metoda za dobivanje proizvodnih i procesnih uvjeta koji su minimalno osjetljivi na različite

uzroke varijacija pri proizvodnji visokokvalitetnih proizvoda, uz niske troškove razvoja i proizvodnje [127]. Primjena DOE omogućuje ravnomjernu raspodjelu podataka na čitav niz kontrolnih čimbenika koje je potrebno istražiti, smanjenje ukupnog broja potrebnih eksperimenata i uspostavljanje odnosa između različitih ulaznih varijabli i izlaznih parametara unutar određenog područja istraživanja [128], [129]. U sljedećem poglavlju DOE će se primijeniti kroz korištenje punog faktorskog plana eksperimenata kroz primjenu metode odzivne površine. Za procjenu interakcija ulaznih varijabli (čimbenika) i zakrivljenosti svojstava površine odziva u eksperimentima odabran je centralni kompozitni dizajn (engl. *Central Composite Design*, CCD). Korišten je nerotabilni plan eksperimenata središnje centriran CCF (engl. *face centered central composite design*) u kojem je vrijednost $\alpha = \pm 1$. Ovaj plan zahtjeva definiranje triju razina svakog ulaznog čimbenika koji se promatra.

4.2.2. Statistička obrada eksperimentalnih rezultata za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže

Pomoću programskog paketa Design Expert 13 statistički su obrađeni rezultati predviđanja pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice. Dobiven je matematički model koji opisuju utjecaj ulaznih čimbenika na kompleksnost montaže. Pri tome, kompleksnost montaže definirana je kao funkcija broja raznolikih proizvoda i broja raznolikih ugradbenih dijelova koji se koriste za montažu na radnoj stanici.

Utvrđivanje konzistentnosti matematičkog modela, tj. ispitivanje njegove funkcionalnosti provedeno je na sljedeći način. Prikladnost modela ispitana je pomoću F-testa. F-testom se određuje značajnost izrađenog modela, njegovih članova te odstupanja od modela. Navedena *F-vrijednost* predstavlja omjer procijenjene varijance modela i procijenjene varijance ostatka. Veliki iznos *F-vrijednosti* ukazuje da je varijanca u velikoj mjeri objašnjena modelom, dok mali iznos *F-vrijednosti* upućuje da su odstupanja nastala kao posljedica šumova. O značajnosti utjecaja modela, njegovih pojedinih članova te odstupanja od modela govori vrijednost $Prob>F$. Ukoliko je ova vrijednost manja od 0,05, odstupanje od modela i pojedini članovi modela su značajni. Ukoliko su neki članovi neznačajni, tj. $Prob>F$ vrijednost je veća od 0,05, moguće je provesti redukciju modela isključivanjem neznačajnih članova. Koeficijent determinacije R^2 poprima vrijednost u intervalu od nula do jedan, a predstavlja proporciju protumačenih odstupanja u ukupnoj sumi kvadrata odstupanja. Što je njegov iznos bliži vrijednosti jedan, više varijabilnosti se pripisuje djelovanju ulaznih veličina te se model smatra reprezentativnijim. *Prilagođeni* R^2 (R_{adj}^2) predstavlja R^2 prilagođen broju stupnjeva slobode

modela u odnosu na broj stanja eksperimenata [130]. Ako je njegova vrijednost veća od 0,75 model se smatra značajnim. *Predviđeni* R^2 (R_{pred}^2) je mjera iznosa varijacija novih podataka objašnjenih modelom. Da bi model bio prihvaćen, razlika između R_{adj}^2 i R_{pred}^2 ne smije biti veća od 0,2. Posljednja veličina koja se upotrebljava za analizu i vrednovanje dobivenih matematičkih modela je *adekvatna preciznost*. Ona predstavlja omjer signal-šum te je potrebno da ova vrijednost bude veća od četiri.

Statističkom obradom rezultata dobiven je polinomni matematički model drugog reda koji ima oblik:

$$y = b_0 + \sum_{l=0}^L b_l * X_l + \sum_{1 \leq l < h} b_{lh} * X_l * X_h + \sum_{l=1}^L b_{ll} * X_l^2 \quad (4.3)$$

gdje se parametri b_0, b_l, b_{lh} i b_{ll} odnose na koeficijente regresije, a X_l i X_h predstavljaju kodirane vrijednosti ulaznih parametara.

4.3. Pokazatelj kompleksnosti montaže na razini radne stanice

Kako bi se opisao utjecaj raznolikosti proizvoda na vrijeme montaže proizvoda na razini radne stanice, potrebni eksperimenti su provedeni na jednoj radnoj stanici unutar četvrtog funkcionalnog područja u sklopu LLF-a, Slika 4.7. U ovom funkcionalnom području napravljeni su eksperimenti za prvu i drugu studiju slučaja. U eksperimentima je promatrano ukupno vrijeme procesa montaže svakog pojedinog proizvoda koje se sastoji od ukupnog vremena pripreme te od vremena koje je utrošeno na sam proces montaže. Ukupno vrijeme pripreme sastoji se od pripremno-završnog vremena koje se odnosi na vrijeme koje je potrebno da operater prouči upute za proizvod koji treba montirati ili da se uvjeri da je proizvod kojeg montira jednak prethodnom, te od pomoćnog vremena koje se definira kao vrijeme koje je potrebno operateru da pronade sve dijelove koji su mu potrebni za montažu podsklopa, odnosno proizvoda. Vrijeme utrošeno na sam proces montaže je vrijeme unutar kojeg se ostvaruje montaža podsklopa/proizvoda. Prvi promatrani skup proizvoda sastoji od ukupno 20 raznolikih ugradbenih dijelova kojima se oblikuju proizvodi. Svakom raznolikom ugradbenom dijelu pripada jedna kutija u samoposluzi radne stanice. Svaki proizvod sastoji se od jednog elementa rada. Iz promatranog skupa proizvoda izdvojeno je sedam raznolikih proizvoda za koje su provedeni eksperimenti, Slika 4.12., dok su upute korištene za montažu svakog pojedinog proizvoda dane u Prilogu B. Promatrani proizvodi su jednostavni proizvodi

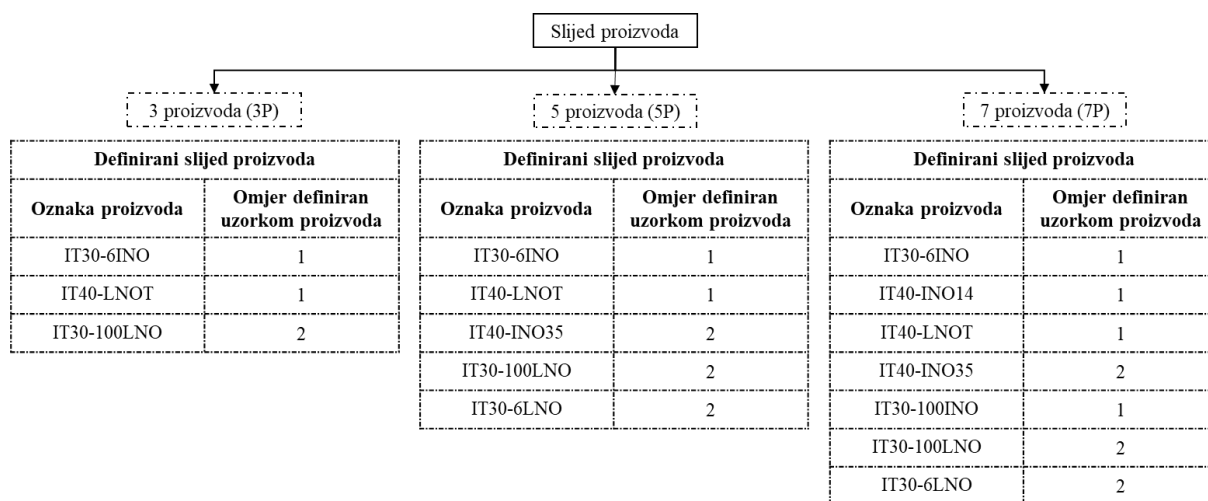
sastavljeni od ukupno jednakog broja ugradbenih dijelova koji se preko jednog vijčanog spoja međusobno povezuju. Ukupan broj raznolikih dijelova kod svakog pojedinog promatranog proizvoda je pet. Svih sedam proizvoda montirano je s istim alatom, tj. ukupan broj alata koji se upotrijebio za njihovu montažu je jedan.



Slika 4.12. Sedam raznolikih proizvoda čija se montaža promatra

Kao glavni parametri za opisivanje utjecaja raznolikosti proizvoda na vrijeme montaže operatera promatrana su dva čimbenika. Prvi čimbenik odnosi se na broj raznolikih proizvoda koji se montiraju unutar promatranog EPEI perioda (T_{EPEI}). Ovaj čimbenik usko je povezan s izmjenama sadržaja rada na radnoj stanici. Odnosno, što je broj raznolikih proizvoda unutar EPEI perioda manji, to će izmjena sadržaja rada biti manje izražena. Što je izmjena sadržaja rada manja, mentalno opterećenje operatera je manje i sukladno tome, period uhodavanja operatera bit će kraći kao i vrijeme montaže pojedinog proizvoda. Drugi čimbenik odnosi se na broj raznolikih ugradbenih dijelova koji su prisutni prilikom montaže promatranih proizvoda. Spomenuta dva čimbenika varirana su na tri razine. Tri vrijednosti raznolikosti proizvoda unutar EPEI perioda koje su promatrane su montaža tri raznolika proizvoda, montaža pet raznolikih proizvoda te montaža sedam raznolikih proizvoda na radnoj stanici. Za potrebe razvoja pokazatelja kompleksnosti montaže, EPEI period definiran je kroz omjere proizvoda u uzorku proizvoda koje je potrebno proizvesti za taj period. Odnosno, definiran je minimalnim omjerom proizvoda u uzorku proizvoda (npr. tri raznolika proizvoda omjera 1:1:2), njihovim slijedom te ukupnom količinom proizvoda koje je potrebno proizvesti u njemu. Primjerice, ako je uzorak kod tri raznolika proizvoda 1:1:2, a ukupna količina proizvoda koju je potrebno proizvesti u njemu je 16, tada je promatrani EPEI period jednak omjeru proizvoda: 4:4:8. To znači da se svako 16 proizvoda ponavlja proizvod koji se prvi nalazi u slijedu, a jednako vrijedi

i za preostale pozicije proizvoda u slijedu. Drugi čimbenik, tj. čimbenik koji se odnosi na broj raznolikih ugradbenih dijelova na razini radne stanice također je variran na tri razine. Promatrane vrijednosti raznolikosti ugradbenih dijelova su 14, 17 i 20. Naime, 14 je najmanji broj raznolikih ugradbenih dijelova koji je potreban da se može montirati sedam promatranih raznolikih proizvoda. Dodatni dijelovi koji se koriste za montažu nekih drugih proizvoda iz promatranog skupa proizvoda dodani su na radnu stanicu kako bi se broj raznolikih ugradbenih dijelova na njoj povećao. Iako se u ovom konkretnom slučaju pretpostavlja da će operater tijekom vremena jednostavno zanemariti ugradbene dijelove koji mu ne trebaju, s obzirom na to da ih ne koristi za montažu promatranih proizvoda, ovaj primjer je napravljen radi jednostavnosti shvaćanja pokazatelja kompleksnosti montaže na razini montažne linije. Na razini montažne linije porast ili smanjenje raznolikosti ugradbenih dijelova na radnoj stanici bit će rezultat premještanja elemenata rada među radnim stanicama, rezultat dijeljenja elemenata rada na više manjih i jednostavnijih elemenata rada ili pak rezultat izvođenja istih elemenata rada na više susjednih radnih stanica kako bi se ostvarila bolja balansiranost radnog opterećenja. Dodani raznoliki ugradbeni dijelovi u ovom primjeru u kojem se promatra jedna radna stanica su vrlo slični već postojećima, što znači da gubitak koncentracije operatera ipak može dovesti do zabune i krivog odabira ugradbenog dijela, a time i do porasta ukupnog prosječnog vremena montaže proizvoda. Na temelju dva spomenuta čimbenika, definiran je puni faktorski plan eksperimenata te su provedeni eksperimenti. Kao što je već rečeno, promatrana su tri različita EPEI perioda u ovisnosti o broju raznolikih proizvoda u uzorku. Slijed montaže proizvoda te omjeri proizvoda u ovisnosti o promatranom uzorku raznolikih proizvoda prikazani su na Slici 4.13. Za opisivanje eksperimenata koji se provode koriste se oznake poput 3P14D1A. Prva oznaka „3P“ odnosi se na broj raznolikih proizvoda koji se razmatraju, tj. na n , druga oznaka „14D“ odnosi se na broj raznolikih ugradbenih dijelova koji su dostupni prilikom montaže, tj. na n_j^{RD} , dok se posljednja oznaka „1A“ odnosi na broj raznolikih alata korištenih za montažu promatranih proizvoda, tj. na n_j^{RA} , Slika 4.13. Nazivi proizvoda koji se koriste djelomično opisuju izgled proizvoda i njegove sastavne dijelove.



Legenda:

Oznake eksperimenata	1	2	3
Primjer: 7P20D1A	7P	20D	1A

Broj oznake	Značenje	Moguće opcije
1	Broj proizvoda	3, 5, 7
2	Broj raznovolikih dijelova na radnoj stanici	14, 17, 20
3	Broj raznovolikih alata na radnoj stanici	1

Slika 4.13. Slijed proizvoda i uzorak proizvoda na radnoj stanici te objašnjenje oznaka eksperimenata

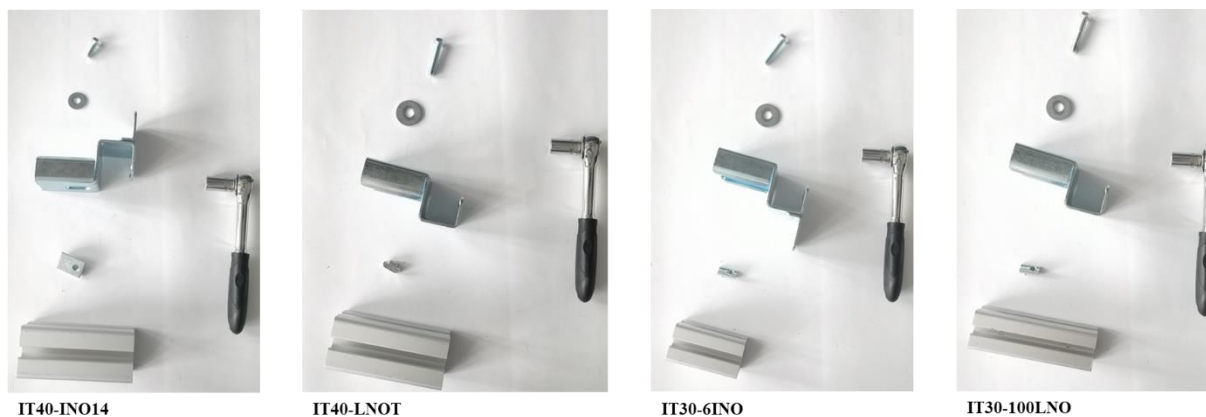
Izgled radne stanice kada je na njoj prisutan maksimalan broj raznovolikih ugradbenih dijelova (maksimalan broj kutija ugradbenih dijelova) za promatrani skup proizvoda prikazan je na Slici 4.14.



Slika 4.14. Primjer radne stanice za montažu sedam proizvoda s maksimalnim brojem raznolikih ugradbenih dijelova

4.3.1. Plan eksperimenata za predviđanje kompleksnosti montaže na razini radne stanice

Kako bi se dobio matematički model koji opisuje kompleksnost montaže proizvoda na razini radne stanice kao funkciju ulaznih parametara, prema izrazu (4.2) potrebno je odrediti kompleksnost montaže za poznate vrijednosti ulaznih parametara. Izraz (4.2) podrazumijeva poznavanje vrijednosti idealnog prosječnog vremena montaže proizvoda promatranog EPEI perioda te poznavanje prosječnog vremena montaže proizvoda na razini radne stanice u prisutnosti raznolikosti sadržaja rada. Idealno prosječno vrijeme montaže proizvoda za EPEI period dobiva se na temelju idealnih prosječnih vremena svakog pojedinačnog proizvoda. Kao što je već rečeno, idealno prosječno vrijeme pojedinog proizvoda je ono vrijeme koje se dobije kada je operater upoznat s montažnim procesom proizvoda kojeg montira te kada je on uvježban. Uz to, definiranje idealnog vremena montaže proizvoda podrazumijeva da je radno mjesto na kojem se vrši montaža organizirano tako da se ispred operatera na radnoj površini nalaze samo dijelovi koje je potrebno ugraditi te samo alati koji su potrebni za njihovu ugradnju. Štoviše, ugradbeni dijelovi raspoređeni su prema redoslijedu ugradnje i u smjeru ugradnje koji ugradbeni dio zahtjeva. Alati su jasno organizirani i pristupačni. Jednom radnom mjestu odgovara montaža jednog elementa rada. Primjer izgleda radne stanice prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda prikazano je na Slici 4.15.



Slika 4.15. Primjeri rasporeda ugradbenih dijelova na radnoj stanici prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda

Za određivanje idealnog prosječnog vremena pojedinačnih proizvoda provedeno je ukupno 210 eksperimenata, odnosno po 30 eksperimenata za svaki od sedam raznolikih proizvoda. Pojam eksperiment u ovom slučaju obuhvaća montažu jednog proizvoda. Za svaki od proizvoda, svih 30 eksperimenata je uzeto u obzir prilikom izračuna prosječne vrijednosti s obzirom na to da vremena montaže nisu značajno odstupala. Ovaj broj eksperimenata je dovoljan za statističku obradu podataka te kako bi se statistički zadovoljila pouzdanost i točnost. U prve dvije studije slučaja svaki proizvod predstavlja jedan element rada, što znači da je broj proizvoda jednak broju elemenata rada, tj. $K = n$ pri čemu je $k = 1, 2, 3, \dots, n, n = 7$. Na temelju provedenih eksperimenata izračunato je idealno prosječno vrijeme svakog proizvoda koji se promatra, $p_{idealno,k}$. Vrijednosti prosječnih vremena montaže svakog proizvoda i njihova standardna odstupanja ($\sigma_{idealno,k}$) prikazani su u Tablici 4.4.

Tablica 4.4. Idealna prosječna vremena montaže raznolikih proizvoda i njihova standardna odstupanja

Proizvodi	$p_{idealno,k} / s$	$\sigma_{idealno,k}$
IT30-6INO	20,6	1,91
IT40-INO14	25,3	2,62
IT40-LNOT	23,3	2,37
IT40-INO35	20,8	1,56
IT40-100INO	20,9	2,78
IT30-100LNO	25,2	2,20
IT30-6LNO	20,7	2,03

Na temelju dobivenih vrijednosti, određeno je idealno prosječno vrijeme svih proizvoda na radnoj stanici za promatrani uzorak proizvoda koji određuje EPEI period. Izračunate vrijednosti prikazane su u Tablici 4.5. S obzirom da se u prve dvije studije slučaja razmatra jedna radna stanica ($j = 1$), idealna prosječna vremena proizvoda s obzirom na promatrani uzorak proizvoda poprimat će oznaku $p_{idealno,1}^n$.

Tablica 4.5. Idealna prosječna vremena montaže proizvoda s obzirom na promatrani uzorak

<i>proizvoda n, tj. promatrani EPEI period</i>	
Raznolikost proizvoda, n	$p_{idealno,1}^n / s$
3 proizvoda	23,6
5 proizvoda	22,2
7 proizvoda	22,4

Prosječno vrijeme montaže proizvoda na razini radne stanice u prisutnosti raznolikosti sadržaja rada dobiveno je na temelju eksperimenata koji su definirani planom eksperimenata za određivanje pokazatelja kompleksnosti montaže. Promatrana su dva ulazna čimbenika na tri razine. Dobiveni plan eksperimenata podrazumijevaju provođenje 13 eksperimenata, 8 eksperimenata s različitim razinama čimbenika uz 5 ponavljanja eksperimenata koji se odnose na točke ponavljanja u središtu plana eksperimenta. Plan eksperimenata za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže proizvoda na razini radne stanice prikazan je u Tablici 4.6.

Tablica 4.6. Plan eksperimenata za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice

Eksperiment	n / kom	n_j^{RD} / kom
1	3	17
2	5	17
3	3	20
4	7	14
5	5	17
6	5	17
7	7	20
8	7	17
9	5	14
10	3	14
11	5	17
12	5	17
13	5	20

Eksperimenti definirani planom eksperimenata, Tablica 4.6., su provedeni. U ovom slučaju naziv eksperiment se odnosi na skup eksperimenata (eksperiment predstavlja montažu jednog proizvoda) koji su definirani uzorkom proizvoda te slijedom (dvije vrijednosti koje definiraju EPEI) i brojem raznolikih ugradbenih dijelova planiranih za montažu na radnoj stanici. Broj montiranja (eksperimenata) svakog pojedinog proizvoda je dovoljno velik da se postigne uhodanost operatera i da ona ne utječe na izračun prosječnog vremena montaže. Na temelju izmjerenih vrijednosti, dobivene su prosječne vrijednosti montaže svakog pojedinog proizvoda. Dobiveni rezultati prosječnih vremena montaže svakog proizvoda i na radnoj stanici j za promatrane kombinacije raznolikih proizvoda i ugradbenih elemenata, $p_{kj}^{n,n_j^{RD}}$, prikazane planom eksperimenata te vrijednosti njihovih standardnih odstupanja, $\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$, dane su od Tablice 4.7. do Tablice 4.10.

Tablica 4.7. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od tri raznolika proizvoda

k	3P14D1A		3P17D1A		3P20D1A	
	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
IT30-6INO	39,5	5,1	42,5	4,7	43,8	5,2
IT40-LNOT	43,0	4,2	46,6	6,2	50,9	8,6
IT30-100LNO	39,7	4,2	43,1	4,3	43,0	4,2

Tablica 4.8. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od pet raznolikih proizvoda

k	5P14D1A		5P17D1A		5P20D1A	
	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
IT30-6INO	43,3	5,0	45,4	4,1	51,0	9,3
IT40-LNOT	47,8	5,7	50,6	8,0	55,9	7,4
IT40-INO35	40,3	3,2	45,2	6,2	49,7	8,4
IT30-100LNO	42,9	4,3	44,6	3,6	50,7	8,8
IT30-6LNO	40,8	3,7	41,2	5,0	42,6	4,5

Tablica 4.9. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za ponovljene eksperimente 5P17D1A

k	5P17D1A		5P17D1A	
	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
IT30-6INO	45,8	4,0	44,1	4,7
IT40-LNOT	49,2	6,4	51,6	6,2
IT40-INO35	46,0	4,9	46,0	5,0
IT30-100LNO	45,1	3,5	44,9	3,2
IT30-6LNO	40,9	4,2	42,2	4,6
k	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
	IT30-6INO	47,0	4,2	45,5
IT40-LNOT	51,6	6,2	52,2	6,6
IT40-INO35	46,7	5,5	46,1	4,9
IT30-100LNO	45,9	3,5	45,2	3,6
IT30-6LNO	43,5	4,6	42,1	5,1

Tablica 4.10. Vrijednosti prosječnih vremena montaže i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od sedam raznolikih proizvoda

<i>k</i>	7P14D1A		7P17D1A		7P20D1A	
	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
IT30-6INO	45,4	5,1	50,8	5,9	54,5	9,4
IT40-INO14	52,8	8,3	56,9	8,3	60,4	9,6
IT40-LNOT	52,6	7,2	56,6	8,9	63,1	7,5
IT40-INO35	44,4	5,6	47,2	6,1	53,9	8,6
IT40-100INO	44,7	6,9	47,5	4,1	54,7	8,8
IT30-100LNO	46,2	4,3	47,5	4,4	55,2	6,9
IT30-6LNO	43,0	6,7	44,4	6,0	50,3	9,1

Iz Tablice 4.7. do Tablice 4.10. uočljivo je da porastom raznolikosti na radnoj stanici, prosječno vrijeme montaže istog proizvoda, tj. istog elemenata rada, raste. Također je uočljivo da je porast raznolikosti broja proizvoda i broja raznolikih ugradbenih dijelova uglavnom praćen i porastom standardne devijacije prosječnog vremena montaže proizvoda.

Iz dobivenih rezultata eksperimenata izračunate su prosječne vrijednosti vremena montaže po proizvodu sukladno definiranom omjeru u uzorku proizvoda. Vrijednosti prosječnih vremena montaže proizvoda za različite vrijednosti kombinacija raznolikih proizvoda i broja ugradbenih dijelova na radnoj stanici *j* za *n* proizvoda, n_j^{RD} raznolikih ugradbenih dijelova i n_j^{RA} raznolikih alata prikazane su Tablici 4.11.

Tablica 4.11. Prosječno vrijeme montaže proizvoda u ovisnosti o definiranim ulaznim parametrima

Eksperiment	$p_j^{n,n_j^{RD}} / s$
3P14D1A	40,5
3P17D1A	43,8
3P20D1A	45,2
5P14D1A	42,4
5P17D1A	44,8
5P17D1A	44,9
5P17D1A	45,3
5P17D1A	46,4
5P17D1A	45,6
5P20D1A	49,1
7P14D1A	46,5
7P20D1A	55,2
7P17D1A	49,1

Dobivene vrijednosti idealnog prosječnog vremena montaže proizvoda te prosječnog vremena montaže proizvoda na razini radne stanice u prisutnosti raznolikosti sadržaja rada uvrštene su u izraz (4.2) kako bi se odredile vrijednosti kompleksnosti montaže na razini radne stanice j . Izračunate vrijednosti prikazane su u Tablici 4.12.

Tablica 4.12. Plan eksperimenata i izlazne vrijednosti pokazatelja kompleksnosti montaže

Eksperiment	n / kom	n_j^{RD} / kom	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$
1	3	17	1,86
2	5	17	2,02
3	3	20	1,91
4	7	14	2,07
5	5	17	2,04
6	5	17	2,09
7	7	20	2,46
8	7	17	2,19
9	5	14	1,91
10	3	14	1,72
11	5	17	2,05
12	5	17	2,02
13	5	20	2,21

4.3.2. Matematički model za predviđanje kompleksnosti montaže na razini radne stanice

Matematički model za predviđanje kompleksnosti montaže na razini radne stanice dobiven je izbacivanjem nesignifikantnih parametara iz polinomne jednadžbe te ima oblik:

$$\lambda_j^{n,n_j^{RD}} = 1,40703 - 0,039167 * n + 0,007222 * n_j^{RD} + 0,008333 * n * n_j^{RD} \quad (4.4)$$

Nakon odabira modela, provedena je analiza varijance (ANOVA) ovog odziva koja je prikazana u Tablici 4.13. Prema Tablici 4.13. *F*-vrijednost modela iznos 109,29 i ukazuje na značajnost modela jer vjerojatnost pojave tako velike vrijednosti uslijed šuma iznosi samo 0,01 %. *Prob>F* vrijednost manja od 0,05 za pojedine članove matematičkog modela govori o značajnosti njihovog utjecaja. Analiza varijance pokazuje da su svih uključeni ulazni čimbenici značajni za predviđanje odziva, kao i njihove interakcije.

Tablica 4.13. Analiza varijance (ANOVA) za kompleksnost montaže na razini radne stanice

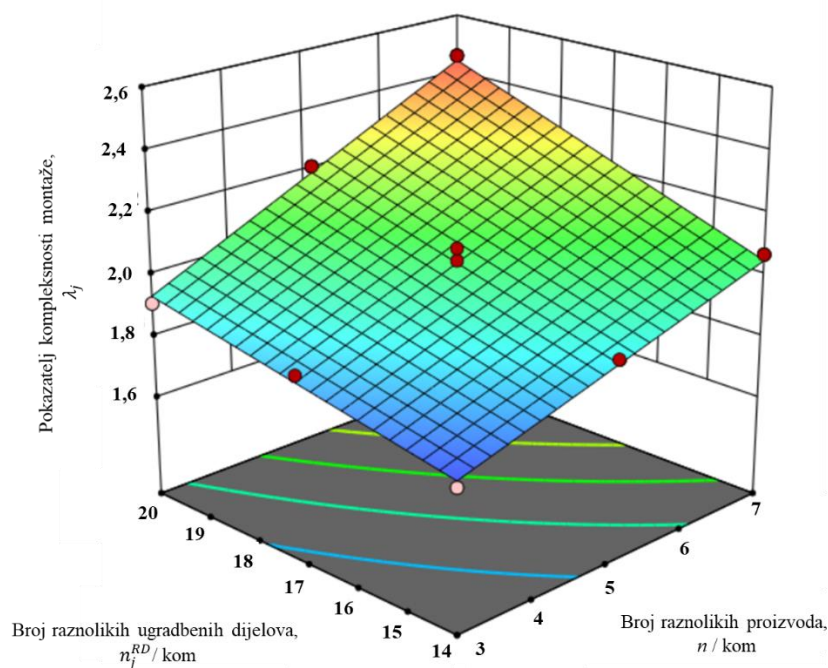
	<i>Br. stupnjeva slobode</i>	<i>Suma kvadrata odstupanja</i>	<i>Srednji kvadrat odstupanja</i>	<i>F vrijednost</i>	<i>Prob>F</i>
Model	3	0,3912	0,1304	124,67	< 0,0001
<i>n</i>	1	0,2521	0,2521	241,06	< 0,0001
<i>n_jRD</i>	1	0,1291	0,1291	123,39	< 0,0001
<i>n * n_jRD</i>	1	0,0100	0,0100	9,56	0,0129
Ostatak	9	0,0094	0,0010		
Odstupanje od modela	5	0,0061	0,0012	1,47	0,3656
Čista pogreška	4	0,0033			
Ukupno	12	0,4006			

U Tablici 4.14. prikazani su rezultati regresijske analize kompleksnosti montaže na razini radne stanice. *Koeficijent determinacije* $R^2 = 0,9765$ pokazuje da se 97,65 % varijabilnosti pripisuje djelovanju ulaznih čimbenika (veličina). Razlika između *Prilagođeni R²* i *Predviđeni R²* je manja od 0,02, dok vrijednost *Adekvatne preciznost* koja mjeri omjer signal šum iznosi 39, 2044. Spomenute vrijednosti upućuju da je ovaj model prikladan za predviđanje pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice.

Tablica 4.14. Rezultati regresijske analize za kompleksnost montaže na razini radne stanice

Rezultati regresijske analize	
R^2	0,9765
R_{adj}^2	0,9687
R_{pred}^2	0,9355
Adekvatna preciznost	39,2044

Pomoću matematičkog modela konstruiran je prostorni dijagram koji opisuju utjecaj ulaznih veličina na kompleksnost montaže. S obzirom da je pokazatelj kompleksnosti montaže izražen kao čimbenik porasta prosječnog vremena procesa montaže zbog djelovanja raznolikosti, kompleksnost montaže je rastuća funkcija broja raznovidnih proizvoda i broja raznovidnih ugradbenih dijelova dostupnih na radnoj stanici, Slika 4.16.

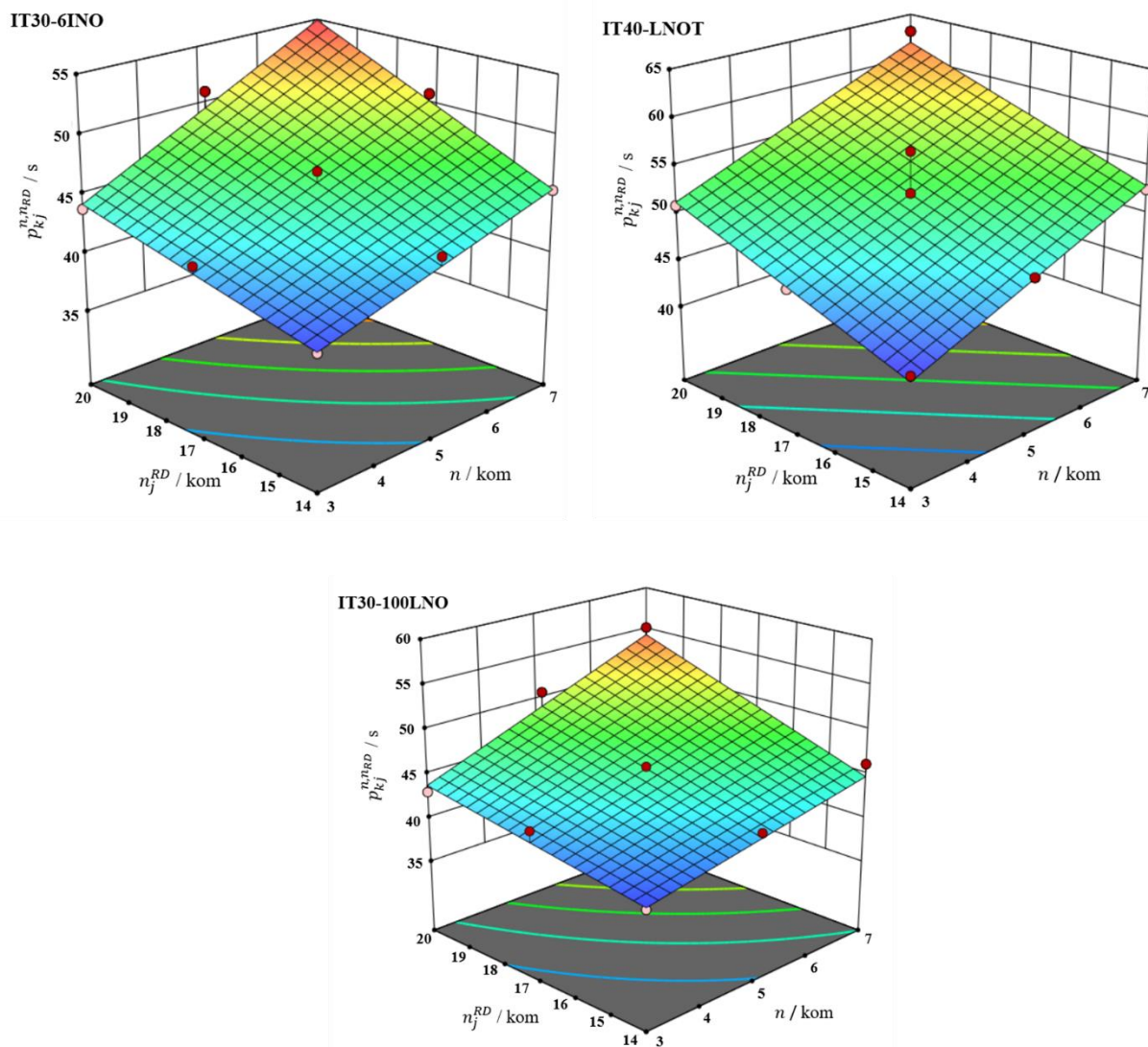


Slika 4.16. Utjecaj broja raznovidnih proizvoda i broja raznovidnih ugradbenih dijelova na kompleksnost montaže

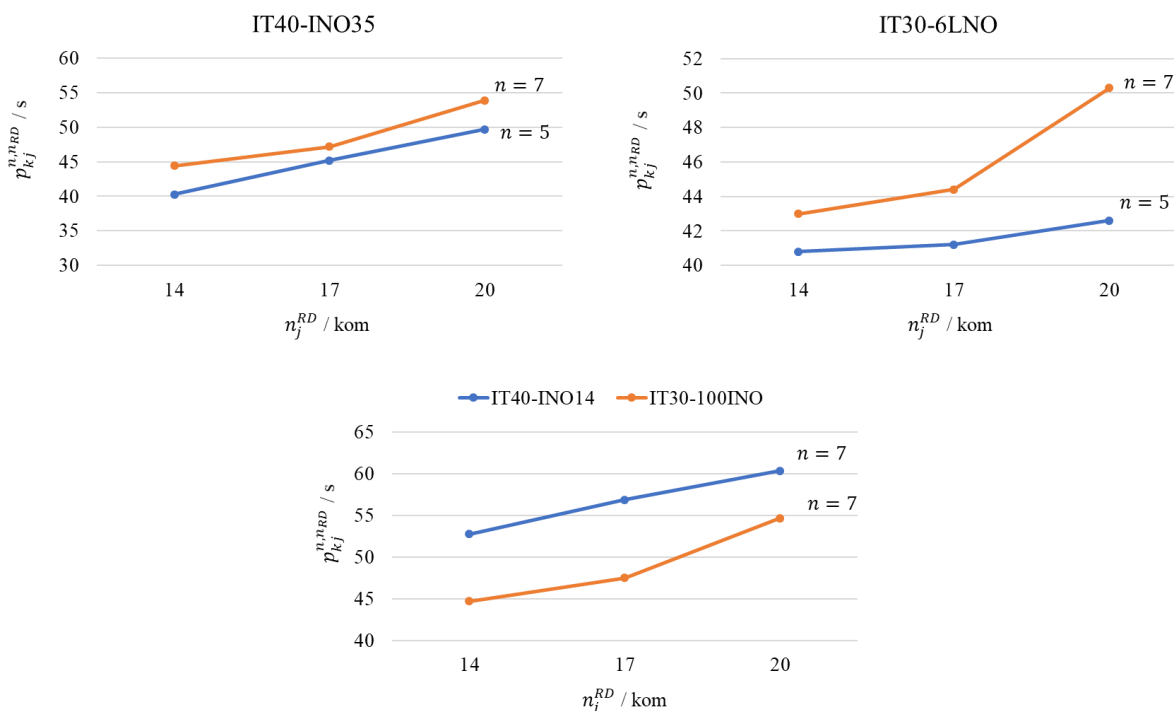
Naime, porast broja raznovidnih ugradbenih dijelova znači da operater duže vremena troši na ukupno vrijeme pripreme, ali i na sam proces montaže zbog veće količine i zbog sličnosti ugradbenih dijelova i proizvoda. Porast broja raznovidnih proizvoda, za istu vrijednost broja raznovidnih ugradbenih dijelova, također utječe na porast prosječnog vremena montaže proizvoda. Ovaj rezultat pripisuje se dodatnom mentalnom opterećenju radnika zbog porasta

sadržaja rada, tj. porasta raznolikih proizvoda, a time i raznolikih uputa s kojima se operater susreće kao i porasta broja ugradbenih dijelova koje operater treba pronaći i montirati. Sukladno rečenome, porast raznolikosti obaju čimbenika rezultirat će porastom prosječnog vremena montaže svakog pojedinog proizvoda koji se montira na radnoj stanici. Porast prosječnog vremena montaže proizvoda značit će veći čimbenik kompleksnosti montaže s obzirom da razlika prosječnih vremena montaže proizvoda, tj. prosječnog vremena montaže proizvoda u prisutnosti porasta raznolikosti sadržaja rada i idealnog prosječnog vremena montaže proizvoda, na radnoj stanici raste.

Porastom broja raznolikih proizvoda u uzorku, količine istog proizvoda koje je potrebno proizvesti u određenom EPEI periodu opadaju. Veća raznolikost proizvoda, veći broj raznolikih ugradbenih elemenata rada i manja učestalost proizvodnje proizvoda dovode do porasta prosječnog vremena proizvodnje svakog individualnog proizvoda. Porast prosječnog vremena proizvodnje proizvoda za različite vrijednosti uzorka proizvoda i broja ugradbenih elemenata za svih sedam promatranih proizvoda vidljiv je na Slici 4.17. i Slici 4.18.



Slika 4.17. Prosječna vremena montaže proizvoda za različite kombinacije uzoraka i broja ugradbenih elemenata



Slika 4.18. Prosječna vremena montaže proizvoda za različite kombinacije uzoraka i broja ugradbenih elemenata

4.3.3. Ispitivanje ispravnosti razvijenog matematičkog modela

Kako bi se provjerila ispravnost predviđanja predloženog matematičkog modela prikazanog izrazom (4.4) napravljen je novi skup eksperimenata koji je podrazumijevao montažu četiri različita proizvoda poštujući prethodno definirane udjele proizvoda u uzorku proizvoda. Ukupan broj eksperimenata, tj. montiranja proizvoda iznosio je 60. Proizvodi su se montirali u slijedu IT30-6INO, IT40-INO14, IT30-100INO te IT30-100LNO prema uzorku proizvoda 1:1:1:2. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 4.15.

Tablica 4.15. Vrijednosti prosječnih vremena i standardnih odstupanja proizvoda za uzorak od četiri raznolika proizvoda

4P16D1A		
k	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
IT30-6INO	43,7	6,86
IT40-INO14	48,9	6,38
IT30-100INO	42,4	4,56
IT30-100LNO	41,8	6,06

Korištenjem podataka iz Tablice 4.4. i Tablice 4.15. dobivene su sljedeće vrijednosti:

$$p_{idealno,j}^4 = 23,44 \text{ s} \quad (4.5)$$

$$p_j^{4,16} = 43,72 \text{ s} \quad (4.6)$$

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti u izraz za određivanje kompleksnosti montaže, izraz (4.2) dobivena je kompleksnost montaže za definirani uzorak proizvoda i broj ugradbenih elemenata:

$$\lambda_j^{4,16} = 1,87 \quad (4.7)$$

Upotrebom razvijenog matematičkog modela za predviđanje kompleksnosti montaže koji je prikazan izrazom (4.4) dobivena vrijednost za slučaj kada je $n = 4, n_j^{RD} = 16$ iznosi:

$$\lambda_j^{4,16} = 1,90 \quad (4.7)$$

Stoga, može se zaključiti da razvijeni model dobro predviđa kompleksnost montaže u promatranom rasponu, s obzirom na to da je odstupanje testnog uzorka prihvatljivog iznosa, odnosno manje je od 2 %.

4.4. Korekcija modela za predviđanje proizvodnosti pokazateljem kompleksnosti montaže

U predloženi model za predviđanje proizvodnosti može se integrirati predloženi pokazatelj kompleksnosti montažne linije. Predloženi model za predviđanje proizvodnosti, proizvodnost predviđa na temelju takta uzorka uskog grla kod EPEI perioda. Kao što je već rečeno, prilikom razvoja matematičkog modela riječ uzorak koristi se za opisivanje udjela proizvoda među proizvodima koje je potrebno proizvesti na montažnoj liniji u promatranom periodu vremena za koji se definiraju zahtjevi tržišta, T (npr. mjesec ili godina). Dok se takt uzorka promatra kao minimalna vrijednost vremena potrebna za izmjenu minimalnog uzorka proizvoda.

Razvijeni faktor kompleksnosti montaže na razini radne stanice temelji se na poznavanju idealnog prosječnog vremena montaže proizvodâ na promatranjoj radnoj stanici j za definirani uzorak proizvoda, tj. na poznavanju vrijednosti $p_{idealno,j}^n$. Ova vrijednost definirana je sljedećim izrazom:

$$p_{idealno,j}^n = \frac{\sum_{k=1}^K p_{idealno,k} * V_{j,k}}{\sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w}} \quad (4.5)$$

gdje je:

$V_{j,k}$ - varijabla odlučivanja za koju vrijedi:

$$V_{j,k} = \begin{cases} 1, & \text{ako je element rada } k \text{ dodiljen radnoj stanici } j \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$$

Ako je vrijednost idealnog prosječnog vremena montaže proizvodâ poznata modifikacijom izraza (3.12) dobiva se vrijednost idealnog prosječnog vremena montaže radne stanice j s obzirom na definirani uzorak proizvoda:

$$t_{rs,j}^{idealno,n} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * p_{idealno,j}^n = \sum_{k=1}^K p_{idealno,k} * V_{j,k} \quad (4.6)$$

Modificirani izraz za takt uzorka dan je sljedećom formulom:

$$TAKT_{uzorak} = \max_j (t_{rs,j}^{idealno,n} * \lambda_j^{n,n^{RD}}) = \max_j \left(\left(\sum_{k=1}^K p_{idealno,k} * V_{j,k} \right) * \lambda_j^{n,n^{RD}} \right) \quad (4.7)$$

S obzirom da koeficijent kompleksnosti u obzir uzima ukupno vrijeme pripreme operatera, izraz za proizvodnost (3.26) sada poprima sljedeći oblik:

$$\begin{aligned} PR_T &= \frac{T_{EPEI}}{TAKT_{uzorak}} * \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * \pi_T \\ &= \frac{T_{EPEI}}{\max_j \left(\left(\sum_{k=1}^K p_{idealno,k} * V_{j,k} \right) * \lambda_j^{n,n^{RD}} \right)} * \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\min w} * \pi_T \end{aligned} \quad (4.8)$$

Na temelju izraza (4.8) moguće je matematički odrediti proizvodnost montažne linije i njezinu balansiranost na temelju ulaznih podataka: broj razolikih proizvoda, ukupna količina svakog razolikog proizvoda u promatranom periodu T , idealna prosječna vremena montaže proizvoda, raspored elemenata rada proizvoda po radnim stanicama montažne linije, te vrijednosti EPEI perioda koje se razmatraju. S obzirom da spomenuti izraz integrira pokazatelj kompleksnosti montaže, u ovisnosti o broju razolikih proizvoda koji se montiraju te o broju razolikih ugradbenih dijelova, prosječno vrijeme procesa montaže uskog grla će se korigirati. Što je pokazatelj kompleksnosti veći, prosječno vrijeme montaže radne stanice uskog grla bit će veće, a time će proizvodnost biti manja. Spomenuti izraz menadžeri mogu koristiti u predloženom matematičkom modelu za predviđanje proizvodnosti. Na temelju korigiranog izraza, mogu se dobiti korigirani podaci o proizvodnosti montažne linije, njejoj balansiranosti te prijedlog slijeda upućivanja radnih naloga u ovisnosti o preferencijama donositelja odluka uzimajući u obzir utjecaj čimbenika koji definiraju kompleksnost montaže. Na temelju različitih ulaznih parametara, može se vršiti optimiranje izlaznih veličina: proizvodnosti i učinkovitosti montažne linije.

5. VREDNOVANJE POKAZATELJA KOMPLEKSNOSTI MONTAŽE

5.1. Osvrt na kompleksnost montaže kod različitih operatera

U prvoj studiji slučaja promatrani su vizualno vrlo slični raznoliki proizvodi. U drugoj studiji slučaja promatran je novi skup proizvoda kojeg karakterizira manja vizualna sličnost gotovih proizvoda. Promatrani proizvodi su jednostavni proizvodi sastavljeni od različitog broja ugradbenih dijelova koji se preko jednog ili dvaju vijčanih spojeva međusobno povezuju. Za razliku od prethodno promatranog skupa proizvoda, ovi proizvodi ne sastoje se od istog broja ugradbenih dijelova te zahtijevaju veći broj raznolikih alata za montažu. Raznoliki proizvodi koji su promatrani prikazani su na Slici 5.1., dok su upute korištene za montažu svakog proizvoda dane u Prilogu C.



Slika 5.1. Sedam razolikih proizvoda u drugoj studiji slučaja

Ovisno o definiranom uzorku proizvoda, na radnoj stanici se razlikuje broj raznolikih ugradbenih dijelova, ali i broj raznolikih alata potrebnih za montažu svih proizvoda. Definirani omjeri u uzorku proizvoda jednaki su kao i u prethodnoj studiji slučaja te su prikazani na Slici 5.2.

3P19D3A		5P27D4A		7P35D5A	
Definirani slijed proizvoda		Definirani slijed proizvoda		Definirani slijed proizvoda	
Oznaka proizvoda	Omjer definiran uzorkom proizvoda	Oznaka proizvoda	Omjer definiran uzorkom proizvoda	Oznaka proizvoda	Omjer definiran uzorkom proizvoda
NOSA-22V	1	NOSA-22V	1	NOSA-22V	1
IT40N-SL	1	IT40N-SL	1	IT40-LU	1
L50-L	2	L50-L	2	IT40N-SL	1
		IT30-6INO	2	L50-L	2
		IT30-100L	2	UZV-PL	1
				IT30-6INO	2
				IT30-100L	2

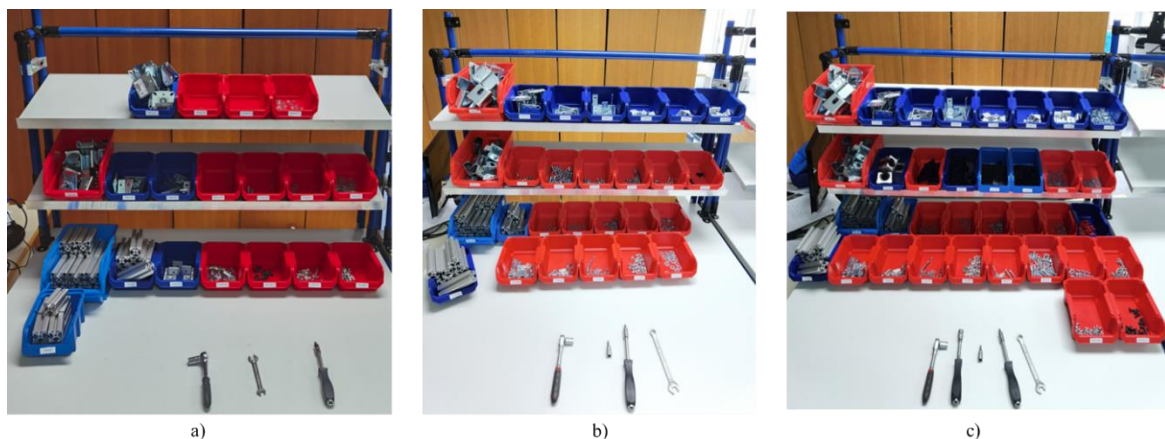
Slika 5.2. Promatrani slijed proizvoda i uzorak proizvoda na radnoj stanici za drugi skup proizvoda

Ukupan broj raznovolikih dijelova, ukupan broj dijelova te ukupan broj raznovolikih alata potrebnih za montažu svakog promatranog proizvoda dani su u Tablici 5.1.

Tablica 5.1. Broj raznovolikih dijelova, ukupan broj dijelova te ukupan broj alata u ovisnosti o proizvodu koji se montira

Oznaka proizvoda	Broj raznovolikih dijelova / kom	Ukupan broj dijelova / kom	Ukupan broj alata / kom
NOSA-22V	3	3	2
IT40-LU	5	5	1
IT40N-SL	4	4	1
L50-L	5	5	2
UZV-PL	6	6	2
IT30-6INO	5	5	1
IT30-100L	5	8	1

Eksperimenti su provedeni za tri uzorka raznovolikih proizvoda i njihov slijed (tj. za tri vrijednosti EPEI perioda), za različit broj raznovolikih ugradbenih dijelova i alata kako slijedi: 3P19D3A, 5P27D4A te 7P35D5A (Slika 5.2.). Eksperimenti su odrađeni s jednakim operaterom kao i u prvoj studiji slučaja. Za potrebe ovog poglavlja ovaj operater nazivat će se Operater 1. Izgled radnih stanica za promatrane eksperimente dan je na Slici 5.3.



Slika 5.3. Primjer radne stanice za montažu: a) tri raznolika proizvoda , b) pet raznolikih proizvoda, c) sedam raznolikih proizvoda

Oba promatrana skupa proizvoda sadrže isti proizvod IT30-6INO. Usporedbom rezultata prosječnih vremena montaže dobivenih u oba skupa proizvoda, uočeno je da veća sličnost ugradbenih dijelova i veća vizualna sličnost raznolikih proizvoda imaju veći utjecaj na vrijeme montaže nego primjerice broj raznolikih ugradbenih dijelova ili broj raznolikih alata s kojima operater rukuje na radnoj stanici. Razlog tome pripisuje se većem mentalnom opterećenju i koncentraciji koja se zahtjeva od operatera kada su proizvodi unutar skupa proizvoda vizualno sličniji. Ovaj zaključak potkrijepljen je i subjektivnim dojmom operatera koji je potvrdio da je montiranje prvog skupa proizvoda smatrao „misaono puno iscrpnijim“ nego montiranje drugog skupa proizvoda. Razlika u vremenima montaže za proizvod IT30-6INO vidljiva je u Tablici 5.2.

Tablica 5.2. Prosječna vremena montaže Operatera 1 za proizvod IT30-6INO kod dva različita skupa proizvoda

IT30-6INO			
1. skup proizvoda	$p_j^{n,n_j^{RD}} / s$	2. skup proizvoda	$p_j^{n,n_j^{RD}} / s$
5P14D1A	43,3	5P27D4A	33,0
5P17D1A	45,4*	7P35D5A	29,9
5P20D1A	51,0		
7P14D1A	45,4		
7P17D1A	50,8		
7P20D1A	54,5		

*prvo izvođenje eksperimenta 5P17D1A

Proizvodi predstavljeni Slikom 5.1. poslužili su za daljnja istraživanja. Eksperimenti 3P19D3A, 5P27D4A te 7P35D5A provedeni su s još dva operatera. Prikupljeni rezultati eksperimenata sumirani su kako bi se donio zaključak o vremenima montaže kod različitih operatera, te o varijacijama pokazatelja kompleksnosti montaže. Rezultati eksperimenata izneseni su u sljedećem potpoglavlju.

5.1.1. Utjecaj različitih operatera na vrijeme montaže

Određivanju idealnog prosječnog vremena montaže te prosječnog vremena montaže u prisutnosti raznolikosti sadržaja rada, pristupilo se provođenjem eksperimenata s tri različita operatera. Jednako kao i u prethodnoj studiji slučaja, kod prisutnosti raznolikosti sadržaja rada u eksperimentima je promatrano vrijeme montaže koje se sastoji od ukupnog prosječnog vremena pripreme operatera te od vremena potrebnog za sam proces montaže. Ukupno prosječno vrijeme pripreme kod određivanja idealnog prosječnog vremena montaže je nula.

Za određivanje idealnog prosječnog vremena montaže pojedinačnih proizvoda svaki operater proveo je ukupno 210 eksperimenata, odnosno svaki operater je izvršio po 30 eksperimenata za svaki od sedam raznolikih proizvoda. Na temelju provedenih eksperimenata izračunato je idealno prosječno vrijeme različitih operatera za svaki proizvod koji se promatra. Pri tome, vremena montaže svih eksperimenata su uzeta za izračun s obzirom da je broj eksperimenata dovoljno velik, a vremena montaže nisu značajno odstupala. Vrijednosti idealnih prosječnih vremena montaže svakog proizvoda i njihova standardna odstupanja za različite operatere prikazani su u Tablici 5.3.

Tablica 5.3. Idealna prosječna vremena montaže proizvoda i njihova standardna odstupanja

<i>k</i>	Operater 1		Operater 2		Operater 3	
	$p_{idealno,k} / s$	$\sigma_{idealno,k}$	$p_{idealno,k} / s$	$\sigma_{idealno,k}$	$p_{idealno,k} / s$	$\sigma_{idealno,k}$
NOSA-22V	19,9	2,57	22,2	4,29	20,8	3,62
IT40-LU	28,2	3,27	31,4	4,54	30,3	3,23
IT40N-SL	20,9	3,76	19,5	2,52	21,8	2,78
L50-L	26,3	4,24	24,1	5,76	22,1	4,54
UZV-PL	37,5	4,32	42,5	6,19	36,4	5,63
IT30-6INO	21,2	2,24	25,8	3,26	22,4	2,88
IT30-100L	42,0	2,83	40,7	4,61	39,6	3,72

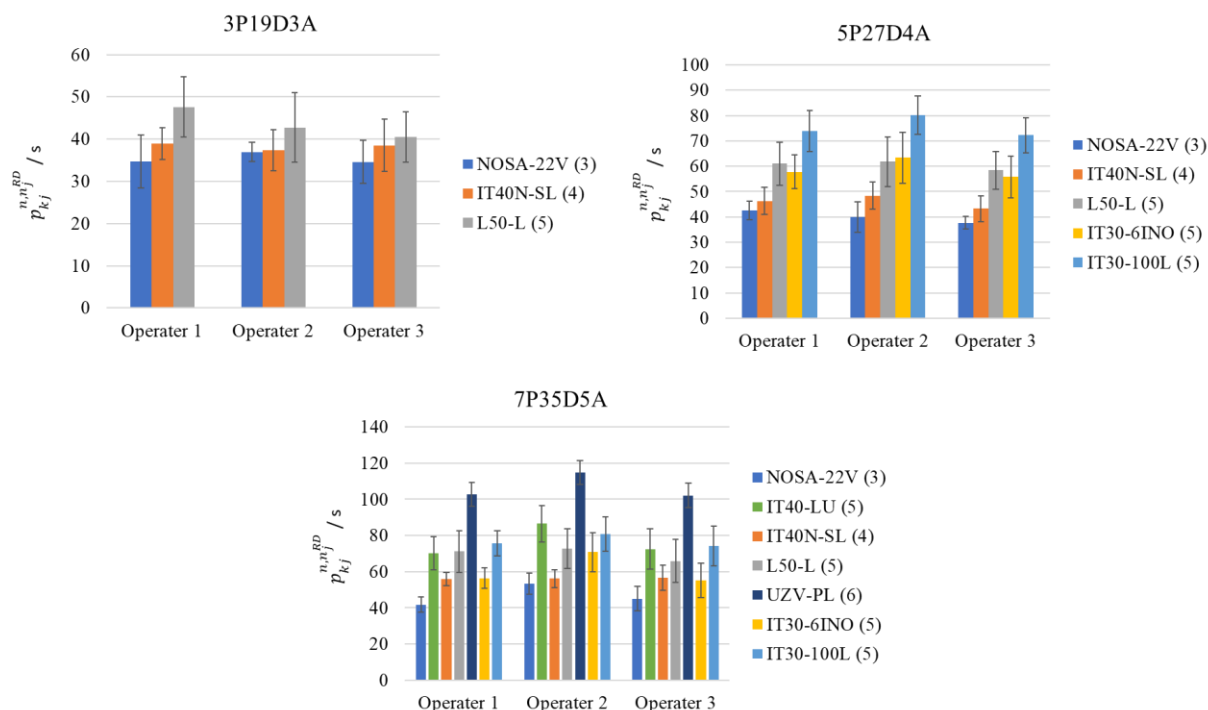
Iz Tablice 5.3. uočljivo je da idealno vrijeme montaže promatranog proizvoda ovisi o individualnoj snalažljivosti operatera, odnosno njegovom shvaćanju uputa za rad i njihovoj interpretaciji te iskustvu. Ali, vrijeme montiranja svakog proizvoda kod različitih operatera kreće se unutar raspona od $\pm 15\%$. Ono što je zajedničko operaterima je da je kod njih svih, najduže vrijeme montaže ima onaj proizvod kojeg karakterizira najveći ukupni broj ugradbenih dijelova (IT30-100L) te proizvod čija je montaža najsloženija zbog građe njegovih ugradbenih dijelova i načina montiranja (UZV-PL). Jednak zaključak vrijedi i prilikom provođenja određene kombinacije ugradbenih elemenata i uzorka raznolikih proizvoda što je uočljivo u tablicama koje se nalaze kasnije u tekstu koji se odnosi na spomenuti dio.

Na temelju dobivenih vrijednosti, određeno je idealno prosječno vrijeme proizvoda na radnoj stanici za promatrani uzorak proizvoda. Izračunate vrijednosti prikazane su u Tablici 5.4. Prema prikazanim rezultatima, porastom broja raznolikih proizvoda koji se montiraju na radnoj stanici, raste i idealno prosječno vrijeme proizvoda. Razlike prosječnih vremena montaže proizvoda s obzirom na uzorak proizvoda za različite operatere ne odstupaju značajno.

Tablica 5.4. Idealna prosječna vremena proizvoda s obzirom na uzorak proizvoda za različite operatere

	Operater 1	Operater 2	Operater 3
Raznolikost proizvoda, <i>n</i>	$p_{idealno}^n / s$	$p_{idealno}^n / s$	$p_{idealno}^n / s$
3 proizvoda	23,3	22,5	21,7
5 proizvoda	27,5	27,9	26,3
7 proizvoda	28,6	29,7	27,7

Rezultati eksperimenata triju operatera za kombinacije 3P19D3A, 5P27D5A te 7P35D5A izvedeni za određivanje prosječnog vremena montaže u prisutnosti raznolikosti sadržaja rada prikazani su na Slici 5.4.



Slika 5.4. Prosječna vremena montaže za različite kombinacije uzoraka proizvoda i ugradbenih elemenata kod triju operatera

Slika 5.4. prikazuje prosječna vremena montaže različitih operatera u ovisnosti o tome koji broj raznolikih proizvoda se montira na radnoj stanici. Brojevi u zagradama pored naziva proizvoda odnose se na broj raznolikih ugradbenih dijelova od kojih se proizvod sastoji. Iz grafova je vidljivo je da su prosječna vremena montaže proizvoda za određeni uzorak proizvoda kod svih operatera slično distribuirana. Odnosno, uočljivo je kako porastom raznolikosti proizvoda, prosječna vremena svakog pojedinog proizvoda rastu. To znači da će se isti proizvod npr. NOSA-22V kod uzorka sa sedam raznolikih proizvoda u većini slučajeva (tj. operatera) montirati duže nego što je to kada se promatra uzorak od pet raznolikih proizvoda, dok će uzorak od pet raznolikih proizvoda rezultirati većim vremenom montaže spomenutog proizvoda nego kada se promatra uzorak s tri raznolika proizvoda. Porast broja raznolikih ugradbenih dijelova jedan je od razloga porasta ukupnog prosječnog vremena pripreme montaže svih proizvoda koji se montiraju u uzorku raznolikih proizvoda s obzirom da se operater porastom raznolikosti proizvoda koje montira prema uzorku, susreće s većim brojem

raznolikih ugradbenih dijelova (kutija na radnoj stanici) između kojih mora pronaći pravi dio. Drugi razlog porasta ukupnog prosječnog vremena pripreme montaže zasigurno je veća količina raznolikih uputa koja dolazi s porastom raznolikosti proizvoda. U Tablici 5.5. do Tablice 5.7. prikazani su podaci o ukupnim prosječnim vremenima pripreme montaže te vremenima procesa montaže za sve promatrane kombinacije. Iz tablica je uočljivo da porastom broja raznolikih proizvoda u uzorku te broja ugradbenih elemenata, i ukupno prosječno vrijeme pripreme i vrijeme samog procesa montaže u većini slučajeva doživljavaju trend porasta. Stoga, prosječno vrijeme montaže (ukupno) raste. Ovaj trend uočljiv je kod svih operatera. Usporedbom podataka o idealnim prosječnim vremenima proizvoda kod svakog operatera, Tablica 5.4., te podataka o procesu montaže (bez pripremno-završnog vremena) kod različitih promatranih kombinacija uzoraka i ugradbenih elemenata, uočeno je da je u drugom spomenutom slučaju sam proces montaže dugotrajniji i da s porastom raznolikosti njihova razlika sve više raste. Razlog tome je veća količina različitih načina montaže (procedura montaže) koje operater obavlja, kao i veći broj alata s kojima operater rukuje te veća raznolikost ugradbenih dijelova.

Tablica 5.5. Ukupna prosječna vremena pripreme i vremena procesa montaže za uzorak od tri raznolika proizvoda kod različitih operatera

Operater 1			
Oznaka proizvoda	NOSA-22V	IT40N-SL	L50-L
Broj raznolikih dijelova / kom	3	4	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	12,8	15,7	17,7
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	21,8	23,2	29,9
Prosječno vrijeme montaže / s	34,7	38,9	47,6
Operater 2			
Oznaka proizvoda	NOSA-22V	IT40N-SL	L50-L
Broj raznolikih dijelova / kom	3	4	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	12,3	14,6	19,2
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	24,6	22,8	26,4
Prosječno vrijeme montaže / s	36,9	37,4	45,6
Operater 3			
Oznaka proizvoda	NOSA-22V	IT40N-SL	L50-L
Broj raznolikih dijelova / kom	3	4	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	11,9	15,2	17,1
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	22,7	23,2	23,4
Prosječno vrijeme montaže / s	34,6	38,5	40,5

Tablica 5.6. Ukupna prosječna vremena pripreme i vremena procesa montaže za uzorak od pet raznovolikih proizvoda kod različitih operatera

Operater 1					
Oznaka proizvoda	NOSA- 22V	IT40N- SL	L50- L	IT30- 6INO	IT30- 100L
Broj raznovolikih dijelova / kom	3	4	5	5	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	16,4	24,5	29,6	24,8	30,2
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	26,2	21,8	31,4	33,0	43,7
Prosječno vrijeme montaže / s	42,6	46,3	61,0	57,8	73,9
Operater 2					
Oznaka proizvoda	NOSA- 22V	IT40N- SL	L50- L	IT30- 6INO	IT30- 100L
Broj raznovolikih dijelova / kom	3	4	5	5	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	15,1	19,5	34,45	35,4	32,1
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	24,8	28,8	27,3	29,9	47,9
Prosječno vrijeme montaže / s	39,9	48,3	61,7	63,3	80,1
Operater 3					
Oznaka proizvoda	NOSA- 22V	IT40N- SL	L50- L	IT30- 6INO	IT30- 100L
Broj raznovolikih dijelova / kom	3	4	5	5	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	13,9	18,5	28,3	23,6	27,7
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	23,8	24,8	30,0	32,1	44,5
Prosječno vrijeme montaže / s	37,7	43,3	58,3	55,7	72,2

Tablica 5.7. Ukupna prosječna vremena pripreme i vremena procesa montaže za uzorak od sedam raznolikih proizvoda kod različitih operatera

Operater 1							
Oznaka proizvoda	NOSA-22V	IT40-LU	IT40N-SL	L50-L	UZV-PL	IT30-6INO	IT30-100L
Broj raznolikih dijelova / kom	3	5	4	5	6	5	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	19,2	31,1	27,6	37,0	43,1	27,2	31,15
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	22,6	39,1	28,3	34,1	59,6	29,1	44,5
Prosječno vrijeme montaže / s	41,8	70,2	55,9	71,1	102,7	56,3	75,6
Operater 2							
Oznaka proizvoda	NOSA-22V	IT40-LU	IT40N-SL	L50-L	UZV-PL	IT30-6INO	IT30-100L
Broj raznolikih dijelova / kom	3	5	4	5	6	5	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	20,1	33,4	27,1	40,1	50,2	34,9	33,6
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	33,3	53,1	29,0	32,6	64,6	35,8	47,1
Prosječno vrijeme montaže / s	53,4	86,5	56,1	72,7	114,8	70,7	80,8
Operater 3							
Oznaka proizvoda	NOSA-22V	IT40-LU	IT40N-SL	L50-L	UZV-PL	IT30-6INO	IT30-100L
Broj raznolikih dijelova / kom	3	5	4	5	6	5	5
Ukupno prosječno vrijeme pripreme / s	20,4	31,7	26,7	32,2	44,3	25,2	30,1
Prosječno vrijeme procesa montaže / s	24,7	40,7	29,9	33,7	57,8	29,9	44,2
Prosječno vrijeme montaže / s	45,1	72,4	56,6	65,9	102,1	55,1	74,2

Osim spomenutoga, jedan od mogućih razloga porasta prosječnog vremena montaže proizvoda (ukupnog) je i smanjenje ponovljivosti uzastopnog montiranja istog proizvoda. Smanjenje ponovljivost podrazumijeva da će se u jednakom vremenskom intervalu, određeni proizvod montirati više puta kada je broj raznolikih proizvoda u uzorku manji. To će rezultirati bržim

postizanjem uvježbanosti operatera, te njegovim bržim snalaženjem u dostupnim uputama, dostupnim kutijama i alatima koje se reflektira u kraćem ukupnom prosječnom vremenu pripreme i u kraćem vremenu procesa montaže. Međutim, ponovljivost, odnosno utjecaj serije proizvoda u promatranom EPEI periodu poštujući uzorak proizvoda, nije bio predmet razmatranja ovog rada, ali je dobra smjernica za buduća istraživanja. Koliki je utjecaj svakog pojedinog nabrojenog čimbenika na krajnji rezultat teško je reći bez provođenja daljnjih eksperimenata, ali je evidentno da postoji. Standardna odstupanja vremena montaže operatera su vrijednosti koje se uvelike razlikuju od operatera do operatera s obzirom da ovise o puno subjektivnih čimbenika (obuka, utreniranost, motivacija, okruženje, snalažljivost...). Međutim, porastom broja eksperimenata i utreniranosti radnika, standardno odstupanje prosječnog vremena montaže operatera svakog pojedinog proizvoda bit će manje, dok će se ukupno vrijeme montaže kretati negdje oko izračunate prosječne vrijednosti montaže. Ove vrijednosti razlikovat će se za svakog pojedinog operatera.

5.1.2. Izračun pokazatelja kompleksnosti kod različitih operatera

U prethodnom poglavlju prikazani su rezultati idealnog prosječnog vremena proizvoda s obzirom na uzorak proizvoda za različite operatere, Tablica 5.4. Podaci o prosječnim vremenima montaže proizvoda u prisutnosti izmjene sadržaja rada za svakog pojedinog operatera prikazani su od Tablice 5.5. do Tablice 5.7. Na temelju njih, izračunate su vrijednosti prosječnog vremena montaže proizvoda po operateru u ovisnosti o promatranim raznolikostima. Dobiveni rezultati prikazani su u Tablici 5.8.

Tablica 5.8. Prosječna vremena montaže proizvoda na radnoj stanici j kod prisutnosti izmjene sadržaja rada

	Operater 1	Operater 2	Operater 3
Eksperiment	$p_j^{n,n_j^{RD}} / s$	$p_j^{n,n_j^{RD}} / s$	$p_j^{n,n_j^{RD}} / s$
3P19D3A	42,2	41,4	38,5
5P27D4A	59,3	62,8	56,7
7P35D5A	67,7	75,9	66,7

Na temelju podatka o prosječnim vremenima proizvoda (idealnih prosječnih vremena i prosječnih vremena u prisutnosti izmjene sadržaja rada) izračunat je pokazatelj kompleksnosti procesa montaže za svakog operatera prema izrazu (4.2). Rezultati su prikazani u Tablici 5.9.

Tablica 5.9. Kompleksnost montaže operatera na razini radne stanice

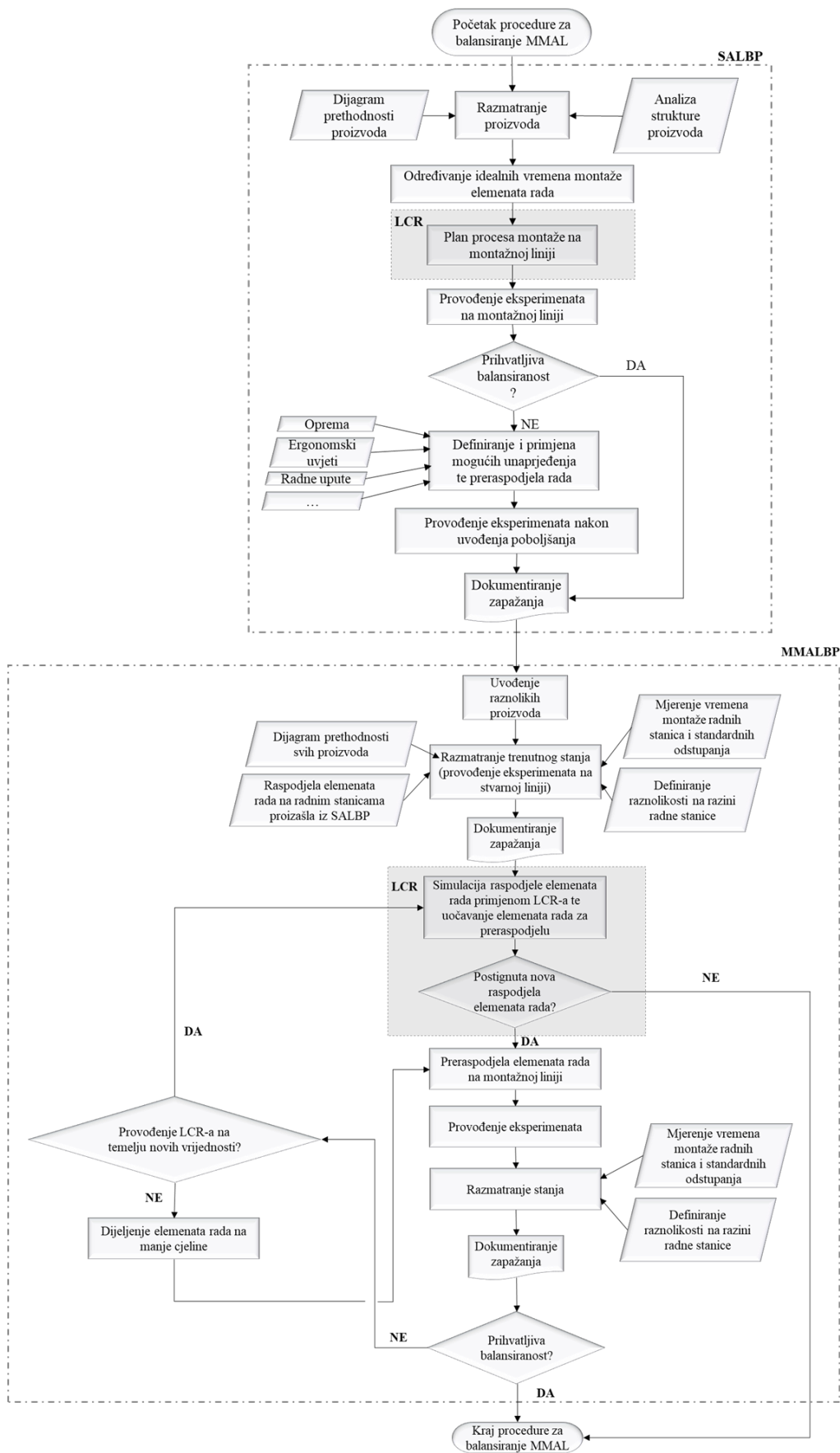
	Operater 1	Operater 2	Operater 3
Eksperiment	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$
3P19D3A	1,81	1,84	1,77
5P27D4A	2,16	2,25	2,15
7P35D5A	2,37	2,56	2,41

Dobiveni rezultati čimbenika kompleksnosti kod različitih operatera su slični, odnosno kreću se u rasponu $\pm 10\%$ od operatera do operatera. Posljedica je to psihofizičkih sposobnosti operatera, odnosno njihove snalažljivosti da bolje ili lošije reagiraju na različitu raznolikost sadržaja rada i izmjene sadržaja rada. Iz spomenutog zaključka proizlazi prijedlog za buduća istraživanja. Naime, ukoliko se želi odrediti pokazatelj kompleksnosti koji preciznije predviđa ukupno vrijeme montaže individualnog operatera, predlaže se da se u budućim istraživanjima napravi procedura za određivanje pokazatelja kompleksnosti montaže svakog pojedinog operatera unaprijed, tj. prije samog angažmana operatera na montaži, izvođenjem preliminarnih testova u dovoljno velikom obujmu.

5.2. Kompleksnost montaže na razini radne stanice i povezivanje s balansiranjem montažne linije

Kako bi se razvijeni pokazatelj kompleksnosti montaže povezoao s balansiranjem montažne linije napravljena je studija slučaja na montažnoj liniji mjenjačke kutije automobila koja je smještena u funkcionalnom području pet u sklopu LLF-a, Slika 4.7. Procedura balansiranja koja je upotrijebljena za balansiranje MMAL prikazana je na Slici 5.5., a sastoji se od SALBP i MMALBP. SALBP podrazumijeva odabir reprezentanta iz familije proizvoda, određivanje idealnih vremena njegovih elemenata rada te potom balansiranje montažne linije primjenom LCR metode na temelju dobivenih vrijednosti o idealnim vremenima. Ukoliko se donese odluka da postignuta balansiranost nije zadovoljavajuća, uočavaju se moguća poboljšanja, integriraju se u montažnu liniju te se ponovo provode eksperimenti. Na tako balansiranu montažnu liniju uvode se raznoliki proizvodi. Naime, uvođenjem raznolikosti u balansiranu montažnu liniju za proizvodnju jednog proizvoda, očekuje se da prethodna raspodjela opterećenja neće biti zadovoljavajuća jer će doći do velikih varijacija vremena montaže na radnim stanicama u odnosu na prijašnje stanje kada se montirala samo jedna vrsta proizvoda.

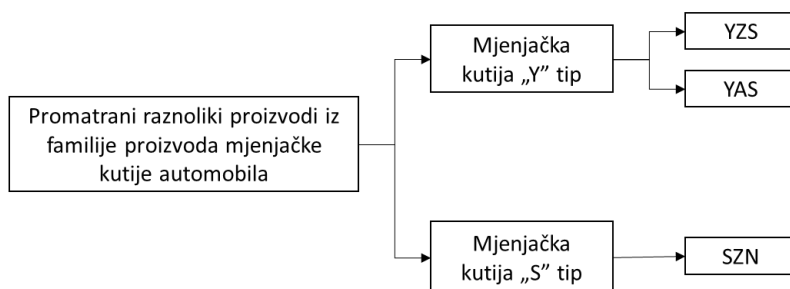
Stoga, kako bi se postigla bolja balansiranost radnog opterećenja među radnim stanicama, potrebno je pristupiti procesu preraspodjele elemenata rada između radnih stanica montažne linije [131]. U ovom slučaju fokus rada nije na postizanju maksimalne balansiranosti montažne linije, stoga će se balansiranje odvijati kroz određen broj iteracija koji je nužan kako bi se povezao pokazatelj kompleksnosti montaže na razini montažne linije s ukupnom balansiranošću montažne linije.



Slika 5.5. Procedura balansiranja MMAL

5.2.1. Određivanje elemenata rada i njihovih idealnih prosječnih vremena montaže

U svrhu povezivanja pokazatelja kompleksnosti montaže s balansiranjem montažne linije, provedena je studija slučaja na stvarnoj industrijskoj porodici proizvoda, porodici proizvoda mjenjačke kutije automobila. Porodica proizvoda mjenjačke kutije automobila koja se promatra sastoji se od preko 20 razolikih proizvoda. Za potrebe ove studije slučaja odabrana su 3 raznolika proizvoda: YZS, YAS te SZN, Slika 5.6. Prvo slovo u nazivu mjenjačke kutije odnosi se na vrstu kućišta u ovisnosti o marki automobila za koju se kućište proizvodi (Y ili S). Vrsta uređaja za sinkronizaciju predstavljena je drugom oznakom u nazivu (A ili Z), dok se posljednja oznaka u nazivu odnosi na vrstu gornjeg poklopca kućišta i njegovih ugradbenih dijelova (S ili N). Promatranjem razolikih proizvoda za montažnu liniju postignuta je visoko raznolika montaža malog volumena (engl. *low-volume/high-variety production*).



Legenda:

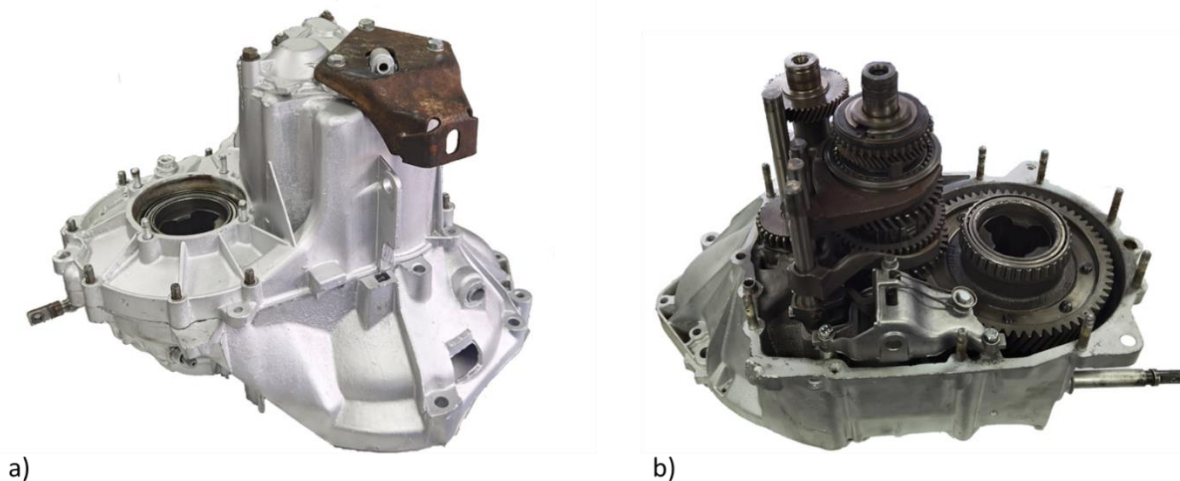
Broj oznake	1	2	3
Primjer: YZS mjenjačka kutija	Y	Z	S

Broj oznake	Značenje	Moguće opcije
1	Vrsta kućišta	Y ili S
2	Vrsta uređaja za sinkronizaciju	A ili Z
3	Vrste ugradbenih dijelova	N ili S

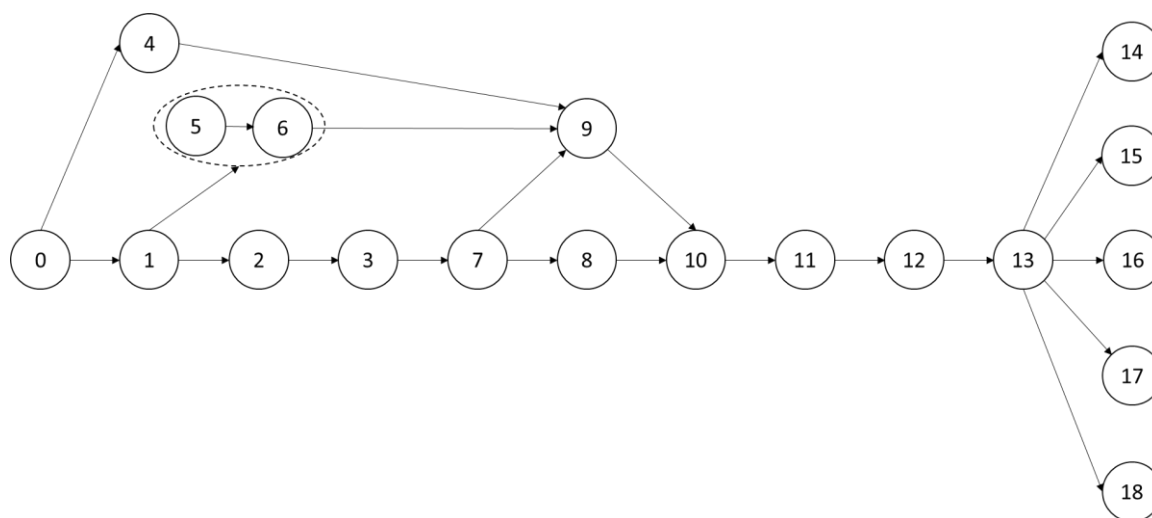
Slika 5.6. Promatrani raznoliki proizvodi iz porodice proizvoda mjenjačke kutije automobila

Početna točka za provođenje procedure balansiranja podrazumijeva analizu strukture proizvoda kako bi se definirali elementi rada. Za predstavnika, tj. reprezentanta promatranih proizvoda uzet je najsloženiji proizvod iz grupe, odnosno proizvod koji se sastoji od najvećeg broja razolikih ugradbenih dijelova rada, mjenjačka kutija YZS. Vanjski i unutrašnji izgled mjenjačke kutije YZS prikazani su na Slici 5.7. Elementi rada uočeni analizom strukture

proizvoda dani su u Prilogu D. Dijagram prethodnosti elemenata rada mjenjačke kutije YZS prikazan je na Slici 5.8.



Slika 5.7. a) vanjski izgled mjenjačke kutije YZS, b) unutrašnjost mjenjačke kutije YZS



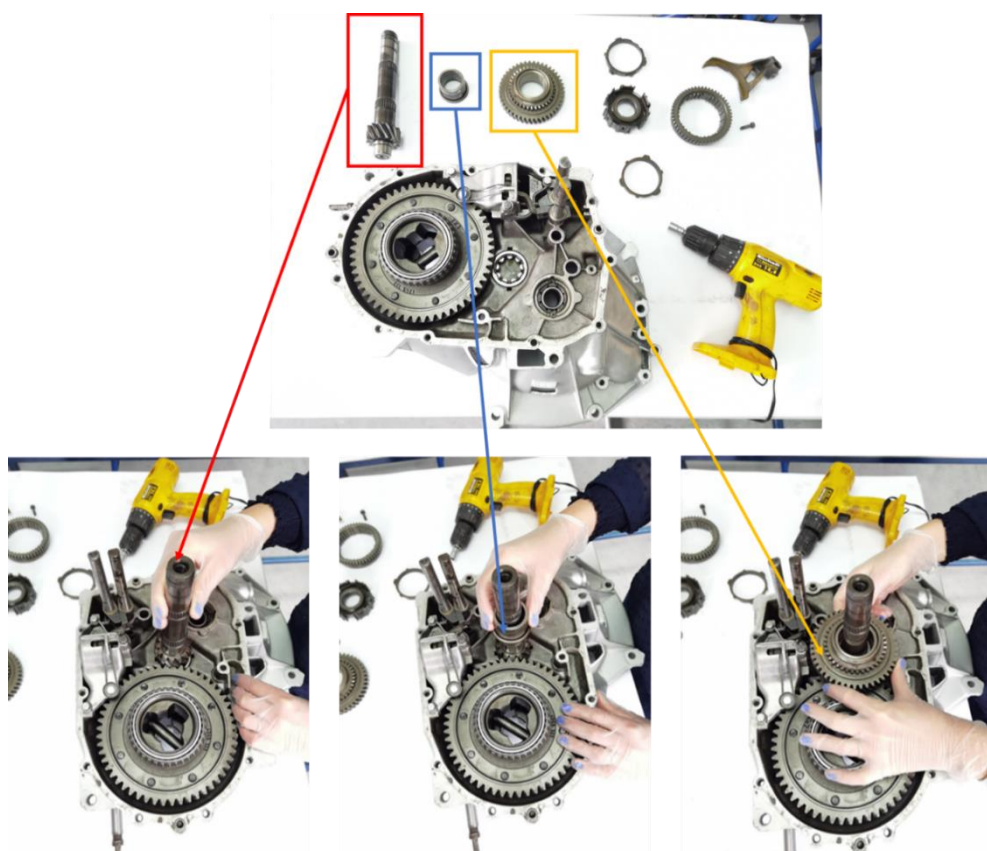
Slika 5.8. Dijagram prethodnosti elemenata rada mjenjačke kutije YZS

Na Slici 5.8. krugovi (od 1-18) označavaju elemente rada, elementi rada u isprekidanoj elipsi su elementi koji se moraju sklopiti na istoj radnoj stanici kako bi se ugradili u mjenjačku kutiju te transportirali na sljedeću radnu stanicu. Krug označen s nulom odnosi se na donji dio kućišta, odnosno na bazni dio proizvoda. Za svaki element rada provedeni su eksperimenti kako bi se odredilo idealno prosječno vrijeme potrebno za njegovu montažu. S obzirom da je s nulom na dijagramu prethodnosti označen bazni dio proizvoda, prilikom određivanja idealnih prosječnih vremena montaže elemenata rada ovaj bazni dio smješten je na radnoj stanici i stoga je vrijeme

njegovog transporta do radne stanice jednako nula. Primjer izgleda radnog mjesta prilikom određivanja idealnog vremena elementa rada 1 i elementa rada 9 prikazan je na Slici 5.9. i Slici 5.10.



Slika 5.9. Primjer rasporeda ugradbenih dijelova na radnoj stanici prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda za element rada 1 i dio montaže



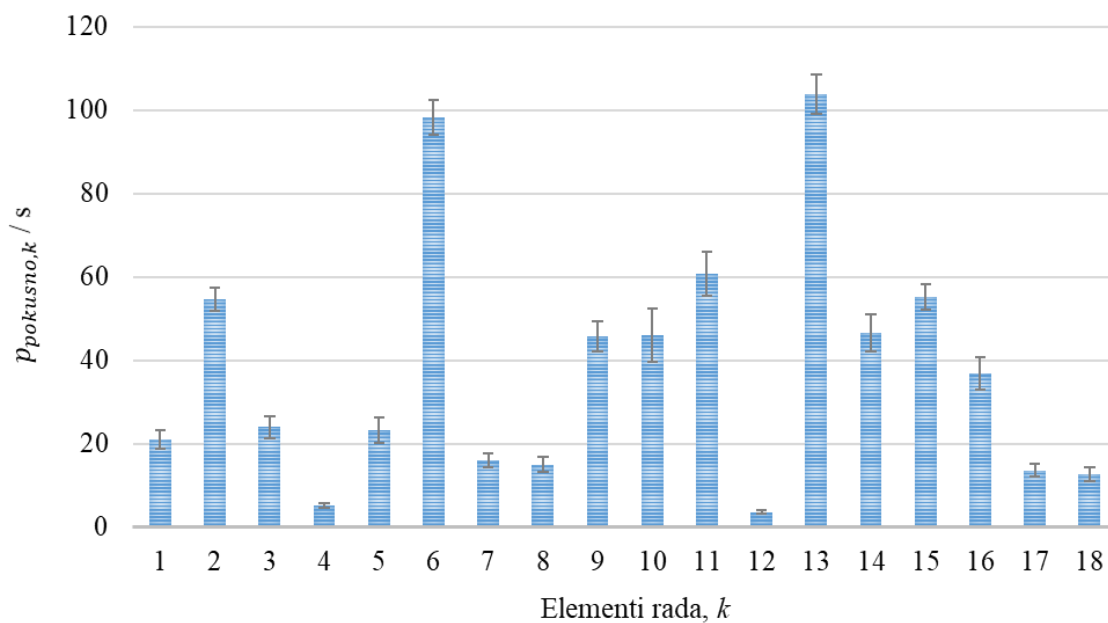
Slika 5.10. Primjer rasporeda ugradbenih dijelova na radnoj stanici prilikom određivanja idealnog vremena montaže proizvoda za element rada 9 i dio montaže

Provođenje eksperimenata za određivanje idealnog prosječnog vremena montaže elemenata rada podrazumijevalo je provođenje pokusnih snimanja. Pokusno snimanje je bitno jer se njime određuje približno trajanje svakog zahvata i čitave operacije kao i veličina uzorka. Pod pojmom veličina uzorka misli se na potrebni broj snimaka svakog elementa rada individualno na temelju izračunatog koeficijenta stabilizacije radnog mjesta. Pokusni uzorci (veličina uzorka pokusnog snimanja) mogu biti različitih veličina. Ovisno o veličini pokusnog uzorka, potrebni broj očitavanja određuje se pripadajućim izrazima, tablicama i nomogramima [132]. Potrebni broj snimaka je funkcija pouzdanosti procjene s kojom se želi utvrditi aritmetička sredina vremena u uzorku, točnost izračunavanja aritmetičke sredine vremena, te standardne devijacije vremena uzorka. On ovisi o vremenu trajanja pojedinog zahvata ili operacije i rasipanju vrijednosti vremena pojedinog operatera. U studiji vremena zadovoljava točnost od $\pm 5\%$ uz pouzdanost od 95,45%. Pri kraćem trajanju vremena pojedinog zahvata ili operacije, odstupanja snimljenih podataka relativno su veća nego za duža vremena trajanja rada, što znači da će trebati snimati više puta. S druge strane, pri dužem vremenu trajanja zahvata bit će dovoljan manji broj snimanja. Razlog tome je taj što pri kraćem trajanju vremena operater može raditi brže ili sporije, pa su i varijacije snimljenih podataka veće nego pri dužem vremenu rada. Pri dužem vremenu rada, varijacije vremena se poništavaju, a takt rada operatera teži k prosjeku [132], [133].

Promatrana veličina pokusnog uzorka za određivanje idealnih vremena montaže elemenata rada mjenjačke kutije je 10. Prosječna vremena montaže elemenata rada, $p_{pokusno,k}$, i njihova standardna odstupanja, $\sigma_{pokusno,k}$, u pokusnom snimanju prikazana su Tablicom 5.10. te grafom prikazanim na Slici 5.11.

Tablica 5.10. Prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje u pokusnom snimanju

Element rada	$p_{pokusno,k} / s$	$\sigma_{pokusno,k}$
1	21,1	2,23
2	54,6	2,80
3	24,0	2,62
4	5,2	0,63
5	23,4	3,02
6	98,2	4,11
7	16,1	1,66
8	15,1	1,91
9	45,9	3,60
10	46,1	6,31
11	60,9	5,28
12	3,7	0,48
13	103,8	4,61
14	46,6	4,35
15	55,3	3,02
16	36,8	3,88
17	13,7	1,56
18	12,8	1,69



Slika 5.11. Prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje u pokusnom snimanju

S obzirom da je veličina pokusnog uzorka za elemente rada iznosila 10, koeficijent stabilizacije radnog mjesta (K_s) za k -ti element rada iščitava se iz tablice u Prilogu E [132], [133]. Manji koeficijent stabilizacije znači da je potrebno izvršiti manji broj snimanja operacija (elemenata rada), i obratno. Na temelju rezultata dobivenih pokusnim uzorkom, izračunat je koeficijent stabilizacije prema izrazu 5.1. Pomoću njega određen je ukupan broj očitavanja (veličina uzroka) svakog pojedinog elementa rada za 95,45 %-tnu pouzdanost i ± 5 %-tnu točnost u izračunavanju srednje vrijednosti očitano vremena montaže. Očitane vrijednosti za svaki element rada prikazane su u Tablici 5.11.

$$K_s = \frac{(p_{pokusno,k})^{max} - (p_{pokusno,k})^{min}}{p_{pokusno,k}} \quad (5.1)$$

gdje je:

- $(p_{pokusno,k})^{max}$ - najveće vrijeme očitavanja k -tog elementa rada u probnom snimku
 $(p_{pokusno,k})^{min}$ - najmanje vrijeme očitavanja k -tog elementa rada u probnom snimku.

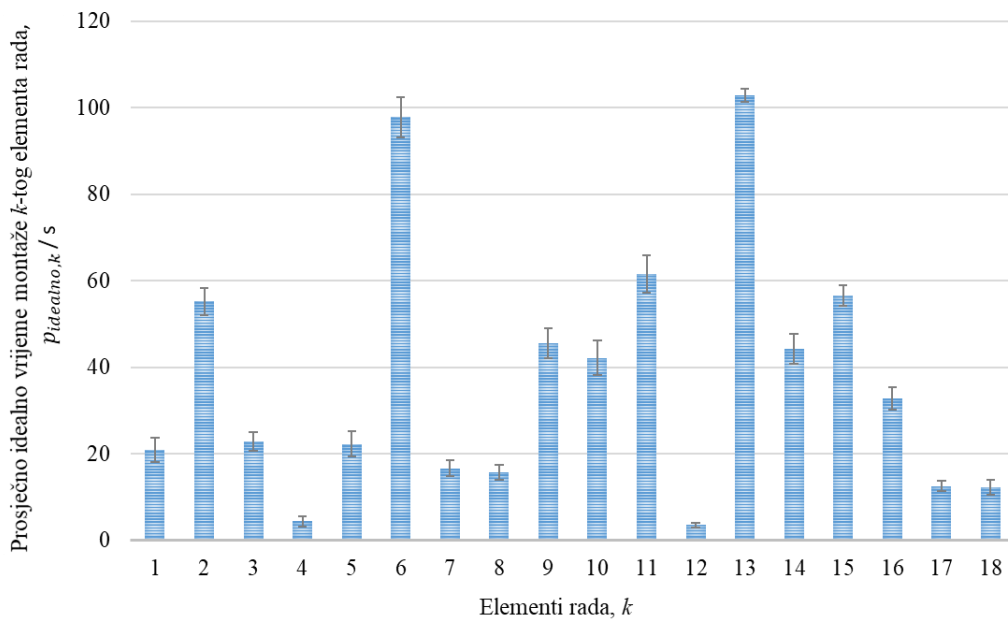
Tablica 5.11. Potrebni broj snimaka za svaki element rada prema koeficijentu stabilizacije

Element rada	K_s	Potreban broj snimaka $S_{snimke,k}$
1	0,33	19
2	0,15	4
3	0,33	19
4	0,38	24
5	0,34	20
6	0,14	3
7	0,31	16
8	0,21	8
9	0,22	8
10	0,37	23
11	0,20	7
12	0,27	12
13	0,13	3
14	0,26	11
15	0,13	3
16	0,30	15
17	0,29	14
18	0,39	26

Na temelju dobivenih podataka napravljeni su novi eksperimenti. Dobivene su vrijednosti prosječnih vremena montaže elemenata rada koje predstavljaju njihova idealna prosječna vremena montaže, $p_{idealno,k}$. Vrijednosti idealnih prosječnih vremena montaže elemenata rada te njihova standardna odstupanja, prikazane su u Tablici 5.12. i na Slici 5.12. Na temelju njih, vrši se postupak balansiranja montažne linije primjenom LCR metode. Opis LCR metode dan je u Prilogu A.

Tablica 5.12. Idealna prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje

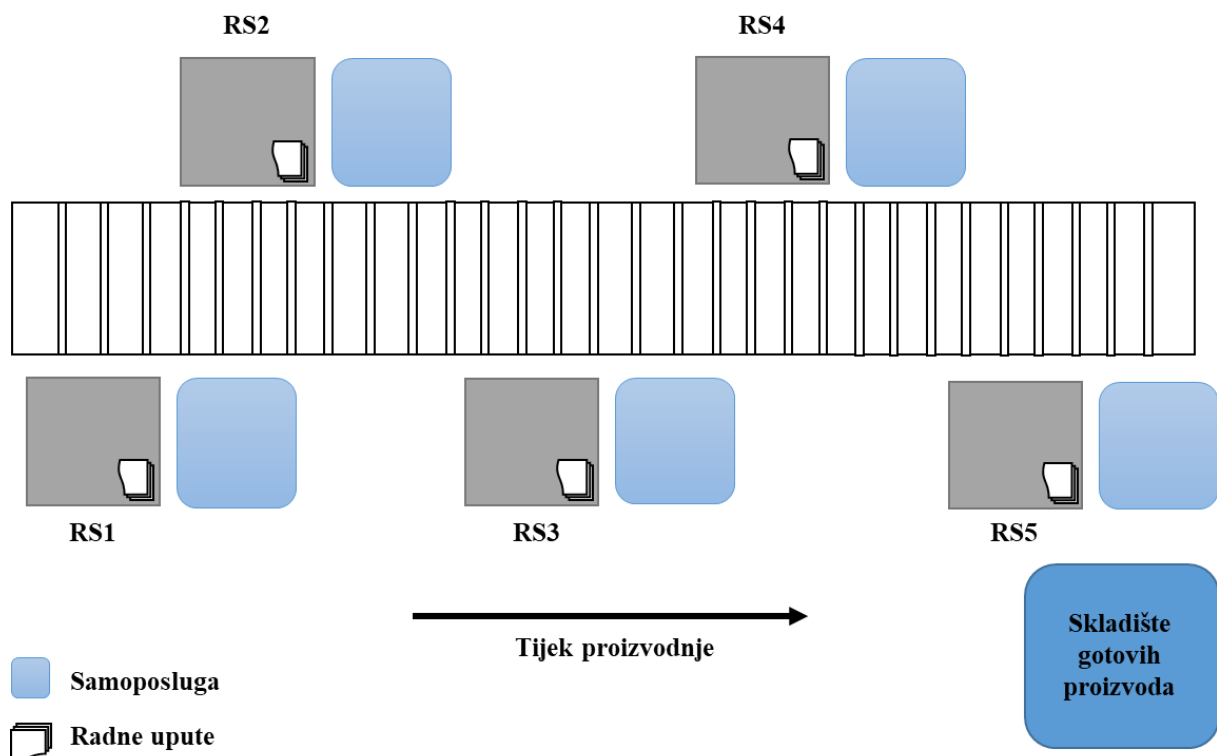
Element rada	$p_{idealno,k}$ / s	$\sigma_{idealno,k}$
1	20,9	2,73
2	55,2	3,19
3	22,9	2,21
4	4,4	1,26
5	22,3	2,87
6	97,8	4,65
7	16,7	1,79
8	15,8	1,75
9	45,6	3,47
10	42,2	4,03
11	61,6	4,31
12	3,6	0,51
13	102,8	1,50
14	44,3	3,45
15	56,5	2,38
16	32,9	2,59
17	12,6	1,22
18	12,3	1,72



Slika 5.12. Idealna prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje

5.2.2. Balansiranje mjenjačke kutije automobila jednog proizvoda primjenom LCR metode – inicijalno balansiranje

Inicijalno balansiranje elemenata rada mjenjačke kutije automobila provedeno je na postojećoj montažnoj liniji koja se sastoji od pet radnih stanica. Dakle, riječ je o SALPB-II kojim se nastoji postići minimalan takt proizvodnje za poznati broj radnih stanica. Balansiranjem se nastoje ujednačiti vremena rada među radnim stanicama, odnosno nastoje se uravnotežiti radna opterećenja među operaterima u svrhu povećanja proizvodnosti. Montažna linija s transportnom vrpcom na kojoj se vrši balansiranje predstavlja „I“ liniju s ručnom montažom, a njezin shematski prikaz dan je na Slici 5.13. Svaka radna stanica ima jednog operatera te je opremljena samoposlugom dijelova, radnim uputama i potrebnim alatima. Prijenos podsklopova između radnih stanica ostvaruje se preko transportne vrpce kako bi se spriječilo fizičko opterećenje operatera, i sukladno tome kako bi se poboljšalo i njegovo fizičko i mentalno opterećenje. Pod fizičkim opterećenjem operatera misli se na opterećenje koje nastaje prenašanjem teških podsklopova s jedne radne stanice na drugu.



Slika 5.13. Shema montažne linije mjenjačke kutije automobila

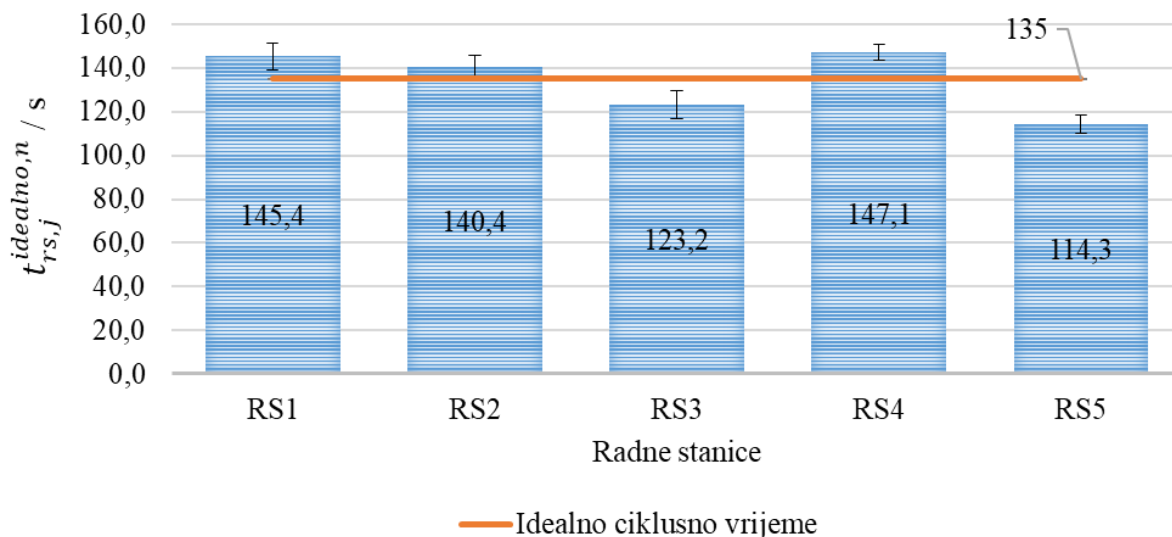
Na temelju dobivenih vrijednosti idealnih prosječnih vremena montaže elemenata rada, Tablica 5.12., i dijagrama prethodnosti mjenjačke kutije YZS, Slika 5.8., definirani su ulazni podaci, Slika 5.14., za proces raspodjele zadataka na radne stanice primjenom LCR metode. Prije provođenja postupka raspodjele elemenata rada, uočeno je da se elementi rada pet i šest moraju montirati na istoj radnoj stanici s obzirom na prirodu proizvoda i težinu ovih elemenata, stoga su ovi elementi rada promatrani kao jedan element.

Ulazni podaci					
Kriterij za "Lookup" funkciju	Element rada	<i>Pidealno,k</i>	Neposredni prethodnik	Element rada	Simbol za element rada
	0	A	0	--	0
20,9	B	20,9	A	1	B
55,2	C	55,2	B	2	C
22,9	D	22,9	C	3	D
4,4	E	4,4	A	4	E
120,1	W	120,1	B	5 + 6	F + G = W
16,7	H	16,7	C	7	H
15,8	I	15,8	H	8	I
45,6	J	45,6	E, W, H	9	J
42,2	K	42,2	I, J	10	K
61,6	L	61,6	K	11	L
3,6	M	3,6	K, L	12	M
102,8	N	102,8	M	13	N
44,3	O	44,3	N	14	O
56,5	P	56,5	N	15	P
32,9	R	32,9	N	16	R
12,6	S	12,6	N	17	S
12,3	T	12,3	N	18	T

Slika 5.14. Ulazni podaci za LCR simulaciju

Kako je već rečeno, broj radnih stanica na montažnoj liniji je fiksna. Sukladno tome, izračunato je idealno teoretsko vrijeme ciklusa montažne linije. Zaokruženo na prvi veći iznos ono iznosi 135 s. Idealno teoretsko vrijeme ciklusa služi za definiranje početne vrijednosti ukupnog vremena ciklusa u LCR simulaciji, Slika 5.14. Vrijednost ukupnog vremena ciklusa u simulaciji se povećava za iznos od pet sekundi sve dok se ne postigne raspodjela svih elemenata rada na pet radnih stanica. Kada je ukupno vrijeme ciklusa doseglo vrijednost od 150 s, svi elementi rada su raspodijeljeni na radne stanice. Postignuta raspodjela elemenata rada po radnim stanicama nakon balansiranja prikazana je na Slici 5.15., dok je na Slici 5.16. prikazana raspodjela elemenata rada zajedno s njihovim ugradbenim elementima.

promatranog proizvoda na radnoj stanici j . Iz slike se može uočiti da je minimalno vrijeme mirovanja radnih stanica približno četiri sekunde. Stoga, teoretsko ciklusno vrijeme montažne linije ovako raspoređenih elemenata rada iznosi 146 s.



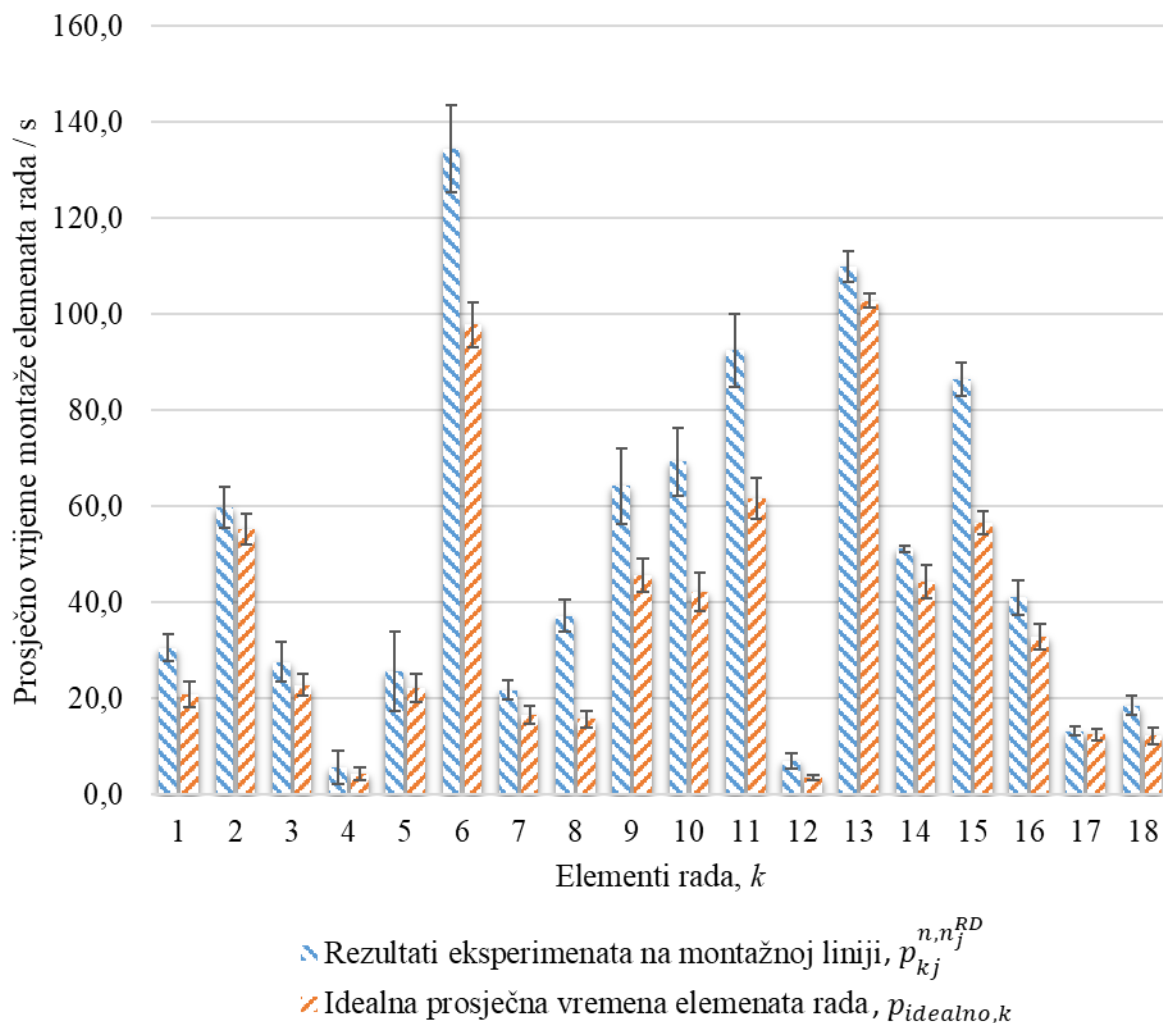
Slika 5.17. Raspodjela radnog opterećenja po radnim stanicama nakon provođenja LCR metode

Postignuta raspodjela elemenata rada po radnim stanicama realizirana je na stvarnoj montažnoj liniji. Na svakoj radnoj stanici ugradbeni dijelovi su smješteni unutar pripadajuće kutije u samoposluzi dijelova. Pripadajući alati za elemente rada koji se montiraju na radnoj stanici smješteni su na radnoj podlozi. Provedeno je 16 eksperimenata u kojima je mjereno vrijeme montaže k -tog elementa rada. Rezultati prosječnih vremena montaže k -tih elemenata rada nakon provođenja eksperimenata prikazani su u Tablici 5.13., dok su na Slici 5.18. prikazani rezultati usporedbe prosječnih idealnih vremena montaže k -tih elemenata rada i njihovih prosječnih vremena montaže nakon provođenja eksperimenata $p_{kj}^{n,n_j^{RD}}$.

Tablica 5.13. Prosječna vremena montaže elemenata rada i njihovo standardno odstupanje nakon provođenja eksperimenata na montažnoj liniji

Element rada	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
0*	4,8	0,9
1	30,6	2,8
2	59,8	4,24
3	27,7	4,12
4	5,7	3,4
5	25,7	8,3
6	134,4	9,07
7	21,8	1,99
8	37,2	3,33
9	64,3	7,83
10	69,3	7,13
11	92,5	7,58
12	7,1	1,66
13	109,9	3,21
14	51,2	0,63
15	86,5	3,46
16	41,1	3,56
17	13,3	0,89
18	18,6	2,07

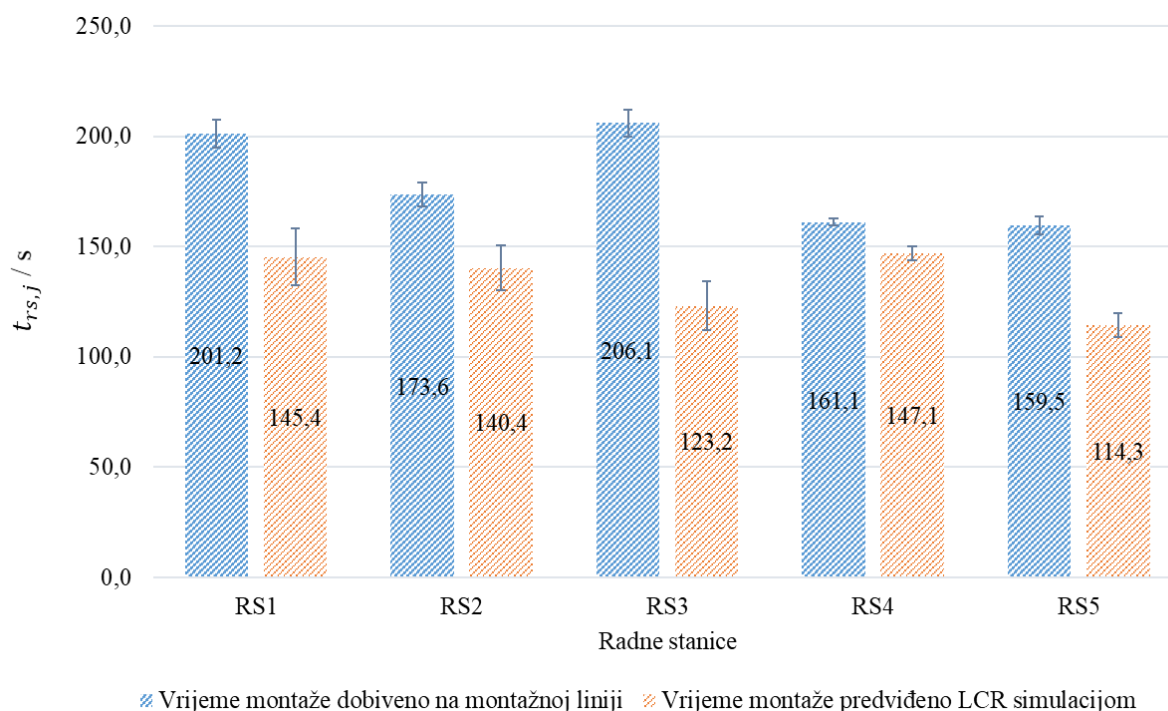
* nula se odnosi na bazni dio proizvoda, njegovo prosječno vrijeme odnosi se na prosječno vrijeme transporta kućišta do prve radne stanice



Slika 5.18. Usporedba prosječnih vremena montaže elemenata rada dobivena eksperimentima na montažnoj liniji i idealnih prosječnih vremena montaže elemenata rada

Usporedbom prosječnih vremena montaže elemenata rada, Slika 5.18., mogu se uočiti odstupanja u vremenima montaže svakog elementa rada pojedinačno. Razlike su rezultat smještaja i raspodjele ugradbenih elemenata rada u samoposluzi dijelova, njihove orijentacije te rada operatera. Naime, kao što je već rečeno, u prvom mjerenju kada su se određivala idealna vremena montaže elemenata rada, na radnoj stanici nalazili su se isključivo ugradbeni dijelovi promatranog elementa rada orijentirani u smjeru ugradnje te pripadajući potrebni alati. Pri provođenju eksperimenata na montažnoj liniji, elementi rada bili su pridruženi radnim stanicama. Njihovi ugradbeni dijelovi nalazili su se u samoposluzi dijelova (dijelovi nisu orijentirani u smjeru ugradnje) i operater je trebao pronaći i uzeti svaki ugradbeni dio pojedinačno te ga montirati. Osim neorijentiranosti dijelova, porastom broja elemenata rada koji se montiraju na jednoj radnoj stanici došlo je i do porasta raznolikosti sadržaja rada na

njoj, a time i do porasta raznolikosti dijelova, raznolikosti alata te sadržaja uputa za rad. Nabrojani čimbenici zasigurno su utjecali na porast vremena montaže. Kao posljedica porasta raznolikosti, vremena montaže radnih stanica razlikuju se od onih predviđenih LCR simulacijom, a idealno vrijeme ciklusa u ovom slučaju iznosi 180 s. Uspoređeni rezultati radnog opterećenja radnih stanica dobiveni primjenom LCR simulacije i provođenjem eksperimenata na montažnoj liniji dani su na Slici 5.19.



Slika 5.19. Raspodjela radnog opterećenja po radnim stanicama dobivena provođenjem eksperimenata na montažnoj liniji te na temelju idealnih prosječnih vremena

Osim porasta idealnog vremena ciklusa, iz Slike 5.19. uočljivo je da je najveća razlika u predviđenim vremenima primjenom simulacije i u eksperimentima na montažnoj liniji prisutna na radnoj stanici 3 (RS3). Ovu radnu stanicu karakterizira najveća raznolikost ugradbenih elemenata u odnosu na ukupan broj dijelova koji se na njoj izrađuju, Tablica 5.14. Najmanju raznolikost dijelova ima radna stanica četiri (RS4). Sukladno tome, vrijeme montaže ove radne stanice dobiveno eksperimentalnim putem najmanje odstupa u odnosu na vrijeme koje je predviđeno simulacijom. Udio porasta vremena preostalih radnih stanica ukazuje na jači utjecaj ili raznolikih dijelova ili raznolikih alata koji se koriste. Modifikacijom izraza (3.18) izračunata je ukupna balansiranost montažne linije koja iznosi 87,5 %. Izračunata vrijednost smatra se

prihvatljivom balansiranošću montažne linije. Stoga se na temelju ove preraspodjele elemenata rada pristupa uvođenju raznolikosti te balansiraju MMAL-a.

Tablica 5.14. Usporedba raznolikosti na radnim stanicama

	RS1	RS2	RS3	RS4	RS5
Broj elemenata rada / kom:	5*	4	4	2	4
Broj raznolikih ugradbenih dijelova / kom:	14	21	20	6	13
Ukupan broj dijelova / kom:	23	24	20	28	27
Broj raznolikih alata / kom:	4	1	2	2	6
Udio raznolikih dijelova na RS / %:	61	87,5	100	21	48
* uključen je i bazni dio (donje kućište mjenjačke kutije)					

5.2.3. Provođenje balansiranja MMAL radi uočavanja povezanosti s pokazateljem kompleksnosti montaže

Prethodna raspodjela elemenata rada proizašla iz balansiranja linije za montažu jednog proizvoda (poglavlje 5.2.2.) poslužila je kao polazišno stanje za uvođenje raznolikih proizvoda na montažnu liniju. Kao što je prethodno spomenuto, balansiranje MMAL odvija se za tri raznolika proizvoda: YZS, YAS te SZN. Promatrani proizvodi imaju gotovo jednak broj ugradbenih dijelova. Razlike ugradbenih dijelova elemenata rada promatranih proizvoda uočljive su u Prilogu D. Tokom izvođenja eksperimenata uočeno je da se element rada 15 razlikuje kod proizvoda SZN, odnosno da mu nedostaje jedan dio. Stoga su provedeni eksperimenti kako bi se odredilo idealno vrijeme montaže elementa rada 15 za proizvod SZN. Provođenjem eksperimenata određeno je da ova vrijednost iznosi 40,2 s sa standardnom devijacijom od 2,76.

Za uočavanje utjecaja raznolikosti proizvoda na raspodjelu radnog opterećenja na montažnoj liniji, definiran je uzorak proizvoda. Udjeli proizvoda u uzorku jednaki su kao i u prethodnim studijama slučaja kada su se razmatrala tri proizvoda, te su prikazani u Tablici 5.15.

Tablica 5.15. Definirani slijed proizvoda i uzorak

Definirani slijed proizvoda	
Oznaka proizvoda	Broj komada u slijedu
YZS	1
YAS	1
SZN	2

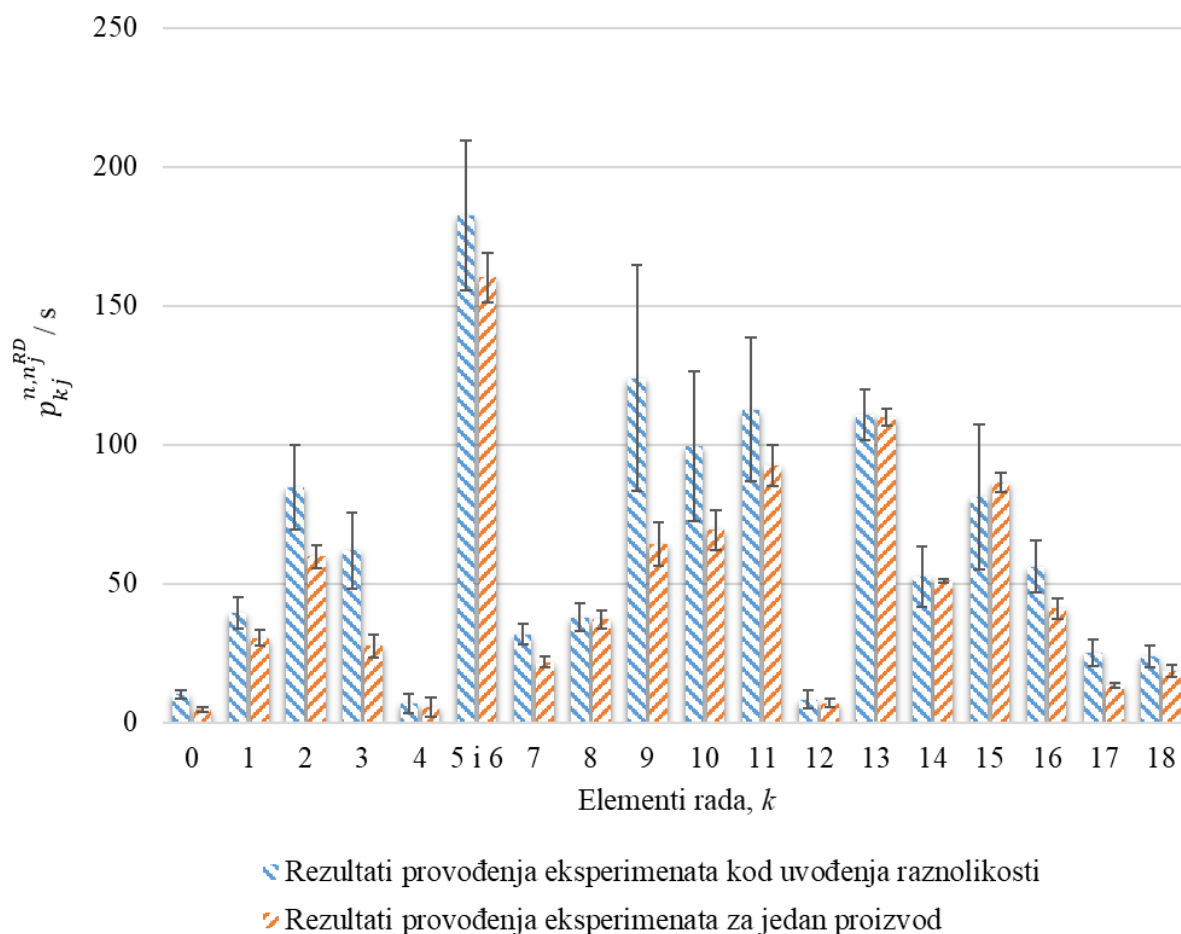
Za definirani uzorak proizvoda provedena su 24 eksperimenta. Rezultati prosječnih vremena elemenata rada za definirani uzorak proizvoda prikazani su u Tablici 5.16. S obzirom da se elementi rada 5 i 6 moraju nalaziti na istoj radnoj stanici i slijediti jedan drugog u montaži, njihova vremena montaže promatrana su zajedno.

Tablica 5.16. Prosječna vremena elemenata rada kod uvođenja raznolikih proizvoda na montažnu liniju

Element rada	$p_{kj}^{n,n^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n^{RD}}$
0*	10,2	1,53
1	39,5	5,7
2	84,7	15,0
3	62,0	13,6
4	6,9	3,4
5+6	182,6	26,9
7	31,8	3,7
8	37,8	5,0
9	123,9	40,6
10	99,5	26,9
11	112,6	25,9
12	8,4	3,1
13	110,7	9,1
14	52,4	10,8
15	81,3	26,0
16	56,2	9,3
17	25,2	4,9
18	23,9	3,8

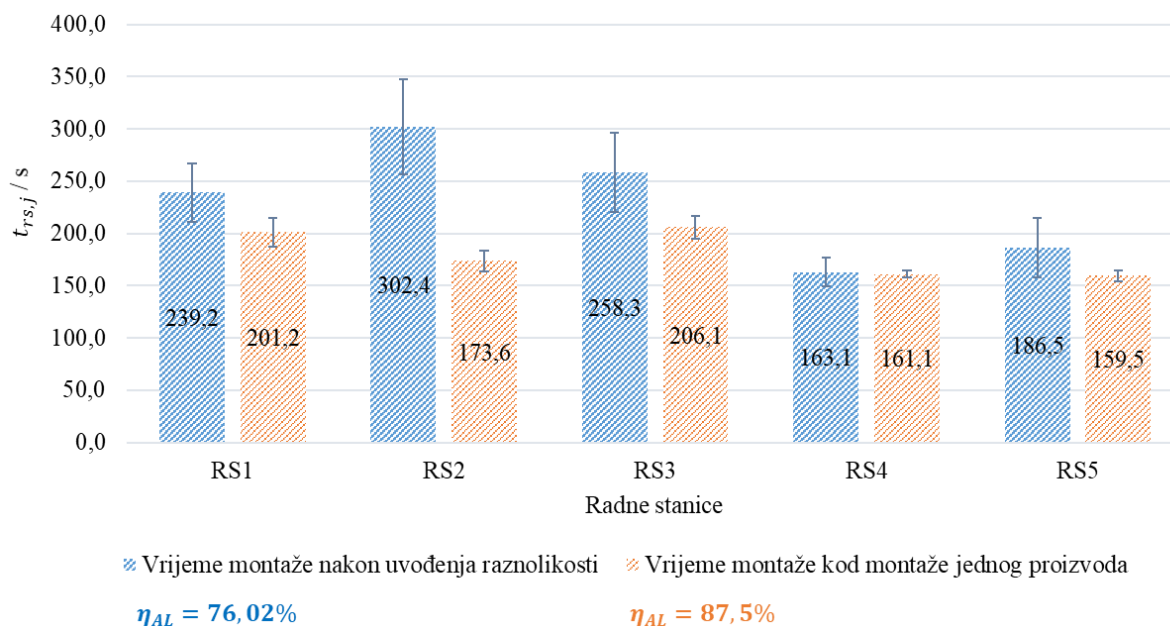
* nula se odnosi na bazni dio proizvoda, njegovo prosječno vrijeme odnosi se na prosječno vrijeme uočavanja potrebnog kućišta na uputama, njegovog pronalaženja te transporta do prve radne stanice

Na Slici 5.20. prikazani su rezultati prosječnih vremena montaže elemenata rada dobiveni provođenjem eksperimenata kod montažne linije s jednim proizvodom, te rezultati prosječnih vremena montaže dobiveni eksperimentima nakon uvođenja raznolikih proizvoda u montažnu liniju. Iz grafa su uočljive razlike među uspoređenim vrijednostima te velike varijacije prosječnih vremena montaže elemenata rada koje se javljaju zbog pojave raznolikih proizvoda.



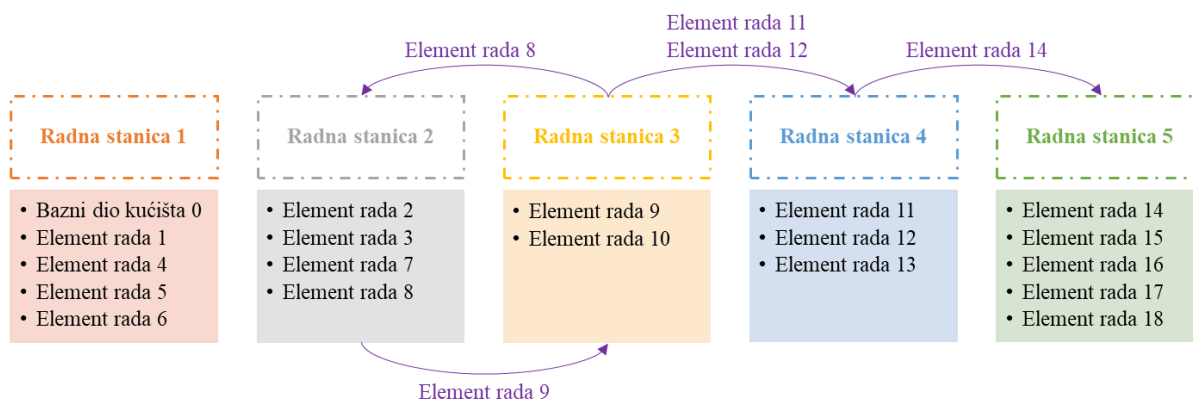
Slika 5.20. Usporedba prosječnih vremena montaže elemenata rada kod montaže jednog proizvoda i nakon uvođenja raznolikih proizvoda u montažnu liniju balansiranu na temelju jednog proizvoda

Zbog porasta prosječnih vremena montaže elemenata rada nakon uvođenja raznolikih proizvoda, ukupna balansiranoost montažne linije pada. Naime, na temelju dobivenih rezultata eksperimenata, Tablica 5.16., izračunato je ukupno vrijeme montaže svake pojedine radne stanice koje je poslužilo za izračun ukupne balansiranoosti montažne linije. Prosječna vremena montaže po radnim stanicama dobivena provođenjem eksperimenata nakon uvođenja raznolikosti te prije uvođenja raznolikosti prikazana su na Slici 5.21. Iz slike je uočljivo da s porastom raznolikosti proizvoda koji se montiraju na montažnoj liniji, prethodna raspodjela opterećenja više nije prihvatljiva jer rezultira s niskom razinom ukupne balansiranoosti montažne linije. Štoviše, usko grlo montažne linije sada postaje radna stanica 2. Razlog tome pripisuje se porastu broja raznolikih ugradbenih elemenata koje novi proizvodi zahtijevaju kao i velikoj različitosti dijelova koji se sastavljaju.



Slika 5.21. Usporedba radnog opterećenja na radnim stanicama kod jednog proizvoda i nakon uvođenja raznolikih proizvoda

U ovom slučaju, ukupna balansiranost montažne linije iznosi 76,02 %. Odlučeno je da ova razina balansiranosti nije zadovoljavajuća, stoga je na temelju dobivenih rezultata eksperimenata provedena LCR simulacija kako bi se izvršila preraspodjela pojedinih elemenata rada u svrhu postizanja bolje raspodjele opterećenja među radnim stanicama. Kada je ciklusno vrijeme doseglo vrijednost od 240 s postignuta je raspodjela elemenata rada na pet radnih stanica. Rezultati provedene simulacije prikazani su na Slici 5.22.



Slika 5.22. Preraspodjela elemenata rada na temelju rezultata o prosječnim vremenima montaže dobivenim nakon uvođenja raznolikih proizvoda

Nakon preraspodjele elemenata rada, provedeni su eksperimenti. Dobiveni rezultati prosječnih vremena montaže elemenata rada prikazani su u Tablici 5.17.

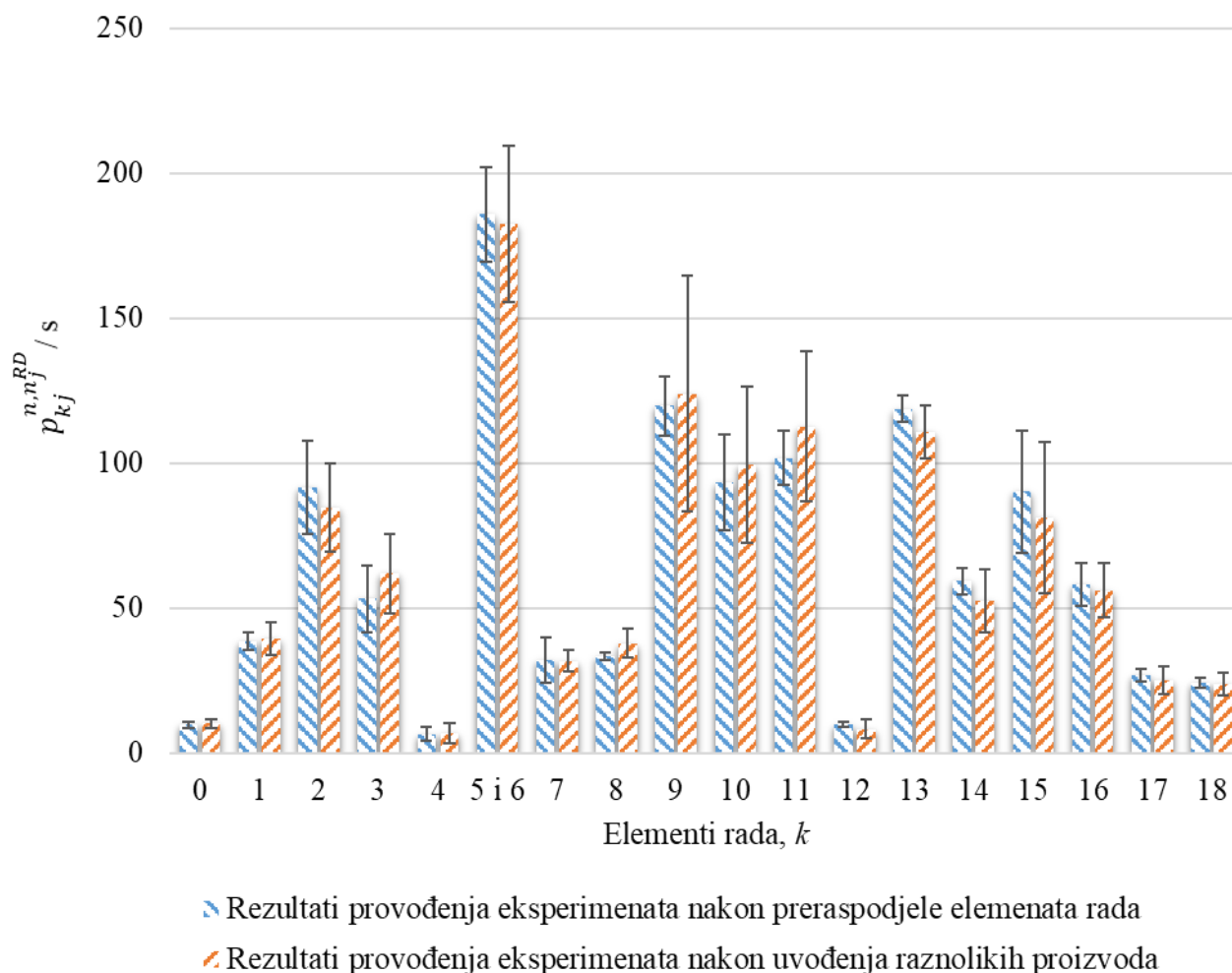
Tablica 5.17. Rezultati prosječnih vremena montaže elemenata rada nakon njihove preraspodjele

Element rada	$p_{kj}^{n,n_j^{RD}} / s$	$\sigma_{kj}^{n,n_j^{RD}}$
0*	9,75	1,28
1	38,6	3,05
2	91,6	16,07
3	53,4	11,52
4	6,6	2,3
5+6	185,8	16,32
7	32,2	7,82
8	33,4	1,34
9	119,8	10,15
10	93,2	16,5
11	101,8	9,22
12	9,8	0,84
13	118,8	4,49
14	59,3	4,65
15	90,3	21,05
16	58,3	7,46
17	26,8	2,22
18	24,3	1,71

* nula se odnosi na bazni dio proizvoda, njegovo prosječno vrijeme odnosi se na prosječno vrijeme uočavanja potrebnog kućišta na uputama, njegovog pronalaženja te transporta do prve radne stanice

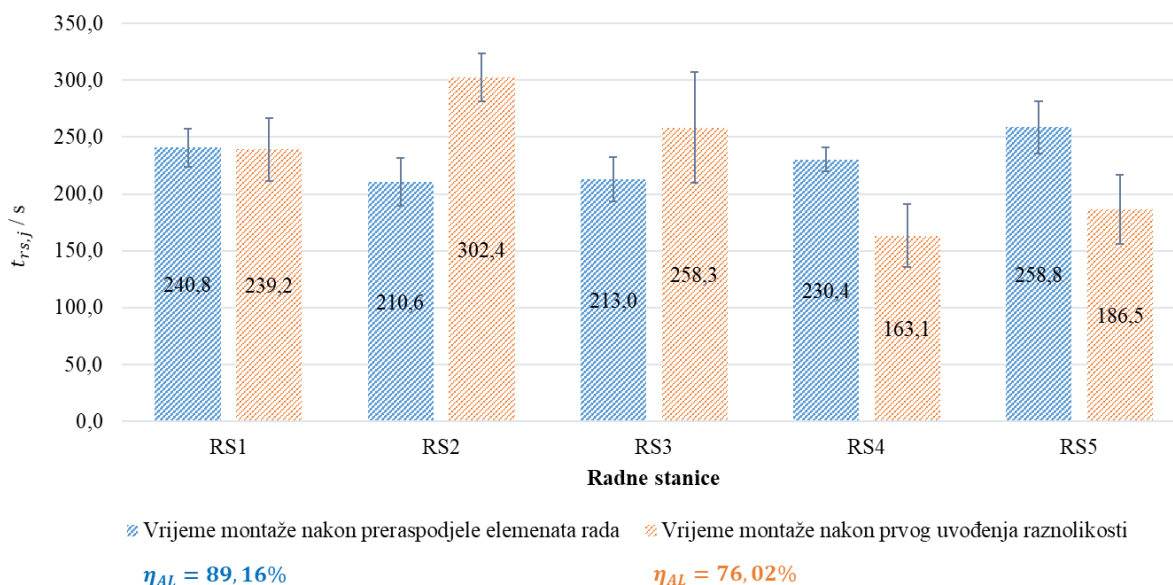
Usporedba prosječnih vremena montaže elemenata rada dobivena nakon provođenja eksperimenata nakon uvođenja raznolikih proizvoda u montažnu liniju, Tablica 5.16. te prosječnih vremena montaže elemenata rada nakon preraspodjele elemenata rada, Tablica 5.17., prikazana je na Slici 5.23. Iz slike je uočljivo da se drugačijom preraspodjelom rada, vrijednosti prosječnih vremena montaže elemenata rada mijenjaju. Trend rasta ili pada prosječnih vremena montaže elemenata rada u ove dvije raspodjele, ovisi o konačnom broju elemenata rada koji se montiraju na promatranoj radnoj stanici u odnosu na prethodnu raspodjelu. Oni elementi rada koji su premješteni na radne stanice na kojima je raznolikost elemenata rada veća, rezultirali su većim prosječnim vremenom montaže. S druge strane, oni

elementi rada koji se sada sastavljaju na radnoj stanici koju karakterizira manji broj elemenata rada, rezultirali su s nižim prosječnim vrijednostima u odnosu na prethodnu raspodjelu. Štoviše, nova raspodjela elemenata rada rezultira i nižim varijacijama vremena montaže pojedinog elementa rada.



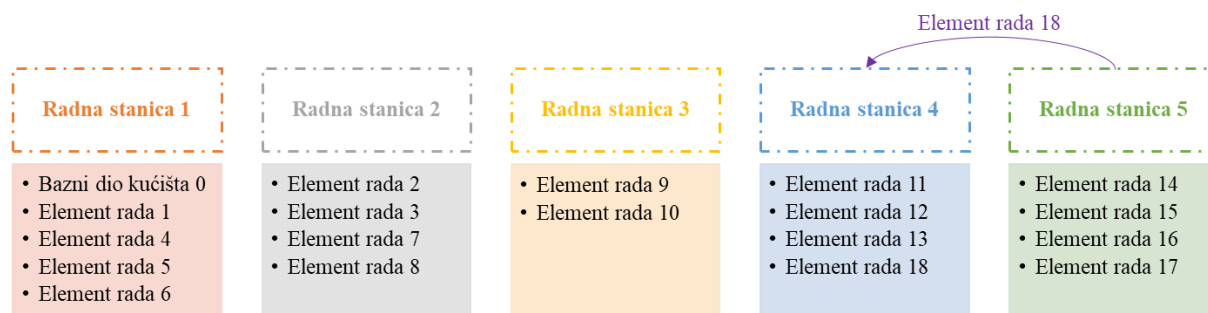
Slika 5.23. Usporedba rezultata prosječnih vremena montaže elemenata rada

Nova raspodjele elemenata rada po radnim stanicama rezultira ravnomjernijom raspodjelom raznolikih ugradbenih dijelova po radnim stanicama. Bolja raspodjela elemenata rada znači bolju balansiranost montažne linije. Usporedba balansiranosti ovih dviju montažnih linija te usporedba rezultata prosječnih vremena montaže elemenata rada po radnim stanicama prikazani su na Slici 5.24.



Slika 5.24. Opterećenja po radnim stanicama pri montaži raznolikih proizvoda

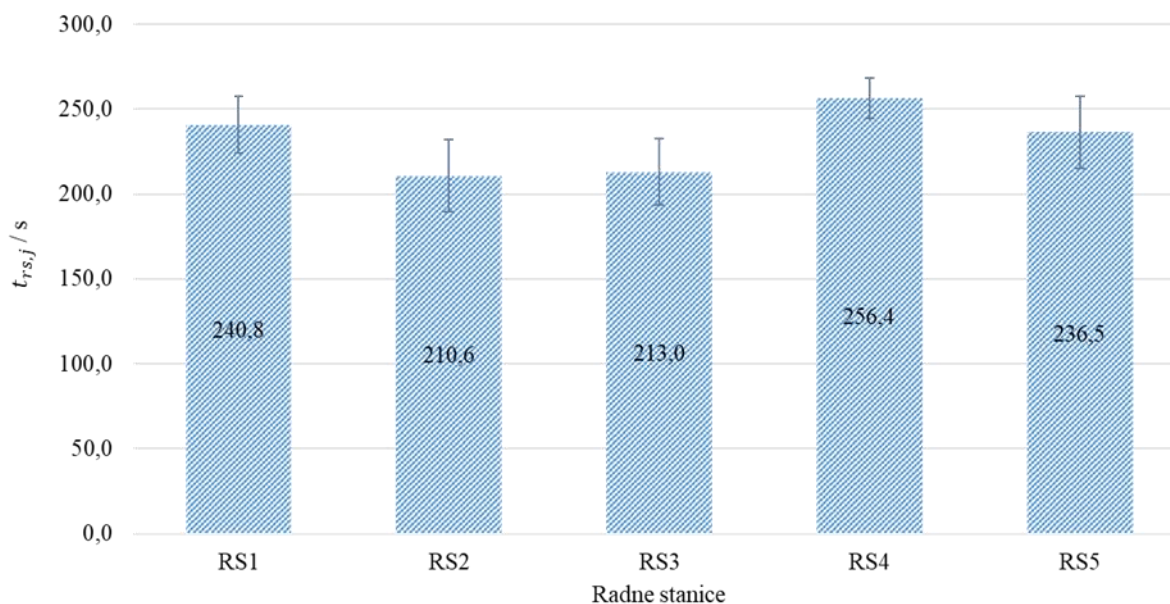
Odlučeno je da se na temelju postignutih rezultata napravi još jedna preraspodjela elemenata rada primjenom LCR simulacije, kako bi se uočilo je li moguće postići bolju balansiranost od 89,16 %. Kada je ciklusno vrijeme doseglo vrijednost od 255 s postignuta je preraspodjela elemenata rada na pet radnih stanica. Rezultati provedene simulacije prikazani su Slici 5.25.



Slika 5.25. Preraspodjela opterećenja nakon ponovnog provođenja LCR simulacije

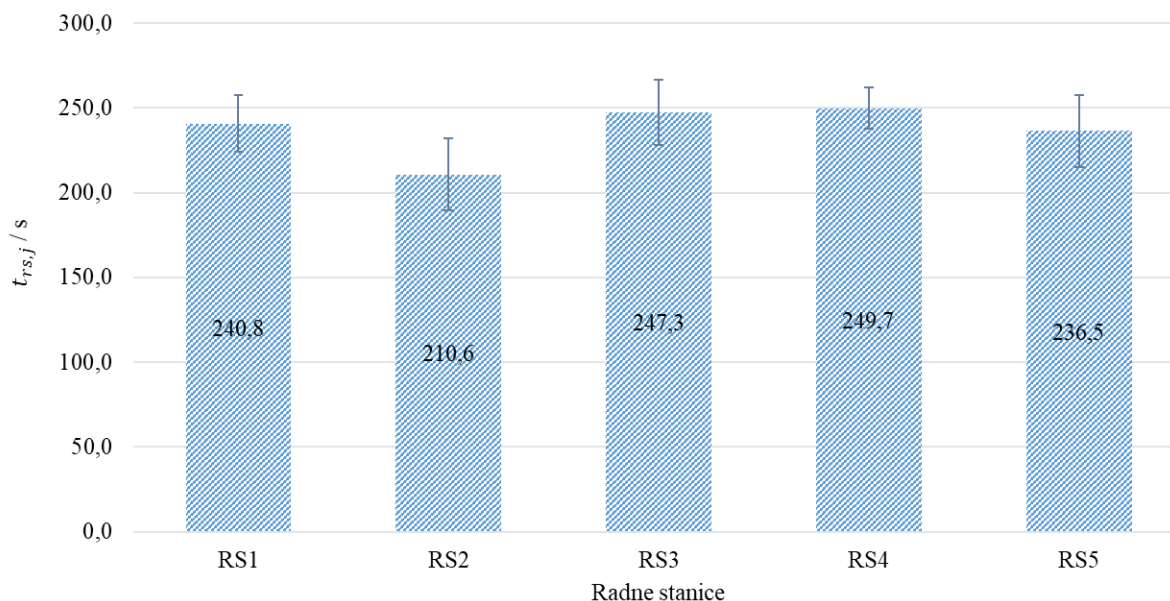
Kao što je uočljivo iz Slike 5.25., primjenom LCR simulacije došlo je do preraspodjele samo jednog elementa rada, elementa rada 18 s radne stanice pet na radnu stanicu četiri. Sve preostale radne stanice imaju jednaku raspodjelu elemenata rada. Stoga su eksperimenti napravljeni samo za ove dvije radne stanice. Rezultati o prosječnim vremenima montaže elemenata rada po radnim stanicama prikazani su na Slici 5.26. Ovakvom raspodjelom postignuta je balansiranost od 90,27 %. S obzirom na prirodu proizvoda i ograničenja prethodnosti njegovih ugradbenih dijelova, zaključeno je da ne postoje više elemenata rada koji se s četvrte i pete

radne stanice mogu prebaciti na njima uzvodne radne stanice u cilju ravnomjernije raspodjele opterećenja. Također, uočeno je i da ne postoje elementi rada koji se mogu prebaciti s radne stanice četiri na radnu stanicu pet kako bi se opterećenje radne stanice četiri smanjilo.



Slika 5.26. Opterećenje radnih stanica nakon posljednje preraspodjele elemenata rada

Stoga, odlučeno je da se element rada 11 podijeli na dvije manje cjeline te da se njegova izvedba podijeli između radne stanice 3 i č4 ovisno o vrsti mjenjačke kutije koja se montira. Sve preostale radne stanice imaju jednaku raspodjelu elemenata rada, stoga za njih nisu napravljeni eksperimenti. Rezultati o prosječnim vremenima montaže elemenata rada po radnim stanicama prikazani su na Slici 5.27. Ovakvom raspodjelom rada postignuta je balansiranoost od 94,90 %. Ovim je procedura balansiranja privedena kraju.



Slika 5.27. Opterećenje radnih stanica nakon podjele elementa rada na manje cjeline koje se montiraju na različitim radnim stanicama

5.2.4. Usporedba stvarne vrijednosti pokazatelja kompleksnosti montaže i vrijednosti dobivene razvijenim matematičkim modelom

Na temelju prethodno dobivenih rezultata balansiranja radnih stanica na montažnoj liniji kod montaže raznolikih proizvoda, napravljene su usporedbe vrijednosti pokazatelja kompleksnosti montaže na razini radne stanice s vrijednostima pokazatelja kompleksnosti montaže dobivenim iz izraza (4.4). Izraz (4.4) definiran je za raspon raznolikosti proizvoda od 3 do 7, te za raspon raznolikosti ugradbenih elemenata (kutija) od četrnaest do dvadeset. Određene radne stanice u prethodno opisanoj studiji slučaja balansiranja montažne linije mjenjačke kutije automobila, zadovoljavaju definirani raspon. Međutim, s obzirom na robusnost modela, za vrijednosti koje se nalaze van raspona, moguće je ekstrapolacijom dobiti vrijednosti kompleksnosti. Vrijednosti kompleksnosti montaže predviđene na temelju izraza (4.4) te vrijednosti kompleksnosti montaže radne stanice dobivene izrazom (4.2) za radne stanice koje zadovoljavaju definirani raspon izraza, prikazane su na Slici 5.28. Kao što je uočljivo iz slike, predloženi izraz za definiranje kompleksnosti montaže na razini radne stanice dobro opisuje kompleksnost montaže za različite vrste proizvoda. Pogreška predviđanja vrijednosti dobivenih izrazom (4.4) i stvarnih vrijednosti kompleksnosti montaže na razini promatrane radne stanice nalazi se unutar 10 %, što je zadovoljavajuće. U slučaju da se želi još preciznije predvidjeti kompleksnost montaže, u matematički izraz potrebno je uključiti još parametara koji su

spomenuti u poglavlju 4.2. Uočeno daje smjernice za daljnja istraživanja koja su pojašnjena u poglavlju 6.

Eksperimenti nakon uvođenja raznolikosti na montažni liniju za proizvodnju jednog proizvoda, $\eta_{AL} = 76,02\%$				
Broj ugradbenih dijelova, tj. raznolikih kutija i broj raznolikih alata	Idealno prosječno vrijeme radne stanice	Prosječno vrijeme radne stanice dobiveno eksperimentima	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$	
			Dobiveno eksperimentima	Predviđeno (izraz (4.4))
$\eta_1^{RD} = 15, \eta_1^{RA} = 4$	$t_{rs,1}^{idealno} = 145,4 \text{ s}$	$t_{rs,1} = 239,2 \text{ s}$	1,65	1,77
$\eta_5^{RD} = 15, \eta_5^{RA} = 6$	$t_{rs,5}^{idealno} = 106,2 \text{ s}$	$t_{rs,2} = 186,5 \text{ s}$	1,76	1,77

Eksperimenti nakon preraspodjele elemenata rada na MMAL, $\eta_{AL} = 89,16\%$				
Broj ugradbenih dijelova, tj. raznolikih kutija i broj raznolikih alata	Idealno prosječno vrijeme radne stanice	Prosječno vrijeme radne stanice dobiveno eksperimentima	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$	
			Dobiveno eksperimentima	Predviđeno (izraz (4.4))
$\eta_1^{RD} = 15, \eta_1^{RA} = 4$	$t_{rs,1}^{idealno} = 145,4 \text{ s}$	$t_{rs,1} = 240,8 \text{ s}$	1,66	1,77
$\eta_2^{RD} = 17, \eta_1^{RA} = 1$	$t_{rs,2}^{idealno} = 110,6 \text{ s}$	$t_{rs,2} = 210,6 \text{ s}$	1,90	1,84
$\eta_5^{RD} = 18, \eta_5^{RA} = 6$	$t_{rs,5}^{idealno} = 150,5 \text{ s}$	$t_{rs,5} = 258,8 \text{ s}$	1,72	1,87

Eksperimenti nakon druge preraspodjele elemenata rada na MMAL, $\eta_{AL} = 90,27\%$				
Broj ugradbenih dijelova, tj. raznolikih kutija i broj raznolikih alata	Idealno prosječno vrijeme radne stanice	Prosječno vrijeme radne stanice dobiveno eksperimentima	$\lambda_j^{n,n_j^{RD}}$	
			Dobiveno eksperimentima	Predviđeno (izraz (4.4))
$\eta_5^{RD} = 17, \eta_5^{RA} = 5$	$t_{rs,5}^{idealno} = 138,2 \text{ s}$	$t_{rs,5} = 236,5 \text{ s}$	1,71	1,84

Slika 5.28. Usporedba pokazatelja kompleksnosti montaže dobivena razvijenim matematičkim modelom te stvarne vrijednosti kompleksnosti

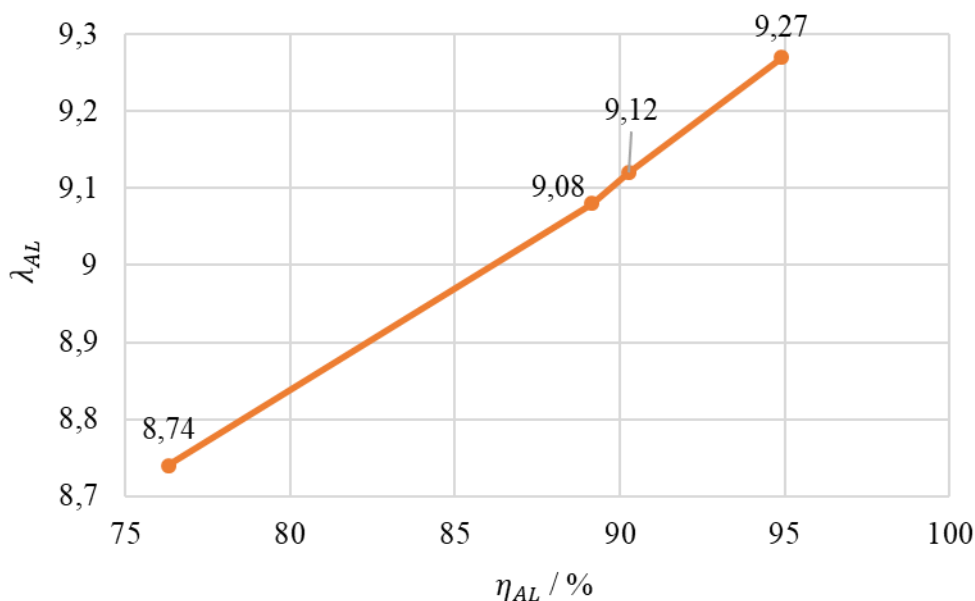
5.2.5. Povezivanje pokazatelja kompleksnosti montaže s balansiranjem MMAL te njezinom proizvodnošću

Balansiranošću se postiže ravnomjernija raspodjela radnog opterećenja među radnim stanicama. Iako prividno veća balansiranost montažne linije vodi k većoj proizvodnosti, u slučajevima kada se zaključci donose na temelju određenih determinističkih podataka koji su konstantni, za očekivati je da će rastom balansiranosti montažne linije u stvarnom okruženju, kompleksnost montaže na razini linije rasti. Odnosno rasti će ukupno prosječno vrijeme montaže radne stanice. Naime, prilikom prebacivanja elemenata rada s jedne radne stanice na drugu, ona radna stanica kojoj se dodjeljuje novi element rada rezultirat će s većim prosječnim vremenom potrebnim po dodijeljenim joj elementima rada nego u slučaju kada joj novi element rada nije bio dodijeljen. Razlog tome je utjecaj različitih čimbenika koji djeluju na rad operatera u uvjetima raznolikosti sadržaja rada, a koji rezultiraju većim psihofizičkim opterećenjem operatera. Sukladno tome, kompleksnost montaže na razini radne stanice će rasti.

Kompleksnost montaže na razini montažne linije, λ_{AL} , može se izraziti kao suma individualnih kompleksnosti montaže radnih stanica u ovisnosti o promatranim ulaznim parametrima:

$$\lambda_{AL} = \sum_{j=1}^m \lambda_j^{n,n_j^{RD}} \quad (5.2)$$

Korištenjem izraza (4.2) izračunata je kompleksnost montaže na razini svake radne stanice montažne linije u ovisnosti o vrijednostima balansiranosti montažne linije koje su dobivene raspodjelom elemenata rada u potpoglavlju 5.5.3. Promatrane vrijednosti balansiranosti montažne linije su: 76,02 %, 89,16 %, 90,27 % te 94,90 % . U ovisnosti o njima, pomoću izraza (5.2) izračunata je kompleksnost montažne linije. Ovisnost kompleksnosti montaže na razini montažne linije i vrijednosti balansiranosti prikazana je grafom na Slici 5.29. Iz slike je uočljivo da porastom balansiranosti raste kompleksnost montaže.

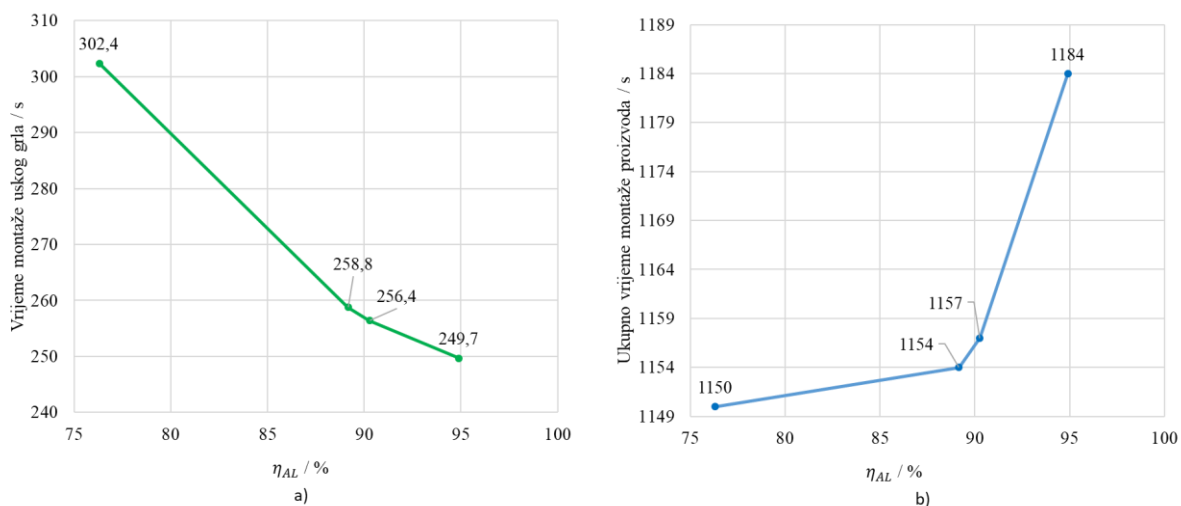


Slika 5.29. Kompleksnost montaže montažne linije i njezina balansiranost

Rastom balansiranosti smanjuje se ukupno prosječno opterećenje na radnoj stanici uskog grla, ali povećava se ukupno prosječno vrijeme montaže proizvoda, Slika 5.30. Štoviše, rastom balansiranosti raste proizvodnost s obzirom da je ona određena taktom uskog grla, ali paralelno raste i kompleksnost montaže na razini montažne linije. To znači da porastom balansiranosti, raste i opterećenost operatera na većini radnih stanica. Sukladno tome pojedini elementi rada u uvjetima veće balansiranosti, izvode se duže nego što je to kada je balansiranost niža. Postizanje balansiranosti veće od 94,90 %, u ovom konkretnom primjeru, moguće je postići dijeljenjem elemenata rada na manje cjeline i njihovom preraspodjelom. Međutim, provođenjem eksperimenata uočeno je da postizanje veće balansiranosti dovodi do porasta vremena montaže na radnoj stanici koja predstavlja proces uskog grla te do porasta ukupnog vremena montaže proizvoda. S obzirom da je proizvodnost određena procesom uskog grla, porastom vremena montaže na procesu uskog grla došlo je do pada proizvodnost. Stoga, možemo zaključiti da je uvođenje pokazatelja kompleksnosti u proces balansiranja montažne linije mjenjačke kutije automobila omogućilo otkrivanje do koje razine balansiranosti je moguće ići, a da proizvodnost i dalje ima trend rasta.

U optimizacijskim problemima balansiranja općenito se postavlja pitanje do koje granice balansiranosti ići da opterećenje radnika ne bude preveliko, a da proizvodnost i dalje ostane na zadovoljavajućoj razini. Ukoliko se primjerice odabere pristup gdje je balansiranost niža, proizvodnost zadovoljavajuća, a opterećenje operatera niže, neiskorišteno vrijeme operateri mogu iskoristiti za održavanje svog radnog mjesta urednim, za dodatnu kontrolu kvalitete

podsklopova ili pak za uočavanje bilo kakvih unaprjeđenja koja bi se mogla uvesti na njihovo radno mjesto ili na cijelu montažnu liniju. Sukladno svemu kazanome, jedan od mogućih pristupa za pronalaženje najprikladnijeg rješenja balansiranosti je integriranje pokazatelja kompleksnosti montaže u proces višekriterijske optimizacije na temelju kriterija koje određeno poduzeće smatra relevantnim.



Slika 5.30. a) vrijednosti prosječnog vremena montaže uskog grla i b) vrijednosti ukupnog vremena montaže proizvoda na montažnoj liniji u ovisnosti o balansiranosti linije

6. ZAKLJUČAK

Globalizacija tržišta pred proizvodne sustave postavlja čitav niz novih izazova koji su prvenstveno rezultat porasta zahtjeva kupaca za proizvodima koji ispunjavaju njihove jedinstvene ili specifične potrebe. Potrebe kupaca razlikuju se zbog individualnosti svakog pojedinog korisnika, njihovih društvenih vrijednosti, načina uporabe proizvoda i slično. Kako bi uspješno odgovorili na zahtjeve tržišta za povećanom raznolikošću proizvoda i time osigurali da kupac dobije ono što želi, proizvodna poduzeća primorana su proširiti svoj asortiman proizvoda. Međutim, uvođenje raznolikosti u proizvodne sustave uzrokuje porast kompleksnosti proizvodnje na svim razinama lanca dodavanja vrijednosti, posebice u montažnim procesima s obzirom da je montaža jedan od najučinkovitijih procesa postizanja diverzifikacije proizvoda. Kompleksnost montaže na razini radne stanice prvenstveno je rezultat količine sadržaja rada. Porast i stalne izmjene sadržaja rada dovode do poteškoća prilikom upravljanja montažnim procesima te u konačnici mogu rezultirati porastom broja grešaka operatera i padom kvalitete proizvoda, nepravovremenim isporukama proizvoda, porastom cijene proizvoda, padom proizvodnosti montažne linije, neučinkovitog korištenja raspoloživog vremena operatera i slično. Porast sadržaja rada na radnoj stanici reflektira se kroz čitav niz čimbenika koji utječu na rad operatera na radnoj stanici. Kroz istraživanja u literaturi i kroz preliminarna istraživanja uočeno je da dva čimbenika uvelike diktiraju opseg sadržaja rada i utječu na raspodjelu opterećenja među radnim stanicama. Riječ je o broju raznolikih proizvoda s kojim se operater susreće tijekom montaže te o broju raznolikih ugradbenih dijelova koji su potrebni za montažu. Sukladno tome, ova dva čimbenika promatrana su kako bi se razvio matematički model kompleksnosti montaže na razini radne stanice. Njime se opisuje doza nesigurnosti koju operater uzrokuje na vrijeme montaže. Kroz preliminarna istraživanja i kroz eksperimentalni dio istraživanja, istraživani su i utjecaji različitih količina alata koji se koriste prilikom montaže na radnoj stanici te utjecaj različitih operatera. Međutim, utjecaji obaju čimbenika su bili zanemarivi. Sukladno tome, dani su zaključci kako prilagoditi modele individualnom operateru za potrebe eventualnog povećanja preciznosti. Osim toga, kroz istraživanje literature je zamijećena potreba za uočavanjem mehanizma koji će omogućiti bolje razumijevanje povezanosti kompleksnosti montaže i proizvodnosti, kao i kompleksnosti montaže i raspodjele radnog opterećenja. Određivanjem ključnih parametara ovog mehanizma omogućilo bi se upravljanje kompleksnošću za koju se očekuje da će imati izravan utjecaj na proizvodnost i balansiranost montažne linije.

Na temelju prethodno izloženog, cilj ovog doktorskog rada iskazan je sljedećim hipotezama:

1. hipoteza

Na tržištu koje potražuje raznolike proizvode u malim količinama, moguće je kombinacijom matematičkog i simulacijskog modeliranja, predvidjeti ključne pokazatelje uspješnosti montažne linije već u fazi njezina projektiranja.

Primjenom razvijenog modela, moguće je na temelju a priori definiranih preferencija menadžera, odrediti optimalan slijed upućivanja radnih naloga za montažu proizvoda.

2. hipoteza

Kod različitih konfiguracija radnih stanica, matematičkim modeliranjem moguće je odrediti utjecaj kompleksnosti montaže na vremena trajanja montaže te zatim matematički model integrirati u model razvijen za predviđanje ključnih pokazatelja uspješnosti montažne linije.

Da bi se navedene hipoteze potvrdile, provedeno je matematičko i simulacijsko modeliranje te su izvršena eksperimentalna istraživanja. Eksperimentalna istraživanja provedena su kroz tri studije slučaja na stvarnim industrijskim primjerima što je dodatna važnost ovog istraživanja. Općenito, u literaturi se mali broj autora orijentirao na primjenu predloženih pokazatelja kompleksnosti montaže na stvarnim primjerima. Autori su uglavnom upotrebljavali numeričke primjere koji su teško primjenjivi u industrijskom okruženju, čak i uz određene pretpostavke koje modeli nude.

S obzirom na sve navedeno, mogu se definirati sljedeći znanstveni doprinosi koji proizlaze iz istraživanja provedenog u ovom doktorskome radu:

- Matematičkim modeliranjem predložen je model predviđanja ključnih pokazatelja uspješnosti montažne linije. Matematički model vrednovan je simulacijom diskretnog događaja te su uočene njegove prednosti i nedostaci.
- Na temelju ograničenja predloženih matematičkih modela kod dinamike izvođenja montažnih postupaka raznolikih proizvoda, izrađeni su simulacijski modeli koji preciznije definiraju ključne pokazatelje uspješnosti.
- Predložen je okvir za odabir optimalne alternative slijeda radnih naloga uzimajući u obzir preferencije donositelja odluke, a koji se temelji na matematičkom modelu za predviđanje proizvodnosti.

- Razvijen je model za predviđanje kompleksnosti montaže na razini radne stanice. Kompleksnost montaže definirana je kao funkcijska vrijednost odabranih parametara montaže.
- Predložena je integracija matematičkog modela kompleksnosti montaže u izraz za predviđanje proizvodnosti kako bi se njime preciznije mogla predvidjeti proizvodnost montažne linije.
- Razvijeni model kompleksnosti montaže na razini radne stanice vrednovan je na montažnoj liniji stvarnog industrijskog proizvoda u okviru Tvornice za učenje.
- Uspostavljena je povezanost između balansiranja montažne linije i njezine proizvodnosti s razvijenim pokazateljem kompleksnosti montaže.

Na temelju istraživanja i zaključaka koji su proizašli iz ovog doktorskog rada dane su smjernice za buduća istraživanja:

- Uključivanje dodatnih čimbenika za opisivanje kompleksnosti montaže u svrhu njezinog još preciznijeg predviđanja. Čimbenici koji se pri tome mogu promatrati su: sličnost proizvoda, sličnost ugradbenih komponenti, sličnost procedura montaže, raznolikost alata za montažu, izgled i organizacija radne stanice i ostali.
- Određivanje utjecaja tehnologije povezane s Industrijom 4.0 na kompleksnost montaže.
- Testiranje robusnosti predloženog matematičkog modela.
- Uvođenje višekriterijske optimizacije slijeda upućivanja radnih naloga jer je predloženim matematičkim modelom proizvodnosti moguće dobiti podatke o maksimalnoj proizvodnosti montažne linije, njejoj balansiranosti te prijedlog optimalnog slijeda upućivanja radnih naloga za montažu raznolikih proizvoda u ovisnosti o definiranim podacima i preferencijama. Međutim, prilikom donošenja odluka o optimalnom slijedu upućivanja radnih naloga, obično je prisutno više kriterija koji su vrlo često međusobno suprotstavljeni. Stoga, predloženi matematički model može se upotrijebiti kao alat za definiranje ulaznih informacija za neku od metoda višekriterijskog odlučivanja ili višekriterijske optimizacije.
- Prilagođavanje matematičkog i simulacijskog modela montažnim linijama kada broj operatera ne odgovara broju radnih stanica.

- Integracija pokazatelja kompleksnosti montaže u višekriterijski optimizacijski okvir kao jednog od kriterija prilikom pronalaženja najprikladnijeg rješenja balansiranja montažne linije.
- Razvoj algoritma za dinamičko balansiranje montažne linije uzimajući u obzir predviđanje utjecaja pokazatelja kompleksnosti na operatere u okolini dinamičke promjene sadržaja rada.
- Određivanje ključnih čimbenika kojima se opisuje psihofizičko stanje operatera i čimbenika kojima se opisuje utjecaj vanjskog okruženja na rad operatera te njihova integracija u indikator kompleksnosti montaže kako bi se kreirao jedinstveni pokazatelj kompleksnosti montaže za različite operatere.

LITERATURA

- [1] E. Abele, J. Meetternich, and M. Tisch, *Learning Factories, Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*, Springer Nature Switzerland AG, 2019.
- [2] N. Hamta, M. A. Shirazi, and S. M. T. F. Ghomi, A bi-level programming model for supply chain network optimization with assembly line balancing and push-pull strategy, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230, 6, 1127–1143, 2016.
- [3] H. ElMaraghy, G. Schuh, W. ElMaraghy, F. Piller, P. Schönsleben, M. Tseng, and A. Bernard, Product variety management, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62, 2, 629–652, 2013.
- [4] K. Efthymiou, D. Mourtzis, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, and G. Chryssolouris, Manufacturing systems complexity analysis methods review, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29, 9, 1025–1044, veljača, 2016.
- [5] H. Skoko, Ekonomija obujma u funkciji uspješnosti poslovanja, *Računovodstvo, revizija i financije*, 6, 2001.
- [6] C. Huffman and B. E. Kahn, Variety for sale: Mass customization or mass confusion?, *Journal of Retailing*, 74, 4, 491–513, 1998.
- [7] R. Schuh, G., Klocke, F., Brecher C., Schmitt, Ed., *Excellence in Production*, Apprimus Verlag, Aachen, 2007.
- [8] S. N. Samy and H. ElMaraghy, A model for measuring products assembly complexity, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23, 11, 1015–1027, 2010.
- [9] H. Schleich, J. Schaffer, and L. F. Scavarda, Managing complexity in automotive production, in *19th International Conference on Production Research*, 2007, 1–6
- [10] K. Roof, Elon Musk Says “Humans are Underrated”, Calls Tesla’s “Excessive Automation” a “Mistake”, <https://techcrunch.com/2018/04/13/elon-musk-says-humans-are-underrated-calls-teslas-excessive-automation-a-mistake/>. [Accessed Apr. 14, 2021.].
- [11] B. Alkan, An experimental investigation on the relationship between perceived assembly complexity and product design complexity, *International Journal on*

- Interactive Design and Manufacturing*, 13, 3, 1145–1157, ožujak, 2019.
- [12] M. Gregor and S. Medvecky, Digital Factory – Theory and Practice, *Engineering the Future*, 2010.
- [13] H. Sun and S. Fan, Car sequencing for mixed-model assembly lines with consideration of changeover complexity, *Journal of Manufacturing Systems*, 46, 93–102, prosinac, 2018.
- [14] Ludmila Luiza De Lima Gabriel Zeltzer, Analysing and Levelling Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines, 2016.
- [15] S. Mattsson, M. Tarrar, and A. Fast-Berglund, Perceived production complexity – understanding more than parts of a system, *International Journal of Production Research*, 54, 20, 6008–6016, ožujak, 2016.
- [16] Ebergardt Rehtin, *Systems Architecting - Creating and Building Complex Systems*, Prentice-Hall, New York, 1991.
- [17] S. Mattsson, What is perceived as complex in final assembly? - To define, measure and manage production Complexity, 2013.
- [18] A. V. Deshmukh, J. J. Talavage, and M. M. Barash, Complexity in manufacturing systems, Part 1: Analysis of static complexity, *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, 30, 7, 645–655, svibanj, 1998.
- [19] W. ElMaraghy, H. ElMaraghy, T. Tomiyama, and L. Monostori, Complexity in engineering design and manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61, 2, 793–814, 2012.
- [20] S. N. S. Badrous, Complexity of products and theirs assembly systems, University of Windsor, 2011.
- [21] J. Gao, Complex systems and emergence: How theory meets reality, *Advances in Mechanics*, 43, 4, 359–389, 2013.
- [22] K. Sinha, Structural complexity and its implications for design of cyber-physical systems, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2014.
- [23] B. Alkan, A Complexity Modelling Approach to Support Early Life-cycle Phases of Assembly Automation Systems, University of Warwick, 2018.

- [24] G. Herrera Vidal and J. R. Coronado Hernández, Complexity in manufacturing systems: a literature review, *Production Engineering*, 15, 3–4, 321–333, siječanj, 2021.
- [25] W. Vogel and R. Lasch, Complexity drivers in manufacturing companies: a literature review, *Logistics Research*, 9, 1, 1–66, studeni, 2016.
- [26] M. Götzfried, Managing Complexity Induced by Product Variety in Manufacturing Companies Complexity Evaluation and Integration in Decision-Making, University of St. Gallen, 2013.
- [27] N. P. Suh, Complexity in engineering, *CIRP Annals*, 54, 2, 46–63, 2005.
- [28] T. Lee, Complexity Theory in Axiomatic Design, 2003.
- [29] B. Alkan, D. A. Vera, M. Ahmad, B. Ahmad, and R. Harrison, Complexity in manufacturing systems and its measures: A literature review, *European Journal of Industrial Engineering*, 12, 1, 116–150, 2018.
- [30] P. Gullander, A. Davidsson, K. Dencker, Å. Fasth, T. Fässberg, U. Harlin, and J. Stahre, Towards a Production Complexity Model that Supports Operation, Re-balancing and Man-hour Planning, *Proceedings of the 4th Swedish Production Symposium (SPS)*, January 2011, 1–10, 2011.
- [31] N. Giannelos, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, Dispatching policy for manufacturing jobs and time-delay plots, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 20, 4, 329–337, travanj, 2007.
- [32] G. Chryssolouris, N. Giannelos, N. Papakostas, and D. Mourtzis, Chaos theory in production scheduling, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53, 1, 381–383, 2004.
- [33] C. Shannon, A mathematical theory of communication, *Bell system technical journal*, 27, 3, 379–423, srpanj, 1948.
- [34] X. Zhu, S. J. Hu, Y. Koren, and S. P. Marin, Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines, *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 130, 5, listopad, 2008.
- [35] S. J. Hu, X. Zhu, H. Wang, and Y. Koren, Product variety and manufacturing complexity in assembly systems and supply chains, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57,

- 1, 45–48, 2008.
- [36] H. Wang and S. J. Hu, Manufacturing complexity in assembly systems with hybrid configurations and its impact on throughput, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59, 1, 53–56, 2010.
- [37] H. Wang, X. Zhu, H. Wang, S. J. Hu, Z. Lin, and G. Chen, Multi-objective optimization of product variety and manufacturing complexity in mixed-model assembly systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 30, 1, 16–27, travanj, 2011.
- [38] K. Park and G. E. Okudan Kremer, Assessment of static complexity in design and manufacturing of a product family and its impact on manufacturing performance, *International Journal of Production Economics*, 169, 215–232, studeni, 2015.
- [39] K. Efthymiou, A. Pagoropoulos, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, Manufacturing systems complexity: An assessment of manufacturing performance indicators unpredictability, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 7, 4, 324–334, 2014.
- [40] H. ElMaraghy, O. Kuzgunkaya, and R. J. Urbanic, Manufacturing Systems Configuration Complexity, *Annals of the CIRP*, 54, 1, 445–448, 2005.
- [41] W. H. ElMaraghy and R. J. Urbanic, Modelling of manufacturing systems complexity, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52, 1, 363–366, 2003.
- [42] W. H. ElMaraghy and R. J. Urbanic, Assessment of manufacturing operational complexity, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53, 1, 401–406, 2004.
- [43] S. N. Samy and H. ElMaraghy, A model for measuring complexity of automated and hybrid assembly systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 62, 5–8, 813–833, siječanj, 2012.
- [44] B. Alkan, D. Vera, B. Ahmad, and R. Harrison, A Method to Assess Assembly Complexity of Industrial Products in Early Design Phase, *IEEE Access*, 6, 989–999, prosinac, 2017.
- [45] J. Sarkis, An empirical analysis of productivity and complexity for flexible manufacturing systems, *International Journal of Production Economics*, 48, 1, 39–48, 1997.

- [46] K. Windt, T. Philipp, and F. Böse, Complexity cube for the characterization of complex production systems, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 21, 2, 195–200, lipanj, 2008.
- [47] J. A. Mesa, I. Esparragoza, and H. Maury, Development of a metric to assess the complexity of assembly/disassembly tasks in open architecture products, *International Journal of Production Research*, 56, 24, 7201–7219, studeni, 2018.
- [48] G. Chryssolouris, K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, and A. Pagoropoulos, Flexibility and complexity: Is it a trade-off?, *International Journal of Production Research*, 51, 23–24, 6788–6802, ožujak, 2013.
- [49] H. ElMaraghy, T. Algeddawy, S. N. Samy, and V. Espinoza, A model for assessing the layout structural complexity of manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Systems*, 33, 1, 51–64, siječanj, 2014.
- [50] K. Jenab and D. Liu, A graph-based model for manufacturing complexity, *International Journal of Production Research*, 48, 11, 3383–3392, lipanj, 2010.
- [51] A. Mattsson, S., Gullander, P., Davidsson, Method for measuring production complexity, in *28th international manufacturing conference*, 2011
- [52] S. Mattsson, P. Gullander, U. Harlin, G. Bäckstrand, A. Fasth, and A. Davidsson, Testing complexity index - A method for measuring perceived production complexity, *Procedia CIRP*, 3, 1, 394–399, prosinac, 2012.
- [53] A. C. Falck and M. Rosenqvist, 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*, 42, 5, 406–415, 2012.
- [54] A. C. Falck, R. Örtengren, and M. Rosenqvist, Assembly failures and action cost in relation to complexity level and assembly ergonomics in manual assembly (part 2), *International Journal of Industrial Ergonomics*, 44, 3, 455–459, ožujak, 2014.
- [55] K. Efthymiou, N. Papakostas, D. Mourtzis, and G. Chryssolouris, Fluid Dynamics Analogy to Manufacturing Systems, *42nd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, November 2017, 2009.
- [56] H. Schleifenbaum, J. Uam, G. Schuh, and C. Hinke, Turbulence in Production Systems

- Fluid Dynamics and its Contributions to Production Theory, II, 2009.
- [57] L. Zeltzer, V. Limère, H. Van Landeghem, E. H. Aghezzaf, and J. Stahre, Measuring complexity in mixed-model assembly workstations, *International Journal of Production Research*, 51, 15, 4630–4643, svibanj, 2013.
- [58] S. Mattsson, M. Karlsson, P. Gullander, H. Van Landeghem, L. Zeltzer, V. Limère, E. H. Aghezzaf, Å. Fasth, and J. Stahre, Comparing quantifiable methods to measure complexity in assembly, *International Journal of Manufacturing Research*, 9, 1, 112–130, listopad, 2014.
- [59] S. J. Hu, J. Ko, L. Weyand, H. A. ElMaraghy, T. K. Lien, Y. Koren, H. Bley, G. Chryssolouris, N. Nasr, and M. Shpitalni, Assembly system design and operations for product variety, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60, 2, 715–733, 2011.
- [60] Z. Jerbić, B., Nikolić, G., Vranješ, B., Kunica, *Projektiranje automatskih montažnih sustava*, Kigen d.o.O., Zagreb, 2009.
- [61] U. Saif, Z. Guan, L. Zhang, F. Zhang, B. Wang, and J. Mirza, Multi-objective artificial bee colony algorithm for order oriented simultaneous sequencing and balancing of multi-mixed model assembly line, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 30, 3, 1195–1220, ožujak, 2019.
- [62] U. Saif, Z. Guan, W. Liu, B. Wang, and C. Zhang, Multi-objective artificial bee colony algorithm for simultaneous sequencing and balancing of mixed model assembly line, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 9–12, 1809–1827, kolovoz, 2014.
- [63] H. Mosadegh, M. Zandieh, and S. M. T. F. Ghomi, Simultaneous solving of balancing and sequencing problems with station-dependent assembly times for mixed-model assembly lines, *Applied Soft Computing Journal*, 12, 4, 1359–1370, siječanj, 2012.
- [64] A. A. Alghazi, *Balancing and Sequencing of Mixed Model Assembly Lines*, 2017.
- [65] M. L. Fisher and C. D. Ittner, Impact of product variety on automobile assembly operations: empirical evidence and simulation analysis, *Management Science*, 45, 6, 771–786, 1999.
- [66] Å. Fast-Berglund, T. Fässberg, F. Hellman, A. Davidsson, and J. Stahre, Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly,

- Journal of Manufacturing Systems*, 32, 3, 449–455, svibanj, 2013.
- [67] A. C. Falck, R. Örtengren, M. Rosenqvist, and R. Söderberg, Basic complexity criteria and their impact on manual assembly quality in actual production, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 58, 117–128, prosinac, 2017.
- [68] A. C. Falck, R. Örtengren, M. Rosenqvist, and R. Söderberg, Proactive assessment of basic complexity in manual assembly: development of a tool to predict and control operator-induced quality errors, *International Journal of Production Research*, 55, 15, 4248–4260, rujun, 2017.
- [69] M. L. F. John Paul MacDuffie, Kannan Sethuraman, Product Variety and Manufacturing Performance: Evidence from the International Automotive Assembly Plant Study, *Management Science*, 42, 3, 350–369, 1996.
- [70] S. N. Samy and H. A. ElMaraghy, Complexity mapping of the product and assembly system, *Assembly Automation*, 32, 2, 135–151, 2012.
- [71] G. Frizelle and Y. Suhov, The measurement of complexity in production and other commercial systems, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 464, 2098, 2649–2668, svibanj, 2008.
- [72] X. Liu, X. Yang, and M. Lei, Optimisation of mixed-model assembly line balancing problem under uncertain demand, *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 214–227, 2021.
- [73] X. Zhu, S. J. Hu, Y. Koren, and N. Huang, A complexity model for sequence planning in mixed-model assembly lines, *Journal of Manufacturing Systems*, 31, 2, 121–130, kolovoz, 2012.
- [74] A. Trattner, L. Hvam, C. Forza, and Z. N. L. Herbert-Hansen, Product complexity and operational performance: A systematic literature review, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 25, 69–83, ožujak, 2019.
- [75] M. Ahmad, B. Alkan, B. Ahmad, D. Vera, R. Harrison, J. Meredith, and A. Bindel, The Use of a Complexity Model to Facilitate in the Selection of a Fuel Cell Assembly Sequence, *Procedia CIRP*, 44, 169–174, 2016.
- [76] M. Uddin and J. Lastra, Assembly line balancing and sequencing, in *Assembly line: Theory and Practice*, W. Grzechca, Ed. IntechOpen, Rijeka, 2011.

-
- [77] C. Becker and A. Scholl, A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing, *European Journal of Operational Research*, 168, 3, 694–715, veljača, 2006.
- [78] N. T. Thomopoulos, Line Balancing-Sequencing for Mixed-Model Assembly, 14, 2, 59–75, listopad, 1967.
- [79] M. Rabbani, A. Ziaefar, and N. Manavizadeh, Mixed-model assembly line balancing in assemble-to-order environment with considering express parallel line: Problem definition and solution procedure, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27, 7, 690–706, 2014.
- [80] L. Zeltzer, E. H. Aghezzaf, and V. Limère, Workload balancing and manufacturing complexity levelling in mixed-model assembly lines, *International Journal of Production Research*, 55, 10, 2829–2844, srpanj, 2017.
- [81] X. Liu, M. Lei, Q. Zeng, and A. Li, Integrated optimization of mixed-model assembly line balancing and buffer allocation based on operation time complexity, *Procedia CIRP*, 81, 1040–1045, 2019.
- [82] N. Boysen, M. Flidner, and A. Scholl, Sequencing mixed-model assembly lines: Survey, classification and model critique, *European Journal of Operational Research*, 192, 2, 349–373, 2009.
- [83] Y. G. Zhong, X. X. Lv, and Y. Zhan, Sequencing problem for a hull mixed-model assembly line considering manufacturing complexity, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 30, 3, 1461–1473, 2016.
- [84] M. Busogi, D. Song, S. H. Kang, and N. Kim, Sequence Based Optimization of Manufacturing Complexity in a Mixed Model Assembly Line, *IEEE Access*, 7, 22096–22106, veljača, 2019.
- [85] M. Busogi, K. Ransikarbum, Y. G. Oh, and N. Kim, Computational modelling of manufacturing choice complexity in a mixed-model assembly line, *International Journal of Production Research*, 55, 20, 5976–5990, travanj, 2017.
- [86] A. Kumar, L. N. Pattanaik, and R. Agrawal, Optimal sequence planning for multi-model reconfigurable assembly systems, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 5–8, 1719–1730, listopad, 2019.

- [87] V. Modrak and Z. Soltysova, Development of operational complexity measure for selection of optimal layout design alternative, *International Journal of Production Research*, 56, 24, 7280–7295, travanj, 2018.
- [88] A. Seleim, Modeling and Performance Analysis of Manufacturing Systems Using Max-Plus Algebra, 2016.
- [89] G. Chryssolouris, *Manufacturing Systems: Theory and Practice*, Springer Science & Business Media, 2013.
- [90] B. Kerber and B. J. Dreckshage, *Lean supply chain management essentials - A Framework for Materials Managers*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [91] N. T. Thomopoulos, *Assembly Line Planning and Control*, Springer, Chicago, 2012.
- [92] A. B. Rane and V. K. Sunnapwar, Assembly line performance and modeling, *Journal of Industrial Engineering International*, 13, 3, 347–355, ožujak, 2017.
- [93] M. Linsinger, M. Sudhoff, K. Lemmerz, P. Glogowski, and B. Kuhlenkötter, Task-based Potential Analysis for Human-Robot Collaboration within Assembly Systems, *Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*, 1–12, 2018.
- [94] S. Jevgeni, S. Eduard, and Z. Roman, Framework for continuous improvement of production processes and product throughput, *Procedia Engineering*, 100, 511–519, prosinac, 2015.
- [95] Y. Monden, *Toyota Production System - An Integrated Approach to Just-In-Time*, CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
- [96] H. J. Weiss, Teaching Note —Implementing Line Balancing Heuristics in Spreadsheets, *INFORMS Transactions on Education*, 13, 2, 114–125, veljača, 2013.
- [97] Microsoft Support, <https://support.microsoft.com>, [Accessed Jan. 23, 2023.].
- [98] A. H. I. Lee, H. Y. Kang, and C. L. Chen, Multi-objective assembly line balancing problem with setup times using fuzzy goal programming and genetic algorithm, *Symmetry*, 13, 2, 1–28, 2021.
- [99] M. Musil, V. Laskovsky, and P. Fialek, Analysis of logistic processes using the software tecnomatix plant simulation, *13th International Conference on Industrial Logistics, ICIL 2016 - Conference Proceedings*, 195–200, 2016.

-
- [100] A. Aljinović, N. Gjeldum, B. Bilić, and M. Mladineo, Optimization of Industry 4.0 Implementation Selection Process towards Enhancement of a Manual Assembly Line, *Energies*, 15, 30, 20, 2022.
- [101] N. Gjeldum, A. Aljinovic, M. Crnjac Zizic, and M. Mladineo, Collaborative robot task allocation on an assembly line using the decision support system, *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 00, 00, 1–17, 2021.
- [102] B. I. Jameel, The Effectiveness of Line Balancing on Production Flow Efficiency: An Experimental Study, *Engineering And Technology Journal*, 33, 6, 2015.
- [103] I. I. Mathew, N. B. Nduka, and N. C. Princewill, Assembly Line Balancing Implementation in Manufacturing Industry, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 10, 3, 5683–5692, srpanj, 2020.
- [104] Y. Jiang, D. Wang, W. Xia, and W. Li, Optimisation of the Logistics System in an Electric Motor Assembly Flowshop by Integrating the Taguchi Approach and Discrete Event Simulation, *Sustainability*, 14, 24, prosinac, 2022.
- [105] E. Abele, J. Metternich, M. Tisch, G. Chryssolouris, W. Sihn, H. ElMaraghy, V. Hummel, and F. Ranz, Learning factories for research, education, and training, *Procedia CIRP*, 32, 1–6, 2015.
- [106] S. Adolph, M. Tisch, and J. Metternich, Challenges and approaches to competency development for future production, *Journal of International Scientific Publications*, 12, 1001–1010, 2014.
- [107] I. Veza, N. Gjeldum, and M. Mladineo, Lean learning factory at FESB - University of Split, *Procedia CIRP*, 32, 132–137, 2015.
- [108] J. Cachay, J. Wennemer, E. Abele, and R. Tenberg, Study on Action-Oriented Learning with a Learning Factory Approach, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 55, 1144–1153, 2012.
- [109] F. Li, J. Yang, J. Wang, S. Li, and L. Zheng, Integration of digitization trends in learning factories, *Procedia Manufacturing*, 31, 343–348, 2019.
- [110] D. Kreimeier, F. Morlock, C. Prinz, B. Krückhans, and D. C. Bakir, Holistic learning factories - A concept to train lean management, resource efficiency as well as management and organization improvement skills, *Procedia CIRP*, 17, 184–188, 2014.

- [111] H. ElMaraghy and W. ElMaraghy, Learning integrated product and manufacturing systems, *Procedia CIRP*, 32, 19–24, 2015.
- [112] E. Abele, G. Chryssolouris, W. Sihn, J. Metternich, H. ElMaraghy, G. Seliger, G. Sivard, W. ElMaraghy, V. Hummel, M. Tisch, and S. Seifermann, Learning factories for future oriented research and education in manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66, 2, 803–826, srpanj, 2017.
- [113] T. Lorber, C.; Stäudel, Best Practice Example 31: VPS Center of the Production Academy at BMW in Munich, Germany, in *Learning Factories, Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*, M. Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, Ed. Springer Nature Switzerland AG, 2019., 450–456
- [114] M. Schwarz, Best Practice Example 23: MPS Lernplattform at Daimler AG in Sindelfingen, Germany, in *Learning Factories, Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*, M. Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, Ed. Springer Nature Switzerland AG, 2019., 420–422
- [115] Kärcher, Kärcher lean consulting: Lean erleben und verstehen,
- [116] D. Pittschellis, R.; Pensky, Best Practice Example 7: Festo Didactic Learning FactoriesTitle, in *Learning Factories, Concepts, Guidelines, Best-Practice Examples*, M. Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, Ed. Springer Nature Switzerland AG, 2019., 358–362
- [117] W. Beauvais, Qualification as an effective tool to support the implementation of lean, in *3rd Conference on Learning Factories*, S. L. Reinhart, G.; Schnellbach, P.; Hilgert, C.; Frank, Ed. Munich, 2013, 108–117
- [118] C. Gebbe, S. Hilmer, G. Götz, M. Lutter-Günther, Q. Chen, E. Unterberger, J. Glasschröder, V. Schmidt, F. Riss, T. Kamps, C. Tammer, C. Seidel, S. Braunreuther, and G. Reinhart, Concept of the green factory Bavaria in Augsburg, in *Procedia CIRP*, 32, Elsevier B.V., 2015, 53–57
- [119] S. Kreitlein, A. Höft, S. Schwender, and J. Franke, Green factories Bavaria: A network of distributed learning factories for energy efficient production, in *Procedia CIRP*, 32, Clf, Elsevier B.V., 2015, 58–63
- [120] C. Rybski and R. Jochem, Benefits of a Learning Factory in the Context of Lean

- Management for the Pharmaceutical Industry, in *Procedia CIRP*, 54, The Author(S), 2016, 31–34
- [121] M. Tisch, F. Ranz, E. Abele, J. Metternich, and H. Vera, Learning factory morphology – Study of form and structure of an innovative learning approach in the manufacturing domain, *Turkish Online Journal of Educational Technology*, 2015, 2, 356–363, 2015.
- [122] A. A. Razak and G. R. T. White, The Triple Helix model for innovation: A holistic exploration of barriers and enablers, *International Journal of Business Performance and Supply Chain Modelling*, 7, 3, 278–291, 2015.
- [123] I. Veža, N. Gjeldum, and M. Mladineo, Eds., *Inovativno pametno poduzeće*, Fakultet Elektrotehnike, Strojarstva i Brodogradnje, FESB Split, Split, 2018.
- [124] M. Aljinović, A.; Gjeldum, N.; Crnjac, M.; Mladineo, Analysis of performance of RFID systems for assembly line purposes in Learning factory, in *9 International Conference, Mechanical Technologies and Structural Materials 2019*, 2019, 1–7
- [125] F. Ranz, V. Hummel, and W. Sihn, Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration, *Procedia Manufacturing*, 9, 182–189, 2017.
- [126] R. Zelenika, *Metodologija i tehnologija izrade znanstvenog i stručnog djela*, Ekonomski Fakultet Sveučilišta u Rijeci, Rijeka, 2000.
- [127] S. Park, *Robust design and analysis for quality engineering*, Boom Koninklijke Uitgevers, 1996.
- [128] B. Gjeldum, N.; Veža, I.; Bilić, Prediction of the material removal rates of cylindrical wire electrical discharge turning processes, *Transactions of FAMENA*, 35, 1, 2011.
- [129] A. Aljinović, B. Bilić, N. Gjeldum, and M. Mladineo, Prediction of surface roughness and power in turning process using response surface method and ANN, *Tehnicki Vjesnik*, 28, 2, 456–464, 2021.
- [130] I. Pavlić, *Statistička teorija i primjena*, Tehnička Knjiga: Zagreb, 1970.
- [131] N. Gjeldum, B. Salah, A. Aljinovic, and S. Khan, Utilization of Industry 4.0 Related Equipment in Assembly Line Balancing Procedure, *Processes*, 8, 7, 864, 2020.
- [132] Drago Taboršak, *Studij rada*, 1970.
- [133] A. Leber, Marjan; Polajnar, *Študij dela za delo v praksi*, Fakulteta Za Strojništvo,

Maribor, Maribor, 2000.

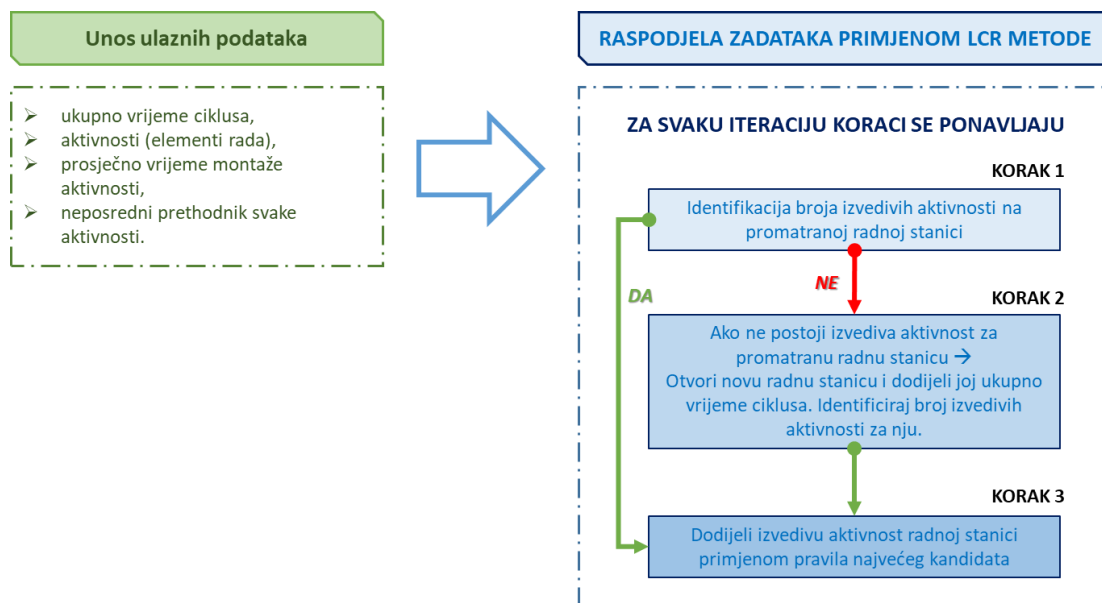
PRILOZI

Prilog A

Okvir za izradu simulacije LCR metode u Microsoft Excel-u

LCR metoda balansiranja može se opisati kroz četiri koraka. Prvi korak podrazumijeva sortiranje odabranih elemenata rada (radni zadaci) prema padajućem nizu vremena obrade. Drugi korak podrazumijeva dodjelu elemenata rada prvoj radnoj stanici idući od vrha do kraja padajuće liste uz poštivanje ograničenja prethodnosti sve dok vrijeme dodijeljenih zadataka ne prijeđe željeno vrijeme ciklusa. Treći korak odnosi se na dodjeljivanje elemenata rada sljedećoj radnoj stanici poštujući prethodno spomenuta ograničenja. Ovi koraci ponavljaju se sve dok svi elementi rada ne budu dodijeljeni na željeni broj radnih stanica.

Simulacija predložene heuristike za balansiranje montažne linije razvijena je primjenom programskog alata Microsoft Excela 2016. Kao polazišna točka za razvoj simulacije korišten je rad od Weissa u kojem je autor pošao od pretpostavke da aktivnosti, tj. elementi rada koje je potrebno raspodijeliti po radnim stanicama, ne mogu imati jednako vrijeme trajanja, ukoliko imaju predložena simulacija se ne može primijeniti jer daje pogrešan rezultat. Stoga je izvršena njezina modifikacija. Simulacija LCR metode može se opisati kroz dva dijela, Slika 1.1. Prvi dio podrazumijeva unošenje ulaznih podataka koji su potrebni za balansiranje montažne linije poput: ukupno traženog vremena ciklusa, popisa aktivnosti, njihovih prosječnih vremena montaže te njihovih neposrednih prethodnika. Drugi dio odnosi se na raspodjelu aktivnosti po radnim stanicama. Raspodjela aktivnosti po radnim stanicama ostvaruje se kroz tri koraka koji se izvršavaju za svaku iteraciju. Pri tome, broj iteracija jednak je broju aktivnosti s obzirom da se kroz jednu iteraciju uvijek jedna izvediva aktivnost dodjeljuje radnoj stanici.

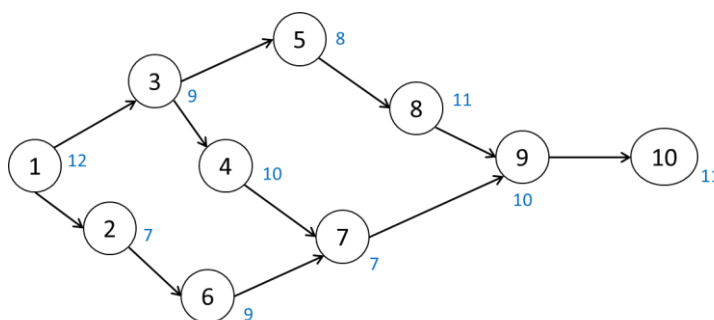


Slika 1.1. Opis LCR simulacije

Izvediva aktivnost je ona aktivnost koja zadovoljava sljedeće uvjete:

- sve aktivnosti koje joj prethode su izvršene
- još nije dodijeljena nijednoj radnoj stanici
- ne zahtijeva više vremena od preostalog vremena montaže na radnoj stanici.

Slika 1.2. predstavlja ogledni primjer primjene LCR simulacije. Na Slici 1.2., kružići se odnose na aktivnosti, dok su plavim slovima pored svake aktivnosti dana njihova prosječna vremena montaže.



Slika 1.2. Ograničenja prethodnosti i prosječna vremena montaže elemenata rada u minuta

Prvi korak simulacije podrazumijeva definiranje ulaznih parametara. Za primjer prikazan na Slici 1.2., ulazni podaci dani su na Slici 1.3., a prikazani su unutar zelenog okvira. U ovom dijelu, ćelije osjenčane zelenom bojom su podaci koje je potrebno unijeti u proračunsku tablicu

kako bi se definirale aktivnosti. Prvi stupac „Kriterij za *Lookup* funkciju“ predstavlja kopiju stupca prosječna vremena montaže i kreiran je jer spomenuta naredba zahtijeva da se vrijednosti koju njome tražimo, a to su u ovom slučaju prosječna vremena montaže, nalaze u prvom stupcu raspona unutar kojeg se pretražuje. Drugi dio prikaza, Slika 1.3., odnosi se na raspodjelu zadataka primjenom LCR metode. On je opisan kroz dva segmenta. Prvi segment odnosi se na određivanje izvršenih/neizvršenih ograničenja prethodnosti aktivnosti kroz iteracije. Drugim riječima, ovaj segment opisuje kada je određena aktivnost spremna na dodjelu na promatranu radnu stanicu u ovisnosti o zadovoljenju definiranih ograničenja prethodnosti (redak 19-31). Kako bi se identificirala ograničenja prethodnosti svake aktivnosti, nije potrebno poznavati točno koje su to aktivnosti, već je potrebno poznavati ukupan broj neispunjenih ograničenja prethodnosti svake aktivnosti. Pri tome, vrijednost „0“ označava da se aktivnost može dodijeliti promatranjoj radnoj stanici, vrijednost „-1“ znači da je aktivnost već dodijeljena nekoj od prethodnih radnih stanica, dok se pozitivna vrijednost (> 0) odnosi na broj potrebnih aktivnosti koje se trebaju ispuniti prije nego se promatrana aktivnosti može pridijeliti radnoj stanici.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Ulazni podaci za balansiranje - LCR metoda										1. DIO		
2													
3		Ukupno vrijeme ciklusa	26										
4	Kriterij za "Lookup" funkciju	Element rada	Prosječno vrijeme montaže	Neposredni prethodnik				Broj elementa rada	Oznaka elementa rada	Opis elementa rada			
5	12	A	12	--				1	A				
6	7	B	7	A				2	B				
7	9	C	9	A				3	C				
8	10	D	10	C				4	D				
9	8	E	8	C				5	E				
10	9	F	9	B				6	F				
11	7	G	7	D, F				7	G				
12	11	H	11	E				8	H				
13	10	I	10	G, H				9	I				
14	11	J	11	I				10	J				
15													
16													
17													
18	Raspodjela zadataka primjenom LCR metode										2. DIO		
19	ITERACIJE ZA ODREĐIVANJE IZVRŠENIH OGRANIČENJA PRETHODNOSTI ELEMENATA RADA												
20		Element rada	Iteracija 1	Iteracija 2	Iteracija 3	Iteracija 4	Iteracija 5	Iteracija 6	Iteracija 7	Iteracija 8	Iteracija 9	Iteracija 10	
21		A	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
22		B	1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	
23		C	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
24		D	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
25		E	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
26		F	1	1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	
27		G	2	2	2	1	1	1	0	-1	-1	-1	
28		H	1	1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	
29		I	2	2	2	2	2	2	1	1	0	-1	
30		J	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	
31													
32													
33													
34	ODABIR SLJEDEĆEG IZVEDIVOG ZADATKA ZA DODJELU:												
35													
36	Dostupno vrijeme za izvođenje zadataka		26	14	5	16	8	1	15	6	19	9	
37	Broj izvedivih zadataka		1	2	0	2	1	0	1	0	1	0	
38	Dostupno vrijeme za izvođenje zadataka		26	14	26	16	8	26	15	26	19	26	
39	Radna stanica		1	1	2	2	2	3	3	4	4	5	
40	Vrijeme montaže elementa rada koji zadovoljavaju ograničenja prethodnosti		12	9	10	8	7	11	9	7	10	11	
41	Odabir elementa rada koji se dodjeljuje radnoj stanici prema LCR metodi		A	C	D	E	B	H	F	G	I	J	
42													

Slika 1.3. Grafički prikaz LCR simulacije u Microsoft Excelu

U drugom dijelu koji se odnosi na odabir sljedećeg izvedivog zadatka (redak 34-41) identificiraju se zadaci koji se dodjeljuju radnim stanicama, kao i broj radnih stanica. Jednako kao i ranije, zelenom bojom uneseni su ulazni podaci koji se ovdje odnose se dostupno vrijeme za izvođenje zadataka (ćelija C36) te na broj radne stanice (ćelija C39) koja je postavljena na jedan (prva radna stanica). Za sve preostale iteracije ovi podaci su promjenjivi.

Sintaksa funkcija koje su korištene za izradu simulacije LCR metodom te objašnjenja njihovih argumenata prikazani su u Tablici 1.1., a kao referenca za njih korištena je *Microsoft Support* službena stranica.

Tablica 1.1. Sintaksa funkcija te objašnjenja njihovih argumenata

SEARCH(*find_text, within_text, [start_num]*)

- funkcija locira jedan tekstni niz unutar drugog tekstnog niza i vraća broj početne pozicije prvog tekstnog niza od prvog znaka drugog tekstnog niza.

- *find_text* (pronađi_tekst): tekst koji se želi pronaći,
- *within_text* (u_tekstu): tekst u kojem se traži vrijednost argumenta *find_text*,
- *start_num* (početni_broj): broj znaka u argumentu *within_text* od kojeg se želi pokrenuti pretraživanje.

ISERR(*value*)

- funkcija koja vraća *TRUE* ako se vrijednost odnosi na bilo koju vrijednost osim pogreške, tj. ova funkcija provjerava je li *value* (vrijednost) ispravna.

VLOOKUP(*lookup_value, table_array, col_index_num, [range_lookup]*)

- traženje željenih stavki unutar tablice

- *lookup_value* (vrijednost_pretraživanja): vrijednost koja se želi dohvatiti u *table_array*,
- *table_array* (polje_tablice): raspon u kojem se nalazi vrijednost koja se želi dohvatiti. Napomena: vrijednost koja se želi dohvatiti mora se nalaziti u prvom stupcu raspona kako bi funkcija *VLOOKUP* pravilno funkcionirala,
- *col_index_num* (broj stupca u rasponu koji sadrži povratnu vrijednost): broj stupca u rasponu (tablici) koji sadrži vrijednost za vraćanje,
- *range_lookup* (raspon_pretraživanja): vraćanje približnog ili točnog podudaranja tražene vrijednosti - približna vrijednost (1/*TRUE*) ili točno podudaranje (0/*FALSE*).

COUNTIF(*criteria_range, criteria*)

- koristi se za brojanje ćelija koje zadovoljavaju kriterij

- *criteria_range* (raspon_pretraživanja_kriterija): područje, tj. raspon gdje se pretražuje tražena vrijednost (kriterij),
- *criteria* (kriterij): vrijednost koju tražimo u *criteria_range*.

INDEX(*array, row_num, [column_num]*)

- vraća vrijednost ili referencu na vrijednost iz tablice ili raspona

- *array* (polje): raspon ćelija ili konstanta polja. Ako polje sadrži samo jedan redak ili stupac, odgovarajući argument *row_num* ili *column_num* nije obavezan. Ako polje ima više redaka i više od jednog stupca, a koristi se *row_num* ili *column_num*, *INDEX* vraća polje cijelog retka ili stupca u polju.
- *row_num* (broj_retka): obavezan argument, osim ako nije definiran *column_num*. Odabire redak polja iz kojeg će se vratiti vrijednost. Ako se *row_num* izostavi, potrebno je definirati *column_num*.
- *column_num* (broj_stupca): odabire stupac polja iz kojeg će se vratiti vrijednost. Ako se *column_num* izostavi, potrebno je definirati *row_num*.

Tablica 1.1. (nastavak) Sintaksa funkcija te objašnjenja njihovih argumenata

MATCH(lookup_value, lookup_array, [match_type])

- traži određenu stavku u rasponu ćelija, a zatim prikazuje relativni položaj (poziciju) te stavke u rasponu

- ***lookup_value*** (vrijednost_pretraživanja): vrijednost koju se želi pronaći u argumentu *lookup_array*. Primjerice, ukoliko se želi dohvatiti nečiji broj iz telefonskog imenika, kao vrijednost za pretraživanje koristit će se ime te osobe, ali je vrijednost koja se traži telefonski broj. Argument *lookup_value* može biti vrijednost (broj, tekst ili logička vrijednost) ili referenca ćelije na broj, tekst ili logičku vrijednost.
- ***lookup_array*** (polje_pretraživanja): raspon ćelija koje se pretražuju.
- ***match_type*** (vrsta_podudaranja): određuje kako Excel usklađuje *lookup_value* s vrijednostima u argumentu *lookup_array*.

Vrijednost argumenta može biti:

- 1 (*LESS THAN*): funkcija *MATCH* pronalazi najveću vrijednost koja je manja od ili jednaka argumentu *lookup_value*.
- 0 (*EXACT MATCH*): funkcija *MATCH* pronalazi prvu vrijednost koja je u potpunosti jednaka argumentu *lookup_value*.

-1 (*GREATER THAN*): *MATCH* pronalazi najmanju vrijednost koja je veća od ili jednaka argumentu *lookup_value*.

Primjena spomenutih funkcija u LCR simulaciji prikazana je u Tablici 1.2. Za razvoj simulacije korištene su formule polja ili „CSE“ formule za čije je izvođenje potrebno pritisnuti *CTRL + SHIFT + ENTER* da bi se formula unijela, stoga je pored takvih formula u Tablici 1.2. stavljena oznaka „unos: CSE“. U prvom dijelu raspodjele zadataka koji se odnosi na određivanje iteracija, Slika 1.3., stupac D (Iteracija 1, D22:D31) osjenčan je narančastom bojom jer se formule koje se za njega primjenjuju razlikuju od ostatka stupaca u kojima se vrše iteracije, Tablica 1.2. U ovom stupcu određen je ukupan broj ograničenja prethodnosti svake aktivnosti (elementa rada) na temelju ulaznih podataka prema dok su u stupcima od E (Iteracija 2) do M (Iteracija 10) od ukupnog broja potrebnih prethodnosti oduzete one aktivnosti koje su u prethodnoj iteraciji izvršene.

Tablica 1.2. Primjena funkcija u LCR simulaciji

Ćelija	Formula	Primjena u ostalim ćelijama
ITERACIJE ZA ODREĐIVANJE IZVRŠENIH OGRANIČENJA PRETHODNOSTI ELEMENATA RADA		
D22	=SUM(IF(ISERR(SEARCH(\$C\$22:\$C\$31,\$D5)),0,1)) unos: CSE	D22:D31
E22	=IF(ISERR(SEARCH(D\$41,\$D5&\$B5)),D22,D22-1)	E22:M31
ODABIR SLJEDEĆEG IZVEDIVOG ZADATKA ZA DODJELU		
D36	=C3	-
E36	=D38-D40	F36:M36
D37	=SUM(IF(\$C\$5:\$C\$14<=D36,1,0)*IF(D22:D31=0,1,0)) unos: CSE	E37:M37
D38	=IF(D37>=1,D36,\$C\$3)	E38:M38
D39	=1	-
E39	=IF(E37>=1,D39,D39+1)	E39:M39
D40	=MAX(IF(\$C\$5:\$C\$14<=D38,1,0)*IF(D22:D31=0,\$A\$5:\$A\$14,0)) unos: CSE	E40:M40
D41	=IF(COUNTIF(\$A\$5:\$A\$14,D40)=1,VLOOKUP(D40,\$A\$5:\$C\$14,2,FALSE),INDEX(\$C\$22:\$C\$31,MATCH(1,(0=D22:D31)*(D40=\$A\$5:\$A\$14),0),0)) unos: CSE	E41:M41

Drugi dio raspodjele zadataka na radne stanice, odnosi se na odabir sljedećeg izvedivog zadatka za dodjelu. Korištene formule prikazane su u Tablici 1.2., dok je njihovo objašnjenje dato u sljedećem tekstu:

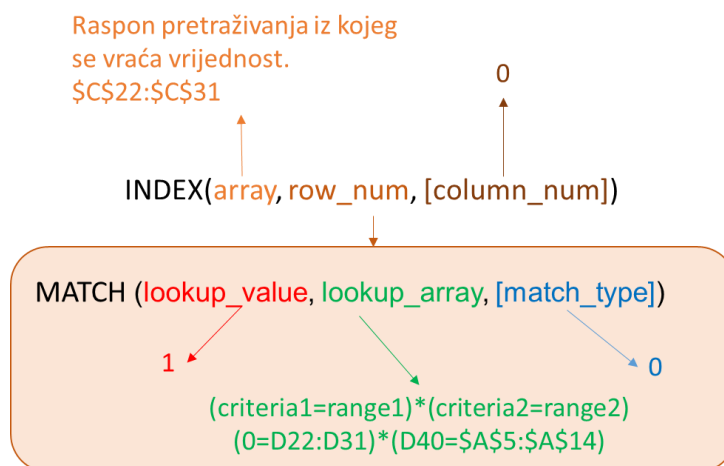
- **Redak 36** (E36:M36) dostupno vrijeme montaže na radnoj stanici jednako je prethodno dostupnom vremenu montaže na toj radnoj stanici umanjenom za iznos vremena montaže prethodno dodijeljene joj aktivnosti.
- **Redak 37** (D37:M37) odnosi se na određivanje broja izvedivih aktivnosti pomoću tablice iteracija. Prvi dio formule, prva *IF* funkcija, provjerava je li dovoljno vremena preostalo za aktivnost, dok drugi dio formule, druga *IF* petlja, provjerava ima li

aktivnost vrijednost nula u stupcu iteracije. Operator množenja „*“ u formulama polja funkcionira kao *AND* operator. Ako su oba uvjeta zadovoljena, produkt *IF* funkcija će biti jedan. Funkcija *SUM* daje ukupan broj zadataka koji zadovoljavaju oba uvjeta. Ukoliko je u broj izvedivih zadataka na toj radnoj stanici nula, potrebno je otvoriti novu radnu stanicu.

- **Redak 38** (D38:M38) računa preostalo raspoloživo vrijeme montaže na radnoj stanici u ovisnosti o dosada dodijeljenim aktivnostima.
- **Redak 39** (E38:M39) određuje na temelju dostupnog vremena i broja izvedivih zadataka je li potrebno otvoriti novu radnu stanicu. Ukoliko se niti jedan zadatak ne može izvršiti u raspoloživom vremenu, otvara se nova radna stanica koja na raspolaganju ima cijelo vrijeme ciklusa.
- **Redak 40** (D40:M40) služi kako bi se odredilo maksimalno prosječno vrijeme aktivnosti koja se može dodijeliti promatranoj radnoj stanici.
- **Redak 41** (D41:M41) odnosi se na odabir aktivnosti koja se dodjeljuje promatranoj radnoj stanici. U ovom retku izvršena je modifikacija formule u odnosu na Weissa. Spomenuti autor je prilikom odabira aktivnosti koristio *VLOOKUP* funkciju kojom je pretraživao aktivnost koja ima traženo vrijeme trajanja, međutim *VLOOKUP* funkcija vraća samo prvu vrijednost na koju naiđe. To bi značilo da ukoliko dvije aktivnosti imaju jednako vrijeme trajanja, funkcija će kao povratnu informaciju dati prvu vrijednost (u ovom slučaju prvu aktivnost) na koju naiđe kao ispravnu i neće tražiti dalje. Stoga je *VLOOKUP* funkcija zamijenjena sljedećom formulom (za ćeliju D41):

$$\begin{aligned}
 &= \text{IF}(\text{COUNTIF}(\$A\$5:\$A\$14, D40) \\
 &= 1, \text{VLOOKUP}(D40, \$A\$5:\$C\$14, 2, \text{FALSE}), \text{INDEX}(\$C\$22:\$C\$31, \text{MATCH}(D40, \\
 &= D22:D31), 0))
 \end{aligned}$$

Ova formula koristi se za pronalaženje imena aktivnosti koja se može dodijeliti, a koja odgovara određenom maksimalnom vremenu trajanja aktivnosti. *COUNTIF* funkcija provjerava koliko je izvedivih zadataka na toj radnoj stanici. Ukoliko postoji samo jedna aktivnosti koja se može dodijeliti, tada se pomoću *VLOOKUP* funkcije ispisuje ime te aktivnosti. Ukoliko postoji više izvedivih rješenja za definirano maksimalno vrijeme trajanja izvedive aktivnosti, za odabir aktivnosti koja se dodjeljuje radnoj stanici koristi se kombinacija funkcija *INDEX* i *MATCH*. Definiranje argumenata formule koja koristi kombinaciju spomenutih funkcija za ćeliju D41 objašnjeno je na Slici 1.4.



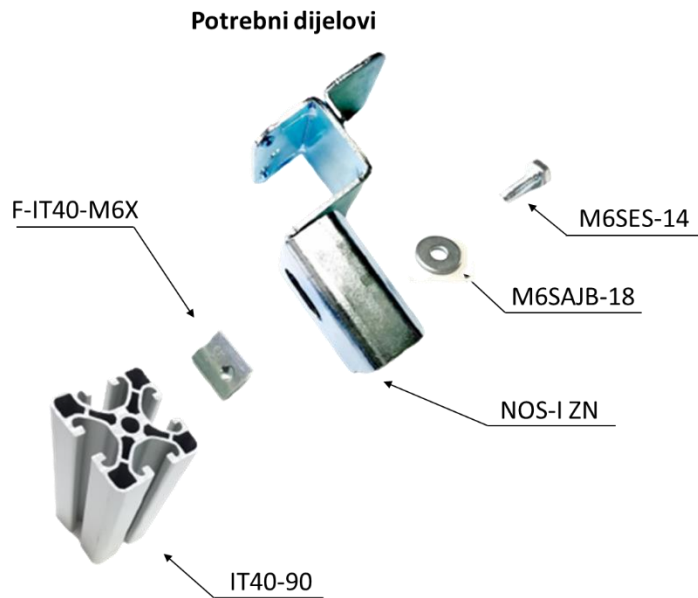
Slika 1.4. Objašnjenje kombinacije formula

Kriterij jedan i dva (engl. *criteria1*, *criteria2*) odnose se na uvjete koji se trebaju ispuniti. Rasponi jedan i dva (engl. *range1* i *range2*) su rasponi unutar kojih se odgovarajući kriteriji testiraju. Predložena MATCH funkcija vraća relativnu poziciju retka za koji su oba kriterija istinita (engl. *TRUE*). Broj vraćen funkcijom MATCH direktno odlazi u *row_num* funkcije INDEX i ispisuje aktivnost u tom retku.

Prilog B

Upute za montažu razolikih proizvoda prvog skupa proizvoda

IT40-INO14



Gotov sklop



Slika 1.5. Upute za montažu proizvoda IT40-INO14

IT40-INO35

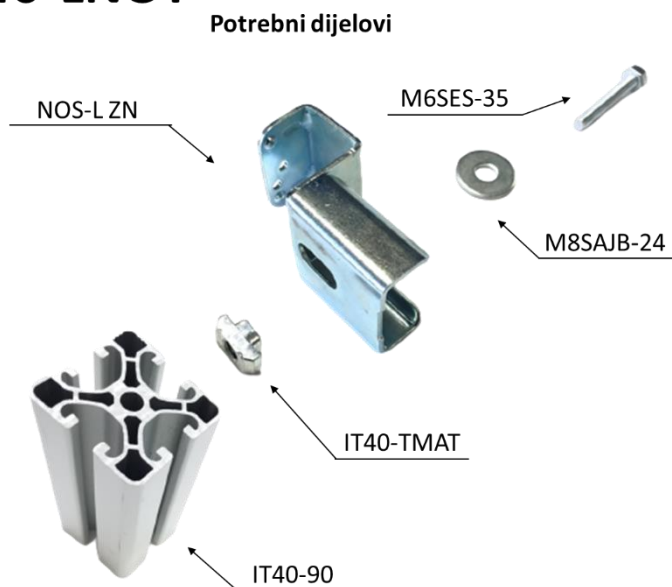


Gotov sklop



Slika 1.6. Upute za montažu proizvoda IT40-INO35

IT40-LNOT

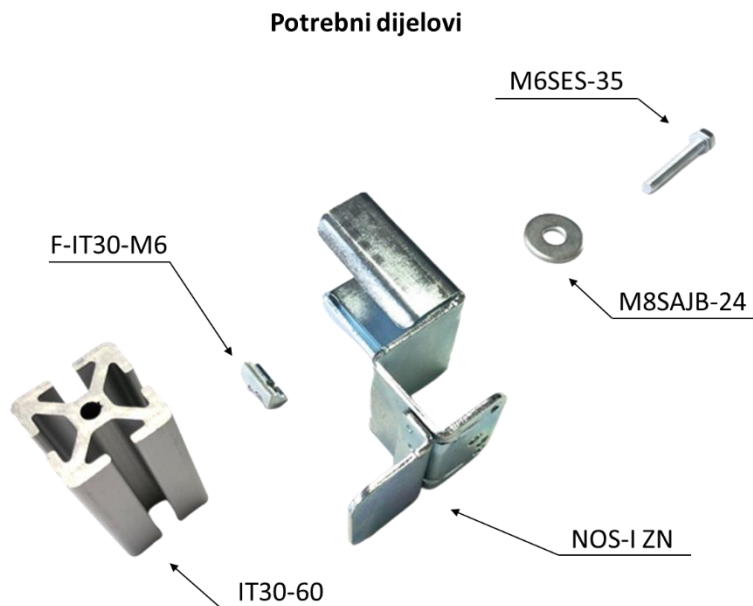


Gotov sklop



Slika 1.7. Upute za montažu proizvoda IT40-LNOT

IT30-6INO

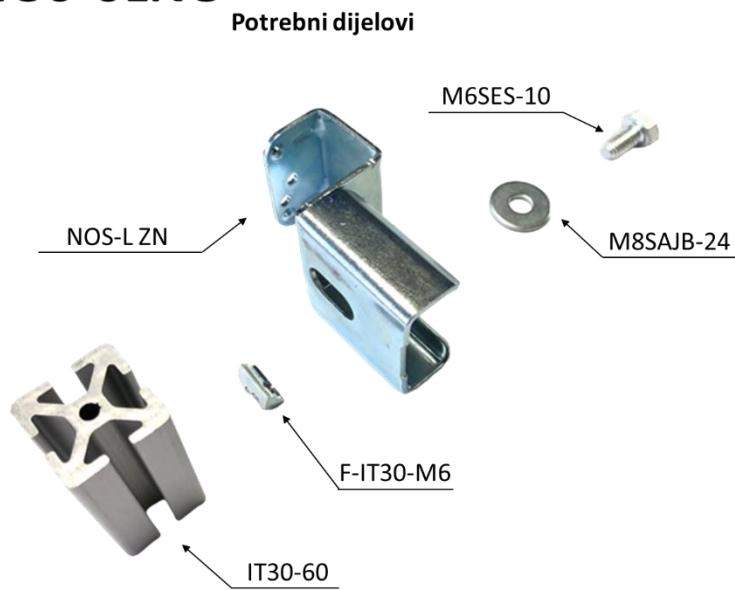


Gotov sklop



Slika 1.8. Upute za montažu proizvoda IT30-6INO

IT30-6LNO

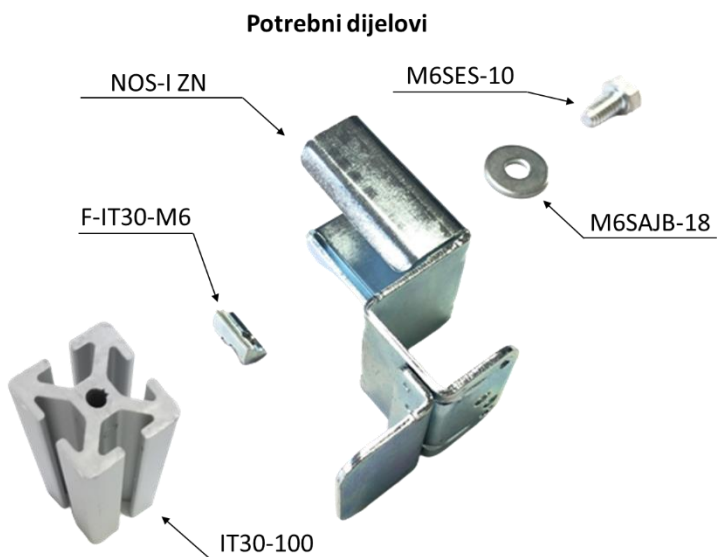


Gotov sklop



Slika 1.9. Upute za montažu proizvoda IT30-6LNO

IT30-100INO



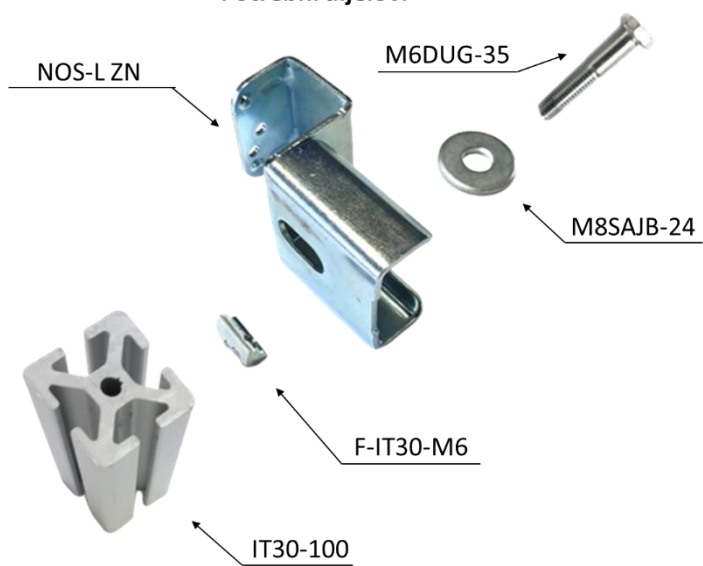
Gotov sklop



Slika 1.10. Upute za montažu proizvoda IT30-100INO

IT30-100LNO

Potrebni dijelovi



Gotov sklop

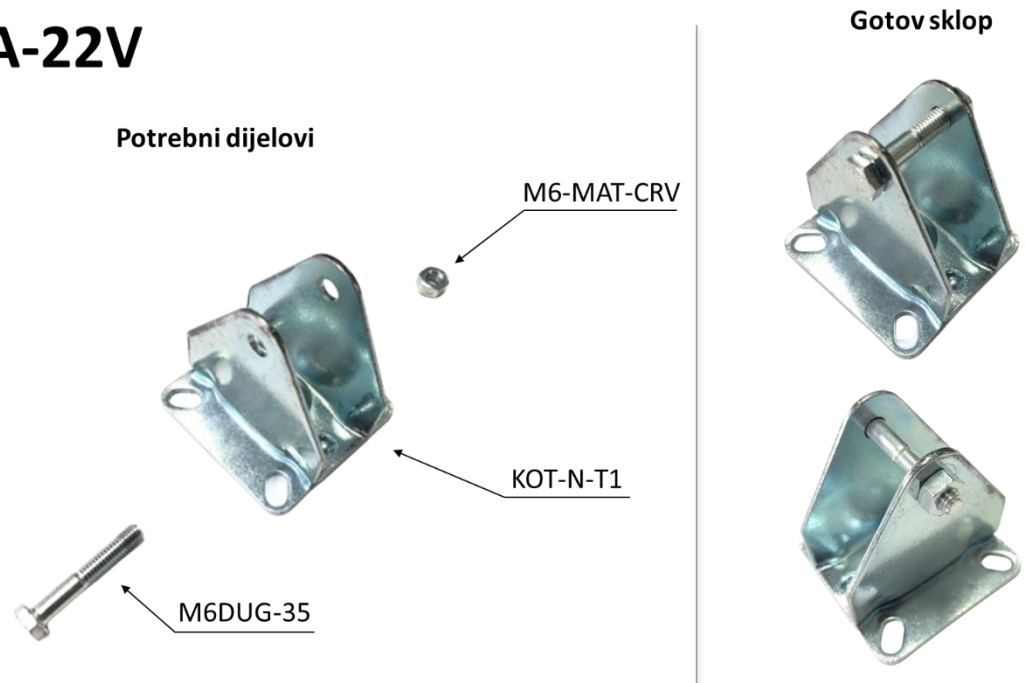


Slika 1.11. Upute za montažu proizvoda IT30-100LNO

Prilog C

Upute za montažu razolikih proizvoda drugog skupa proizvoda

NOSA-22V



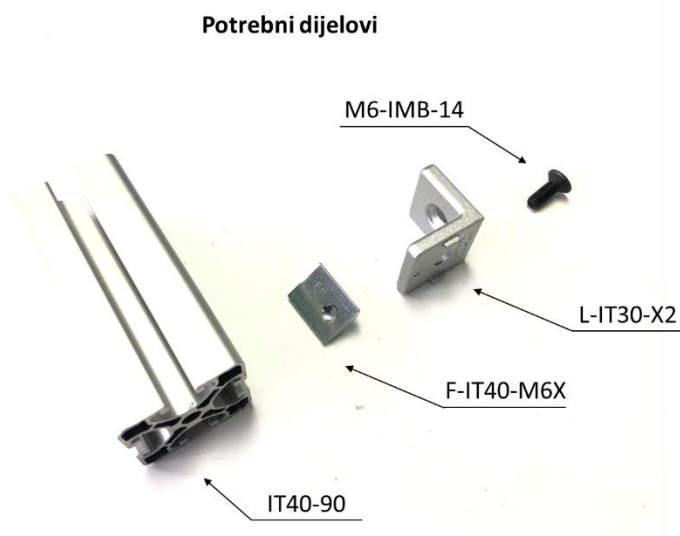
Slika 1.12. Upute za montažu proizvoda NOSA-22V

IT40-LU



Slika 1.13. Upute za montažu proizvoda IT40-LU

IT40N-SL

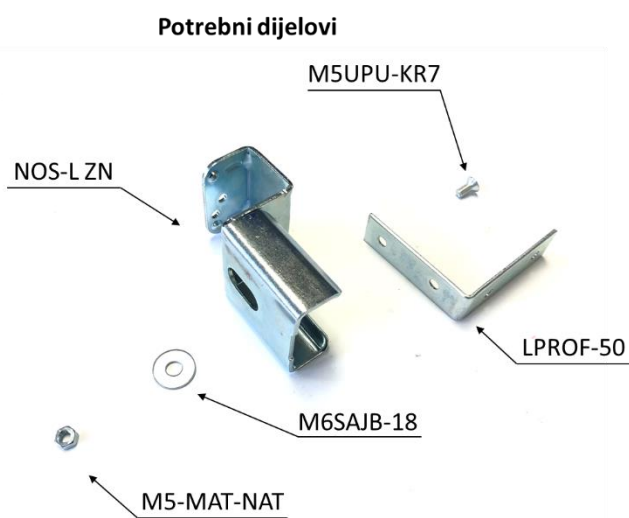


Gotov sklop



Slika 1.14. Upute za montažu proizvoda IT40N-SL

L50-L

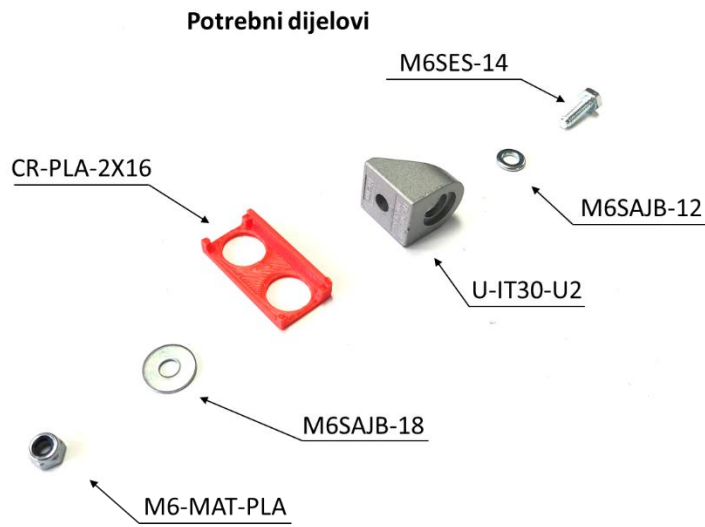


Gotov sklop



Slika 1.15. Upute za montažu proizvoda L50-L

UZV-PL

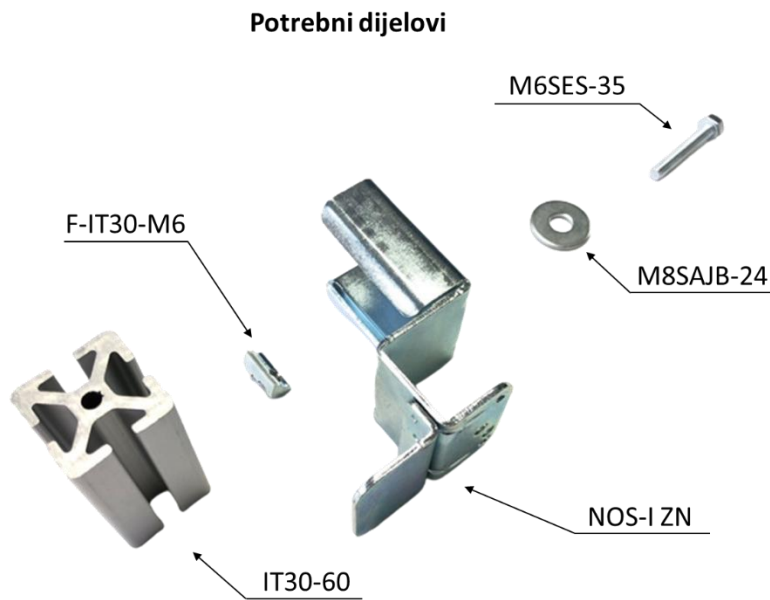


Gotov sklop



Slika 1.16. Upute za montažu proizvoda UZV-PL

IT30-6INO

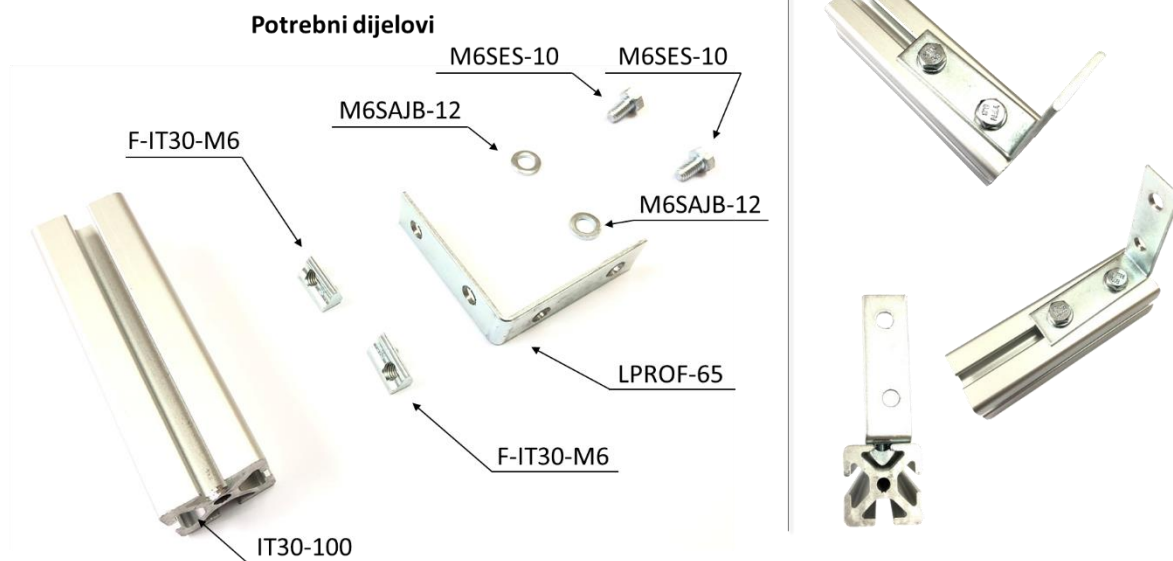


Gotov sklop



Slika 1.17. Upute za montažu proizvoda IT30-6INO

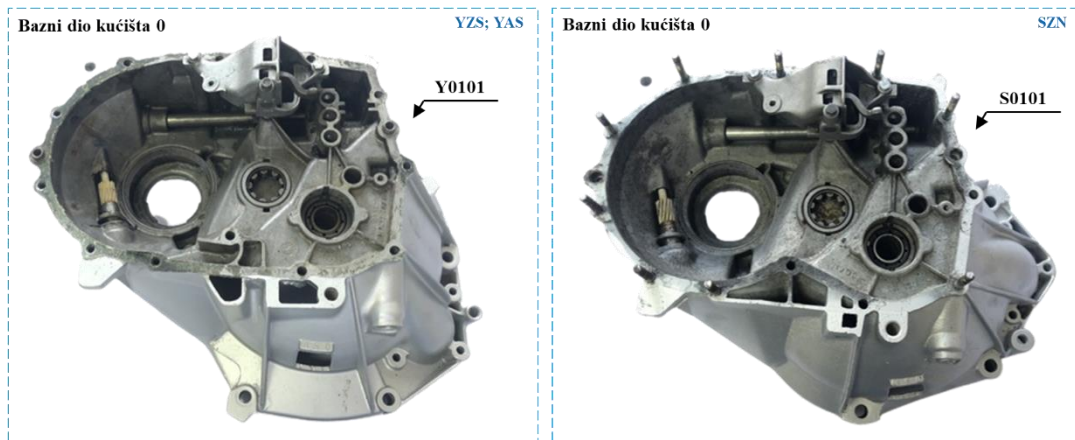
IT30-100L



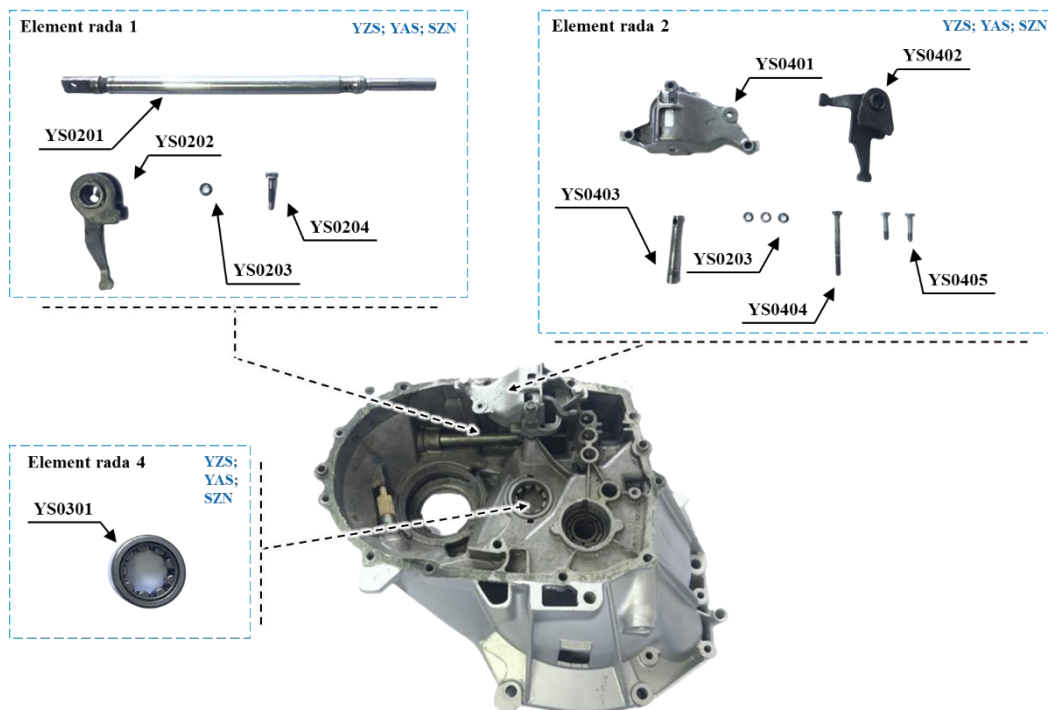
Slika 1.18. Upute za montažu proizvoda IT30-6INO

Prilog D

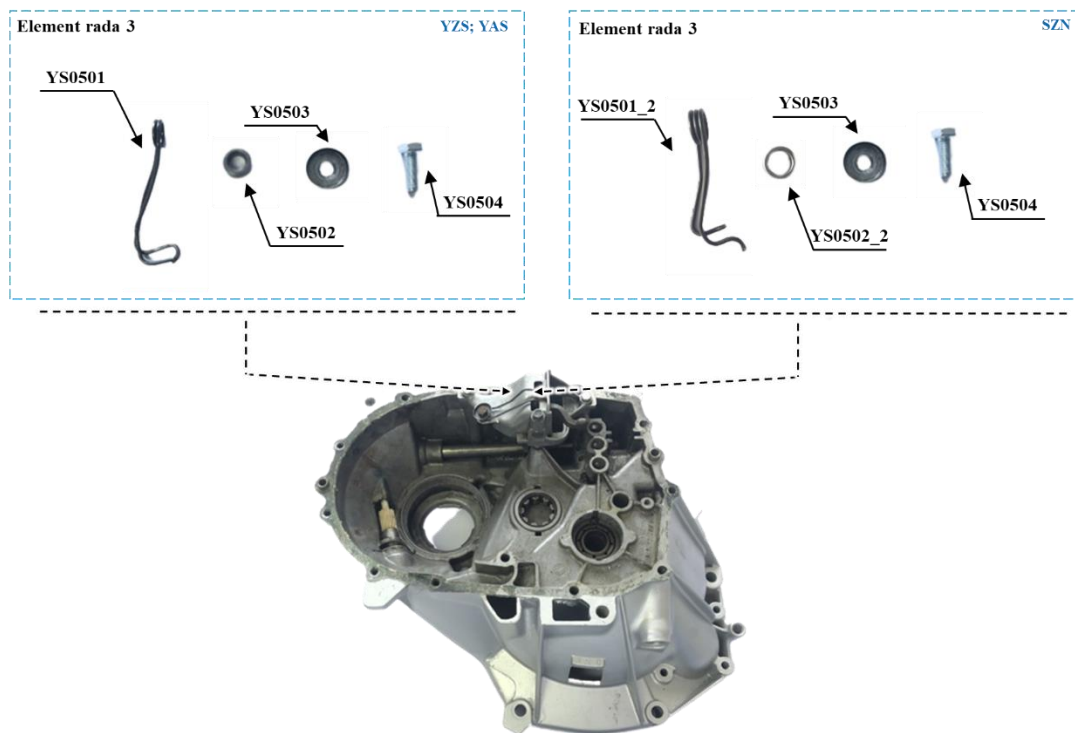
Elementi rada mjenjačke kutije automobila



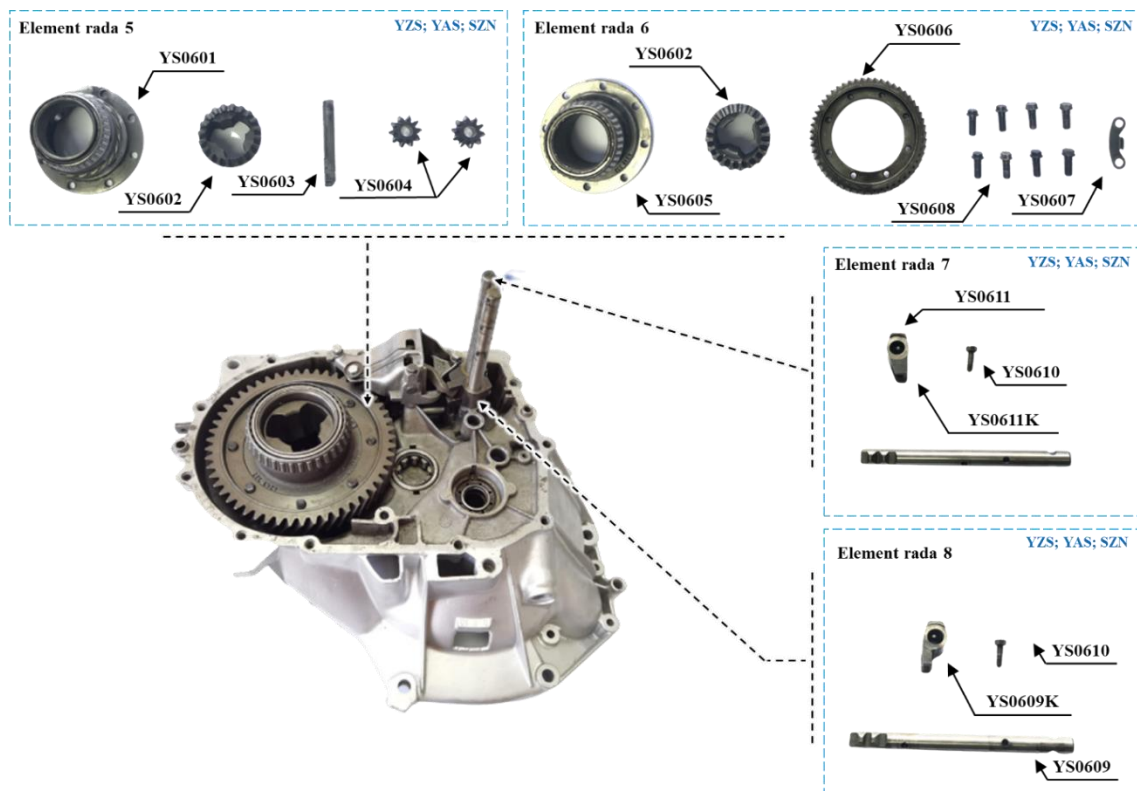
Slika 1.19. Bazni dio kućišta mjenjačkih kutija



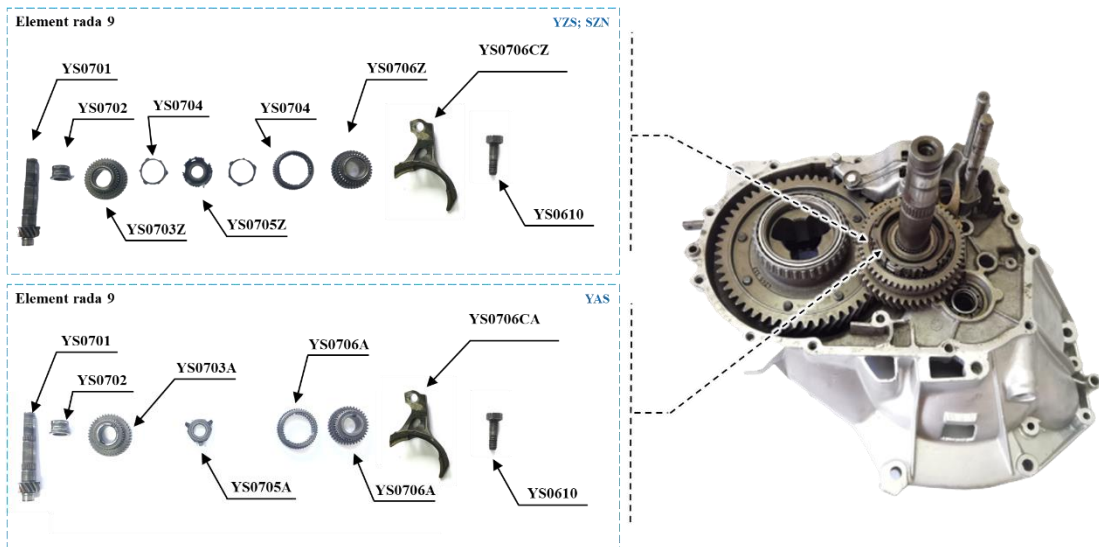
Slika 1.20. Element rada 1, 2, 4



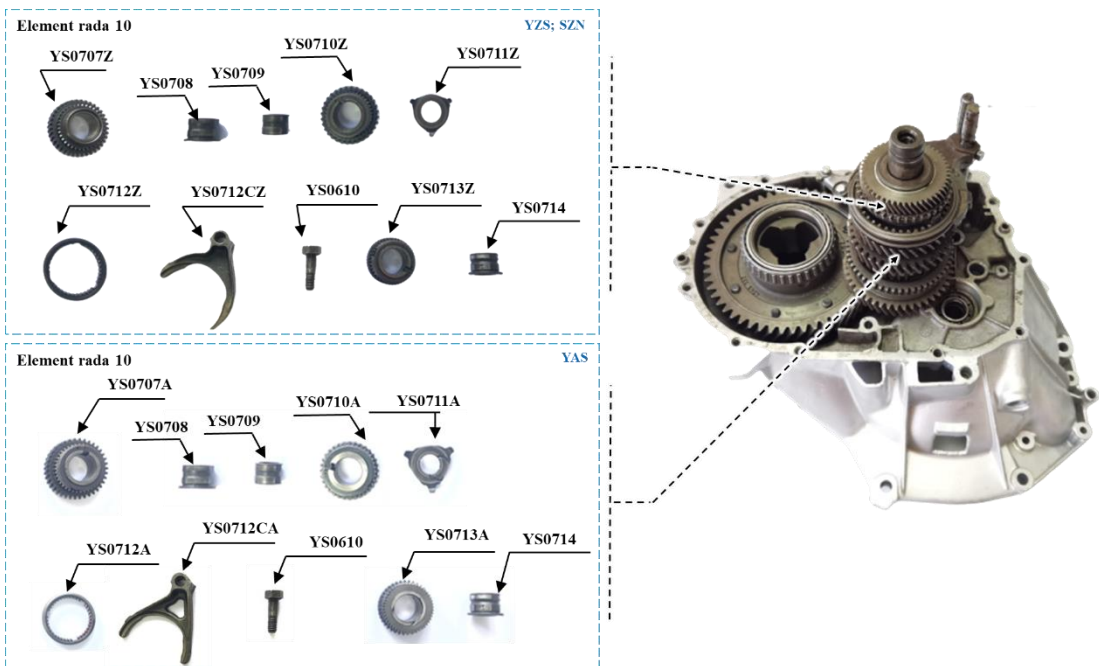
Slika 1.21. Element rada 3



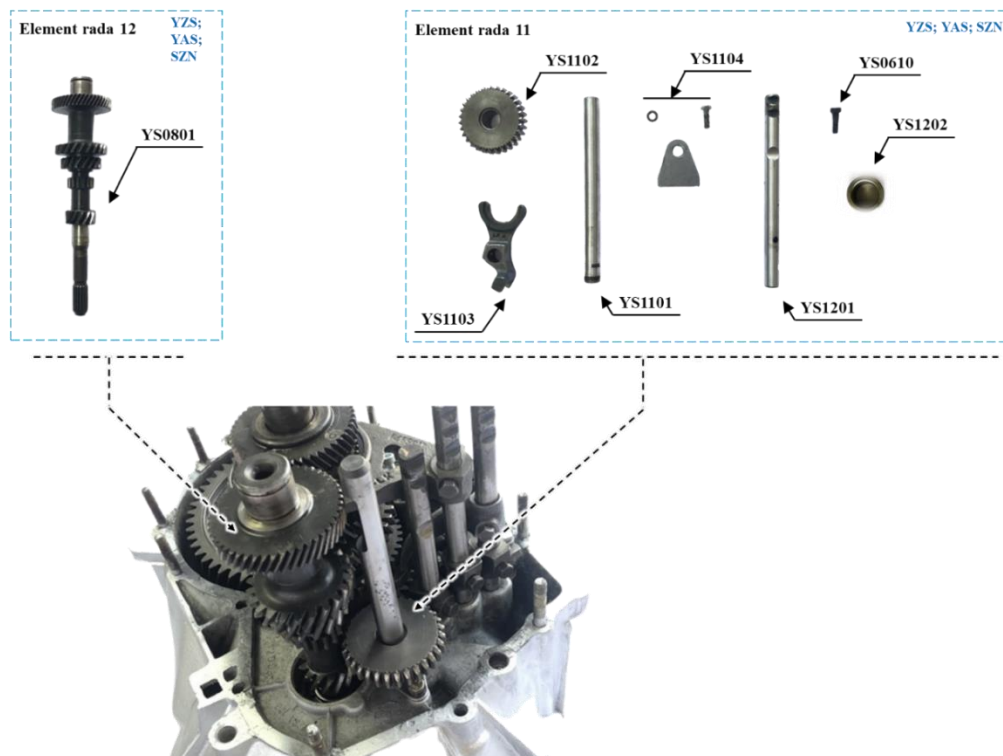
Slika 1.22. Element rada 5, 6, 7, 8



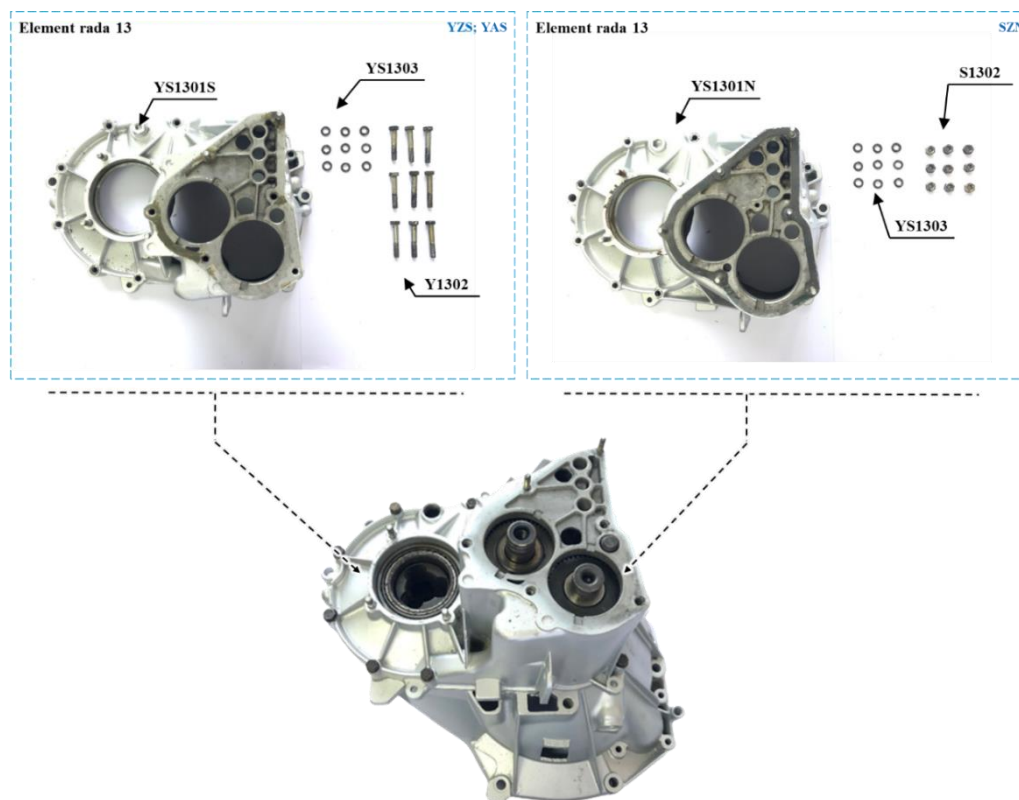
Slika 1.23. Element rada 9



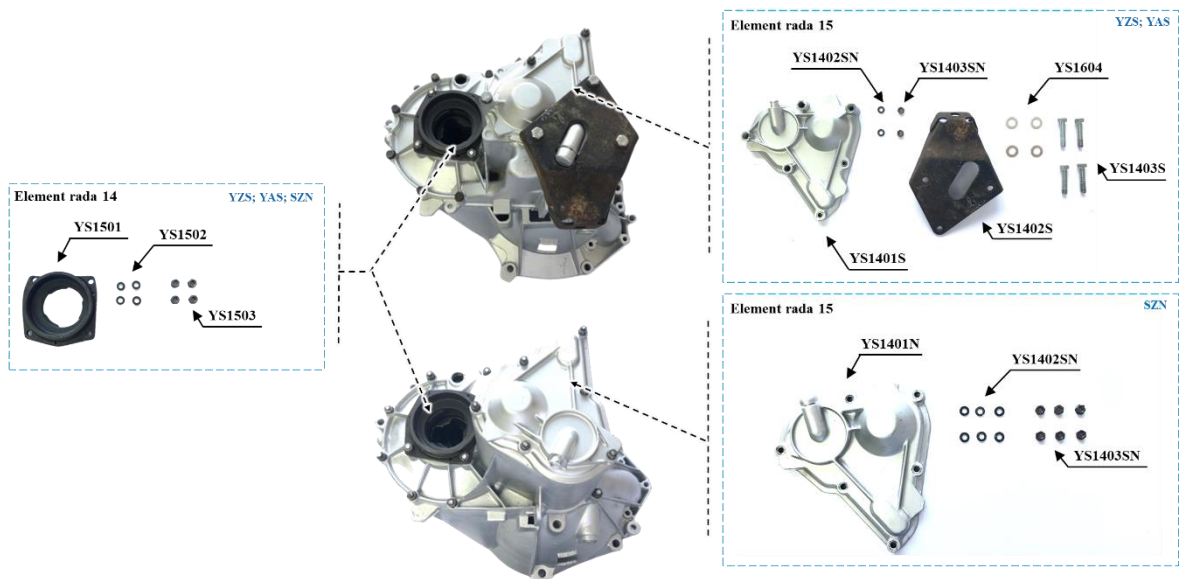
Slika 1.24. Element rada 10



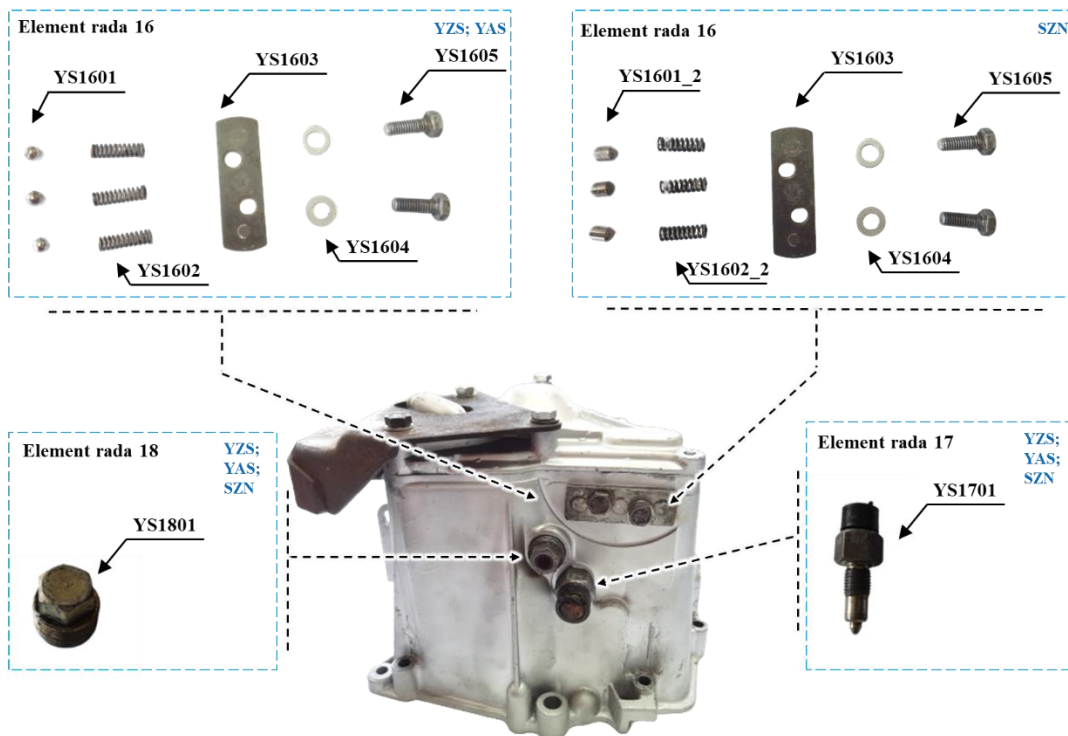
Slika 1.25. Element rada 11 i 12



Slika 1.26. Element rada 13



Slika 1.27. Element rada 14 i 15



Slika 1.28. Element rada 16, 17, 18

Prilog E

Tablica 1.3. Potreban broj očitavanja $s_{snimke,k}$ uz 5 %-tnu preciznost izračunavanja srednjeg vremena očitavanja i 95,45 %-tnu pouzdanost procjene za $s_{snimke,k} = 5$ i $s_{snimke,k} = 10$

Koeficijent stabilizacije, K_s	Pokusno snimanje		Koeficijent stabilizacije, K_s	Pokusno snimanje	
	$s_{snimke,k} = 5$	$s_{snimke,k} = 10$		$s_{snimke,k} = 5$	$s_{snimke,k} = 10$
0,10	3	2	0,56	93	53
0,12	4	2	0,58	100	57
0,14	6	3	0,60	107	61
0,16	8	4	0,62	114	65
0,18	10	5	0,64	121	69
0,20	12	7	0,66	129	74
0,22	14	8	0,68	137	78
0,24	17	10	0,70	145	83
0,26	20	11	0,72	153	88
0,28	23	13	0,74	162	93
0,30	27	15	0,76	171	98
0,32	30	17	0,78	180	103
0,34	34	20	0,80	190	108
0,36	38	22	0,82	200	114
0,38	43	24	0,84	210	120
0,40	47	27	0,86	218	125
0,42	52	30	0,88	230	131
0,44	57	33	0,90	240	138
0,46	63	36	0,92	250	143
0,48	68	39	0,94	261	150
0,50	74	42	0,96	273	156
0,52	80	46	0,98	285	162
0,54	86	49	1,00	296	170

Životopis

Amanda Aljinović Meštrović

Amanda Aljinović Meštrović rođena je 26.09.1991. u Splitu, u Hrvatskoj. Maturirala je u III. gimnaziji (MIOC) u Splitu 2010. godine. Akademske godine 2010./2011. upisuje prediplomski studij industrijskog inženjerstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu. U srpnju 2013. godine stječe zvanje *sveučilišna prvostupnica inženjerka industrijskog inženjerstva*. Iste godine upisuje diplomski studij industrijskog inženjerstva i u srpnju 2015. godine stječe zvanje *magistra inženjerka industrijskog inženjerstva*.

Od travnja 2016. do rujna 2017. radi u poduzeću Deltron d.o.o., kao suradnik u tehničkom odjelu. Poslijediplomski doktorski studij strojarstva na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Nikole Gjelduma upisuje u listopadu 2017. godine. Iste godine zapošljava se na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu, kao asistent na Zavodu za proizvodno strojarstvo, Katedra za industrijsko inženjerstvo. U nastavnim aktivnostima sudjeluje izvođeci laboratorijske, konstrukcijske i auditorne vježbe iz kolegija: Dizajn za montažu, Planiranje i upravljanje proizvodnjom, Proizvodni menadžment, Projektiranje tehnoloških procesa, Planiranje i priprema proizvodnje te Teorija i tehnike mjerenja.

Znanstveno istraživački projekti na kojima je sudjelovala ili sudjeluje su projekt DEPROCIM (UKF) te Erasmus + projekt naziva EXCURS (engl. *An Excellence based Curriculum for the Improvement of LEAN & Green Management Skills in SME*).

Od 2021. godine je član u organizacijskom odboru međunarodne konferencije *Mechanical Technologies and Structural Materials* (MTSM). Aktivno se služi engleskim jezikom. U listopadu 2019. godine odlazi u posjet na Universidade de Aveiro u Portugal u sklopu ERAMUS+ programa.

Kao autor ili koautor sudjelovala je u pisanju i objavljivanju 10 radova u znanstvenim časopisima (sedam radova A kategorije i tri rada B kategorije) i 10 radova u zbornicima skupova s međunarodnom recenzijom (C kategorija) i jednim stručnim radom.

Curriculum vitae

Amanda Aljinović Meštrović

Amanda Aljinović Meštrović was born on September 26, 1991. in Split, Croatia. She graduated in the III. Gymnasium (MIOC) in Split 2010. In the academic year 2010/2011, she enrolled in the university undergraduate study of Industrial Engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split. In July 2013, she obtained the University Bachelor of Science in Industrial Engineering title. The same year she enrolled in a graduate university study in Industrial Engineering and in July 2017, she obtained the title of Master of Science in Industrial Engineering.

In the period from April 2016 to September 2017, she was working in the company Deltron d.o.o. as an associate in the technical department. In October 2017, she enrolled postgraduate doctoral studies in Mechanical engineering at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Naval Architecture in Split under the mentorship of Associate Professor Ph.D. Nikola Gjeldum. The same year, she was employed at the Faculty of Electrical Engineering, Mechanical Engineering and Shipbuilding as an assistant at the Department of Mechanical Engineering Technology, Department of Industrial Engineering. In teaching activities, she has been participating by performing laboratory, construction and auditory exercises for the courses: Design for assembly, Technological process design, Production planning and management, Production management, Production Planning and Preparation and Measurement theory and techniques.

Scientific research projects in which she participated or participates are the DEPROCIM project (UKF) and the Erasmus + project called EXCURS (An Excellence based Curriculum for the Improvement of LEAN & Green Management Skills in SME).

Since 2021, she has been a member of the organizing committee of the International Conference of Mechanical Engineering Technologies and Construction Materials (MTSM). She is fluent in English. In October 2019, she went to the Universidade de Aveiro in Portugal as part of the ERAMUS+ program.

As an author or co-author, she participated in writing and publishing 10 papers in scientific journals (seven papers of A category and three papers of B category), 10 papers in conference proceedings with the international review (C category), and one professional paper.