

Preoblikovanje prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o.

Bregović, Marko

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:070686>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-15**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Bregović

Zagreb, 2017. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Marko Bregović

Zagreb, 2017. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija, materijale dobivene od strane poduzeća i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Goranu Đukiću na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i kolegama na razumijevanju i pruženoj podršci tijekom cijelog studija.

Posebno se zahvaljujem poduzeću TMT d.o.o. i zaposlenicima Tihomiru Hunjetu, dipl. ing. i Jurici Jagarincu, dipl. ing. na prilici, savjetima i ustupljenim podacima koji su mi omogućili izradu ovog rada i značajno pridonijeli njegovoj kvaliteti.

Marko Bregović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Bregović** Mat. br.: 0035193085

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Preoblikovanje prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o.**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Plant Layout Redesign of Company TMT d.o.o.**

Opis zadatka:

S ciljem unapređenja proizvodnog procesa temeljem smanjenja ukupnog transportnog učina, u radu je potrebno provesti razradu i analizu nekoliko varijanti preoblikovanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća.

U radu je potrebno:

- dati sažet opis poduzeća (djelatnost, proizvodni program, proizvodni pogoni, organizacijska shema i odjeli,...)
- za odabrani reprezentativni proizvod prikazati tehnološki proces temeljem kojeg treba definirati matricu prijevoza
- prikazati detaljno prostorni raspored odjela i elemenata proizvodnog sustava temeljem kojeg treba definirati matricu udaljenosti
- izračunati ukupni transportni učin postojećeg stanja za odabrani reprezentativni proizvod i realnu veličinu serije
- prezentirati i razraditi nekoliko varijanti preoblikovanih rješenja prostornog rasporeda (teorijske i realne s obzirom na uvažena ograničenja)
- usporediti i odabrati najpovoljniju varijantu, pri čemu upotrijebiti i višekriterijano odlučivanje

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


Zadatak zadan:
11. svibnja 2017.

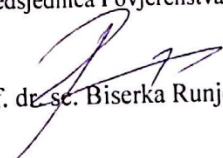
Rok predaje rada:
13. srpnja 2017.

Predvideni datum obrane:
19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:


Izv. prof. dr. sc. Goran Đukić


Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA	VII
POPIS OZNAKA.....	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY.....	X
1. UVOD.....	1
2. PROIZVODNI SUSTAV.....	3
2.1. Zahtjevi na proizvodni sustav	5
2.2. Utjecaj promjena na proizvodni sustav	6
2.3. Koncepti proizvodnih sustava	6
2.3.1. Rekonfigurabilni proizvodni sustavi.....	7
2.3.2. Lean proizvodni sustavi	9
2.3.3. Agilni proizvodni sustavi	12
3. OBLIKOVANJE PROSTORNOG RASPOREDA PROIZVODNIH SUSTAVA.....	15
3.1. Problematika određivanja najpovoljnijeg rasporeda proizvodnih sustava.....	15
3.2. Vrste projektnih zadataka kod projektiranja proizvodnih sustava	17
3.3. Proces projektiranja proizvodnih sustava	18
3.3.1. Tradicionalni pristup projektiranju proizvodnih sustava	18
3.3.2. Suvremeni pristup projektiranju proizvodnih sustava	19
3.4. Načela projektiranja proizvodnih sustava	21
3.5. Strukture proizvodnih sustava.....	22
3.5.1. Proizvodni sustav strukturiran prema vrsti obrade	24
3.5.2. Proizvodni sustav strukturiran prema predmetu rada	25
3.5.3. Automatizirane proizvodne strukture.....	28
3.6. Tok materijala	29
3.7. Kapacitivno dimenzioniranje proizvodnog sustava	33
3.8. Prostorno dimenzioniranje proizvodnog sustava	34
3.9. Metode i alati oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnog sustava.....	38

3.9.1. Heurističke metode	40
3.9.2. Metaheurističke metode	45
3.9.3. Računalne aplikacije	46
4. PODUZEĆE TMT d.o.o.	54
4.1. Organizacijska struktura	56
4.2. Proizvodni program.....	57
4.3. Tehnološki kapaciteti	57
5. ANALIZA TOKA MATERIJALA PODUZEĆA TMT d.o.o.	59
5.1. Snimanje postojećeg stanja	59
5.2. Izbor reprezentantnog proizvoda	62
5.3. Opis proizvodnog procesa.....	65
5.4. Definiranje tokova materijala i izračun ukupnog transportnog učina.....	68
6. IZRADA VARIJANTI RJEŠENJA PROSTORNOG RASPOREDA ELEMENATA PROIZVODNOG SUSTAVA	73
6.1. Teorijska varijanta.....	73
6.2. Varijanta II	79
6.3. Varijanta III.....	84
6.4. Varijanta IV.....	89
6.5. Varijanta V	93
7. PRIMJENA AHP METODE KAO PODRŠKE PRI ODABIRU VARIJANTE PROSTORNOG RASPOREDA ELEMENATA PROIZVODNOG SUSTAVA PODUZEĆA TMT d.o.o.....	99
7.1. Opća podjela metoda višekriterijalnog odlučivanja.....	99
7.1.1. ELECTRE	100
7.1.2. TOPIS.....	100
7.1.3. PROMETHEE.....	101
7.1.4. Grey Theory	101
7.2. AHP metoda	102
7.2.1. Definicija i osnovne značajke	102
7.2.2. Matematički model	103
7.2.3. Konzistentnost.....	105

7.2.4. Proces primjene AHP metode	105
7.2.5. Prednosti i nedostaci AHP metode	106
7.3. Primjena AHP metode	108
7.3.1. Definicija i analiza kriterija.....	108
7.3.2. Izračun težina kriterija i provjera konzistentnosti.....	111
7.3.3. Procjena varijanti u odnosu na kriterije	111
7.3.4. Analiza osjetljivosti.....	112
8. ZAKLJUČAK	116

POPIS SLIKA

Slika 1. Osnovni elementi proizvodnog sustava [1].....	3
Slika 2. Odnos proizvoda, proizvodnog procesa i sustava [1]	4
Slika 3. Struktura rekonfigurabilnih proizvodnih sustava [4].....	7
Slika 4. Rekonfigurabilni alatni strojevi [5].....	8
Slika 5. Ključni koncepti agilnih proizvodnih sustava prema [7].....	13
Slika 6. Strukture proizvodnih sustava prema [1]	23
Slika 7. Struktura proizvodnog sustava prema vrsti obrade prema [1]	24
Slika 8. Struktura proizvodnog sustava prema predmetu rada – izradbena linija prema [1] ...	26
Slika 9. Struktura proizvodnog sustava prema predmetu rada - izradbene stanice prema [1].	27
Slika 10. Osnovne komponente FIS – a [1]	28
Slika 11. Sankeyjev dijagram toka materijala prema [2]	30
Slika 12. Razine toka materijala prema VDI 3300 [1].....	30
Slika 13. Shematski prikaz tokova materijala prema [1]	33
Slika 14. Sastavnice površine radnog mjesta [1].....	36
Slika 15. Prikaz metoda za određivanje prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava prema [11]	39
Slika 16. Mreža trokuta s pripadajućim čvorovima	41
Slika 17. Radno sučelje računalne aplikacije FactoryCAD iz [24].....	47
Slika 18. Radno sučelje računalne aplikacije FactoryFLOW iz [24].....	49
Slika 19. Radno sučelje aplikacije Catia Plant Layout 1 iz [25].....	51
Slika 20. Radno sučelje aplikacije prema [26].....	52
Slika 21. logo poduzeća TMT d.o.o. [14]	54
Slika 22. Prikaz mikrolokacije u Čakovcu (lijevo) i u Lepoglavi (desno) [14]	54
Slika 23. Mjerni laboratorij poduzeća TMT d.o.o. [14].....	55
Slika 24. Organizacijska struktura poduzeća TMT d.o.o.	56
Slika 25. Prikaz dijela proizvodnog programa [14]	57
Slika 26. Skica mikrolokacije poduzeća TMT d.o.o. u Lepoglavi.....	61
Slika 27. Reprezentantni proizvod: prednji dio okvira utovarivača [14]	62
Slika 28. Struktura reprezentativnog proizvoda	63
Slika 29. Okvirni tijek proizvodnog procesa izrade reprezentativnog proizvoda	65
Slika 30. Skica proizvodnog sustava - snimljeno stanje	69
Slika 31. Matrica transportnih intenziteta - snimljeno stanje.....	70

Slika 32. Matrica transportnih udaljenosti - snimljeno stanje	71
Slika 33. Matrica ukupnog transportnog učina između pojedinih radnih mjesta - snimljeno stanje.....	72
Slika 34. Modificirana metoda trokuta - teorijska varijanta.....	74
Slika 35. Mreža trokuta - teorijska varijanta	75
Slika 36. Skica proizvodnog sustava - teorijska varijanta.....	76
Slika 37. Matrica transportnih udaljenosti – teorijska varijanta.....	77
Slika 38. Matrica ukupnog transportnog učinka - teorijska varijanta	78
Slika 39. Modificirana metoda trokuta za objekt 3 - varijanta II	80
Slika 40. Modificirana metoda trokuta za objekt 5 - varijanta II	80
Slika 41. Skica proizvodnog sustava - varijanta II.....	81
Slika 42. Matrica transportnih udaljenosti - varijanta II	82
Slika 43. Matrica transportnog učina - varijanta II	83
Slika 44. Skica proizvodnog sustava - varijanta III	86
Slika 45. Matrica transportnih udaljenosti - varijanta III.....	87
Slika 46. Matrica ukupnog transportnog učina - varijanta III.....	88
Slika 47. Skica proizvodnog sustava - varijanta IV	90
Slika 48. Matrica transportnih udaljenosti – varijanta IV	91
Slika 49. Matrica ukupnog transportnog učina – varijanta IV	92
Slika 50. Skica proizvodnog sustava - varijanta V.....	94
Slika 51. Matrica transportnih udaljenosti - varijanta V	95
Slika 52. Matrica ukupnog transportnog učinka - varijanta V	96
Slika 53. Osnovne metode višekriterijalnog odlučivanja prema [16]	100
Slika 54. Prikaz hijerarhijskog modela	110
Slika 55. Težine kriterija i konzistentnost.....	111
Slika 56. Prikaz rezultata odabira.....	112
Slika 57. Usporedba grafova dinamičnosti	113
Slika 58. Analiza osjetljivosti - graf performansi dobivenog rješenja	114
Slika 59. Analiza osjetljivosti - graf performansi s promijenjenim težinama kriterija	114
Slika 60. Analiza osjetljivosti – graf gradijenta	115

POPIS TABLICA

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti nekih površina prema [1]	35
Tablica 2. Faktori za proračun površine radnog mjesta prema [1].....	37
Tablica 3. Reprezentativni tehnološki kapacitetea poduzeća prema [14]	58
Tablica 4. Popis potrebnih pozicija koje čine reprezentativni proizvod (sklop)	64
Tablica 5. Popis radnih mjesta	67
Tablica 6. Iznosi transportnih učina kod pojedinih varijanti prostornog rasporeda.....	97
Tablica 7. Vrijednosti slučajnog indeksa konzistentnosti <i>RI</i> [20].....	105
Tablica 8. Opis Saatyjeve skale prioriteta prema [20]	106

POPIS KRATICA

Kratika	Izvorni naziv
AHP	Analytical Hierarchy Process
AGV	Automated Guided Vehicles
CAD	Computer - Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CORELAP	Computerized Relationship Layout Planning
CRAFT	Computerized Relative Allocation of Facilities Technique
DNC	Direct Numerical Control
ELECTRE	Elimination et choix la réalité
ERP	Enterprise Resource Planning
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FRAT	Facilities Relative Allocation Technique
MAT	Modular Allocation Technique
MULTIPLE	Multi – floor Plant Layout Evaluation,
PLANET	Plant Layout Analysis and Evaluation Technique
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations
SMED	Single-Minute Exchange of Die
TOPIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
TPM	Total Productive Maintenance
TPS	Toyota Production System
VSM	Value Stream Mapping

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_0	m^2	Površina osnove radnog stroja
A_N	m^2	Površina radnog mjesta
A_{RMi}	m^2	Površina i – tog radnog mjesta
b_{ij}	-	Ukupni transportni intenzitet između i – tog i j – tog radnog mjesta
b_{ijk}	-	Broj prijevoza k – tog dijela između i – tog i j – tog radnog mjesta
CI	-	Indeks konzistentnije
CR	-	Omjer (ne)konzistentnosti
D_0	m	Dodatak za održavanje
d_{ij}	m	Udaljenost između i – tog i j – tog radnog mjesta
D_P	m	Dodatak za posluživanje
D_{RM}	m	Duljina radnog mjesta sa strane posluživanja
D_{SO}	m	Duljina sredstva za odlaganje
f_{ij}	n.j./m	Trošak prijevoza od i - tog do j - tog radnog mjesta
f_{oi}	-	Faktor u ovisnosti o površini i – tog radnog stroja
m	kom	Broj radnih mjesta
n	kom	Broj kriterija / alternativa
n_k	kom	Godišnja potražnja k – tog proizvoda na promatranom stroju
n_{OK}	-	Potreban broj prijevoza jedne serije k – tog dijela
n_{Sk}	-	Broj serija k – tog dijela u promatranom razdoblju
n_{TE}	kom	Teoretski potreban broj strojeva
q	m	Ukupni transportni učin
q_{ij}	m	Transportni učin između i – tog i j – tog radnog mjesta
Q_{POk}	kom	Broj dijelova u jednom sredstvu za odlaganje
Q_{Sk}	kom	Veličina serije k – tog dijela
Q_{TSk}	kom	Broj sredstva za odlaganje k – tog dijela koji se prevozi u jednoj vožnji
RI	-	Slučajni indeks konzistentnosti
s_{ij}	-	Udaljenost između i – tog i j – tog radnog mjesta
\check{S}_{RM}	m	Širina radnog mjesta
\check{S}_{SO}	m	Širina sredstva za odlaganje
t_{1kj}	s	Komadno vrijeme obrade na stroju za j – tu operaciju k – tog proizvoda
t_E	s	Vremensko opterećenje stroja na godišnjoj razini
t_{PZkj}	s	Pripremno – završno vrijeme na stroju za j – tu operaciju k – tog proizvoda
w_i	-	Težina i – tog kriterija
x_{ij}	-	Varijabla odlučivanja
η_{RE}	-	Stupanj iskoristivosti radnog mjesta
λ_{max}	-	Najveća svojstvena vrijednost

SAŽETAK

U cilju unapređenja proizvodnog procesa temeljem smanjenja ukupnog transportnog učina, u radu je pružana teorijska osnova, te prikazana provedena razrada i analiza nekoliko varijanti kod preoblikovanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. Na temelju izrađenih varijanti prostornog rasporeda i njihove analize, provedeno je višekriterijalno odlučivanje i usporedba dobivenih rješenja.

U prvom dijelu ovog rada prikazana je teorijska osnova proizvodnih sustava, zahtjevi i utjecaj promjena na proizvodne sustave te osnove projektiranja proizvodnih sustava. Opisan je koncept toka materijala kao osnove koja povezuje sve elemente proizvodnog sustava s ciljem ostvarenja proizvodnog sustava kao kohezivnog modela visokih performansi. Ovdje se također daje pregled metoda i alata oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnih sustava uz uvodni prikaz aktualnih računalnih aplikacija koje se koriste u tu svrhu.

U drugom dijelu rada je uvodno predstavljeno poduzeće TMT d.o.o. koje je ustupilo svoje proizvodne podatke na primjeru reprezentativnog proizvoda, zahvaljujući kojem je postavljen temelj za daljnju analizu toka materijala i primjenu prethodno navedenih znanja i metoda. Analiza toka materijala slijedi u nekoliko faza: snimanje i analiza postojećeg stanja gdje se definira problematika mikrolokacije promatranog pogona proizašla iz kombiniranog načina gradnje proizvodnog sustava, odabir reprezentativnog proizvoda te analizom strukture proizvoda i redosljeda tehnoloških procesa, definirani su tokovi materijala (matrice transportnog intenziteta, udaljenosti i učinka).

Treći dio se bavi izradom nekoliko varijanti prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava, njihovom analizom te, uz pomoć zaposlenika poduzeća, odabirom najprikladnijeg rješenja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava. U ovom djelu rada detaljno je prikazana izrada i analiza pet varijanti rasporeda elemenata.

Posljednji dio bavi se uvođenjem dodatnih kriterija pri ocjenjivanju izrađenih varijanti te primjeni odabrane metode višekriterijalnog odlučivanja kao podrške pri odabiru najprikladnije varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava.

Ključne riječi: projektiranje proizvodnog sustava, preoblikovanje prostornog rasporeda proizvodnog sustava, minimizacija ukupnog transportnog učina, višekriterijalno odlučivanje, odabir najprikladnijeg prostornog rasporeda.

SUMMARY

In order to improve the production process based on the reduction of total transport distance, this paper provides insight from a theoretical approach, elaboration, analysis of several variants of the company TMT Ltd. plant layout designs, as well as decision process of choosing the most appropriate among them.

The first part of this paper provides a theoretical approach related to production systems, the requirements and impact of changes on production systems and the basics of designing production systems. The concept of material flow is described as a fundamental approach that connects all elements of the production system with the aim of achieving the production system as a cohesive system capable of high output performance. Here is also given an overview of methods and tools for various plant layout design problems in addition to an introductory overview of current computer applications used for this purpose.

In the second part of the paper, the company TMT Ltd. is introduced which provided its production data on a representative product sample. The product sample provided the basic input information for further material flow analysis and application of the above-mentioned methods and tools. The material flow analysis follows in several phases: recording and analysis of the existing case study where the problem of the microlocation of the observed plant originated from, the selection of the representative product and the analysis of the product structure and, in order to determinate the production planning process, the flow of materials (transport intensity matrix, and transport distance matrix) is quantified.

The third part deals with the construction of several plant layout variants of the production system, their analysis and, with the help of the company employees, selection of the most appropriate layout for the plant layout design problem. The presentation of the constructed five plant layout variants is given in a detailed view.

The last part deals with the initiation of additional criteria in evaluating the created plant layout variants and the selection of the chosen multi - criteria decision - making method to support the selection of the most suitable production system plant layout.

Keywords: production system design, plant layout redesign, minimizing overall transport distance, multi-criteria decision making, plant layout selection.

1. UVOD

Projektiranje novih, ali i postojećih proizvodnih sustava ključna je aktivnost prostornog prilagođavanja rasporeda proizvodnih kapaciteta s ciljem povećanja njihove iskoristivosti, ali i osiguranja određene fleksibilnost koja osigurava brzi odziv na stalno promjenjive zahtjeve tržišta. Stoga, projektiranje novih ali i postojećih proizvodnih sustava predstavlja poseban izazov i odgovornost s obzirom da proizvodni sustav svojim položajem i strukturom direktno utječe na svoje sastavne elemente, ali i na vlastite izlazne performanse.

Prilikom realizacije procesa koje je potrebno egzaktno definirati, obuhvaćeni su svi segmenti proizvodnog sustava koji imaju niz različitih zadataka koje treba prostorno i vremenski uskladiti prema zajedničkom cilju – uz prihvatljive uvjete pružiti korisniku proizvode i rješenja koji zadovoljavaju njegove potrebe. U novije vrijeme proizvodni sustavi (ali i ostale organizacije) djeluju u vrlo promjenjivom, kompetitivnom i zahtjevnom tržištu na globalnoj i lokalnoj razini.

Značajke okruženja u kojem se nalaze proizvodni sustavi su [2]:

- Globalizacija
- Individualizacija želja kupaca
- Intenzivna primjena automatizacije, novih tehnologija i novih materijala
- Uvođenje zelenih i održivih načela u svim segmentima proizvodnje i opskrbnog lanca
- Demografske promjene
- Kraći životni vijek proizvoda
- Povećanje pouzdanosti tehničkih sustava
- Integracija proizvodnih i uslužnih procesa

Ove značajke predstavljaju veliki izazov za kreativnost, kompetencije, znanje, iskustvo i inovativnost svih elemenata proizvodnih sustava što zahtjeva stvaranje platforme za umreženu izmjenu informacija i znanja te bližu i intenzivniju suradnju između svih elemenata opskrbnog lanca promatranog proizvodnog sustava. Iz navedenog proizlazi potreba za dodatnim analizama postojećih, ali i novih proizvodnih sustava kako bi se osigurala što bolja iskoristivost postojećih kapaciteta uz zadržavanje što većeg stupnja fleksibilnosti kako bi se na tržište mogao plasirati konkurentan proizvod koji osim zadovoljenja zahtjeva kupaca, osigurava jaku poslovnu sposobnost i sigurnost poduzeća u kompetitivnom okruženju.

Cilj ovoga rada je pružiti teorijsku podlogu pri pristupanju problematici preoblikovanja postojećeg prostornog rasporeda na primjeru proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. Oblikovanje i odabir najpogodnijeg prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava predstavljaju neke od najvažnijih odluka poduzeća koje imaju direktni utjecaj na sve elemente proizvodnog sustava u kratkom i dugom vremenskom razdoblju.

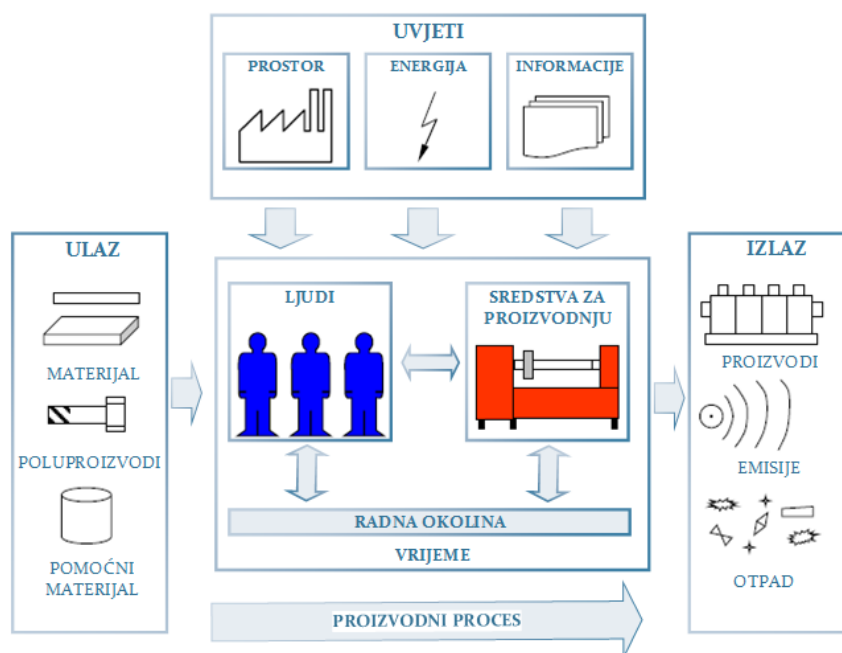
S obzirom na složenost promatranog proizvodnog sustava, osim kriterija minimizacije ukupnog transportnog učina, potrebno je definirati i procijeniti oblikovane varijante prostornih rasporeda u odnosu na veći broj postavljenih kriterija koje često karakterizira činjenica kako su oni međusobno suprotstavljeni. Kako ne postoji univerzalna metoda koja će riješiti navedeni problem, potrebno je razmotriti upotrebu neke od metoda višekriterijalnog odlučivanja kao podrške jednoj od najvažnijih odluka poduzeća, a to je odabir najprikladnijeg prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava.

Tako ovaj rad, kao zaokružena cjelina, obuhvaća i detaljno obrađuje sve dijelove vezane uz analizu, projektiranje i odabir najprikladnijeg prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava. Rad daje pregled teorijskih osnova proizvodnih sustava, prikazuje osnovne značajke tokova materijala te kapacitivnog i prostornog dimenzioniranja proizvodnog sustava. Cilj iznošenja teorijskog dijela u ovom opsegu je kvalitetnije razumijevanje sadržaja iznesenog u nastavku koji se sastoji od provođenja analize toka materijala poduzeća TMT d.o.o., izrade varijanti prostornog rasporeda elemenata promatranog proizvodnog sustava te konačno, odabir najprikladnije varijante prostornog rasporeda elemenata kod kojeg se osim uvažavanjem najutjecajnijeg kriterija minimizacije ukupnog transportnog učina pristupa i višekriterijalnom odlučivanju.

2. PROIZVODNISUSTAV

Kada je riječ o pojmu proizvodnog sustava, on se prema [1] može definirati kao kompleksna socijalna i materijalna cjelina koja ima funkciju stvaranja vrijednosti transformacijom ulaznih dobara (materijala, poluproizvoda, pomoćnog i potrošnog materijala) u izlaz (proizvod, emisije, otpadni materijal). Drugim riječima, vremenskim (sinkronizacija) i funkcionalnim (koordinacija) usklađivanjem svih navedenih elemenata proizvodnog sustava nastoje se proizvesti dobra koja zadovoljavaju zahtjeve kupaca.

Stvaranje vrijednosti se vrši na temelju proizvodnih procesa kao skupom organiziranih aktivnosti posvećenih transformaciji sirovina u gotove proizvode. Proizvodni procesi predstavljaju realizaciju tehnološkog procesa u prostoru i vremenu. Tehnološkim se procesom, pojednostavljeno, određuje način i redoslijed izvođenja proizvodnih aktivnosti i kontrole kvalitete. Pritom izlazni proizvod jednog proizvodnog sustava često može predstavljati ulaz u drugi proizvodni sustav.



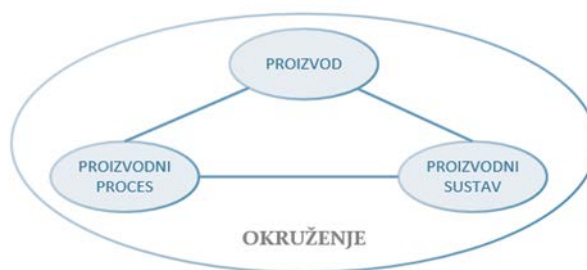
Slika 1. Osnovni elementi proizvodnog sustava [1]

Osnovni elementi proizvodnog sustava (slika 1) su ljudi sa svojim potencijalima i sredstvima za proizvodnju koji zajedničkim djelovanjem u radnoj okolini, uz utrošak vremena i osiguranih uvjeta, transformiraju ulazne komponente u željeni izlaz. Da bi se ta transformacija mogla vršiti potrebni su prostor, energija, sredstva za proizvodnju i informacije.

Prema [1], proizvodni se procesi kao osnova za stvaranje vrijednosti, dijele na kontinuirane i diskretne.

Kontinuirani proizvodni procesi su oni kod kojih se predmet rada javlja u kontinuiranom, mjerljivom obliku karakterističnim za procesnu industriju. Diskretni proizvodni procesi su oni kod kojih se predmet rada javlja u diskretnim, cjelobrojnim količinama koje se mogu odrediti prebrojavanjem. Ovakvi proizvodni procesi su karakteristični za metaloprerađivačku industriju te će se pod pojmom proizvodni proces upravo prešutno smatrati da se radi o ovoj vrsti proizvodnih procesa.

Svaki proizvodni proces definira podjela rada što znači da se aktivnosti procesa odvijaju na prostorno i vremenski različitim lokacijama u proizvodnom sustavu. Rezultat ovakvog odvijanja procesa su proizvodni tokovi koji osiguravaju interakciju između pojedinih elementa kojima se realiziraju proizvodni procesi.



Slika 2. Odnos proizvoda, proizvodnog procesa i sustava [1]

Da bi proizvodni sustav, koji se nalazi u kompetitivnom, promjenjivom i teško predvidivom tržišnom okruženju mogao realizirati tražene proizvode uz minimalan utrošak resursa, potrebne su prilagodbe na (između ostalog) proizvodnim procesima. Iz toga proizlazi kako promjena u jednoj komponenti (najčešće proizvod) direktno zahtijeva veće ili manje promijene na ostale dvije komponente, kako na proizvodnom procesu, tako i na samom proizvodnom sustavu. Iz toga proizlaze karakteristike proizvodnih sustava prema [1]:

- Proizvodni sustavi su konkretni sustavi s potpuno definiranim vezama između svojih sastavnih elemenata.
- Proizvodni sustavi su umjetni, stvoreni ulaganjem ljudskog rada s ciljem zadovoljena ljudskih potreba.
- Proizvodni sustavi su dinamični, skloni promjenama tijekom vremena.
- Proizvodni sustavi su složeni, sastoje se od velikog broja elemenata pri čemu svaki do njih predstavlja zaseban (pod)sustav.
- Proizvodni sustavi su otvoreni, neizolirani od utjecaja vanjskih sustava, pri čemu su u intenzivnoj interakciji s okolinom.

- Proizvodni sustavi su stohastični, njihovo je ponašanje uzrokovano tržišnim promjenama koje se mogu predvidjeti samo s određenom vjerojatnošću.
- Proizvodni sustavi su sociotehnički jer su osnovni elementi tih sustava ljudi sa sredstvima za proizvodnju.

2.1. Zahtjevi na proizvodni sustav

Zahtjevi na proizvodne sustave proizlaze prvenstveno iz zahtjeva kupaca, odnosno osiguravanja određene razine zadovoljstva kupaca. Pritom je u središtu pozornosti transformacija, razumijevanje (i predviđanje) želja i potreba kupaca u gotov proizvod. U [2] se navode sljedeći utjecaji koji određuju zahtjeve na proizvodne sustave:

- *Zadovoljstvo kupaca* - ovisi o očekivanju i percepciji izvedbe proizvoda (usluge), traže se individualni, njima prilagođeni proizvodi (što rezultira da se proizvodi izrađuju u manjim serijama, s kraćim životnim vijekom, ali s više mogućnosti i u velikom broju varijanti kako bi svaki kupac dobio upravo ono što želi).
- *Rast kompleksnosti proizvoda, sustava i procesa* – rast kompleksnosti zahtijeva savladavanje i primjena novih tehnologija i uz njih vezanih znanja kako bi se one mogle savladati i na tržište mogao plasirati konkurentan proizvod.
- *Globalizacija* – uzrokuje veću kompetitivnost i turbulencije na tržištu pri čemu je sve više natjecatelja koji žele osigurati i unaprijediti svoj položaj na globalnom tržištu.
- *Utrošak resursa i energije* – efikasan utrošak svih resursa (materijalnih i nematerijalnih) osigurava fleksibilnost proizvodnog sustava, brži odziv na zahtjeve kupca i zauzimanje boljeg položaja na tržištu (oporaba).
- *Zaštita okoliša i održiva proizvodnja* – zahtijevaju metode i rješenja u skladu sa zelenim načelima koja obuhvaćaju cijeli životni ciklus proizvoda (pritom su obuhvaćeni svi dijelovi i procesi u opskrbnom lancu poduzeća).
- *Informatizacija* – korištenje novih informacijskih i komunikacijskih tehnologija ubrzava i osigurava kvalitetniju razmjenu informacija između raznih elemenata opskrbnog lanca.

2.2. Utjecaj promjena na proizvodni sustav

Promjene na tržištu (okruženje) direktno određuju i promjene na proizvodne sustave. Kompetitivna klima i razvoj novih tehnologija vode prema potrebama za umreženim, prilagodljivim i efikasnim proizvodnim sustavima koji mogu brzo reagirati na promjene na tržištu. Tako se od proizvodnog sustava kao i ostalog dijela organizacije očekuje prilagodljivost na svim razinama, od radnog mjesta do organizacijske strukture.

Važne značajke koje prikazuju kako i u kojoj mjeri poduzeće reagira na zahtijevane promjene su:

- *Brzina prilagodbe* – predstavlja odziv proizvodnog sustava na novopostavljene zahtjeve, odnosno brzinu kojom se vrši promjena u proizvodnom sustavu kako bi se prilagodilo novim zahtjevima kupaca.
- *Fleksibilnost* – mjera do koje je proizvodni sustav sposoban prilagoditi svoje postojeće komponente (tehnologije, strukturu, kapacitete i logističke aktivnosti).
 - *Tehnološka fleksibilnost* – sposobnost proizvodnog sustava da upotrebom postojećih resursa realizira određeni spektar proizvoda.
 - *Strukturalna fleksibilnost* – sposobnost proizvodnog sustava da se prostorno i vremenski prilagodi novim proizvodnim asortimanima i količinama.
 - *Kapacitivna fleksibilnost* – sposobnost proizvodnog sustava koja proizlazi iz mogućnosti uspješnog praćenja promjena proizvodnog asortimana i količina pri čemu su količine sredstva za rad nepromijenjena.
 - *Logistička fleksibilnost* – sposobnost proizvodnog sustava da prilagodi logističke aktivnosti zahtjevima kupaca.
- *Varijabilnost* – sposobnost prilagodbe proizvodnog sustava različitim proizvodnim asortimanima, procesima, tehnologijom i pratećim količinama.
- *Mobilnost (promjena položaja)* – stupanj do kojeg je omogućeno prostorno kretanje ljudi, opreme i resursa za brzu prilagodbu novim zahtjevima.

2.3. Koncepti proizvodnih sustava

Kako bi poduzeće moglo adekvatno odgovoriti na promjenjive zahtjeve na turbulentnom tržištu te uz minimalne troškove plasirati tražene proizvode uz zadane uvijete, u nastavku su navedeni

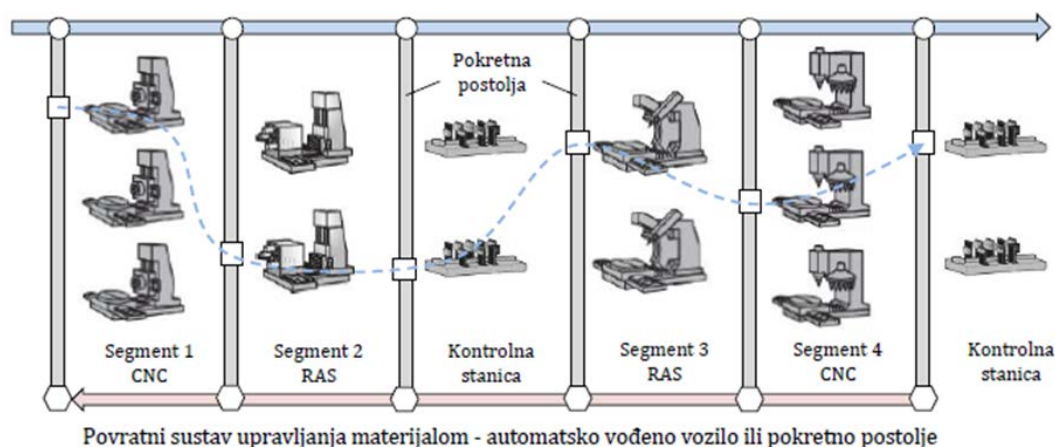
i ukratko opisani neki od novijih koncepata proizvodnih sustava poput rekonfigurabilnih proizvodnih sustava, *lean* proizvodnih sustava i agilnih proizvodnih sustava.

2.3.1. Rekonfigurabilni proizvodni sustavi

Rekonfigurabilni proizvodni sustavi (eng. *Reconfigurable Manufacturing Systems, RMS*) su proizvodni sustavi koncipirani na način da mogu u vrlo kratkom vremenu promijeniti svoju strukturu i komponente (s ciljem promjene tehnoloških kapaciteta i mogućnosti) kako bi se uz minimalne troškove što brže prilagodili promjenjivim tržišnim uvjetima.

Rekonfigurabilni proizvodni sustavi se temelje na grupama tehnološki sličnih proizvoda. Idealan rekonfigurabilni proizvodni sustav ima šest osnovnih značajki. Međutim, da bi proizvodni sustav bio rekonfigurabilan, ne mora ih sadržavati sve. Značajke rekonfigurabilnih proizvodnih sustava prema [3] su:

- Modularnost
- Skalabilnost
- Integrabilnost
- Konvertibilnost
- Prilagodljivost
- Dijagnostika izvora problema kvalitete i pouzdanosti



Slika 3. Struktura rekonfigurabilnih proizvodnih sustava [4]

Na slici 3 je prikazana struktura rekonfigurabilnog proizvodnog sustava koji se sastoji od numerički upravljanih alatnih strojeva i rekonfigurabilnih alatnih strojeva koji su međusobno povezani tokovima materijala. Kao što je već spomenuto, rekonfigurabilni proizvodni sustavi se projektiraju oko grupe tehnološki sličnih proizvoda s ciljem jednostavne rekonfiguracije sustava uz niske troškove i mali utrošak vremena.

Oni omogućuju prilagodbe na sljedećim razinama [5]:

- Rekonfigurabilnost cijelog proizvodnog sustava.
- Rekonfigurabilnost hardverskih dijelova alatnog stroja.
- Rekonfigurabilnost upravljačkog dijela alatnog stroja.

Slično kao i fleksibilni izradbeni sustav (FIS) koji će biti prikazan kasnije (poglavlje 3.5.3), rekonfigurabilni imaju također automatski sustav rukovanja materijalom koji ima značajan utjecaj na produktivnost i pouzdanost rekonfigurabilnih sustava, te ima glavnu ulogu prilikom modeliranja sustava toka materijala i prateće opreme.

Kada je riječ o strojevima rekonfigurabilnih proizvodnih sustava, dva su kriterija [5] koja trebaju ispuniti:

1. Povećanje produktivnosti promjenom odgovarajućih modula stroja
2. Prilagodba funkcionalnosti stroja promjenom njegove geometrije u skladu sa zahtjevima postojećih i novih grupa tehnološki sličnih proizvoda



Slika 4. Rekonfigurabilni alatni strojevi [5]

Na slici 4 lijevo je prikazana izvedba rekonfigurabilnog alatnog stroja s mogućnošću prilagodbe kapaciteta, dok je desno prikazani rekonfigurabilni alatni stroj promjenjive geometrije. Osnovni cilj rekonfigurabilnog alatnog stroja je pružiti upravo one tehnološke mogućnosti i kapacitete koji su u promatranom trenutku stvarno potrebni. Stoga je vrlo važna značajka modularnost tih strojeva kako bi se jednostavnim promjenama, strojevi mogli prilagoditi potrebnim zahtjevima proizašlim iz grupe tehnološki sličnih proizvoda.

U [5] je ta modularnost ilustrativno prikazana na sljedeći način. Umjesto da proizvodno poduzeće kupuje složeni, široko primjenjivi alatni stroj koji ima nekoliko glavnih vretena, proizvođač alatnog stroja treba omogućiti kupnju stroja modularne koncepcije s jednim glavnim vretenom, a kada je potrebno povećati tehnološke kapacitete, dodatni moduli (poput dodatnog glavnog vretena) se mogu kupiti i jednostavno nadograditi ukoliko potražnja na tržištu opravdava troškove nabave dodatnog glavnog vretena.

Tako se, umjesto kupnje složenih numerički upravljanih alatnih strojeva kupuju jednostavniji modularni numerički upravljani alatni strojevi koji su u mogućnosti proizvesti tražene proizvode bez da se uz stroj kupuje niz funkcionalnosti koje nisu u tom trenutku iskoristive. Međutim, ukoliko je potrebno povećati funkcionalnost stroja, to se može ciljano izvršiti kupnjom odgovarajućeg modula.

2.3.2. *Lean proizvodni sustavi*

Lean proizvodni sustav (eng. *Lean Manufacturing*) predstavlja sustav temeljen na *lean* načelima. *Lean* predstavlja koncept proizašlog iz Toyotinog proizvodnog sustava (eng. *Toyota Production System*, TPS) s osnovnim ciljem da se proizvodi točno ono što kupac želi, tj. onu vrstu, kvalitetu i količinu proizvoda koju diktira potražnja tržišta. Pojam *lean* (eng. *lean* - vitak) prvi je puta korišten u knjizi „*The Machine That Changed The World*“ autora J.P. Womacka i D.T. Jonesa.

Lean proizvodnja znači realizirati proizvod sa što višim stupnjem ekonomičnosti, upotrebom minimalne količine resursa s ciljem postizanja maksimalnog učinka. Drugim riječima, kada se ona implementira, skraćuje vrijeme od narudžbe kupca do isporuke gotovog proizvoda, eliminirajući i pritom sve izvore rasipanja u proizvodnom sustavu.

Lean koncept identificira osam izvora rasipanja (gubitaka), a prema [3] to su prekomjerna proizvodnja, prekomjerna obrada, čekanje i zastoji, transport, škart, zalihe, nepotrebni pokreti te zanemarivanje ljudskih potencijala. Prekomjerna proizvodnja označava stvaranje proizvoda „za svaki slučaj“, odnosno proizvoda koji na tržištu nemaju svog kupca bilo da se radi zbog loše predviđene potražnje ili mjere sigurnosti, potom stvaranje suvišne dokumentacije i generiranje informacija koje su nepotrebne. Prekomjerna se obrada odnosi na upotrebu neadekvatnih strojeva, učestala pojava suvišnih operacija pri obradi, loša konstrukcija proizvoda ili naknadna dorada uslijed loše projektiranih prethodnih operacija i cijelog tehnološkog procesa. Čekanje i zastoji se odnose na vrijeme čekanja materijala između dvije operacije, čekanje radnika za strojevima na materijal, informacije ili potrošni materijal te čekanje na isporuku. Gubitak kod transporta označava nepotrebno kretanje materijala (obradaka) između operacija ili između objekata, korištenje neučinkovite raspodjele strojeva na proizvodnim površinama, te neučinkovitost transporta informacija i loša komunikacija. Škart predstavlja očiti gubitak zbog loše iskorištenih sirovina, vremena obrade i potrošnog materijala.

Također se odnosi na prekid toka materijala zbog grešaka, nepotrebna vremena, troškova za analizu i otklanjanje uzroka pojavljivanja škarta. Zalihe su usko povezane s prekomjernom proizvodnjom te predstavljaju zamrznuti kapital u skladištima. Ovaj gubitak vrlo često predstavlja jedno od mjesta gdje se implementacijom adekvatnog modela upravljanja zalihama može ostvariti najviše ušteda u razumno kratkom vremenu. Nepotrebni pokreti su posljedica loše raspodjele strojeva na proizvodnim

površinama koje uzrokuju nepotrebno gibanje radnika kako bi došli do potrebnih informacija i sredstva za proizvodnju. U ovu skupinu također spada ručni rad (dorada) uslijed loše projektiranog tehnološkog procesa izrade dijela ili proizvoda. Zanemarivanje ljudskih potencijala također predstavlja jedan od gubitaka, pri čemu je vrlo važno dobivanje povratnih informacija od strane zaposlenika koji 7 i pol sati rade taj posao. Cilj je osigurati najbolja sredstva za rad i identificirati određene nepravilnosti koje su se previdjele te kontinuiranim unapređenjem svih aktivnosti i procesa spriječiti njihovo pojavljivanje. Kako bi se mogli uspješno identificirati i eliminirati prethodno navedeni gubici te kako bi se moglo raditi na kontinuiranom unaprijeđenju svih aktivnosti i procesa *lean* koncept se prema [6] koristi sljedećim alatima: 5S, Six sigma, Kaizen, VSM, Kanban, Andon, Takt, SMED, TPM, i vizualizacija. 5S alat služi za poboljšanje načina rada na radnom mjestu u proizvodnom pogonu ili u bilo kojoj drugoj organizaciji pri čemu 5S znači: *seiri* (sortiranje), *seiton* (red), *seiso* (čišćenje), *seiketsu* (standardiziranje) i *shisuke* (samodisciplina). Primjenom 5S alata se dobiva povećana sigurnost i efikasnost na radnom mjestu na temelju sistematično organiziranog, urednog i preglednog radnog mjesta. *Six sigma* predstavlja kvantitativni alat kojim se nastoje mjeriti i implementirati poboljšanja proizvodnih procesa te daje sistematičan pristup rješavanju problema. Sastoji se od šest koraka, a to su definicija (definiranje promatranog problema i ograničenja), mjerenje (prikupljanje podataka), analiziranje (obrada podataka i pronalaženje rješenja), poboljšavanje (odabir i implementacija najprikladnijeg rješenja), kontrola (praćenje ponašanja implementiranog rješenja i ponavljanje (primjena *six sigma* alata na preostale dijelove proizvodnog sustava ili druge organizacije).

Kaizen predstavlja filozofiju za kontinuirano unapređenje temeljeno na manjim poboljšanjima. Svi zaposlenici su motivirani da svaki dan u malim koracima poboljšavaju svoj rad što u konačnici rezultira smanjenim troškovima, povećanim zadovoljstvom zaposlenika i povećanom produktivnošću. Postoje dvije vrste kaizena, prva vrsta je usredotočena na kontinuirano poboljšanje dok je druga vrsta usredotočena na trenutnu eliminaciju rasipanja u radnom okruženju.

Andon predstavlja indikator (svijetlo) stanja stroja te se temelji na vizualizaciji informacija u cilju brzog otklanjanja pogrešaka. Obično se sastoji od tri boje (crvene, žute i zelene) pri čemu svaka ima određeno značenje. Crveno svijetlo predstavlja neko neželjeno stanje ili kvar stroja, žuto predstavlja izvršavanje aktivnosti održavanja na stroju, dok zeleno predstavlja normalni rad stroja kojima se upravlja koje će svijetlo zasvijetliti na stroju mogu biti dobiveni od strane operatera ili samog stroja. Time se mogu lako dobiti informacije o stanju stroja i gdje je došlo do zastoja kako bi se on što brže eliminirao, a uzrok zastoja otklonio. Takt predstavlja maksimalno dozvoljeno vrijeme za proizvodnju jednog proizvoda ili dijela. Pritom svako radno mjesto dobiva određeni dio tog vremena na raspolaganje pri čemu se to vrijeme ne smije prekoračiti niti na jednom radnom mjestu. Ukoliko neko od radnih mjesta prekorači

dozvoljeno vrijeme, dolazi do zastoja u proizvodnji te nije moguće održati definirane rokove. S druge strane, ukoliko neko od radnih mjesta završi svoju operaciju prije nego što je takt prošao, dolazi do gomilanja poluproizvoda uz radna mjesta. Korištenjem takta se osigurava balans na radnoj liniji, svaka radna stanica ima točno definirano ciljano vrijeme obrade te minimizira broj obradaka u procesu. Izmjena kalupa u minuti (eng. *Single Minute Exchange of Die*, SMED) je alat kojim se želi smanjiti pripremno – završno vrijeme, odnosno vrijeme potrebno za pripremu stroja za obradu novog poluproizvoda. Implementacijom SMED – a smanjuje se broj potrebnih aktivnosti i vrijeme za pripremu stroja, grupiraju se zaposlenici kako bi zajedno pronašli rješenje kojim se nastoji smanjiti vrijeme potrebno za pripremu stroja te se više aktivnosti odvija istovremeno. Kanban predstavlja alat koji se koristi određenim oblikom kartica za jasno prikazivanje informacija. Koristi se u proizvodnim sustavima za prosljeđivanje informacija kada obradak ide s jednog radnog mjesta na drugo. Kanban kartica se obično pripoji na dio ili kutiju te kada je operacija završila, kartica se vraća na prethodno radno mjesto, a dio ili kutija se kreće uzvodno pri čemu na novom radnom mjestu dobiva novu karticu. Kada neko radno mjesto sakupi određeni broj kartica, to predstavlja signal da je obrađena određena serija proizvoda ili poluproizvoda. Prednosti kanban kartica je u tome što njihova primjena smanjuje razinu potrebnih zaliha, olakšava i automatizira planiranje te daje vizualni signal (informacije) svakoj radnoj stanici. Cjelokupno produktivno održavanje (eng. *Total Production Maintenance*, TPM) predstavlja strategiju održavanja koja je fokusirana na konstantno poboljšavanje sveukupne učinkovitosti opreme s aktivnim angažmanom operatera koji ima zadatak posebno brinuti o stroju na kojem radi. Strategija zahtjeva djelotvorni timski rad, razvoj vještina za operatere i održavatelje te zahtjeva podršku rukovodstva. Time se nastoji ostvariti veća iskoristivost i produktivnost stroja s minimalnim brojem otkazivanja i potrebnim korektivnim održavanjem.

Vizualizacija je alat kojim se nastoji sve potrebne informacije učiniti vidljivima i jasnima na prvi pogled tamo gdje je to potrebno pri čemu su oni prikazani u nekom od dijagrama. Prikazani podaci mogu biti informacije o sigurnosnim mjerama, informacije o operacijama i vremenima ili bilo koje druge informacije. Treba voditi računa o ispravnosti informacija koje su vizualizirane i trebaju se u skladu s time mijenjati i ažurirati. U [6] je navedeno kako korištenje vizualizacije u edukaciji, iskazivanju sigurnosnih mjera, analiza performansi sustava, identifikaciji kvarova i kod nagrađivanja pozitivno utječe na moral zaposlenika. Mapiranje toka vrijednosti (eng. *Value Stream Mapping*, VSM) predstavlja alat kojim se analizira kompletan niz aktivnosti od primitka narudžbe do isporuke gotovog proizvoda. VSM mapira

proces kakav je on u inicijalnom stanju te ukazuje na promjene koje nastaju u procesu, a koje su uzrokovane promjenom parametara procesa.

Velika prednost *lean* koncepta i njegovih alata je u tome što zaposlenici, nakon što se uvjere u njegovo djelovanje te uz dobru komunikaciju na horizontalnim i vertikalnim razinama, žele aktivno sudjelovati u identifikaciji problema, pronalaženju i eliminaciji uzroka s ciljem kontinuiranog poboljšanja svih procesa. Ovakav proaktivan pristup pridonosi smanjenju rasipanja i značajnom povećanju produktivnosti proizvodnog sustava i većem zadovoljstvu zaposlenika.

2.3.3. *Agilni proizvodni sustavi*

Agilni proizvodni sustavi imaju sposobnost rutinskog tretiranja i prilagođavanje tržišnim promjena pri čemu se radi više o poslovnom, nego o proizvodnom pristupu. Agilnost kao koncept u proizvodnji je prema [7], utemeljen od skupine znanstvenika na Iaccoca Institutu Lehigh Sveučilišta 1991. godine. Agilni proizvodni sustavi se prema [8] temelje na četiri dimenzije a to su: stvaranje vrijednosti koja ispunjava potrebe kupca, spremnost na prilagodbu i promjene, vrednovanje ljudskog znanja i sposobnosti te stvaranje virtualnog partnerstva.

Agilnost se temelji na inovacijama u proizvodnim, informacijskim i komunikacijskim tehnologijama koje su imale značajan doprinos promjeni struktura i procesa organizacija (pa tako i proizvodnih sustava) te u formiranju novih marketinških strategija. Tako prema [7], agilnost se definira kao sposobnost organizacije da odgovori na varijabilne i promjenjive zahtjeve kupaca. Cilj agilnog proizvodnog sustava je kupcu pružiti proizvod koji predstavlja rješenje koje će zadovoljiti njegove potrebe. Na poslovnoj razini agilnost predstavlja mogućnost kooperacije i suradnje s drugim poduzećima u cilju postizanja kompetitivne prednosti.

Glavne karakteristike agilnih proizvodnih sustava su [7]:

- Proizvodi visoke kvalitete koji potpuno odgovaraju svim zahtjevima kupaca.
- Proizvodi i usluge sa sadržanom visokom razinom informacija i visokom dodanom vrijednosti.
- Mobilizacija ključnih kompetencija.
- Odziv na socijalne i okolišne probleme.
- Integracija dostupnih i novih tehnologija.
- Upravljanje i odziv na nesigurnost i promjene.
- Unutarorganizacijska i međuorganizacijska integracija



Slika 5. Ključni koncepti agilnih proizvodnih sustava prema [7]

Slika 5 prikazuje četiri ključna koncepta agilnih proizvodnih sustava: upravljanje ključnim kompetencijama, virtualna organizacija, organizacija temeljena na znanju i sposobnost prilagodbe. Upravljanje ključnim kompetencijama je koncept koji obuhvaća ljudske potencijale organizacije s ciljem zauzimanja što većeg udjela na tržištu zadovoljenjem širokih potreba kupaca. Uz to olakšava prepoznavanje njihovih potreba i otežava konkurentima kopiranje razvijenih rješenja. Kompetencije obuhvaćaju znanje, iskustvo, poznanstva i vještine zaposlenika.

Kroz primjer različitih seminara i obrazovnih programa zaposlenici mogu unaprijediti svoje potencijale unutar organizacije kako bi mogli pridonijeti boljem razumijevanju potreba kupaca pri čemu su zaposlenici i njihovi potencijali ključni resurs bilo koje organizacije, pa tako i proizvodnih sustava. Uz to, vrlo je važno da su u organizaciji (pa tako i u proizvodnim sustavima) prepoznati potencijali zaposlenika kako bi se oni mogli adekvatno upotrijebiti, ali i unaprijediti. Identifikacija postojećih potencijala prvi je korak pri njihovoj upotrebi i daljnjem razvijanju. Prema [7], virtualna organizacija predstavlja oblik veza u opskrbnom lancu koji je različit od tradicionalnog oblika veza.

Tako proizvodni sustav sa svojim dobavljačima i kupcima pomoću tehnologija temeljenim na razvoju informacijskih sustava formira platformu za brži odziv na nove zahtjeve kupaca. Time se dobiva pristup ljudskim potencijalima i tehničkim resursima unutar pojedinih elemenata opskrbnog lanca koji sežu van vlastite organizacije s ciljem bolje iskoristivosti postojećih kapaciteta. Organizacija temeljena na znanju uz upravljanje ključnim kompetencijama omogućuje formiranje dobro obučene i motivirane radne snage koja posjeduje potrebne vještine, znanje i informacije. Pritom je važno identificirati, sakupiti i upotrijebiti pojedine ljudske potencijale u jednu cjelinu s ciljem stvaranja rješenja koja pokrivaju različite potrebe kupaca čime se značajno dobiva na brzini odziva i kvaliteti pruženog rješenja kupcu. Dodatno se tako skraćuje vrijeme realizacije proizvoda (ili usluge) čime se stvara novi vremenski prozor u kojem se postojećih tehnološki kapaciteta mogu iskoristiti za izradu novih proizvoda (ili realizaciju novih usluga). Sposobnost prilagodbe omogućuje agilnim proizvodnim sustavima da u kratkom vremenu promjene korporativne ciljeve i usmjere ih prema novim

možnostima. Time se dodatno dobiva prednost bržim odzivom na zahtjeve kupaca, plasiranjem svog rješenja na tržište prije konkurenata te proaktivnim određivanjem i predviđanjem budućih potreba kupaca netom prije nego što ih kupci izjasne.

Kako bi organizacija mogla u kratkom vremenu plasirati zadovoljavajuće rješenje, na raspolaganju ima cijeli niz metoda i računalnih inženjerskih aplikacija kojima se ubrzava i unapređuje proces razvoja i izrade proizvoda. Neki od njih, prema [8] su: proizvodnja podržana računalom (eng. *Computer Aided Manufacturing*, CAM), aplikacije za verifikaciju programa numerički upravljanih alatnih strojeva, aplikacije za dvodimenzionalno i trodimenzionalno modeliranje i simulacije, upotreba metode konačnih elemenata, optimizacija, konstruiranje usmjereno na proizvodnju, montažu, ergonomiju ili pouzdanost, analize uzroka i posljedice kvara (eng. *Failure Mode and Effect Analysis*, FMEA), korištenje aditivne tehnologije i sl.

U nastavku je iznesen opći prikaz značajki oblikovanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnih sustava uz predstavljanje problematike određivanja najpovoljnijeg rasporeda, određivanja vrste projektnih zadataka kod projektiranja proizvodnih sustava te prikaz tradicionalnog i suvremenog pristupa projektiranju proizvodnih sustava. Nakon toga su prikazane osnovne strukture proizvodnih sustava, detaljno je prikazan i razrađen koncept toka materijala uz kapacitivno i prostorno dimenzioniranje elemenata proizvodnog sustava uz prikaz metoda i alata oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnog sustava.

3. OBLIKOVANJE PROSTORNOG RASPOREDA PROIZVODNIH SUSTAVA

Oblikovanje prostornog rasporeda proizvodnih sustava predstavlja iznimno odgovornu djelatnost budući da obično uz sebe veže značajna financijska sredstva pri čemu predstavljena projektna rješenja imaju utjecaj na duže vremensko razdoblje. Pritom je obično sam životni vijek proizvodnih sustava višestruko dulji od životnog vijeka njihovih proizvoda.

Stalna promjena potrebnog broja proizvoda na tržištu, uvođenje novih proizvoda, sustava rukovanja materijalom, ali i tehnologija zahtjeva stvaranje novih, uz prilagođavanje postojećih proizvodnih sustava pri čemu je projektna rješenja potrebno napraviti što kvalitetnije u što kraćem vremenu. Takav projekt obuhvaća proizvode proizvodnog sustava, količine proizvoda, rokove isporuke, raspoloživa investicijska sredstva za realizaciju proizvodnog sustava te ostale zahtjeve vezane uz funkcionalnost, ekonomičnost ili fleksibilnost.

Cilj oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnih sustava je definiranje prostornog rasporeda i broja potrebnih elemenata (strojeva, ljudi, prateće infrastrukture) kojim se omogućuje profitabilna proizvodnja uz konkurentsku cijenu proizvoda. Uz to, prostorni raspored treba biti izveden na način da omogućuje što jednostavnije rukovanje materijalom i što efikasnije tokove materijala između pojedinih elemenata proizvodnog sustava. Stoga prema [1], projektiranje proizvodnih sustava predstavlja interdisciplinarnu djelatnost koja ima svrhu ostvarivanja funkcionalnog, ekonomičnog, fleksibilnog, humanog i ekološki prihvatljivog proizvodnog sustava racionalnim korištenjem ljudskih i materijalnih resursa.

3.1. Problematika određivanja najpovoljnijeg rasporeda proizvodnih sustava

Problematika određivanja najpovoljnijeg prostornog rasporeda proteže se kroz sve razine proizvodnih sustava, počevši od odabira mikrolokacije uvjetovanom prometnim položajem, dostupnom radnom snagom, ograničenjima i zakonskim regulativama, klimom, stanjem zemljišta, opskrbom energijom, susjedstvom i načinom gradnje objekata sve do definiranja radnog mjesta.

Kada je riječ o postojećim proizvodnim sustavima, prilikom određivanja najpovoljnijeg rasporeda proizvodnog sustava treba sagledati postojeće kapacitete s ciljem njihovog maksimalnog iskorištenja. Pod iskorištenjem postojećih kapaciteta podrazumijeva se iskoristivost postojećih strojeva, tehnologije, prostora, kupaca, ljudi, znanja i iskustva. Moguće je preispitati rentabilnost postojeće opreme te donijeti

odluku da li će se taj stroj uopće nastaviti koristiti ili će se otpisati. Otpis tog stroja obično znači suradnju s kooperantima čime se gubi određena kontrola i nadzor nad proizvodnim procesom. Međutim, oslobađa se prostor za stvaranje nove vrijednosti koja donosi veći profit i dugoročno pruža sigurnost proizvodnom sustavu. Najčešći problemi s kojim se susreću poduzeća su vezani uz smanjenje troškova na svim mogućim mjestima, pri čemu je opsežnost projektiranja proizvodnog sustava idealno mjesto za uvođenje načela minimizacije troškova prilikom određivanja novog prostornog rasporeda. Vrijednost proizvoda definirana je od strane kupca pri čemu je cilj smanjiti sve aktivnosti kojima se ne dodaje vrijednost (eng. *Waste Time*, WT), a troše resurse. Te aktivnosti stvaraju čisti gubitak i potrebno ih je eliminirati (poput zastoja strojeva, pojava redova čekanja, traženje materijala i potrebne opreme, informacija i sl.). Njihovom eliminacijom značajno se može pridonijeti povećanju produktivnosti i efikasnosti proizvodnog sustava. Kod projektiranja novih proizvodnih sustava ušteda prostora znači manje investicijske, ali i operativne troškove. Dodatno, strateškim planiranjem budućih aktivnosti mogu se predvidjeti promjene na proizvodnom sustavu te se mogu stvoriti preduvjeti za njihovu realizaciju u kasnijem razdoblju. Time se troši manje financijskih sredstva, vremena i ne remeti se proizvodni proces prilikom izvođenja naknadnih preinaka. Osiguravanje neometanog i sigurnog pristupa radnom mjestu u svrhu provođenja implementirane strategije održavanja također je jedan od problema koji je potrebno uzeti u obzir. Radno mjesto treba oblikovati na način da se do svih dijelova strojeva koji podliježu nekoj od aktivnosti održavanja može pristupiti neometano i sigurno, bez remećenja odvijanja proizvodnog procesa. Osim neometanog pristupa održavanju, osiguravanjem neometanog pristupa i pravilnim razmještajem radnih mjesta povećava se sigurnost zaposlenika i smanjuje neželjeni međusobni utjecaj (buka, vibracije, opasnost od rotirajućih dijelova, opasnost od površina visoke temperature, opasnost od agresivnih kemijskih supstanci ili para i sl.) pojedinih radnih mjesta. Iz toga proizlazi zahtjev za sigurnosti zaposlenika. Potrebno je minimizirati mogućnost pojavljivanja nesreća bilo da se radi o radnom mjestu ili koordiniranom kretanju zaposlenika kroz proizvodni sustav.

Posebnu pozornost treba posvetiti skladišnom prostoru pri čemu je poželjno da njegova lokacija bude u skladu s glavnim tokovima materijala, a dimenzije skladišnog prostora trebaju biti pažljivo odabrane s naglaskom na iskoristivost horizontalne i vertikalne razine skladišta primjenom adekvatnih vrsta regalnih skladišta i sredstva za rukovanje materijalom. Važno je također pravilno formirati pristup utovarnim i istovarnim zonama kao i primjenom odgovarajućih informacijskih sustava pratiti stanje zaliha te prostornim rasporedom riješiti problem gubitka materijala, pogrešnog odlaganja, demodiranosti ili zastarjelosti pri čemu se potpuno želi eliminirati pojavljivanje nekuretnih zaliha.

3.2. Vrste projektnih zadataka kod projektiranja proizvodnih sustava

Zahtjev za projektiranjem proizvodnih sustava može biti indiciran iz niza različitih razloga. U nastavku će biti uvedeno prikazani osnovni projektni zadaci i glavni utjecajni faktori koji određuju koji će biti projektni zadatak projektiranja proizvodnih sustava. Osnovni pokazatelji o kojoj je vrsti projektnog zadatka riječ su: potreba za novim proizvodom, promjena proizvodnih količina postojećih proizvoda i uvođenje novih tehnologija.

Kombinacijom navedenih pokazatelja dolazi se do jednog od sljedećih projektnih zadataka projektiranja proizvodnih sustava prema [1]:

- Projektiranje novog proizvodnog sustava
- Rekonstrukcija proizvodnog sustava uz njegovo širenje
- Rekonstrukcija proizvodnog sustava bez njegovog širenja
- Uvođenje manjih racionalizacija u postojećem proizvodnom sustavu
- Dekonstrukcija proizvodnog sustava

Projektiranje novih proizvodnih sustava se pojavljuje kada su sva tri pokazatelja prisutna te predstavlja najopsežniji oblik projektnog zadatka. Sadrži manju količinu ograničenja s obzirom kako ne treba voditi računa o ograničenjima koja sa sobom nose postojeći proizvodni sustavi. Rekonstrukcija proizvodnih sustava sa ili bez njihovog širenja javlja se kao posljedica dinamičkog, promjenjivog okruženja pri čemu stvarno stanje i zahtjevi na proizvodne sustave počinju značajno odstupati od prvotno zamišljenih. Pritom dolazi do preoblikovanja proizvodnih tokova i struktura. Najčešće se pojavljuje pri povećanju proizvodnih količina kada dodatni zahtjevi nadilaze postojeće kapacitete proizvodnih sredstava.

Osim toga, pojavljuje se kada se žele smanjiti troškovi proizvodnje, kada se uvodi promjena na postojećem proizvodnom asortimanu ili se asortiman izmjenjuje novim proizvodima. Također se pojavljuje u značajnom opsegu prilikom retrofita i prenamjene starih proizvodnih pogona. Uvođenje manjih racionalizacija u postojećim proizvodnim sustavima je gotovo svakodnevni zadatak s ciljem finog podešavanja njegovih procesa. Pritom se u proizvodnim sustavima vrše male promjene kako bi se poboljšala njihova postojeća koncepcija. Dekonstrukcija proizvodnih sustava je vrsta zadataka koji ima glavnu zadaću uklanjanje proizvodnih sustava i minimiziranje utjecaja uslijed njegovog postojanja na okoliš s ciljem vraćanja stanja mikrolokacije na razinu kakva je bila prije izgradnje proizvodnih sustava. Uklanjanje proizvodnih sustava može biti uslijed gubitka svrhe njihovog postojanja, zbog zastarjelog proizvodnog programa, tehnologije, postupaka ili zbog nemogućnosti prenamjene izrađenih objekata u druge svrhe.

3.3. Proces projektiranja proizvodnih sustava

Proces planiranja proizvodnih sustava može se ilustrativno prikazati kroz životni ciklus proizvodnog postrojenja pri čemu sustav tijekom životnog vijeka doživi cijeli niz manjih ili opsežnijih promjena kako bi se prilagodio za izradu rješenja koja zadovoljavaju zahtjeve kupaca. Taj proces je kontinuirani i nastoji se proizvodni pogon i prateće procese unaprijediti u što većoj mjeri. Svaki se proces planiranja proizvodnih sustava sastoji od dvije glavne etape, a to su izrada nekoliko varijanti rješenja i prilagodba tih varijanti danim ograničenjima uz izbor zadovoljavajućeg rješenja. Planiranje proizvodnih sustava se temelji na dva pristupa: tradicionalni i suvremeni. Oba pristupa će u nastavku biti ukratko prikazani i objašnjeni.

3.3.1. Tradicionalni pristup projektiranju proizvodnih sustava

Tradicionalni se pristup planiranju proizvodnih sustava, prema [9], sastoji od sljedećih 6 koraka:

1. Definicija problema
2. Analiza problema
3. Izrada varijanti rješenja
4. Procjena varijanti rješenja
5. Izbor prikladne varijante
6. Prilagodba i implementacija

U prvom se koraku određuje glavni smjer u kojem se kreće prilikom planiranja proizvodnih sustava. Pritom je vrlo važno prikupiti i strukturirati odgovarajuće relevantne podatke koji će se koristiti u sljedećim koracima. Stoga je bitno da promatrani (reprezentativni) proizvodi budu pravilno identificirani i njihove značajke po mogućnosti kvantitativno iskazane. Potom je potrebno odrediti i razlučiti primarne od pomoćnih aktivnosti proizvodnog sustava, pritom treba imati na umu kako su pomoćne aktivnosti one koje osiguravaju nesmetano odvijanje primarnih aktivnosti. To se izvodi definiranjem strojeva i operacija, potrebne pomoćne i mjerne opreme, popis potrebnog materijala i sl. Ulazni podaci koji se razmatraju prilikom analize obuhvaćaju [10]:

- P – proizvod (eng. *Product*), vrsta proizvoda koji će se proizvoditi.
- Q – količina (eng. *Quantity*), ukupna količina i veličine serija promatranih proizvoda.
- R – usmjeravanje (eng. *Routing*), određivanje redoslijeda operacija i tokova materijala.

- S – pomoćna oprema i odjeli (eng. *Services*), obuhvaća stezne naprave, mjernu opremu, garderobne ormariće, sanitarije i sl.
- T – vrijeme (eng. *Time*), kada je potrebno isporučiti tražene serije i koji će strojevi biti zauzeti u tom periodu.

Potom slijedi određivanje i definiranje svih unutrašnjih veza između svih strojeva i ostalih tehnoloških kapaciteta. Potrebno je za odabrane reprezentativne proizvode, definirati redoslijed operacija izrade i pripadajuća radna mjesta na kojima se one odvijaju. Nakon toga slijedi definiranje potrebnog prostora za svu opremu i zaposlenike kako bi se osigurali preduvjeti za izvršavanje svih proizvodnih aktivnosti. Sve navedene podatke treba odgovarajuće kvalitativno i kvantitativno prikazati. Slijedi izrada varijanti prostornog rasporeda elemenata proizvodnih sustava s prikazom različitog razmještaja promatranih radnih mjesta, pripadajućih strojeva i opreme. Prema [9], ove varijante sadrže sve smislene različite prostorne rasporede, strukturu, različite tokove materijala i sredstva rukovanja materijalom. Nakon izrade varijanti pristupa se njihovoj procjeni i odabiru što je ujedno i najteži korak. Ovdje se posebno reflektira važnost ispravnosti i reprezentivnosti ulaznih podataka gdje donosioc odluke mora usporediti varijante i odlučiti koja će najbolje ispuniti definirane ciljeve. Konačno, slijedi prilagodba i implementacija odabrane varijante u odnosu na postojeća ograničenja.

Uz implementaciju, vrlo je važno obaviti probna testiranja i planirano uvođenje novoinplementiranih proizvodnih sustava u rad kako bi se mogle identificirati i eliminirati potencijalne greške prije nego što se proizvodni sustav pušta u pogon. Uz to, također je važno primijeniti odgovarajuće strategije održavanja proizvodnog sustava i svih njegovih elemenata, te ga kontinuirano poboljšavati u skladu s novim zahtjevima koji se stavljaju pred proizvodni sustav. Pritom treba, prema [9], osigurati takav prostorni raspored koji će poduprijeti produktivnost, profitabilnost i fleksibilnost poduzeća.

3.3.2. Suvremeni pristup projektiranju proizvodnih sustava

Suvremeni se pristup temelji na pet osnovnih komponenti prema [9]:

1. Misija
2. Vizija
3. Zahtjevi na uspjeh
4. Načela vođenja
5. Dokaz o uspjehu

Prije nego što se kreće u projektiranje proizvodnih sustava potrebno je osigurati dovoljnu razinu znanja o tom procesu te educirati i uputiti sve koji u tome sudjeluju pri čemu treba obuhvatiti ne samo one koji sudjeluju u projektiranju proizvodnih sustava nego i one koji će djelovati unutar takvog sustava. Osim toga, treba osigurati kvalitetnu razmjenu informacija i njihovo aktualiziranje kod svih uključenih kako ne bi došlo do nesporazuma koji mogu u konačnici rezultirati neupotrebljivim rješenjima.

Potom slijedi identifikacija i razumijevanje prirode svih internih i eksternih problema prisutnih kod proizvodnog sustava. Interni problemi se očituju kroz poznavanje proizvodnih tehnologija i procesa, potrebne proizvodne i pomoćne opreme te njihovo usklađivanje. Nakon toga je potrebno poznavati organizacijsku strukturu proizvodnog sustava kojim se određuje priroda komunikacije unutar sustava. Razrada mogućih organizacijskih struktura seže van okvira ovog rada te ovdje neće biti dalje prikazana.

Kada je riječ o eksternim problemima važno je razumjeti okruženje u kojem se proizvodni sustav nalazi i ciljeve koji se stavljaju pred njega. Osim toga, treba vršiti usporedbu proizvodnog sustava s onim najboljima u toj branši (eng. *benchmarking*) s ciljem identifikacije i implementacije postojećih poboljšanja na vlastiti proizvodni sustav. Spoznaje o radu i rješavanju problema koji su se pojavili kod najboljih proizvodnih sustava u toj branši mogu se iskoristiti za rješavanje problema i uvođenje poboljšanja kod vlastitih proizvodnih sustava. Time se dodatno preispituju svi procesi postojećeg proizvodnog sustava uz pogled s drugačije perspektive i dobivanje potencijalnih rješenja koji se mogu implementirati u vlastiti sustav uz manje ili opsežnije preinake. Potom slijedi definiranje kriterija važnosti prilikom projektiranja i izrade različitih varijanti prostornog rasporeda kako bi se postavio temelj za vrednovanje varijanti i odabir one najpogodnije. Time se također dodatno navodi izrada svih varijanti u pravom smjeru. Nakon što su kriteriji definirani, slijedi izrada varijanti prostornog rasporeda proizvodnog sustava uz pomoć formiranih ekspertnih skupina koji nadziru cjelokupni proces izrade, ali i vrednovanje varijanti rješenja.

Ako je problem projektiranja proizvodnog sustava orijentiran na rekonstrukciju postojećeg proizvodnog sustava, prvi je korak snimanje postojećeg stanja kako bi se mogle prikupiti odgovarajuće informacije koje će poslužiti kao temelj za daljnje projektiranje, ali i za usporedbu novoimplementiranih rješenja. Pritom je vrlo važno postaviti ciljeve koji se mogu kvantificirati za svako od postavljenih kriterija prema kojima se provodi vrednovanje varijante. Prilikom izrade različitih varijanti vrlo je bitna kreativnost i inovativnost, te treba razmotriti uvođenje

novih sustava, tehnologija, opreme i metoda kako bi se zadani ciljevi što lakše postigli. Nakon što su sve varijante izrađene, vrši se njihova procjena prema prethodno definiranim kriterijima. Potom slijedi prilagodba odabrane varijante realnim ograničenjima te njena implementacija. Kod suvremenog pristupa projektiranju proizvodnih sustava vrlo je važno uvjeriti menadžment kako je odabrana varijanta upravo ta koja je najprikladnija (ovdje je vrlo važno koristiti kvantificirane podatke i 3D vizualizaciju uz razne opcije prezentiranja rješenja koje nude razne računalne aplikacije) kao rješenje te je potrebno dokumentirati sve varijante i rezultate njihove procjene. Možda među njima leži upravo jedno od rješenja za buduće izazove s kojima će se proizvodni sustav susresti.

3.4. Načela projektiranja proizvodnih sustava

Kao što je već prethodno spomenuto, osnovni problem projektiranja proizvodnih sustava je prostorno određivanje sustava na različitim razinama pri čemu je, prema [1], potrebno potpuno definirati prostor za:

- Realizaciju proizvodnih procesa
- Transport i rukovanje materijalom
- Osigurati prostor za skladišta
- Osigurati prostor za sve prateće djelatnosti

Kako se prilikom projektiranja složenih sustava poput proizvodnog sustava nailazi na brojne poteškoće i ograničenja koja je potrebno uvažiti kako bi se dobilo valjano rješenje, u [1] su navedena načela projektiranja proizvodnih sustava kojima se nastoji identificirati najutjecajniji problem. Primjenom nekih od tih načela se postavljaju osnovne smjernice za oblikovanje proizvodnog sustava, ali i za savladavanje i uvažavanje problema.

Stoga su u nastavku navedena načela projektiranja proizvodnih sustava prema [1]:

Načelo integracije svih utjecajnih faktora – ljudi, sredstva za rad kao i svi ostali utjecajni faktori uzeti su u obzir na način koji rezultira najprikladnijim kompromisom.

Načelo kretanja materijala najkraćim udaljenostima – cilj je minimizacija transportnog učina između pojedinih radnih mjesta kako bi se skratilo ukupno vrijeme od ulaska sirovina do izlaska gotovog proizvoda.

Načelo toka – radna mjesta su tako razmještena da prate redoslijed odvijanja tehnološkog procesa definiranog operacijama i fazama rada.

Načelo kugle – načelo koje osim horizontalne u obzir uzima i vertikalnu komponentu proizvodnog sustava kako bi se cijeli raspoloživi prostor što efikasnije iskoristio.

Načelo zadovoljstva i sigurnosti zaposlenika – načelo koje ima za cilj povećati zadovoljstvo zaposlenika pravilnim oblikovanjem i razmještajem svih potrebnih površina kako bi se zaposlenici osjećali ugodno, ali i sigurno u proizvodnom sustavu.

Načelo fleksibilnosti – načelo koje osigurava prilagodljivost svih elemenata proizvodnog sustava na promjenjivu potražnju tržišta uz minimalan utrošak vremena i financijskih sredstava.

Načelo cjelovitosti – nastoji ujediniti rješenja različitih problema vezanih uz projektiranje proizvodnih sustava pri čemu treba imati na umu kako optimum pojedinačnih rješenja najčešće neće biti i optimum cjelovitog rješenja pri čemu je cjelina najbolji kompromis.

Načelo postupnosti i iterativnosti – do konačnog rješenja se ne dolazi u jednom koraku već je potrebno nekoliko iteracija čija se valjanost očituje u sljedećim koracima. U slučaju da rješenje ne odgovara očekivanom, postupak projektiranja se iterativno ponavlja.

Načelo orijentiranosti na funkciju proizvodnog sustava – projektiranje proizvodnog sustava se orijentira na zahtjeve koji proizlaze iz proizvodnog programa te oni imaju prioritet u postupku donošenja odluka.

Načelo varijantnosti – prilikom projektiranja proizvodnog sustava izvede se nekoliko rješenja koja se potom vrednuju od ekspertne skupine po specifičnim kriterijima.

Načelo idealnog projektiranja – uspoređuje se idealno rješenje s usvojenim pri čemu je idealno rješenje izvedeno bez uzimanja u obzir ikakva ograničenja uzrokovana mikrolokacijom.

Načelo ekonomičnosti – nastoji izbjeći preprojektiranje ili potprojektiranje. Preprojektiranje daje rješenja visoke kakvoće, ali zahtijevaju visok utrošak vremena koja na kraju neće značajno pridonijeti kvaliteti čitavog projekta. Potprojektiranje podrazumijeva rješenje u kratkom vremenu koje ili ne nudi zadovoljavajuće kvalitetno rješenje ili je sklono pojavljivanju nepredviđenih prepreka.

Načelo interdisciplinarnosti – za realizaciju projektnih rješenja visoke kakvoće u razumnom vremenu potrebno je specijalističko znanje raznih stručnjaka koji čine interdisciplinarne projektne skupine.

3.5. Strukture proizvodnih sustava

Odabirom odgovarajuće proizvodne strukture želi se postići što veća učinkovitost i iskoristivost dostupnih sredstava za rad te minimiziranje troškova i vremena trajanja proizvodnih ciklusa.

Na odabir odgovarajuće strukture utječe niz faktor od kojih najveći utjecaj imaju proizvodni program i tehnologija (asortiman, količine, oblik, dimenzije, tolerancije, tehnološka sličnost itd.).

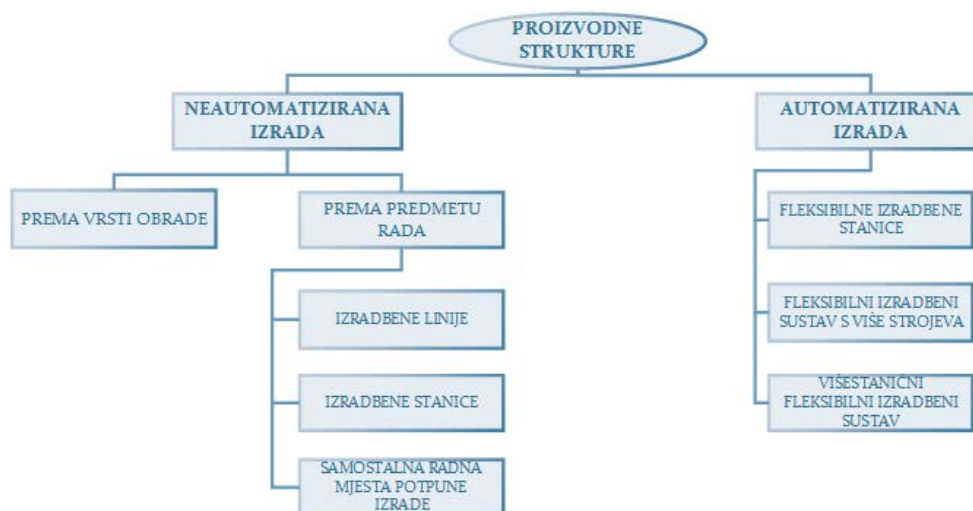
Efikasnost cjelokupnog proizvodnog sustava ovisi o njegovoj strukturi jer ona direktno određuje karakteristike toka materijala što se potom odražava na odvijanje proizvodnih ciklusa, iskoristivost proizvodnih sredstava te na upravljivost proizvodnog sustava.

U [1] se navode tri slučaja proizvodnih sustava kod kojih je karakteristično da:

- Predmeti rada su stacionarni u proizvodnom procesu, a ljudi i sredstva su pokretni – karakteristični za izradu proizvoda vrlo velikih dimenzija i masa poput brodova, lokomotiva, aviona i sl.
- Predmeti rada se kreću kroz proizvodni sustav, dok su ljudi i sredstva za rad stacionarni – češći slučaj
- Pokretni predmeti rada, ljudi ali i sredstva za rad

Ovisno o stupnju automatizacije, u [1] je navedena podjela proizvodnih struktura na neautomatizirane i automatizirane proizvodne strukture.

Neautomatiziranu izradu tvore strukture prema vrsti obrade i prema predmetu rada, dok se kod automatiziranih struktura javljaju fleksibilne izradbene stanice, fleksibilni izradbeni sustavi i višestanični fleksibilni izradbeni sustavi (slika 6).



Slika 6. Strukture proizvodnih sustava prema [1]

Proizvodne se strukture dijele na dvije osnovne skupine ovisno o tome da li se radi o klasičnim proizvodnim sustavima bez ili s vrlo niskim stupnjem automatizacije ili se radi o automatiziranim proizvodnim sustavima s visokim stupnjem automatizacije s fokusom na osiguranje proizvodnje različite količine različitih proizvoda uz relativno niske troškove.

Kada je riječ o strukturama klasičnih proizvodnih sustava, one se prema [1] definiraju po načelu funkcije ili prema predmetnom načelu. Po načelu funkcije, radna se mjesta grupiraju u one skupine koje omogućuju istu vrstu operacija (istu vrstu obrade) na različitim predmetima rada.

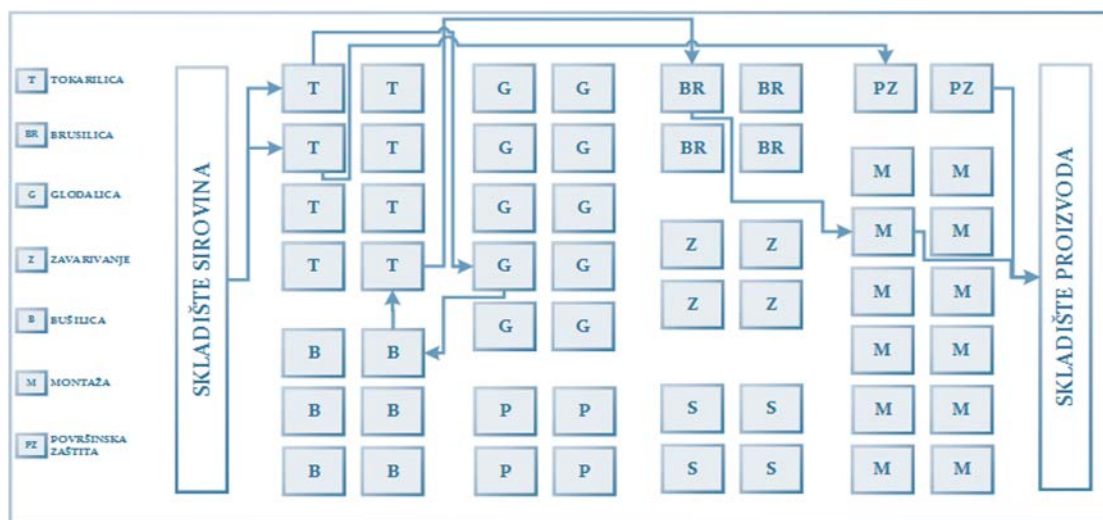
Prema predmetnom načelu radna se mjesta grupiraju s ciljem izvođenja različitih, svih potrebnih operacija za djelomičnu ili potpunu izradu jednog ili više tehnološki sličnih predmeta rada. Strukture klasičnih proizvodnih sustava mogu biti izvedene [1]:

- Prema vrsti obrade
- Prema predmetu rada – izradbene linije, stanice i samostalna radna mjesta potpune izrade

U nastavku će navedene strukture biti uvodno grafički prikazane i opisane.

3.5.1. Proizvodni sustav strukturiran prema vrsti obrade

U ovoj se strukturi sredstva za rad (strojevi i oprema) grupiraju prema vrsti operacija koje mogu izvršiti. To znači da će strojevi za tokarenje tvoriti jednu zasebnu skupinu (odjel), strojevi za glodanje drugu zasebnu skupinu, strojevi za bušenje treću itd. Time se tok materijala uglavnom prebacuje između skupina strojeva, dok se on rijetko pojavljuje unutar same skupine strojeva pošto je u osnovi na bilo kojem radnom mjestu iste skupine moguće izvršiti istu operaciju.



Slika 7. Struktura proizvodnog sustava prema vrsti obrade prema [1]

Do pojavljivanja toka materijala unutar same skupine može doći uslijed balansiranja opterećenja pojedinih strojeva ili zbog definicije samog tehnološkog procesa.

Kako poduzeća usvom strojnom parku često imaju više strojeva koji u osnovi mogu izvršiti tehnološki iste operacije, ali različite složenosti (poput klasične tokarilice i numerički upravljane tokarilice) tada se obično pristupa tako da se na klasičnim strojevima mogu odraditi

jednostavnije (pripremne) operacije, a za složenije operacije se potom koriste numerički upravljani strojevi.

Ova struktura je pogodna za maloserijsku proizvodnju sa širokim asortimanom proizvoda. Prednosti ovakve strukture su očite. Omogućuje koncentriranje stručnog znanja tamo gdje je to potrebno, odnosno grupiranje ljudi istih ili sličnih znanja i vještina koji mogu brzo reagirati i zajednički riješiti razne probleme. Osim toga, moguće je raspodijeliti različite, složenije radne zadatke zaposlenicima, pri čemu je sama podjela rada puno jednostavnija. Ova struktura također omogućuje iskorištenje prednosti starijeg strojnog parka (klasični alatni strojevi) koji imaju znatno nižu cijenu sata rada što se u konačnici odrazi na cijenu gotovog proizvoda (naravno, odražava se i na vrijeme obrade). Također su troškovi održavanja, ako se ne radi o retrofitu ili remontu, značajno niži nego kod numerički upravljanih alatnih strojeva. Koncentriranje stručnog znanja dodatno omogućuje visoku programsku fleksibilnost i mogućnost realizacije širokog asortimana proizvoda.

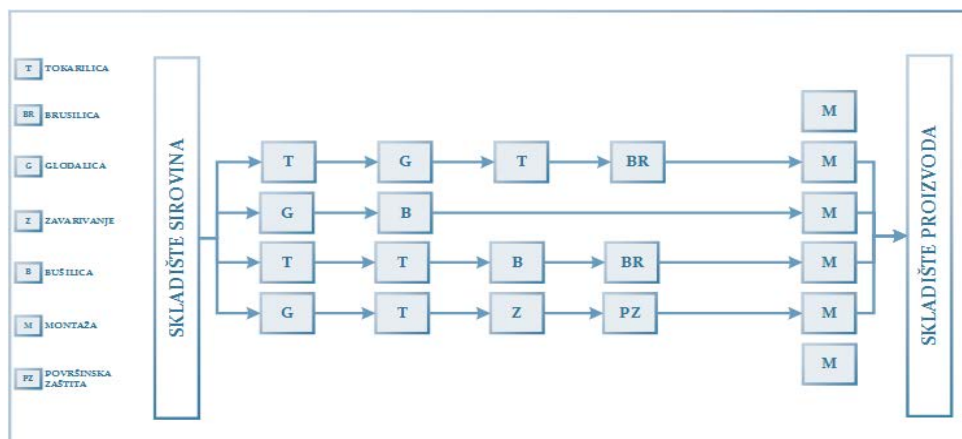
Nedostaci ove strukture su dugi ciklusi izrade koji su posljedica dugih transportnih puteva između pojedinih skupina strojeva, značajan udio priprema – završnih vremena, kao i veliki broj povratnih tokova materijala uvjetovan tehnološkim postupkom. Povratni tokovi također čine proizvodni proces nepreglednim te dolazi do pojave redova čekanja između pojedinih operacija. Veliki redovi čekanja zahtijevaju određene površine za međuodlaganje na radnim mjestima što je nepovoljno jer se troši proizvodna površina koja se mogla iskoristiti za proširenje postojećih ili uvođenje novih tehnoloških kapaciteta.

3.5.2. Proizvodni sustav strukturiran prema predmetu rada

Kako je struktura prema vrsti obrade primjenjiva samo kod malih proizvodnih serija, a zahtjeva veliku površinu uslijed potrebe za međuodlaganjem kao i loša preglednost procesa, javlja se potreba za drugim oblikom proizvodne strukture – *strukture orijentirane prema predmetu rada*.

U početku su to bile proizvodne linije namijenjene za velikoserijsku i masovnu proizvodnju, dok su se kasnije pojavili sustavi temeljeni na konceptu grupne tehnologije.

Vrlo pojednostavljeno rečeno, koncept grupne tehnologije nastoji identificirati i definirati proces pronalazanja tehnološki sličnih dijelova i proizvoda što omogućuje grupiranje strojeva različitih operacija na način kako to nalaže tehnološki proces izrade. Na slici 8 je prikazana struktura prema predmetu rada u izvedbi izradbene linije. Ovdje se jasno vidi orijentiranost strukture na proizvod, odnosno njegov redoslijed operacija uvjetovan tehnološkim procesom.



Slika 8. Struktura proizvodnog sustava prema predmetu rada – izradbene linija prema [1]

Ovakva struktura osigurava jednostavan, jednosmjernan tok materijala s kratkim transportnim udaljenostima. Osim toga, bolja je iskoristivost dostupne proizvodne površine s obzirom kako se ovom strukturom dobiva onaj dio površine koji bi otpao na međudlaganje koje je ovdje (u idealnom slučaju) nepotrebno. Izradbene linije postižu vrlo visoku učinkovitost izrade, vrlo kratka vremena izrade s vrlo malim udjelom priprema – završnih vremena.

Dodatno, ovakva struktura zahtjeva niži nivo znanja i kompetencija zaposlenika te se od njih očekuje manje rukovanja materijalom. Upotrebom specijalnih tehnoloških kapaciteta poput obradnih centara i ćelija moguće je dodatno iskoristiti prednosti strukture definirane prema predmetu rada. Vremena potrebna za obavljanje operacija na pojedinim radnim mjestima trebaju biti međusobno balansirana s vrijednostima što bližima iznosu takta linije kako ne bi došlo do pojave uskog grla uslijed zastoja ili čekanja.

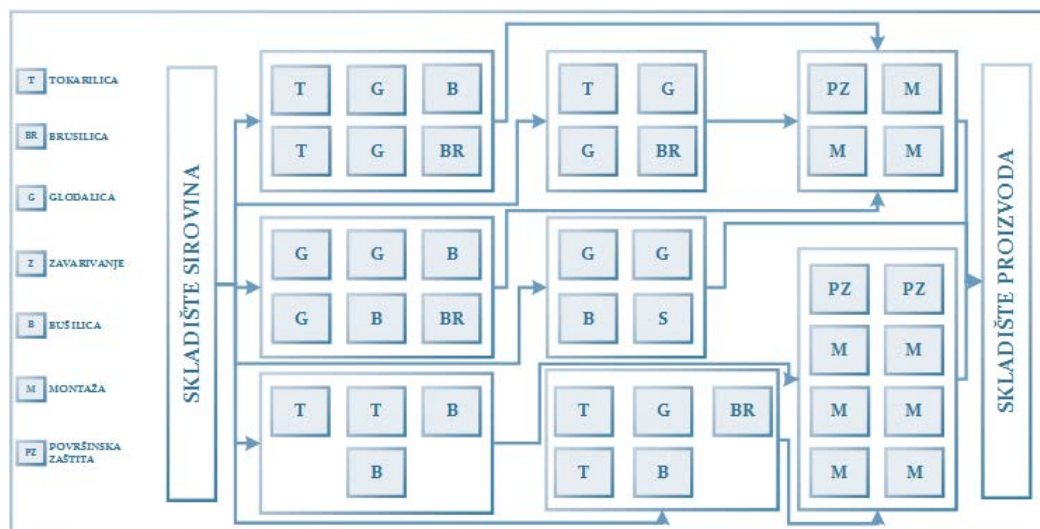
Iz navedenog proizlaze nedostaci ove strukture. Nedostaci ove strukture su visoka osjetljivost na poremećaje pri čemu operacija koja najdulje traje definira izlaz. Time se ograničava iskoristivost preostalih strojeva u liniji. Ovakav sustav je također nefleksibilan i ovako postavljen raspored proizvodnih sredstava omogućuje izradu samo jedne vrste tehnološki sličnih proizvoda. Osim toga, zahtjeva veća investicijska sredstva, te monotoni rad dugoročno može uzrokovati nemotiviranost i pad performansi zaposlenika.

Kombinacijom prethodno navedenih proizvodnih struktura dolazi se do izradbenih stanica. One nastoje maksimalno iskoristiti prednosti koje sa sobom nose prethodne strukture, minimizirajući njihove negativne strane u što većoj mjeri.

Ova struktura se temelji na grupnoj tehnologiji kod koje je već spomenuto kako ona nastoji grupirati elemente u skladu s procesom izrade tehnološki sličnih dijelova i proizvoda.

Osnovno polazište je podjela sustava na više podsustava u kojima se nastoji ostvariti što veći stupanj gotovosti proizvoda uz minimalnu interakciju s ostalim podsustavima. Unutrašnja struktura je po svojim karakteristikama slična strukturi prema vrsti obrade, naglašavajući prednosti fleksibilnosti, ali i prostornim rasporedom proizvodnih sredstava koji osigurava tok materijala u skladu s tehnološkim procesom izrade grupe proizvoda.

Tako se ova struktura sastoji od izradbenih stanica koje posjeduju efikasnost linija, ali i fleksibilnost sustava strukturiranog prema vrsti obrade.



Slika 9. Struktura proizvodnog sustava prema predmetu rada - izradbene stanice prema [1]

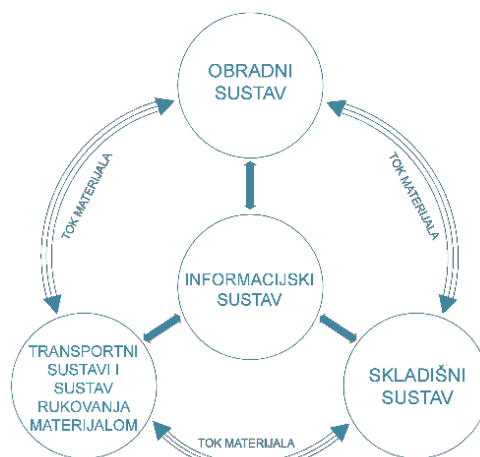
Prednosti ovakve strukture su visoka iskoristivost strojeva, mali udio priprema – završnih vremena i povećanje kvalitete izradaka. Kratki i jednostavni transportni tokovi olakšavaju planiranje, vođenje i nadzor proizvodnih procesa čime se značajno dobiva na njihovoj preglednosti. Prema [1], ova struktura također pridonosi humanizaciji rada budući da zaposlenici imaju direktan uvid u cjelokupan proizvodni proces, od početka do krajnjeg rezultata. Grupiranje dodatno pridonosi formiranju timskog duha i posvećenost zajedničkom cilju što dodatno motivira zaposlenike. Tako zaposlenici mogu obavljati i preuzeti dio organizacijskih poslova što se dodatno odražava na povećanje produktivnosti i efikasnosti. Ako je za određenu grupu tehnološki sličnih proizvoda i njihovih količina opterećenje sredstva za proizvodnju slabo, iz ekonomskih razloga nije isplativo osigurati takve kapacitete već ih je potrebno preuzeti iz preostalih izradbenih stanica. Takve se stanice nazivaju djelomično samostalne te uzrokuju međusobni tok materijala. Nedostaci ove strukture su visoki zahtjevi na znanje i sposobnosti zaposlenika i njihovo rukovodstvo. Osim toga, dolazi do neujednačenosti opterećenja po radnim stanicama što zahtjeva ujednačavanje tokova na svakoj stanici. Također postoji jedan poseban slučaj radne stanice a to je samostalno mjesto potpune izrade s jednim radnim mjestom na kojemu se izvodi

obrada predmeta rada od početka od kraja. Ovakva struktura predstavlja izolirani oblik pri čemu se tokovi materijala uspostavljaju samo sa skladištima. Ova struktura je primjenjiva u slučaju prostome koncentracije tehnoloških kapaciteta bilo da se radi o specijaliziranim ručnim radnim mjestima (kao kod izrade prototipa) ili primjenom suvremenih visokosofisticiranih sredstva za rad (obradni centri i ćelije, primjena aditivne tehnologije i sl.).

3.5.3. Automatizirane proizvodne strukture

Upotreba jedne od prethodno navedenih proizvodnih struktura ili izrada strukture kombinacijom nekih od navedenih nije moguće eliminirati dva karakteristična problema. Prvi je da neautomatizirana izrada može osigurati proizvodnju različitih proizvoda manjih količina, ali uz visoke troškove. Takav slučaj je karakterističan za strukturu prema vrsti obrade. Drugi problem je vezan uz strukturu orijentiranu prema predmetu rada u kojoj se može proizvesti veliki broj proizvoda uz male troškove, ali uz umjereno uzak proizvodni asortiman uz lošu fleksibilnost i spor odziv na nove zahtjeve kupaca. Stoga se javljaju automatizirane proizvodne strukture koje se u [1] nazivaju fleksibilni izradbeni sustavi (FIS). Pojam FIS je, prema [1], uveo Dolezalek početkom 70 – ih godina 20. stoljeća pri čemu taj pojam podrazumijeva automatizaciju serijske proizvodnje, integracije tokova materijala i informacija u sustave numerički upravljanih alatni strojeva. FIS sustavi su oblikovani na način da u što većoj mjeri riješe navedene probleme upotrebom automatizacije. Prema [1], FIS sustavi predstavljaju temelj suvremene automatizirane proizvodnje. FIS sustavi predstavljaju reprogramabilne proizvodne sustave koji su sposobni automatski proizvesti široki spektar različitih proizvoda. Obično ih karakteriziraju programabilni alatni strojevi, automatizirani sustavi rukovanja materijalom, upravljanje zajedničkom računalnom mrežom, skraćene pripreme – završnih vremena i vremena čekanja, kao i spajanje fleksibilnosti i učinkovitosti.

Opće značajke fleksibilnih proizvodnih sustava prema [1] su:



Slika 10. Osnovne komponente FIS – a [1]

Prema [1], osnovni elementi FIS – a su direktno upravljani numerički alatni strojevi (eng. *Direct Numerical Control*, DNC), upravljački informacijski sustav, automatski trokoordinatni mjerni sustavi, automatski sustav rukovanja materijalom koji se sastoji od automatski vođenih vozila (eng. *Automated Guided Vehicles*, AGV), konvejera te automatskih skladišnih sustava za izuzimanje i odlaganje materijala i industrijskih robota. Postoje tri tipa fleksibilnih izradbenih sustava koji se razlikuju prema sustavu rukovanja materijalom. To su prema [1]:

- Fleksibilna izradbena stanica
- Fleksibilni izradbeni sustav s više strojeva
- Višestanični fleksibilni izradbeni sustav

Fleksibilna izradbena stanica je varijanta fleksibilnog izradbenog sustava koja se sastoji od jednog ili više numerički upravljanih alatnih strojeva koji imaju jedan zajednički sustav rukovanja materijalom. Sustav za rukovanje materijalom je zadužen za opskrbu strojeva potrebnim materijalom iz ulaznog spremnika. Prilikom opskrbe stroja novim materijalom, iz njega vadi obrađeni dio koji prebacuje u izlazni spremnik. Automatsko čišćenje i kontrola kvalitete mogu biti također ugrađenu u fleksibilnu izradbenu stanicu.

Fleksibilni izradbeni sustav s više strojeva se sastoji od više numerički upravljanih alatnih strojeva koji su međusobno povezani automatiziranim sustavom za rukovanje materijalom koji se sastoji od dva ili više uređaja koji poslužuje strojeve ili od jednog uređaja koji je sposoban istovremeno poslužiti dva ili više strojeva. Glavna prednost ovakvog fleksibilnog izradbenog sustava je ta što omogućuje paralelnu obradu različitih dijelova koji mogu istovremeno prolaziti rutama neovisno jedan o drugome, u skladu s njihovim tehnološkim postupcima izrade.

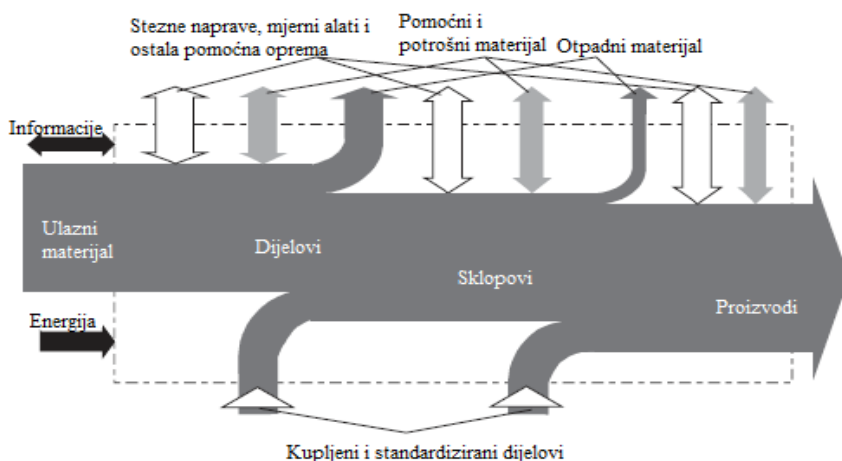
Višestanični fleksibilni izradbeni sustav se sastoji od više fleksibilnih izradbenih stanica s više numerički upravljanih alatnih strojeva koji su povezani automatskim sustavom rukovanja materijalom. Posjeduje karakteristike slične sustavu više stroja s razlikom da je tok materijala koncipiran na način da se izvodi paralelno po pojedinim stanicama. Iz navedenog se vidi kako se ove strukture razlikuju ponajprije s načinom određivanja automatskog sustava rukovanja materijalom.

3.6. Tok materijala

Prema [1], tok materijala je organizacijsko, vremensko i prostorno povezivanje tehnoloških, kontrolnih, skladišnih, transportnih i svih ostalih procesa vezanih uz materijal koji se kreće proizvodnim sustavom tijekom proizvodnog ciklusa.

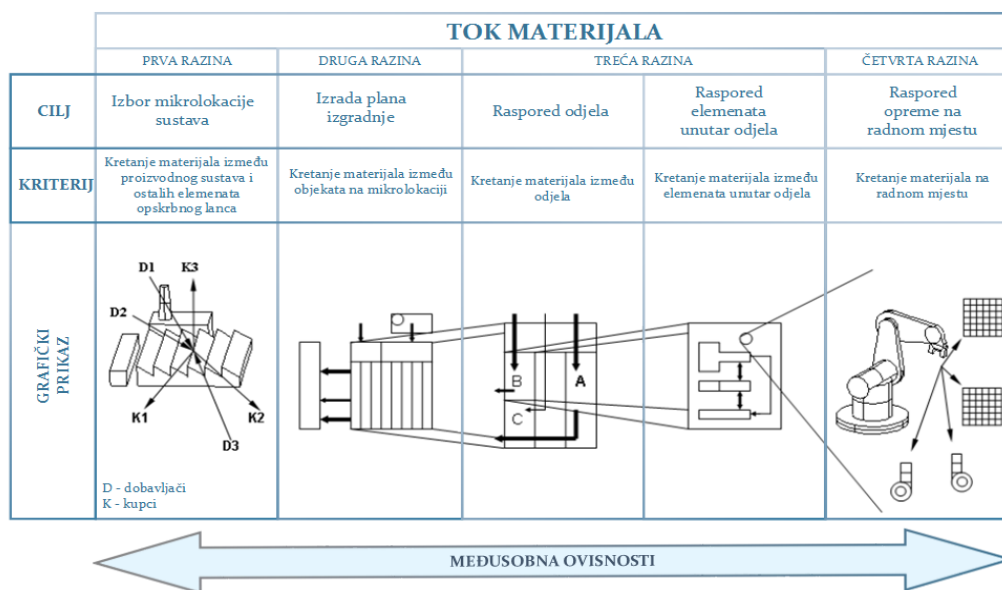
Tok materijala se izražava kao količina materijala koja se prevozi proizvodnim sustavom u promatranom vremenskom razdoblju, a prikazuje se pomoću transportnog intenziteta. Obuhvaća svo kretanje materijala unutar promatranog područja u promatranom vremenu uz promjenjivi put, brzinu gibanja i količinu koja se prevozi, a pri izvođenju operacija ili kod skladištenja se pretpostavlja brzina kretanja jednaka nuli.

Pod pojmom tok materijala podrazumijevaju se tokovi (slika 11): sirovina, poluproizvoda, rezervnih dijelova, potrošnog materijala, sklopova, gotovih proizvoda, alata, naprava, mjerna oprema, ali i informacija, energije i otpadnog materijala.



Slika 11. Sankeyjev dijagram toka materijala prema [2]

Kao što je pod pojmom toka materijala obuhvaćeno kretanje različitih elemenata proizvodnih sustava, tako se njihov protok gleda na različitim razinama. Norma VDI 3300 tok materijala dijeli na četiri razine pri čemu svaka razina ima svoju zadaću unutar projektiranja proizvodnog sustava. Pojedine razine su ilustrativno prikazane na slici 12.



Slika 12. Razine toka materijala prema VDI 3300 [1]

Prva razina toka materijala svedena je na razinu mikrolokacije. Ona služi za određivanje njenog položaja u odnosu na dobavljače i kupce te obuhvaća tokove materijala između proizvodnog sustava i njegove okoline.

Tok materijala druge razine služi za određivanje tokova na razini mikrolokacije pri čemu se gleda međusobna povezanost objekata na mikrolokaciji te je mjerodavan za izradu plana izgradnje. Plan izgradnje predstavlja projekt kojim se definira idealni plan proizvodnog sustava koji je potrebno prilagoditi postojećim ograničenjima te predstavlja osnovu za sve buduće promjene proizvodnog sustava.

Tok materijala treće razine promatra tokove materijala između pojedinih odjela kao i unutar samog odjela te daje osnovne podatke potrebne za optimiranje prostornog rasporeda promatranog odjela proizvodnog sustava. Treća razina je ujedno ta od koje započinje postupak određivanja toka materijala. Pritom se tokovi materijala koji se nalaze na nižim razinama dobivaju preračunavanjem s obzirom da se elementi spajaju u veće cjeline.

Tok materijala četvrte razine opisuje kretanje materijala unutar samog radnog mjesta što je posebno interesantno ukoliko se žele automatizirati tokovi materijala na tom radnom mjestu i standardizirati aktivnosti i oprema radnog mjesta.

Prema [1], određivanje toka materijala može se na dva načina. Prvi način je izravnim snimanjem, dok je drugi na temelju proračuna pomoću dostupnih podataka. Izravno snimanje toka materijala se u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji izbjegava zbog dugotrajnosti od oko tri mjeseca, remećenja proizvodnje i nepouzdanosti informacija. Naime, ovaj način se može provesti metodom trenutačnih zapažanja ili naložiti operateru transportnog sredstva da popunjava potrebne informacije (datum, broj i količina sredstva za odlaganje, transportno sredstvo, predmet i količina koja se transportirala, lokacije, i sl.). Nedostatak ovog načina je da se na temelju podataka iz trenutnog stanja vrlo teško može donijeti zaključak o toku materijala za neko buduće stanje. Proračun toka materijala se provodi na temelju podataka o proizvodnom asortimanu, sastavnici proizvoda, tehnološkom listu, planu montaže. Pošto je ponekad zbog velikog broja proizvoda i dijelova teško prikupiti podatke za sve proizvode iz asortimana, postupak se primjenjuje na reprezentante proizvode, dijelove i sklopove. Postupak proračuna se sastoji od 6 koraka prema [1]:

1. Proizvod je potrebno rastaviti na sastavne sklopove i pojedinačne dijelove
2. Odrediti ukupan broj sklopova i pojedinačnih dijelova za promatrano razdoblje
3. Definirati vrstu sredstva za odlaganje za svaki predmet rada

4. Za svaki predmet rada je potrebno izračunati potreban broj transporta za prijevoz jedne serije k - tog dijela pomoću izraza:

$$n_{OK} = \frac{Q_{SK}}{Q_{POk}} \cdot \frac{1}{Q_{TSk}} \quad (3.1)$$

Gdje je:

Q_{Sk} – veličina serije k – tog dijela

Q_{POk} – broj dijelova koji stanu u jedno sredstvo za odlaganje

Q_{TSk} – Broj sredstva za odlaganje k – tog dijela koji se prevoze transportnim sredstvom u jednoj vožnji

5. Potrebno je odrediti transportni intenzitet (broj prijevoza) između i – tog i j – tog radnog mjesta proizvodnog sustava za k – ti dio.

$$b_{ij_k} = n_{OK_k} \cdot n_{Sk} \quad (3.2)$$

Gdje je:

n_{Sk} – broj serija k – tog dijela u promatranom razdoblju

6. Ukupni transportni intenzitet u promatranom razdoblju između i – tog i j – tog radnog mjesta proizvodnog sustava se dobiva zbrajanjem pojedinih transportnih
7. intenziteta svih dijelova koji se transportiraju između ta dva radna mjesta u promatranom razdoblju.

$$b_{ij} = \sum_k b_{ij_k} \quad (3.3)$$

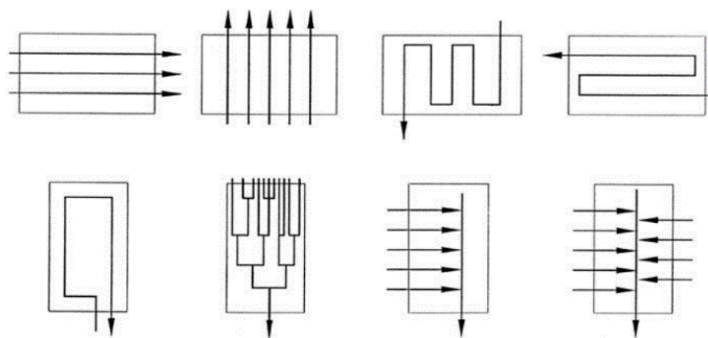
Množenjem intenzivnosti toka materijala i udaljenosti na kojoj se odvija dobiva se transportni učin (jednadžba 3.4) kojim se nastoji minimizirati ukupno vrijeme putovanja materijala od jednog radnog mjesta prema drugome što dovodi do skraćivanja trajanja ciklusa i povećanja preglednosti i produktivnosti promatranog proizvodnog sustava.

$$q_{ij} = b_{ij} \cdot s_{ij} \quad (3.4)$$

Pri čemu se transportni učin na razini cijelog proizvodnog sustava određuje jednadžbom (3.5):

$$q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m b_{ij} \cdot s_{ij} \quad (3.5)$$

U nastavku su shematski prikazani različiti oblici tokova materijala koji se mogu pojaviti unutar proizvodnog pogona.



Slika 13. Shematski prikaz tokova materijala prema [1]

Prilikom formiranja tokova materijala treba voditi računa o tome da se oni odvijaju na najkraćim mogućim putovima, potom je potrebno izbjegavati križanja transportnih putova kao i izbjegavati povratne tokove.

3.7. Kapacitivno dimenzioniranje proizvodnog sustava

Cilj kapacitivnog dimenzioniranja proizvodnog sustava je odrediti potreban broj strojeva i ostalih elemenata proizvodnog sustava. Osnovni izvor podataka za kapacitivno dimenzioniranje proizvodnog sustava je tehnološki proces izrade dijela kojim se određuje redosljed, trajanje, potrebna oprema i opis operacije.

Kada je poznato koja je potrebna oprema i kada su poznata vremena tehnoloških operacija, broj elemenata proizvodnog sustava ovisi o potrebnoj količini, veličinama serija i kapacitetu elemenata, tj. vremenu koje mu je raspoloživo za obradu promatranog dijela. Prema poznatim podacima iz tehnološkog procesa izrade, vremensko opterećenje pojedinog stroja računa se [1]:

$$t_E = \sum_k \sum_j n_{sk} \cdot t_{PZkj} + \sum_k \sum_j n_k \cdot t_{1kj} \quad [s] \quad (3.6)$$

Gdje je:

t_E – vremensko opterećenje stroja na godišnjoj razini [s]

n_{sk} – broj serije k – tog proizvoda godišnje

t_{PZkj} – pripremno – završno vrijeme na stroju za j – tu operaciju k – tog proizvoda [s]

n_k – godišnja potražnja k – tog proizvoda na promatranom stroju

t_{1kj} – komadno vrijeme obrade na stroju za j – tu operaciju k – tog proizvoda [s]

k – brojač različitih proizvoda koji se izrađuju na stroju $k = 1, 2, \dots, N_P$

j – brojač operacija za i – ti proizvod, $j = 1, 2, \dots, N_{oi}$

Pomoću jednadžbe (3.6) može se odrediti teoretski potreban broj elemenata pomoću izraza [2]:

$$n_{TE} = \frac{t_E}{t_{RE}} \quad (3.7)$$

Gdje je:

t_{RE} – raspoloživo vrijeme stroja na godišnjoj razini [h/a]

Raspoloživo vrijeme stroja za rad u jednoj smjeni (7,5 h) u jednoj godini može izračunati pomoću izraza prema [1]:

$$t_{RE} = (365 - \text{broj neradnih dana} - \text{broj dana za održavanje}) \cdot 7,5 \cdot \eta_{RE} \cdot [h] \quad (3.8)$$

Gdje je:

η_{RE} – stupanj iskoristivosti radnog mjesta

U [1] se preporučuje uzimati iznost $t_{RE} = 1800 \text{ h} = 6480000 \text{ s}$ na godišnjoj razini za rad u jednoj smjeni. Broj dana potrebnih za održavanje se određuje na temelju proizvođača opreme, dok se stupanj iskoristivosti η_{RE} procjenjuje na osnovi iskustva za nove proizvodne sustave, a za postojeće pomoću prethodnih podataka iz proizvodnje.

Kao što je iz izraza (3.7) vidljivo, teoretski broj potrebnih strojeva poprima necijelu vrijednosti pa ga je potrebno zaokružiti kako bi se dobio stvaran potreban broj strojeva. Ako je pomoću izraza (3.7) dobivena potreba od 6,12 strojeva, potrebno bi ih bilo nabaviti 7. Međutim, u realnoj situaciji moguće je taj broj zaokružiti i na 6 strojeva na način da se ostatak potrebnog kapaciteta prebaci na one strojeve koje imaju slobodnog kapaciteta, a u mogućnosti su izvršiti potrebnu operaciju.

Odnosno, moguća su tri rješenja:

- Upotreba stroja slobodnog kapaciteta koji omogućuje izvršenje potrebne operacije
- Prekovremeni ili višesmjenski rad
- Kooperacija

Preporuka prema [1] je kako se kod malih vrijednosti n_{TE} (npr. $n_{TE} < 0,5$) isplati zaokružiti na višu vrijednost samo ako se radi o jeftinijem stroju uz zadovoljavanje osnovnih kriterija ekonomičnosti i potrebne upotrebe u budućnosti.

3.8. Prostorno dimenzioniranje proizvodnog sustava

Za prostorno dimenzioniranje važno je poznavati sve faktore kojima je potrebno osigurati prostor i smjestiti ih u proizvodni sustav. Iz navedenog proizlaze osnovni utjecajni faktori veličine ukupne površine proizvodnog sustava [1]:

- Proizvodni procesi
- Pomoćni procesi (skladištenje, transport, pretovar, međuodlaganje)
- Vrsta zgrada i broj katova
- Struktura i organizacija sustava
- Ukupan broj zaposlenih
- Količina proizvodnih sredstava
- Zaštita okoliša

Za proračun potrebnih površina proizvodnog sustava u [1] se navode tri metode:

1. Postupak pomoću karakterističnih vrijednosti
2. Analitički postupci – proračun netoproizvodne površine pomoću površinskih faktora ili pomoću ekvivalentnih površina
3. Grafički postupak

Postupak pomoću karakterističnih vrijednosti potrebnih površina proizvodnog sustava se temelji na količnicima koji izražavaju odnos empirijski definiranih vrijednosti dviju značajki poput [1]:

- Površina po zaposlenom (broj zaposlenih se odnosi na jednu smjenu i predstavlja sumu proizvodnih, skladišnih, administrativnih i pomoćnih površina) $\left[\frac{m^2}{zaposlenik} \right]$
- Površina po stroju $\left[\frac{m^2}{stroj} \right]$
- Površina po obujmu proizvodnje $\left[\frac{m^2}{komad} \right]$ ili $\left[\frac{m^2}{t} \right]$
- Površina po jedinici prihoda $\left[\frac{m^2}{kn} \right]$

Ovaj je postupak primjenjiv samo za slične proizvodne procese te je potrebno preispitati vrijednosti predložene u literaturi.

Tablica 1. Karakteristične vrijednosti nekih površina prema [1]

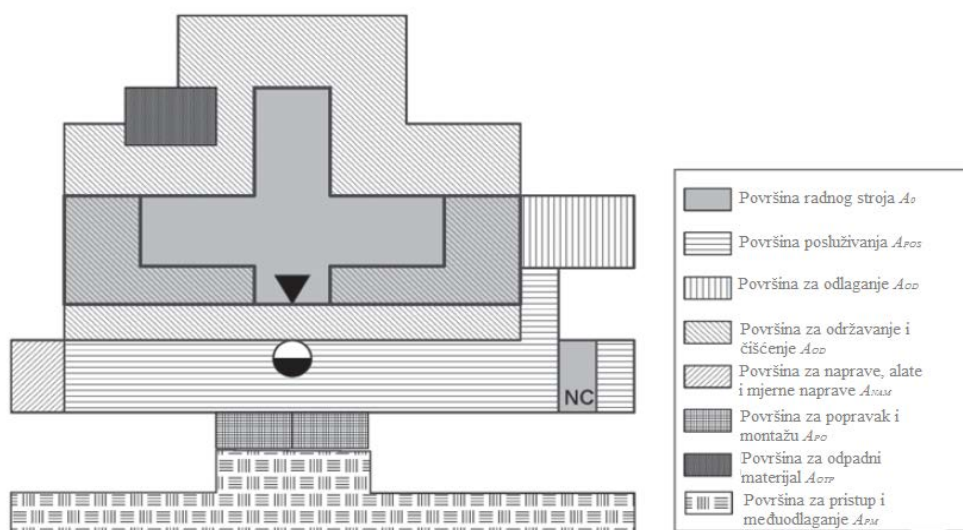
Površina zemljišta [$m^2/zaposlenik$]:	60 do 90
Površina za promet:	20% površine zemljišta
Površina za parkiranje uključujući prilaze i izlaze [$m^2/5$ zaposlenika]:	25
Za putnička vozila [$m^2/zaposlenik$]:	25
Za teretna vozila [$m^2/zaposlenik$]:	35
Rezervna površina:	od 20% do 30% površine zemljišta
Tokarilice, lake [$m^2/stroj$]:	6
Tokarilice, srednje [$m^2/stroj$]:	12
Tokarilice teške [$m^2/stroj$]:	15
Male i srednje glodalice [$m^2/stroj$]:	20
Transportna površina:	30% površine strojnih radnih mjesta

Proračun netoproizvodne površine pomoću površinskih faktora analitička je metoda kod koje se površina radnog mjesta A_{RMI} sastoji od:

- Površina osnovnog radnog mjesta
- Površina za posluživanje, održavanje, popravak, odlaganje i zaštitu.

Karakteristika funkcionalnih površina je da se pojavljuju u ovisnosti o radnom mjestu i zadatku, a dozvoljeno je međusobno preklapanje tako da je površina radnog mjesta manja od sume funkcionalnih površina.

Površina radnog stroja A_0 (slika 14) označuje projicirani tlocrt stroja u položaju pri kojem zauzima najviše prostora. Površina za posluživanje A_{POS} služi za pouzdano i neometano posluživanje stroja, stezanje i otpuštanje izratka, mjerenje, izmjenu alata i naprava i sl.



Slika 14. Sastavnice površine radnog mjesta [1]

Površine za posluživanje pojedinih radnih mjesta se ne smiju preklapati kako bi zaposlenik imao dovoljno prostora za siguran rad. Površina za održavanje i čišćenje A_{OD} služi za osiguranje odvijanja aktivnosti održavanja, čišćenje stroja kao i za otklanjanje strugotine. Površina za popravak A_{PO} treba osigurati neometano izvođenje popravaka poput demontaže vratila, vodilica, osovina, elektromotora i slično. Ova se površina samo povremeno koristi zbog čega je dozvoljeno njeno preklapanje s drugim funkcionalnim površinama.

Površina za odlaganje A_{OD} se koristi za odlaganje izatka, neposredno uz radno mjesto te ovisi o veličini izatka, transportnoj jedinici, načinu slaganja i sl.

Površina za zaštitu u pravilu se pojavljuje kod radnih mjesta kod kojih postoji opasnost od ispadanja izatka, opekline, blještanja i slično.

Funkcionalne se površine jednog ili više radnih mjesta preklapaju u određenom obujmu, bez negativnog utjecaja na funkcionalnost radnog mjesta. Dozvoljeni stupanj preklapanja funkcionalnih površina na radnom mjestu, prema [1] η_{PRM} iznosi od 40 % do 60 %.

Veličina površine radnog mjesta dobiva se kao umnožak površine radnog mjesta i površinskog faktora [1]:

$$A_N = \sum_{i=1}^m A_{RMi} = \sum_{i=1}^m A_{oi} \cdot f_{oi} \quad (3.9)$$

Gdje je:

A_{RMi} – površina i – tog radnog mjesta [m^2]

f_{oi} – faktor u ovisnosti o površini osnovnog stroja

A_{oi} – površina osnove stroja [m^2]

Tablica 2. Faktori za proračun površine radnog mjesta prema [1]

Površina osnove radnog mjesta A_o [m^2]	Faktor površine f_o
0,5 ... 1	6
>1 ... 2	5
>2 ... 3	4,5
>3 ... 4	4
>4 ... 12	3
>12 ... 16	2,5
>16	2

Faktori površine su dobiveni kao prosječne statističke vrijednosti dobivene na osnovi snimanja u industriji, uzimajući pritom u obzir funkcionalne površine radnog mjesta.

Zbog toga faktori površine ne smiju koristiti za pojedinačno određivanje površine radnog mjesta, nego samo za proračun površine za smještaj više različitih radnih mjesta.

Proračun netoproizvodne površine pomoću ekvivalentnih površina je prikladan za proračun pojedinačnih radnih mjesta. Temelji se na dimenzijama osnovnog radnog mjesta za kojeg se pretpostavlja da je pravokutnog oblika.

Na osnovne dimenzije stroja dodaje se [1]:

- 1 m na strani posluživanja (0,7 m za poslužitelja i 0,3 m za sigurnost)
- Na preostalim stranama 0,6 m (za neometani prolaz)

Površine za odlaganje nadomještaju se ekvivalentnom površinom četiriju sredstva za odlaganje iz čega slijedi površina jednog radnog mjesta [1]:

$$A_{RMi} = (D_{RM} + 2 \cdot D_O) \cdot (\check{S}_{RM} + D_P + D_O) + 4 \cdot D_{SO} \cdot \check{S}_{SO} \quad [m^2] \quad (3.10)$$

Gdje je:

D_{RM} – Duljina radnog mjesta sa strane posluživanja [m]

\check{S}_{RM} – širina radnog mjesta [m]

D_P – dodatak za posluživanje [m]

D_O – dodatak za održavanje [m]

D_{SO} – duljina sredstva za odlaganje [m]

\check{S}_{SO} – širina sredstva za odlaganje [m]

Grafički postupak za proračun potrebne proizvodne površine polazi od projiciranje osnove stroja u ekstremnim položajima nacrtane u mjerilu ($M 1:10$ ili $M 1:50$). Na ovu se površinu dodaju sve ostale potrebne površine za ostvarenje svih potrebnih funkcija radnog mjesta.

Grafički je postupak prikladan zbog svoje zornosti, ali zahtjeva veliki utrošak rada i vremena (osim ako se ne koristi neka od aplikacija koja ima CAD bazu potrebnih modela) stoga nije posebno prikladan za određivanja ukupne radioničke površine.

3.9. Metode i alati oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnog sustava

Glavni cilj primjene metoda i alata pri oblikovanju prostornog rasporeda proizvodnog sustava je da se unutar unaprijed definirane proizvodne strukture odredi ona varijanta koja je najbliža (sub)optimalnoj vrijednosti funkciji cilja. Važno je razumjeti kako neprimjereni prostorni raspored može dovesti do niza zakašnjenja, nedostatka materijala i informacija, gomilanja materijala uz radna mjesta koji se u konačnici transformiraju u novčane gubitke.

Iz navedenog proizlaze ciljevi koji se žele postići primjenom odgovarajućih metoda. Ti ciljevi mogu biti maksimizacija proizvodnosti, fleksibilnosti, sigurnosti i iskorištenja postojećih kapaciteta, ili pak minimizacija transportne udaljenosti, učina ili troškova pri čemu postaje jasno kako su neki od ovih ciljeva u opreci iz čega proizlazi činjenica kako je cilj primjene metoda i alata prostornog rasporeda elemenata kompromisom ostvariti zadovoljavajući balans između zadanih ciljeva koji će rezultirati najboljim mogućim rješenje za zadani projektni problem.

Općenito, problem prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava može se zapisati kao sljedeći matematički model (prema [11]):

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij} \cdot d_{ij} \rightarrow \min \quad (3.11)$$

Uz ograničenja:

$$(1) \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad (3.12)$$

$$(2) \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m x_{ij} = 1 \quad (3.13)$$

$$(3) x_{ij} = \{0, 1\} \quad (3.14)$$

Gdje je:

m – broj radnih mjesta (strojeva) [kom]

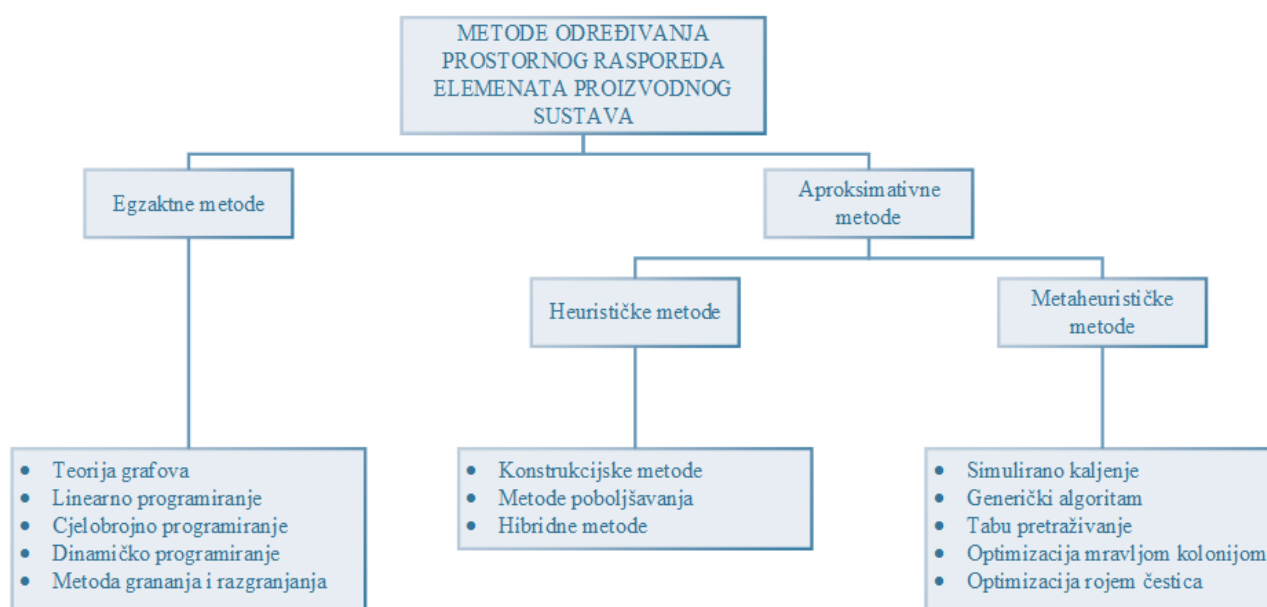
f_{ij} – trošak prijevoza od i - tog do j - tog radnog mjesta [n.j./m]

d_{ij} – udaljenost između i – tog i j – tog radnog mjesta [m]

$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{ako je radno mjesto } i \text{ dodijeljeno na lokaciju } j \\ 0, & \text{inače} \end{cases}$

Jednadžba (3.11) predstavlja funkciju cilja u kojoj se nastoji minimizirati ukupni transportni trošak uvažavajući pritom ograničenja koja govore da se točno jedno radno mjesto može dodijeliti na točno jednu lokaciju (3.10) te da je točno jedna lokacija dodijeljena svakom radnom mjestu (3.12).

Na slici 15 je dani pregled dostupnih metoda za određivanje prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava koje omogućavaju rješavanje problema prostornog rasporeda bilo da se radi o manjim sustavima, ili znatno složenijim.



Slika 15. Prikaz metoda za određivanje prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava prema [11]

Prema [11], egzaktna metoda se primjenjuje kada je problem relativno jednostavan s brojem radnih mjesta manjim od 30 ($m < 30$). Njihovim se rješavanjem dolazi do optimalnih rješenja zadanog modela, ali se pritom ne vodi računa o utrošku vremena za rješavanje postavljenog problema. U [11] se kao primjeri egzaktnih metoda navode teorija grafova, linearno, cjelobrojno i dinamičko programiranje te metoda grananja i razgrananja. S obzirom kako se one neće koristiti u ovom radu, one se neće dalje razmatrati. S druge strane, aproksimativne metode su primjenjivije za rješavanje složenijih praktičnih problema. Prednosti aproksimativnih metoda su u tome što rješenje može biti pronađeno uz razuman utrošak vremena te je velika vjerojatnost da je postignuto rješenje blisko globalnom optimumu. Međutim, ne može se tvrditi kako je dobiveno rješenje optimalno s obzirom da ono optimalno nije poznato te se smatra da aproksimativne metode rezultiraju zadovoljavajućim rješenjima za postavljene probleme.

3.9.1. Heurističke metode

Heurističke metode predstavljaju jednu skupinu aproksimativnih metoda koja se sastoji od konstrukcijskih metoda, metoda poboljšavanja i hibridnih metoda koja sadržavaju karakteristike konstrukcijskih metoda i metoda poboljšavanja.

3.9.1.1. Konstrukcijske metode

Konstrukcijske metode se temelje na algoritmima za dodjeljivanje radnih mjesta na promatranu proizvodnu površinu sagledavajući pritom različite položaja njihovog smještaja u odnosu na već dodijeljene elemente pri čemu se rješenje odabire kao ono mjesto koje rezultira najpovoljnijom parcijalnom vrijednosti funkcije cilja (npr. minimalna udaljenost d_{ij}). Glavna prednost algoritama konstrukcijske metode je mogućnost uzimanja u obzir različitih ograničenja poput dimenzije i oblika radnih mjesta, uzimanja u obzir raznih prepreka poput stupova, ulaza i izlaza tokova materijala i sl. Tako rješenja dobivena konstrukcijskim metodama velikim dijelom odgovaraju realnim uvjetima te ih je moguće gotovo direktno primijeniti uz vrlo male preinake. Međutim, treba imati na umu kako konstrukcijski modeli nisu uvijek u stanju identificirati i eliminirati nelogična ili neizvediva rješenja što onda postaje zadatak projektanta. Iako svaka od navedenih metoda ima niz pretpostavki i ograničenja koja promatrani model udaljuju od realnog stanja, ipak su korisne jer projektantu isporučuju orijentacijske podatke koji mu značajno olakšavaju proces projektiranja proizvodnih sustava na način da se dolazi u što kraćem vremenu do što kvalitetnijeg rješenja. Projektant stoga mora biti svjestan pretpostavki i ograničenja koja sa sobom nose pojedine metode kako bi mogao adekvatno analizirati i protumačiti dobivena rješenja te na temelju njih donijeti odgovarajuće zaključke. U ovu skupinu spadaju Modificirana metoda trokuta (MMT) te algoritmi CORELAP, MAT i PLANET.

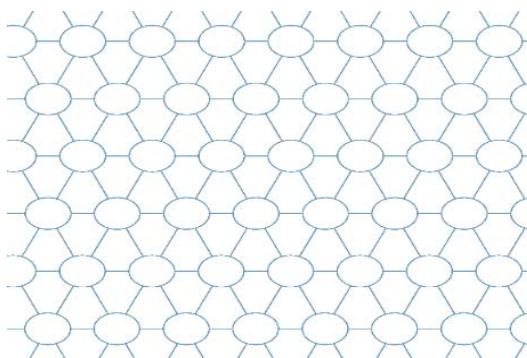
Metoda koja će se koristiti u poglavlju pri izradi različitih varijanti prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. predstavlja aproksimativni konstrukcijski heuristički algoritam pod nazivom Modificirana metoda trokuta. U nastavku će ona iz tog razloga biti detaljnije opisana.

Modificirana metoda trokuta koristi se kod modela s neograničenim izborom lokacija koji se temelji na hipotezi kako je broj slobodnih lokacija znatno veći od broja radnih mjesta koje je potrebno dodijeliti. Time se eliminiraju ograničenja vezana uz izbor broja slobodnih lokacija. Ova se metoda primjenjuje kod onih proizvodnih sustava u kojima se tokovi materijala pojavljuju između bilo kojih elemenata sustava. Takvi se tokovi upravo pojavljuju kod proizvodnih sustava strukturiranih prema vrsti obrade, izradbenih linija i izradbenih stanica. Važno je napomenuti kako je u slučaju proizvodne strukture u obliku izradbene linije nepotrebno primjenjivati ovu metodu iz razloga kako je raspored elemenata u izradbenoj liniji definiran redoslijedom operacija koje proizlaze iz projektiranog tehnološkog procesa izrade.

Prema [1] ovaj model je 1950. godine razvio Bloch (Metoda trokuta) pri čemu je njegov kriterij optimizacije bio minimalna transportna udaljenost što je u konačnici rezultiralo trokutnim odabirom lokacija koji osigurava kraće udaljenosti od npr. pravokutne ili kvadratne strukture raspodjele lokacija radnih mjesta.

Prema [1], H. Schmigalla je unaprijedio Metodu trokuta (u Modificiranu metodu trokuta) pri čemu je za optimum vrijednosti funkcije cilja odabrao minimalni ukupni transportni učinak sustava. Modificirana metoda trokuta se sastoji od mreže neograničenog broja istančanih trokuta (slika 16) na čijim se vrhovima nalaze čvorovi koji predstavljaju potencijalne lokacije za dodjeljivanje radnih mjesta.

Osnovni podaci za ovu metodu se dobivaju iz matrice transportnih intenziteta. Ovaj model polazi od tvrdnje kako su lokacije približno sličnih dimenzija i oblika iz čega proizlazi da se njihove površine zanemaruju, tj. predstavljaju vrhove trokuta dok su udaljenosti između susjednih radnih mjesta (stranice trokuta) jedinične, slika 16.



Slika 16. Mreža trokuta s pripadajućim čvorovima

Osnovno ograničenje je da se u jednom čvoru (jedna lokacija – vrh trokuta) može nalaziti samo jedno radno mjesto i obratno. Pritom se, prema [1], polazi od hipoteze kako će minimalni transportni učinak sustava biti postignuti ako se najprije osigura raspoređivanje radnih mjesta s najvećim transportnim intenzitetom neovisno o njegovom smjeru. Time se osigurava da ona radna mjesta koja imaju najveći utjecaj na poboljšanje vrijednosti funkcije cilja budu raspoređena na međusobno najpovoljnije lokacije, a to su upravo one koje rezultiraju minimalnim transportnim udaljenostima.

Nakon što se orijentirana matrica toka materijala transformira u neorijentiranu matricu toka materijala, odabiru se prva dva elementa koji će se dodijeliti u vrhove mreže trokuta. Kriterij odabira prva dva elementa je maksimalna transportna intenzivnost između ta dva elementa. Nakon što se lokacije postave u vrhove mreže trokuta, kreće dodjeljivanje ostalih neodijeljenih elemenata sustava. Dodjeljivanje se vrši tako da se za svaki još neraspodijeljeni element izračuna suma intenziteta toka materijala sa raspoređenim elementima. Elementu sa najvećom sumom biti će dodijeljena jedna lokacija (neposredno u susjedni čvor mreže trokuta) i taj postupak se nastavlja sve dok svi elementi ne budu raspoređeni. Nakon toga se izrađuje grafički prikaz koji je ostvaren putem mrežnog trokutnog modela lokacija.

Prednost ove metode je njena jednostavnost i može se koristiti bez pomoći računala, no u slučaju velikog broja elemenata sustava, korištenje računala značajno olakšava rad. Osim raspoređivanja elemenata (radnih mjesta) unutar sustava, metoda se može koristiti i za veće elemente poput raznih odjela nekog proizvodnog pogona ili objekata u kojima se proizvodni proces odvija. Važno je za napomenuti kako će se upravo Modificirana metoda trokuta koristiti pri izradi varijanti rješenja prostornog rasporeda proizvodnog sustava

Računalno planiranje rasporeda na temelju odnosa (eng. *Computerized Relationship Layout Planning*, CORELAP) je heuristički konstrukcijski algoritam sa slobodnim izborom lokacija. Prema [6], cilj ovog algoritma je oformiti takav raspored proizvodnog pogona koji će rezultirati da promatrano radno mjesto ima oko sebe što veći broj susjednih radnih mjesta. Algoritam radi na način da se prvo se definira broj međusobnih odnosa (interakcija) pojedinog radnog mjesta s ostalima. Nakon toga odabire ono radno mjesto koje ima najviše međusobnih odnosa s drugim radnim mjestima i to se radno mjesto pozicionira u središnji dio promatrane proizvodne površine (središnji raster), a raspored ostalih radnih mjesta će se vršiti oko njega. Tako se u sljedećem koraku odabire ono neraspoređeno radno mjesto koje ima najveći broj interakcija s dodijeljenim radnim mjestom te se stavlja u susjedno mjesto radnom mjestu koje je prethodno dodijeljeno. Ovaj algoritam radi s pretpostavkom da je promatrana proizvodna površina po obliku slična pravokutnom. Međutim, ukoliko to nije slučaj, algoritam

prilagođava položaj pozicioniranja radnih mjesta zauzimajući pritom najbliža dostupna mjesta na proizvodnoj površini (slobodna rasterska polja).

Glavna prednost ovog algoritma je što uz tok materijala uzima u obzir i ostale faktore kojima se ostvaruje interakcija između pojedinih radnih mjesta poput toka informacija, energije i sl.

Tehnika analize i evaluacije rasporeda proizvodnog pogona (eng. *Plant Layout Analysis and Evaluation Technique*, PLANET) je heuristički konstrukcijski algoritam koji se temelji na podacima iz matrica toka materijala. Cilj ovog algoritma je minimizirati ukupne troškove rukovanja materijalom. Prema [6], postoje tri kriterija na temelju kojih se odabire sljedeće radno mjesto a to je ono radno mjesto s najviše međusobnih veza, par radnih mjesta koji imaju najveću sumu veza s prethodno odabranim radnim mjestima ili se radna mjesta silazno rangiraju po vrijednosti sume tokova koje međusobno ostvaruju s preostalim radnim mjestima. PLANET, kao i CORELAP, pozicionira prvo radno mjesto u središte promatrane površine proizvodnog sustava te preostale pozicionira oko njega i tako dokle nisu definirani položaji svih radnih mjesta.

Tehnika modularnog dodjeljivanja (eng. *Modular Allocation Technique*, MAT) je također heuristički konstrukcijski algoritam koji se temelji na rješavanju problema kvadratnog dodjeljivanja. Temelji se na funkciji cilja koja opisno govori kako suma produkata dva seta brojeva, od kojih je jedan poredan ulazno, drugi silazno, daje minimum [6]. Prema [6], vrijednosti transportnog intenziteta između parova radnih mjesta se poredaju silazno, dok se udaljenosti između tih radnih mjesta poredaju uzlazno. Svaki par iz prve skupine podataka se uspoređuje s parom iz druge skupine podataka te se na temelju toga radnim mjestima dodjeljuju lokacije. Međutim, treba biti na oprezu prilikom korištenja ovog algoritma jer može doći do problema ukoliko su vrijednosti transportnih intenziteta i udaljenosti između radnih mjesta jednake. Pritom može doći do situacije da je prilikom promatranja potencijalnog para za dodjeljivanje na radna mjesta, jedan od ta dva radna mjesta već dodijeljen. U tom slučaju neodijeljeno radno mjesto mora biti odgovarajuće ubačeno u postojeći raspored prethodno dodijeljenog člana para, ako je moguće ili na neko drugo mjesto. Niti jedna od te dvije lokacije potencijalno neće rezultirati zadovoljavajućem rješenju. Najbolji položaj promatranog radnog mjesta u odnosu na već dodane se određuje po kriteriju minimalnih ukupnih troškova (ili intenziteta) između promatranog radnog mjesta i već dodijeljenih. Postupak se ponavlja dokle se svim radnim mjestima ne dodijele lokacije na proizvodnoj površini.

3.9.1.2. Metode poboljšavanja

Metode poboljšavanja kreću od nekog početnog problema koji se može definirati na nekoliko načina: slučajno generirani raspored radnih mjesta proizvodnog sustava, korištenje trenutnog rasporeda kao početnog, ili inicijalno postavljanje rasporeda na temelju iskustva.

Osnovni princip tih metoda je istovremena zamjena lokacija (može i redoslijeda) minimalno dva radna mjesta u cilju poboljšanja početne vrijednosti funkcije cilja. Postupci se potom ponavljaju sve do trenutka kada se primjenom postupka poboljšavanja ne može ostvariti značajan doprinos poboljšavanju vrijednosti funkcije cilja.

Kao najstariji i najpoznatiji algoritam u [11] se navodi Računalna tehnika relativnog raspoređivanja elemenata (eng. *Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*, CRAFT). Na temelju nekog početnog (najčešće postojećeg) rješenja izračunavaju se udaljenosti između pojedinih centara (centroidi) svakog radnog mjesta te se određuje ukupni trošak prijevoza početnog rješenja. Nakon toga slijedi poboljšanje vrijednosti funkcije cilja na način da se odabiru ona radna mjesta koja su susjedna (leže jedno do drugog) ili koja imaju približno jednak iznos površine koju zauzimaju. Potom vrši izmjenu lokacija na način koji rezultira najvećom uštedom u troškovima prijevoza. Nakon toga se razmatraju sve moguće izmjene tih elemenata i na kraju odabire onaj koji donosi najmanji transportni učinak odnosno trošak. Algoritam se iterativno provodi sve dok niti jedna sljedeća izmjena elemenata ne bi dovela do smanjenja transportnog učina ili troška. U slučaju da podaci o jediničnim troškovima nisu poznati, uz uvjet korištenja istovrsnih sredstva rukovanja materijalom, svi se troškovi svode na jedinične. Ovakav pristup je česti kod projektiranja novih proizvodnih sustava s obzirom da uslijed nepoznate proizvodne strukture, nisu ni poznata sredstva rukovanja materijalom pa se trošak ne može točno odrediti. Pritom se zadatak optimizacije svodi na minimizaciju transportnog učinka.

Nedostatak CRAFT algoritma, kao i ostalih algoritma poboljšavanja (SPACECRAFT, PLOP, FRAT, DISCON) je u tome što u kreiranju konačnog rješenja ima vrlo važan utjecaj polazno stanje. Pritom, što je bolje polazno stanje, biti će i bolje dobiveno rješenje. Također CRAFT algoritam pretpostavlja kada se radnom mjestu i dodijeli novo radno mjesto j , da će isto sredstvo za rukovanje materijalom posluživati ta dva radna mjesta na njihovim novim lokacijama. Osim toga, dobiveno rješenje može u realnom sustavu rezultirati kolizijom pojedinih radnih mjesta što treba dodatno imati na umu.

3.9.1.3. Hibridne metode

Hibridne metode svojim karakteristikama predstavljaju presjek prethodno navedenih konstrukcijskih metoda i metoda poboljšavanja. Glavna prednost hibridnih metoda leži u činjenici kako one nastoje u što većoj mjeri iskoristiti prednosti prethodno navedenih metoda, a da pritom istovremeno savladaju

poteškoće koje se javljaju uslijed njihovih nedostataka. Kao primjeri hibridnih metoda u se navode [11] Tehnika relativne alokacije elemenata (eng. *Facilities Relative Allocation Technique*, FRAT) i Evaluacija prostornog rasporeda višekratnog proizvodnog sustava (eng. *Multi – floor Plant Layout Evaluation*, MULTIPLE).

FRAT metoda se temelji na prethodno spomenutom CRAFT algoritmu. Radi na način da određuje razlike između najvećih i najmanjih iznosa udaljenosti između dva radna mjesta. Algoritam izvodi dvije procedure od čega je jedna određivanje ukupnog troška transporta između dva radna mjesta i procedura razmjene lokacija elemenata u cilju minimizacije troškova. Ova metoda je primjenjiva samo u slučajevima u kojima su površine elemenata jednake i postoji konačan broj elemenata.

MULTIPLE predstavlja metodu koja se također temelji na CRAFT algoritmu i vrši diskretizaciju prostornog rasporeda elemenata i njihovih površina primjenom odgovarajućih krivulja. Uloga CRAFT algoritma je povećanje broja kombinacija razmještaja elemenata koje se razmatraju u svakoj iteraciji pri čemu je također moguće uzeti u obzir nepravilan oblik površine elemenata. Međutim, prema [11], zbog diskretizacije može se dogoditi kao izlazni rezultat nije pravokutnog oblika.

3.9.2. *Metaheurističke metode*

Za razliku od prethodno navedenih heurističkih algoritama koji rješavaju uzak skup problema, metaheurističke metode su u mogućnosti riješiti širi spektar problema njihovim jednostavnim prilagođavanjem i primjenom na odabrani problem. Time se nastoji smanjiti potrebno iskustvo, ali i trud za implementaciju i tumačenje heurističkih algoritama. Rad metaheurističkih algoritama se prema [12] može temeljiti na jednom ili oba sljedeća principa:

- Postupna izgradnja ukupnog rješenja uz pomoć pojedinačnih komponenti rješenja
- Modifikacija postojećeg potpunog rješenja

Prema [12], prilikom korištenja metaheuristike je važno imati na umu dvije značajke, a to su: istraživanje prostora pretraživanja (diversifikacija) i eksploatacija najboljeg pronađenog rješenja (pojačavanje). Diversifikacija predstavlja generiranje skupa različitih rješenja kako bi se istražio prostor pretraživanja na globalnoj razini.

S druge strane, pojačavanje predstavlja upotrebu i fokusiranje na pretraživanje lokalnog područja rješenja. Pritom diversifikacija osigurava da rješenja budu na razini globalnog optimuma povećanjem raznolikosti rješenja. Kod metaheurističkih metoda najčešće je „preživljavanje najpovoljnijih“ kriterij za odabir trenutnog najboljeg rješenja koji se temelji na ponavljajućem aktualiziranju trenutnog najboljeg rješenja iz prethodnog koraka.

U [11] se spominju sljedeći algoritmi: simulirano kaljenje, generički algoritam, tabu pretraživanje, optimizacija mravljom kolonijom i optimizacija rojem čestica. S obzirom kako se ovi algoritmi ne koriste u radu, oni se neće dalje razrađivati.

3.9.3. Računalne aplikacije

Iako se rad prethodno navedenim modelima i algoritmima može pojednostavniti upotrebom računala, oni su strogo orijentirani na optimizaciju prostornog rasporeda te imaju malo dodatnih mogućnosti. Potrebno je značajno iskustvo prilikom iščitavanja, analize i validacije dobivenih rješenja pošto su oni najčešće prikazani u nepreglednim numeričkim ili matričnim zapisima koji potencijalnim kupcima i investitorima kojima se rješenja prezentiraju ne govore mnogo.

Stoga se nakon dobivenih rješenja mora posvetiti posebna pažnja i uložiti značajna količina vremena za adekvatnu vizualizaciju dobivenih podataka.

Uz to, za korištenje podataka urazličitim aplikacijama potrebno ih je svaki puta iznova unijeti što može rezultirati kolanjem različitih neusklađenih varijanti rješenja modela istog proizvodnog sustava. Zbog toga su u nastavku ukratko navedene i opisane najčešće korištene složene računalne aplikacije za projektiranje proizvodnih, ali i ostalih industrijskih sustava. Takve aplikacije često imaju CAD bazu gotovih prilagodljivih modela gotovo svih elemenata proizvodnog sustava, ali i šire. Računalne aplikacije su vrlo složeni alati koji omogućuju znatno brže i olakšano projektiranje, optimizaciju proizvodnih sustava te omogućuju izvođenje simulacije, evaluaciju rješenja i njihov atraktivan prikaz. Dodatno usmjeruju fokus projektanta na ključne aktivnosti projektiranja i olakšanu izradu varijanti, nego na crtanje kontura objekata što u konačnici rezultira kvalitetnijim rješenjima, uz manji utrošak vremena.

Glavne prednosti računalnih aplikacija prema [6] su:

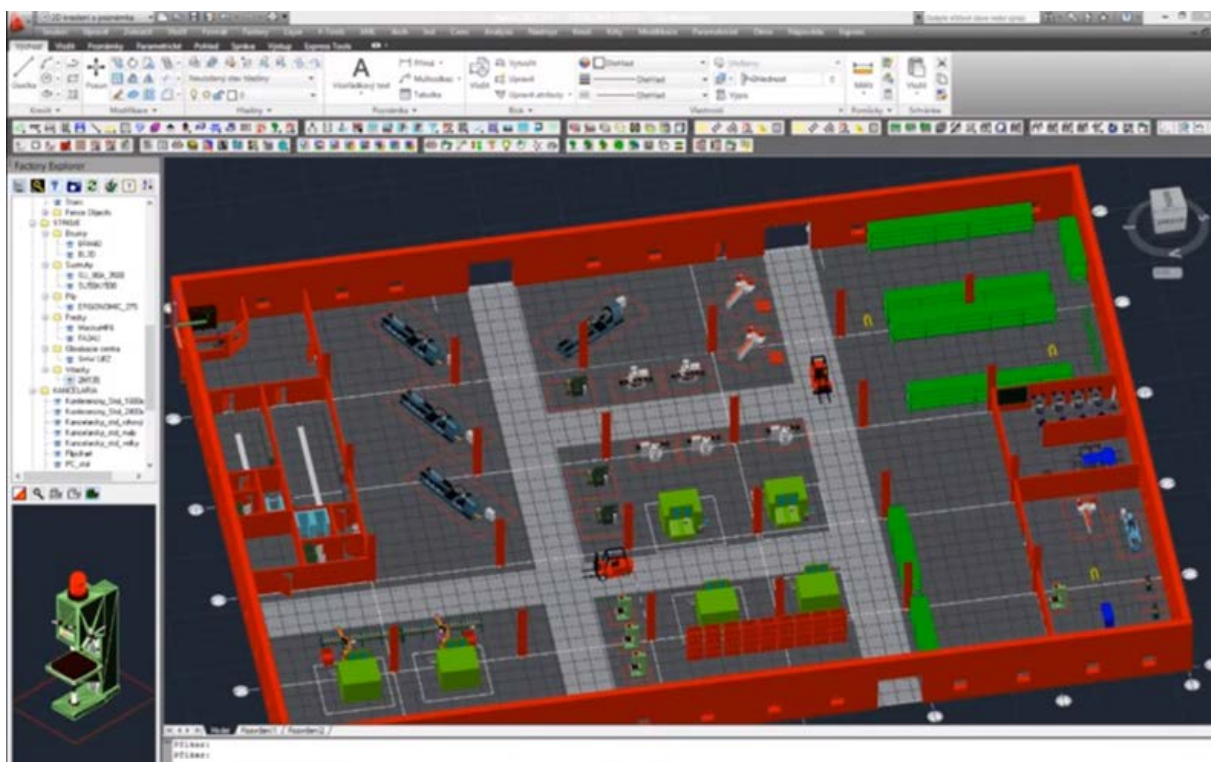
- Izrada detaljnih modela.
- Fleksibilnost i lako modificiranje postojećih rješenja modela.
- Upotreba grafičkih i interaktivnih sučelja.
- Olakšano i ubrzano izrade varijanti rješenja.
- Olakšani prikaz i interpretacija dobivenih podataka.
- Korištenje egzaktnih matematičkih modela.
- Mogućnost potpomognute izrade prostornog rasporeda proizvodnog pogona temeljenom na grupnoj tehnologiji analizom ulaznih podataka (tehnoloških procesa) dijelova i proizvoda.

- Mogućnost simulacije ponašanja proizvodnog sustava u različitim situacijama.
- Jednostavno izvršavanje promjena na modelu proizvodnog sustava bez njihovog izvršavanja na fizičkom sustavu što je znatno jeftinije, brže i ne remeti rad postojećeg proizvodnog sustava.

3.9.3.1. FactoryCAD

FactoryCAD (radno sučelje prikazano na slici 17) je računalna aplikacija koja je dio Siemensove platforme za upravljanje životnim ciklusom proizvoda (eng. *Product Lifecycle Management*, PLM), a služi prvenstveno za projektiranje, analizu i vizualizaciju modela proizvodnih, ali i ostalih industrijskih sustava. PLM platforma ima za cilj obuhvatiti skup aplikacija koje daju podršku kroz cijeli životni ciklus proizvoda od oblikovanja i razvoja proizvoda pomoću računala (CAD), izrada dijelova i proizvoda (CAM), planiranje i ergonomsko oblikovanje radnih mjesta, montažnih sustava i sustava komisioniranja, simulacija proizvodnje, projektiranje i upravljanje robotskim sustavima i sustavima automatizacije, projektiranje proizvodnih sustava, upravljanje kvalitetom, upravljanje proizvodnjom i sl.

FactoryCAD omogućuje izradu vrlo detaljnih i inteligentnih virtualnih modela proizvodnih sustava s relativno malim utroškom vremena. Za osnovu koristi podatke dobivene pomoću poznatog AutoCAD softvera što projektantu olakšava izradu novih, ali i prilagodbu postojećih modela proizvodnih sustava.



Slika 17. Radno sučelje računalne aplikacije FactoryCAD iz [24]

Kao što je vidljivo na slici 17, u sebi sadrži bogatu bazu detaljnih, inteligentnih i konfigurabilnih CAD modela svih elemenata koji čine neki proizvodni sustav (pod, strop, komunikacijsku i informacijsku infrastrukturu, strukturne elemente objekta, energetske sustave, alatne strojeve, konvejjere, robote i manipulatore, palete, viličare, operatere, regale i sl.) čime se značajno skraćuje vrijeme potrebno na izradu modela i rasporeda radnih mjesta. Detaljna vizualizacija dodatno olakšava detekciju nepravilnosti i predviđanje potencijalnih problema kako bi se oni već u najranijoj fazi projektiranja mogli ukloniti. Osim toga, podatke i modele izrađene u ovoj aplikaciji moguće je koristiti u bilo kojoj drugoj Siemensovoj PLM aplikaciji.

Ključni benefiti upotrebe FactoryCAD aplikacije prilikom projektiranja proizvodnih sustava [13] su:

- Olakšana interpretacija složene tehničke dokumentacije i modela.
- Omogućuje otkrivanje i rješavanje potencijalnih problema u ranim fazama projektiranja bez uzrokovanja visokih troškova.
- Izrađeni modeli i podaci su kompatibilni s ostalim računalnim aplikacijama.
- Osigurava do 90% brže projektiranje proizvodnih sustava u odnosu na tradicionalno 3D modeliranje.
- Osigurava stvaranje kompaktnih datoteka koje zauzimaju i za obradu traže računala umjerenih performansi.
- Jednostavna i brza izrada 2D/3D modela te izrada animacija.
- Višestruka iskoristivost podataka.

Uz navedene benefite, FactoryCAD nudi mogućnost okvirnog izračuna troškova te pruža olakšano oblikovanje CAD modela koji nisu obuhvaćeni postojećom bazom modela.

Glavne značajke FactoryCAD aplikacije su [13]:

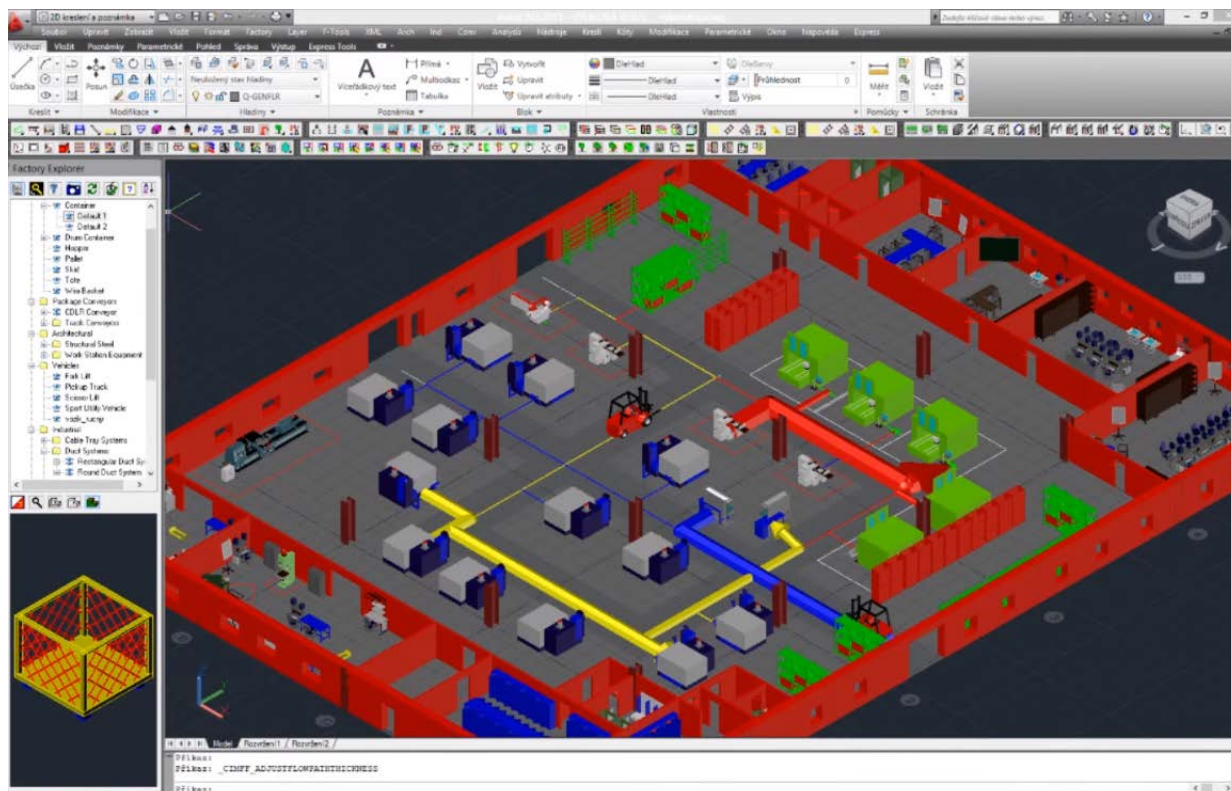
- Stvaranje 3D CAD datoteka koje se mogu pregledavati bez CAD aplikacija korištenjem pametnih objekata (modela).
- Modeli konvejjera – CAD baza detaljnih modela sadrži velik broj različitih konvejjera s ugrađenim svim karakterističnim značajkama.
- Modeli robota i manipulatora – CAD baza detaljnih modela robota i manipulatora svih poznatih proizvođača.
- Modeli razne pomoćne opreme rukovanja materijalom.
- Detekcija zračnosti – omogućava olakšano pozicioniranje elemenata proizvodnog sustava pri čemu se jednostavno mogu definirati udaljenosti između pojedinih elemenata kako ne bi došlo do kolizije ili nepotpune iskoristivosti dostupnog prostora.

- Jednostavno stvaranje popisa korištenih elemenata modela proizvodnog sustava s pratećim informacijama i specifikacijama.
- Uvoz CAD podataka – nudi mogućnost uvoza podataka iz raznih NX, Parasolid, VRML ili JT formata koji se mogu jednostavno integrirati u postojeće modele.
- Mogućnost mjerenja značajki modela poput udjela škarta i otpadnog materijala, vrijeme utovara i istovara, vrijeme potrebno za popravak stroja i sl.

3.9.3.2. *FactoryFLOW*

FactoryFLOW je također aplikacija koja je dio Siemensove PLM platforme kod koje se prvenstveno radi o grafičkom prikazivanju sustava rukovanja materijalom u svrhu planiranja i optimiziranja upotrebe površina proizvodnih i ostalih industrijskih sustava. Temelji se na podacima iz tokova materijala poput matrica udaljenosti, intenziteta i troška, a kao i FactoryCAD, integrirana je u AutoCAD.

Omogućuje određivanje, analizu i optimizaciju (npr. ugrađenom CRAFT metodom) transportnih puteva, potrebnu količinu sredstva za rukovanje materijalom, oblikovanje i dimenzioniranje skladišnih prostora i slično.



Slika 18. Radno sučelje računalne aplikacije FactoryFLOW iz [24]

Na slici 18 je prikazano radno sučelje kod kojeg se jasno vide Sankeyjevi dijagrami različitih boja za različite proizvode. Predstavljaju rezultat unosa dimenzija i osnovnih podataka o proizvodu, definiranju radnih mjesta i trajanja operacija te definiranje parametara vožnje i puta sredstva za rukovanje materijalom.

Općenito, aplikacija za rad zahtjeva sljedeće podatke [10]:

- Dimenzije proizvodnog ili industrijskog objekta izrađene u aplikaciji AutoCAD
- Sastavnicu proizvoda
- Podaci o radnim mjestima
- Korištena oprema za rukovanje materijalom

Podaci o proizvodima sadržani su u njegovoj sastavnici kao i potrebna količina u promatranom razdoblju. Podaci o radnim mjestima obuhvaćaju transportne količine (jedinčne terete), udaljenosti, potrebne dijelove za rad na određenom radnom mjestu. Što se tiče opreme rukovanja materijalom, aplikacija ima bazu od 10 grupa različitih sredstva za rukovanje materijalom poput raznih vrsta konvejera, robota, manipulatora, razne vrste viličara, automatski vođenih vozila (eng. *Automated Guided Vehlices*, AGV), granika i sl.

Ukoliko potrebno sredstvo za rukovanje materijalom nije obuhvaćeno bazom, isto se može jednostavno samostalno definirati. Nakon toga potrebno je točno definirati transportne putove između svih radnih mjesta modela. Pomoću svih unesenih podataka, aplikacija izračunava prijedene transportne udaljenosti i troškove. Također je moguće naprednim grafičkim opcijama vizualizirati cjelokupni proces kako bi se potencijalni problemi i mjesta koja je potrebno poboljšati mogla lakše identificirati.

Prema [10], glavni nedostatak ove aplikacije što nema mogućnost izrade prostornog rasporeda proizvodnog sustava već ih je potrebno izraditi drugom aplikacijom (npr. AutoCAD) i uvesti u FactoryFLOW.

Međutim, vrlo je koristan za analizu različitih varijanti te kako će promjene u proizvodnim asortimanima i količini utjecati na tokove materijala. Moguće je definirati kapacitivno zauzeće radnih mjesta i na proizvodni sustav u cijelosti.

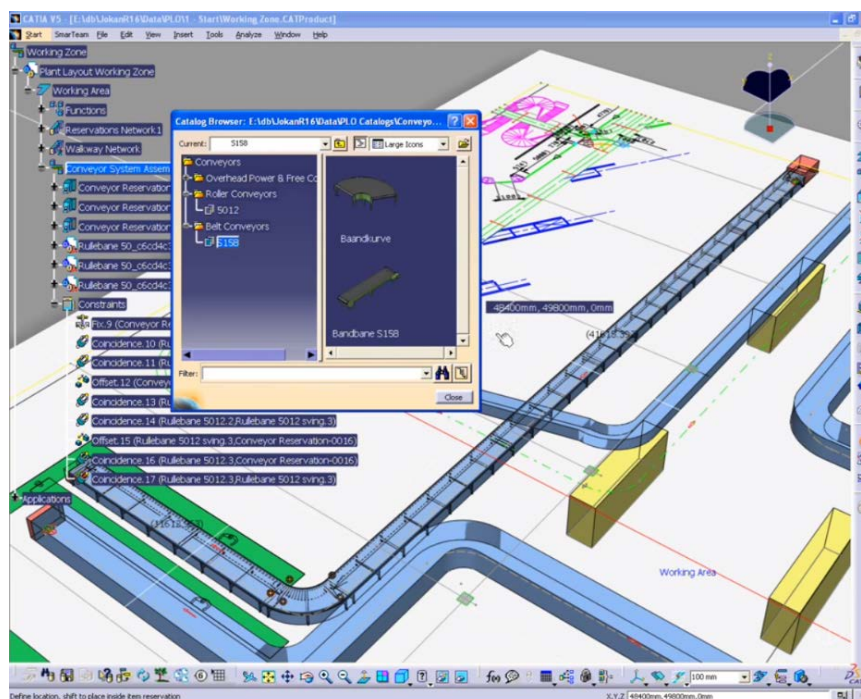
Osim toga, prema [10], moguće je dobiti informacije o iskoristivosti sredstva za rukovanje materijalom, vrijeme u radu, vrijeme utovara i istovara, vrijeme praznog hoda, potrošnju pogonskog goriva, troškove održavanja, izrada raznih dijagrama i izvješća. FactoryFLOW je koristan alat za analizu i optimizaciju tokova materijala, olakšava identifikaciju uskih grla čime se dobivaju ulazne informacije za poboljšanje postojećih tokova.

3.9.3.3. CATIA Plant Layout 1

CATIA Plant Layout 1 računalna je aplikacija poduzeća Dassault Systems koja omogućuje optimizaciju tokova materijala u cilju ostvarenja što bolje iskoristivosti dostupnog prostora te optimiranje sustava rukovanje materijalom. Ključne značajke ove aplikacije prema [6] su:

- Olakšava analizu i optimizaciju tokova materijala.
- Omogućuje prilagođavanje korisničkog sučelja vlastitim potrebama.
- Ugrađenim se alatima olakšava izrada prostornog rasporeda i definiranje tokova materijala.
- Omogućava jednostavnu modifikaciju postojećih modela.
- Analizira prostorne i energetske potrebe proizvodnog sustava na temelju dobivenog modela.
- Generiranje detaljnih popisa potrebnih elemenata proizvodnog sustava.
- Omogućuje 2D/3D vizualizaciju modela proizvodnog sustava.

Aplikacija također ima bogati CAD katalog modela koji se može prilagoditi vlastitim potrebama te iz kojeg se pojedini elementi mogu upotrijebiti, a parametri prilagoditi. Parametri pritom mogu biti uvezeni u aplikaciju ili izvezeni u formatu poput .xlsx MS Excel tablica za daljnju upotrebu dobivenih parametara.



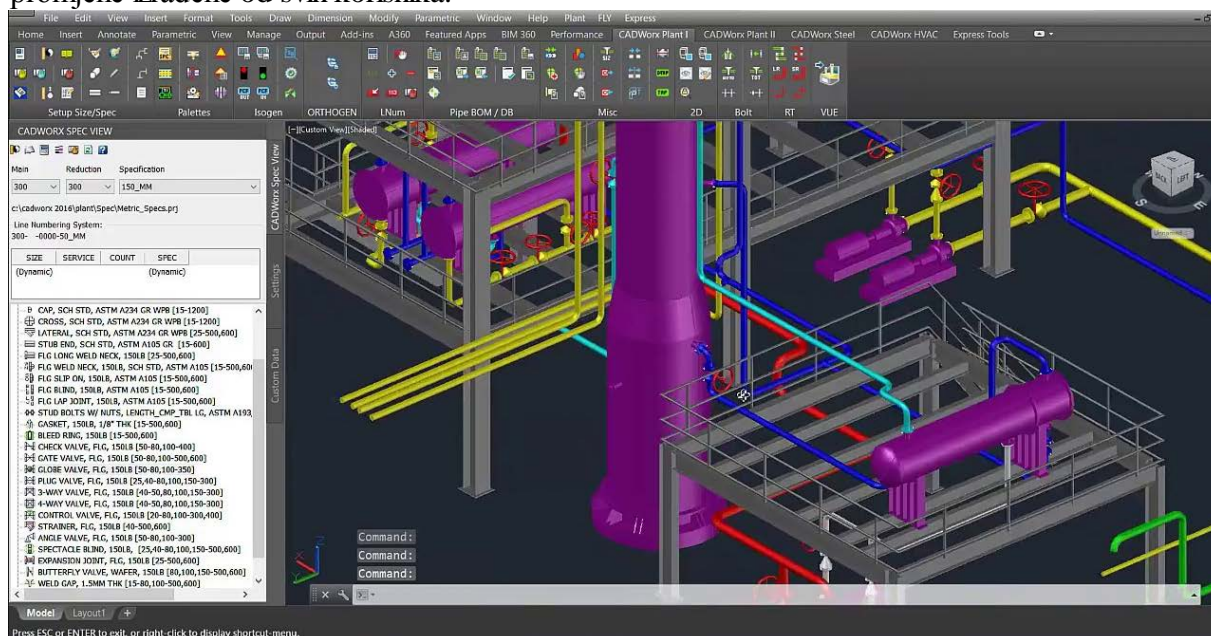
Slika 19. Radno sučelje aplikacije Catia Plant Layout 1 iz [25]

Na slici 19 je prikazano sučelje aplikacije gdje se vidi kako je na dnu iscrtan prostorni raspored u točrtu i na njega se jednostavno iz kataloga modela ubacuju i konfiguriraju potrebni modeli za modeliranje proizvodnog sustava.

3.9.3.4. CADWorx Plant Professional

CADWorks Plant Professional (radno sučelje prikazano na slici 20) je računalna aplikacija poduzeća COADE koja također koristi podatke dobivene aplikacijom AutoCAD za olakšanu izradu 3D modela proizvodnog sustava. Prema [6], ima bogatu bazu koja se sastoji od preko 60000 CAD modela. Tako omogućuje jednostavno definiranje cjevovodnog sustava, ožičenja, čeličnih konstrukcija, opreme poput pumpi, spremnika, generatora ili izmjenjivača topline, definiranje i dimenzioniranje sustava klimatizacije i grijanja.

Ova aplikacija ima napredne funkcije izrade modela u kojoj ona sama ima mogućnost predlaganja prikladne lokacije i tokova ožičenja i cjevovoda u kontekstu promatranog proizvodnog sustava. U bilo kojem trenutku izrade modela je moguće izvući njegovu sastavnicu sa željenim podacima svih ugrađenih elemenata modela koji se mogu prikladnim formatom koristiti u daljnjim aplikacijama. Dodatno omogućuje pojednostavljene hidrauličke proračune cjevovoda kao i proračun čvrstoće konstrukcija. Također omogućuje da više korisnika radi na jednom složenom modelu istovremeno pri čemu se kontinuirano prati rad pojedinih korisnika kako bi se u realnom vremenu mogle uskladiti promjene izrađene od svih korisnika.



Slika 20. Radno sučelje aplikacije prema [26]

Alati za prezentaciju dobivenih rješenja omogućuju stvaranje videozapisa sa simulacijama kretanja po virtualnom proizvodnom sustavu što značajno olakšava prezentaciju i analizu rješenja kupcu koji nije upoznat s tehničkim nacrtima.

U nastavku rada slijedi primjena prethodno iznesenog teorijskog dijela vezanog uz problematiku projektiranja novih, ali i postojećih proizvodnih sustava s konkretnom primjenom na problemu preoblikovanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o.

Kao što je u uvodnom dijelu spomenuto, teorijski pregled znanja iznesen je s ciljem formiranja polazne osnove i lakšeg razumijevanja i praćenja koraka prilikom analize trenutnog stanja, izrade varijanti te njihovog odabira. Stoga će prvo u nastavku biti uvedeno prikazano poduzeće (lokacije, djelatnost, proizvodni program i asortiman, organizacijska struktura i sl.). Nakon toga slijedi detaljna analiza toka materijala poduzeća (promatrana treća razina prema VDI 3300) temeljena na reprezentantnom proizvodu, opisni prikaz tehnološkog procesa, definiranje prostornog rasporeda i definiranje matrice udaljenosti, transportnog intenziteta i ukupnog transportnog učina.

Potom se pristupa izradi varijanti rješenja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava počevši od teorijske varijante temeljene na načelu idealnog projektiranja nakon čega slijedi još četiri varijanti. Konačno slijedi primjena odabrane metode višekriterijalnog odlučivanja koja služi kao podrška prethodno odabranoj varijanti s ciljem odabira upravo one koja je najpovoljnija za promatrano poduzeće.

4. PODUZEĆE TMT d.o.o.

TMT društvo s ograničenom odgovornošću za proizvodnju industrijske opreme i preradu metala (logo poduzeća je prikazan na slici 21) proizvodno je poduzeće osnovano 1989. godine u okviru metalne industrije Sjeverne Hrvatske. Trenutno ima oko 230 zaposlenika (poduzeće srednje veličine), a proizvodni se program temelji na širokom spektru većinom specijalnih metalnih konstrukcija, zavarenih sklopova te ostalih metalnih dijelova i proizvoda.

Tržišna orijentacija poduzeća je s udjelom od preko 90 % usmjerena prema Zapadnoj Europi te je u potpunosti usmjereno na ispunjenje i zadovoljenje individualnih potreba svakog kupca, nudeći im pritom dugoročnu sigurnost, podršku i zahtijevanu razinu kvalitete proizvoda uz garantiranu isporuku u željenom roku.



Slika 21. logo poduzeća TMT d.o.o. [14]

Karakteristično za poduzeće je kako se poslovni prostori i proizvodni pogoni nalaze na dvije različite mikrolokacije međusobno udaljene oko 46 km. Prva mikrolokacija je u Međimurskoj županiji u Gradu Čakovcu na adresi Kalnička b.b (slika 22 lijevo). Površina prve mikrolokacije je 16000 m² [14] pri čemu je 5000 m² [14] proizvodnog prostora. Druga mikrolokacija je u Varaždinskoj županiji u Gradu Lepoglavi na adresi Varaždinska 11 (slika 22 desno). Površina druge mikrolokacije je 44000 m² [14] s ukupnom površinom proizvodnog prostora od 8500 m²



Slika 22. Prikaz mikrolokacije u Čakovcu (lijevo) i u Lepoglavi (desno) [14]

Poduzeće, sukladno promjeni potreba i zahtjeva kupaca na tržištu, vrlo uspješno neprestano ulaže u kontinuirano poboljšanje postojećih tehnoloških i proizvodnih procesa i opreme, te implementira nove tehnologije poput automatiziranog robotskog zavarivanja, naprednih trokoordinatnih mjernih uređaja i ostale mjerne opreme, korištenje visokosofisticiranih obradnih centara, implementacija naprednih informacijskih sustava i pratećih tehnologija kojima se nadzire i upravlja operacijama u proizvodnji, optimizira se utrošak potrošnog materijala i sirovina te se omogućuje planiranje i upravljanje zalihama.

Tome u prilog također govori vlastito razvijeni poslovni informacijski sustav (eng. *Enterprise Resource Planning*, ERP) poduzeća koji svojim mogućnostima pokriva sve procese unutar poduzeća bilo da su oni vezani uz financijsko poslovanje, upravljanje ljudskim potencijalima, robno i materijalno poslovanje ili uz proizvodnju i proizvodne procese. Omogućuje brzi pristup svim potrebnim relevantnim informacijama koje se mogu strukturirati i prezentirati u željenom obliku. Tako dobivene informacije pružaju uvid u prethodno i trenutno stanje spomenutih elemenata poduzeća, ali omogućuju i predviđanje budućih aktivnosti s visokim stupnjem pouzdanosti.

Poduzeće također posjeduje sljedeće certifikate [14]:

- EN ISO 9001:2008
- DIN EN ISO 3834 – 2.2006
- DIN 18800 – 7 Klasa E
- DIN 15018
- DIN 22261

Valja posebno naglasiti kako poduzeće posjeduje mjerni laboratorij (slika 23) koji je opremljen najmodernijim mjernim instrumentima (poput naprednih trokoordinatnih mjernih uređaja, fleksibilnih uređaja za napredno 3D mjerenje s pripadajućim softverima, digitalnim visinomjerima i ostalih uređaja) koji se nalaze u adekvatno klimatiziranoj prostoriji koji uspješno ostvaruju svoj primarni cilj, a to je stalno smanjivanje rasipanja kao najznačajnije mjere kvalitete (proces) proizvoda u užem smislu. Time se osigurava najviša razina kvalitete proizvoda i ujedno se osigurava dugoročno zadovoljstva kupaca.



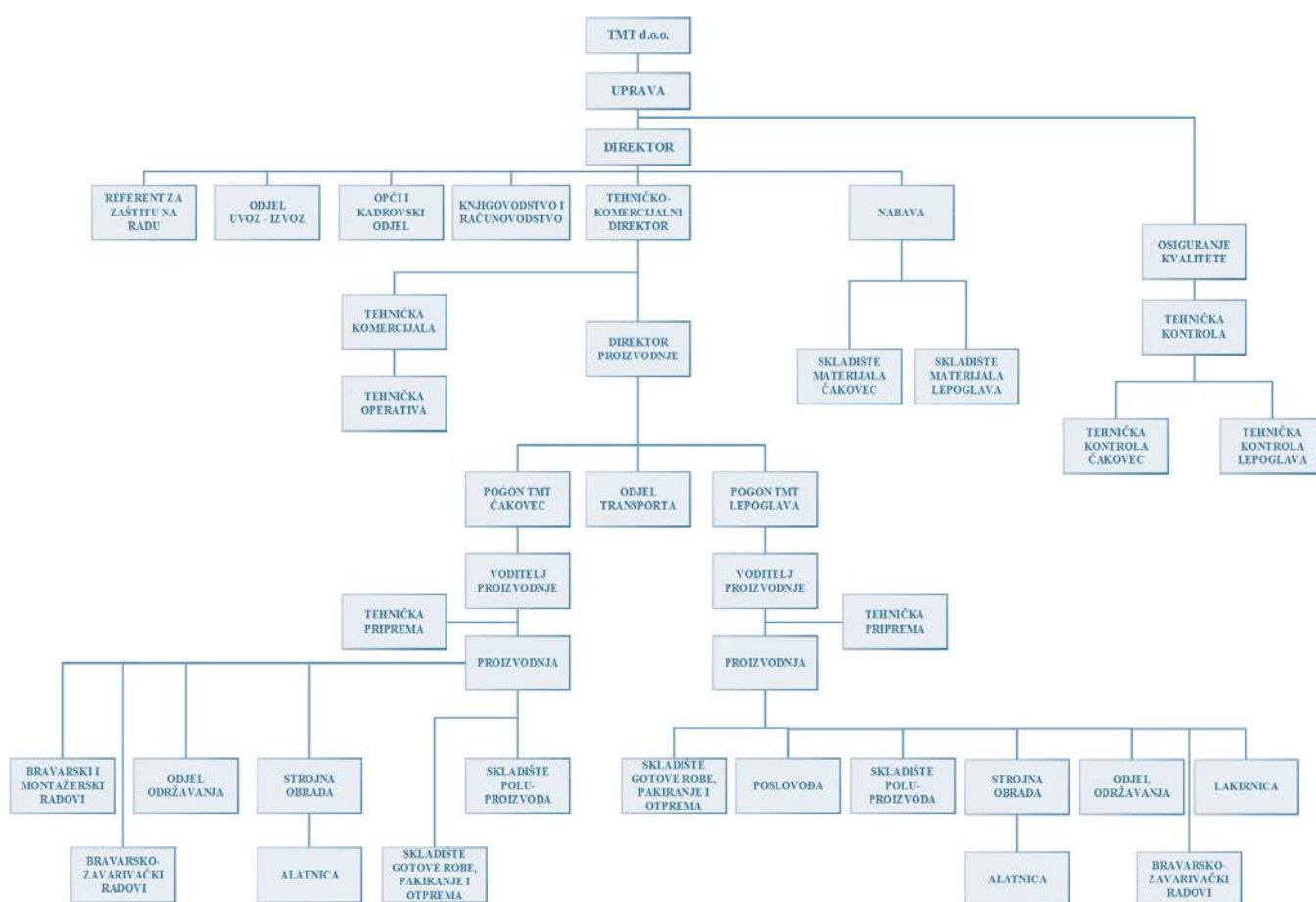
Slika 23. Mjerni laboratorij poduzeća TMT d.o.o. [14]

U nastavku će biti prikazana i opisana organizacijska struktura poduzeća, te proizvodni program i tehnološki kapaciteti poduzeća.

4.1. Organizacijska struktura

TMT d.o.o. je društvo s ograničenom odgovornošću koje predstavlja oblik društva u kojem jedna ili više pravnih ili fizičkih osoba, ulaganjem temeljnih uloga, sudjeluje u formiranju unaprijed dogovorenog temeljnog kapitala.

Pritom temeljni ulozi ne moraju biti jednaki, a članovi društva ne odgovaraju za obveze društva (osim iznimno, u slučajevima u kojima dolazi do pobijanja pravne osobnosti). Organizacijska struktura poduzeća prikazana je u nastavku na slici 24.



Slika 24. Organizacijska struktura poduzeća TMT d.o.o.

Kao što je prema slici 24 vidljivo, poduzeće TMT d.o.o. ima hibridnu organizacijsku strukturu s funkcijskim i geografskim organizacijskim jedinicama. Ured uprave predstavlja najvažniji organ kojeg podupire služba kontrole kvalitete. Ovlast u poduzeću se prenosi s nadređenog na podređenog od najviših do najnižih razina organizacijske strukture. Glavno mjesto ove organizacijske strukture zauzimaju funkcijske organizacijske jedinice na koje se nadovezuju teritorijalne (geografske) organizacijske jedinice

s obzirom da poduzeće, kako je već spomenuto, sadrži dva proizvodna pogona (u gradovima Čakovec i Lepoglava). Svi poslovi vezani za proizvodni proces i kupce se odnose na funkcijske organizacijske jedinice. Ovaj oblik organizacijske strukture omogućuje razvitak onih poslovnih funkcija koje su bitne za daljnji rast i širenje poduzeća, omogućuje stručno vođenje, visok stupanj specijalizacije i podjelu rada, racionalnost pri upotrebi resursa, niže režijske troškove te lagano i brzo prilagođavanje promjenama u okolini.

4.2. Proizvodni program

Kao što je prethodno spomenuto, glavnina proizvodnog programa (slika 25) čine specijalne metalne zavarene konstrukcije manjih i većih dimenzija te razni sklopovi koji pokrivaju široke potrebe prvenstveno teške industrije. To su dijelovi nosača i radnih uređaja građevinskih strojeva (utovarivača i grejdera), dijelovi pokretnih stepenica i staza, dijelovi dieselskih motora i generatora, dijelovi strojeva za preradu polimera kao i dijelovi opreme za obnovljive izvore energije.



Slika 25. Prikaz dijela proizvodnog programa [14]

4.3. Tehnološki kapaciteti

Kod tehnoloških kapaciteta poduzeća, sukladno proizvodnom asortimanu, prevladavaju teški strojevi većih dimenzija i masa. Kapaciteti su univerzalno koncipirani i pokrivaju sve vrste strojne obrade metala, izrade i montaže konstrukcija kao i površinske zaštite. Strojevi kojima raspolaže poduzeće su horizontalne bušilice – glodalice, vertikalne tokarilice (karuseli), CNC strojevi i obradnici (tokarski i glodači), robotski sustavi za automatizirano zavarivanje, lasersko, plazma i plinsko rezanje limova, oprema za precizno balansiranje, savijanje te termolakirnice. U nastavku su u tablici 3 prikazani tehnološki kapaciteti poduzeća prema [14]. Kapaciteti koji su prikazani u toj tablici odnose se prvenstveno na reprezentativni proizvod prikazan na slici 27.

Tablica 3. Reprezentativni tehnološki kapacitete a poduzeća prema [14]

BOHRWERK TOS WHN 13 CNC TOS 2611-I		ROBOTSKI MANIPULATOR		
HORIZONTALNE CNC GLODALICE - BUŠILICE	Upravljački sustav:	Heidenhain TNC 426 M	Oznaka:	OTC AII-4BL
	Pomak u osi X:	5000 mm	Broj osi:	6
	Pomak u osi Y:	2500 mm	Točnost pozicioniranja:	+/- 0,08 mm
	Pomak u osi Z:	2000 mm	Maks. radni prostor:	6,37 m ²
	Maksimalni broj okretaja vretena:	3000 o/min	Maks. nosivost ruke:	4 kg
	Maksimalna snaga glavnog vretena:	37 kW	Masa:	280 kg
	Dimenzije radnog stola:	2500 mm x 1800 mm	ROBOTSKE TRACNICE	
	Maksimalna masa obratka:	12000 kg	Oznaka:	R7500
	BOHRWERK TOS WHN 13 CNC 2840-II		Broj osi:	3
	Upravljački sustav:	Heidenhain iTNC 530	Pomak po X osi:	6000 mm
	Pomak u osi X:	5000 mm	Pomak po Y osi:	750 mm
	Pomak u osi Y:	3000 mm	Pomak po Z osi:	1200 mm
Pomak u osi Z:	2000 mm	Brzina gibanja:	15 m/min	
Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	3000 o/min	Broj radnih mjesta:	2	
Maksimalna snaga glavnog vretena:	37 kW	IZVOR		
Dimenzije radnog stola:	2500 mm x 1800 mm	Oznaka:	VPS 5000 digit	
Maksimalna masa obratka:	20000 kg	Prik. Snaga:	24,3 kW	
BOHRWERK TOS WHN 13 CNC 2931-III		Intermitencija:	350A - 100%	
Upravljački sustav:	Heidenhain iTNC 530	Struja zavarivanja:	30 - 500A	
Pomak u osi X:	5000 mm	Postupak zavarivanja:	MIG/MAG	
Pomak u osi Y:	3000 mm	Promjeri žice:	1 mm/1,2 mm/1,6 mm	
Pomak u osi Z:	2000 mm	Hlađenje gorionika:	vodeno	
Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	3000 o/min	MICROSTEP HYPER THERM HPR 260 XD		
Maksimalna snaga glavnog vretena:	37 kW	Broj plamenika:	1	
Dimenzije radnog stola:	2500 mm x 1800 mm	Širina stola:	2500 mm	
Maksimalna masa obratka:	20000 kg	Dužina stola:	13000 mm	
BOHRWERK TOS WHN 130 Q-IV		Maks. debljuna lima za rezanje:	30 mm	
Upravljački sustav:	Heidenhain iTNC 530	NUMOTAJ 50		
Pomak u osi X:	3000 mm	Broj plamenika:	4	
Pomak u osi Y:	2500 mm	Širina stola:	4000 mm	
Pomak u osi Z:	1250 mm	Dužina stola:	13000 mm	
Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	2800 o/min	Maks. debljuna lima za rezanje:	180 mm	
Maksimalna snaga glavnog vretena:	37 kW	NUKON NFPRO-620		
Dimenzije radnog stola:	1800 mm x 1600 mm	Broj plamenika:	1	
Maksimalna masa obratka:	12000 kg	Širina stola:	3424 mm	
Broj mjesta u magazinu alata:	60	Dužina stola:	10638 mm	
		Maks. debljuna lima za rezanje:	6 mm	
CNC GLODALICE I GLODAČI OBRADNI CENTRI				
DECKEL MAHO DMU 200P		HURCO VMX 42T		
Pomak u osi X:	1800 mm	Pomak u osi X:	1060	
Pomak u osi Y:	2000 mm	Pomak u osi Y:	610	
Pomak u osi Z:	1100 mm	Pomak u osi Z:	610	
Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	8000 o/min	Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	12000 o/min	
Maksimalna snaga glavnog vretena:	30 kW	Maksimalna snaga glavnog vretena:	18 kW	
Dimenzije radnog stola:	1700 mm x 1400 mm	Dimenzije radnog stola:	1200 mm x 610 mm	
Broj mjesta u magazinu alata:	60	Broj mjesta u magazinu alata:	24	
HELLER MCH 350		HURCO VMX 42		
Pomak u osi X:	1250 mm	Pomak u osi X:	1060	
Pomak u osi Y:	1000 mm	Pomak u osi Y:	610	
Pomak u osi Z:	1000 mm	Pomak u osi Z:	610	
Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	125000 o/min	Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	10000 o/min	
Maksimalna snaga glavnog vretena:	60 kW	Maksimalna snaga glavnog vretena:	18 kW	
Dimenzije radnog stola:	800 mm x 800 mm	Dimenzije radnog stola:	1200 mm x 610 mm	
Broj mjesta u magazinu alata:	100	Broj mjesta u magazinu alata:	24	
HURCO VMX 50		HURCO VMX 24		
Pomak u osi X:	1270 mm	Pomak u osi X:	610 mm	
Pomak u osi Y:	660 mm	Pomak u osi Y:	610 mm	
Pomak u osi Z:	610 mm	Pomak u osi Z:	510 mm	
Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	8000 o/min	Maksimalni broj okretaja gl. vretena:	10000 o/min	
Maksimalna snaga glavnog vretena:	23 kW	Maksimalna snaga glavnog vretena:	11 kW	
Dimenzije radnog stola:	1450 mm x 610 mm	Dimenzije radnog stola:	810 mm x 610 mm	
Broj mjesta u magazinu alata:	30	Broj mjesta u magazinu alata:	24	

5. ANALIZA TOKA MATERIJALA PODUZEĆA TMT d.o.o.

Kao što je u poglavlju 3.6 navedeno, tok materijala predstavlja organizacijsko, vremensko i prostorno povezivanje tehnoloških, kontrolnih, skladišnih, transportnih i ostalih pomoćnih procesa koji su vezani uz materijal se kreće proizvodnim sustavom u svom proizvodnom ciklusu. Postupak analize toka materijala temeljit će se na trećoj razini (prema VDI 3300) pri čemu su obuhvaćena kretanja materijala između, ali i unutar pojedinih odjela (objekata). Kako bi se dobila informacija o tokovima materijala unutar postojećeg proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o., za odabranu skupinu proizvoda, potrebno je prikupiti relevantne i reprezentativne podatke kako bi se osigurala ispravnost analize. Temeljni izvor tih podataka su planovi izrade i montaže te sastavnice materijala dobivene od strane poduzeća TMT d.o.o.

Prema [1], prikupljanje i obrada podataka slijedi u nekoliko koraka:

1. Snimanje postojećeg stanja.
2. Izbor reprezentativnih proizvoda i dijelova.
3. Opis proizvodnog procesa (analiza tehnološkog procesa izrade).
4. Definiranje tokova materijala.
5. Izračun ukupnog transportnog učina.

5.1. Snimanje postojećeg stanja

Snimanje postojećeg stanja prvi je korak pri analizi toka materijala. Time se stvara uvid u stvarno stanje i u procese koji karakteriziraju promatrani proizvodni sustav. Pritom treba imati na umu da dobivanje uvida u postojeće stanje nije moguće s manjkavim niti netočnim podacima. S druge strane, preveliki obujam prikupljenih podataka nije povoljan jer veća količina podataka zahtjeva više vremena i napora za razradu pri čemu je njihova relevantnost velikim dijelom upitna. Dodatno, velika količina podataka i njihova razrada mogu odvući analizu u neželjeni smjer koji u konačnici ne rezultira upotrebljivim rješenjima. No treba imati na umu da je u slučaju većeg obujma podataka moguće njihovo sažimanje i redukcija što u slučaju manjeg obujma podataka nije moguće.

Cilj snimanja i analize postojećeg stanja je utvrđivanje dobrih, ali i slabijih mjesta proizvodnog sustava kako bi se stekao uvid u sustav i definirali potrebni podaci za projektiranje. Snimanje se može provesti na nekoliko načina a to su: vizualno praćenje procesa, proučavanjem tehničke dokumentacije ili razgovorom sa zaposlenicima. U ovom je koraku u razgovoru sa zaposlenicima poduzeća utvrđeno kako će se promatrati proizvodni sustav u Lepoglavi pri čemu je izrađeni plan mikrolokacije (slika 26) koji prikazuje položaj svih objekata koji se na njoj nalaze.

Razlog odabira upravo ove mikrolokacije leži u kombiniranom načinu izgradnje ovog proizvodnog sustava koji je interesantan jer se tok materijala odvija unutar, ali i između pojedinih objekata koji su međusobno različito udaljeni. Općenito, postoje tri načina gradnje proizvodnih sustava, a to su: kompaktni, nekompaktni i kombinirani način gradnje.

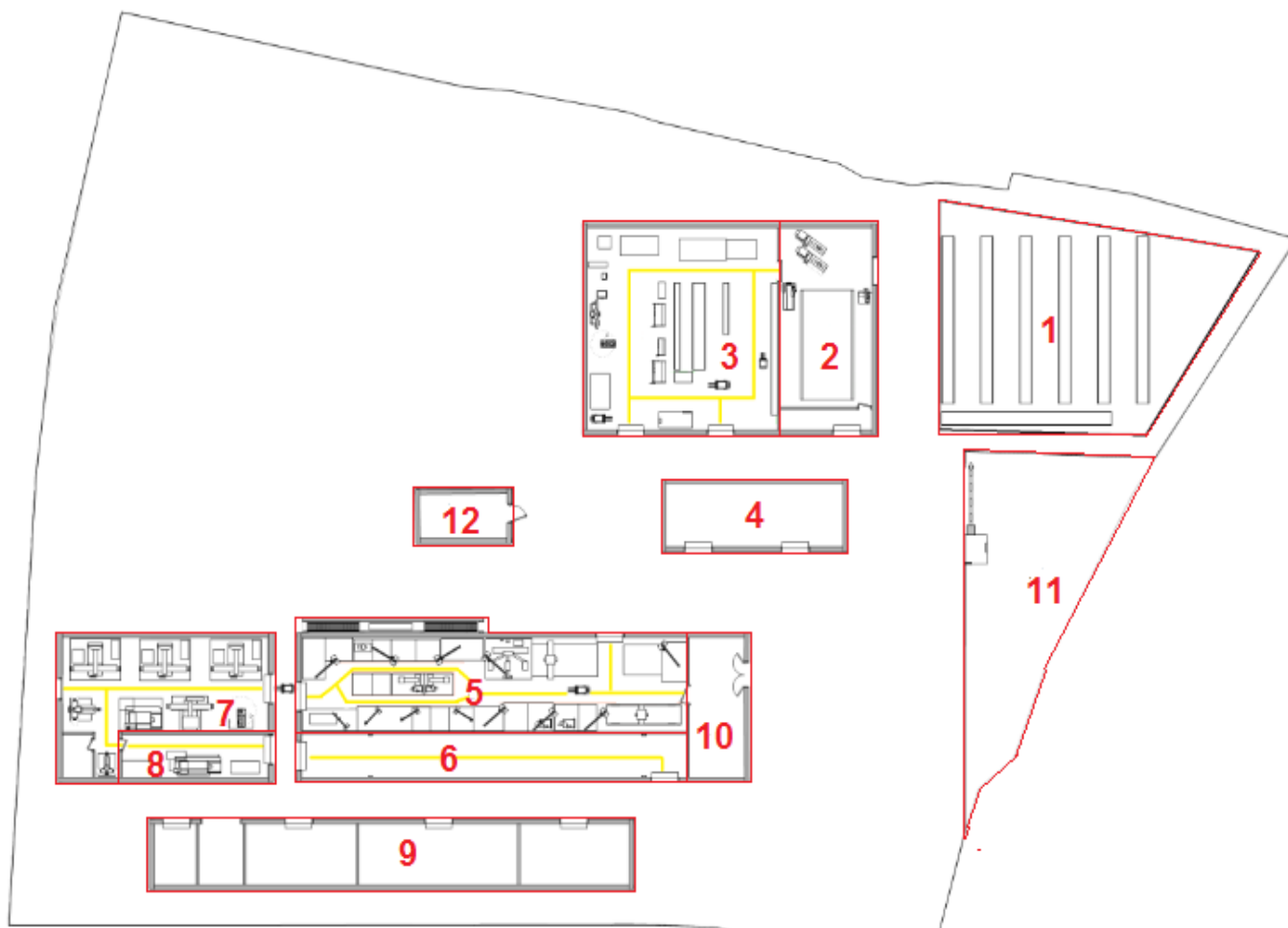
Kompaktan način gradnje ujedinjuje sve zone (proizvodna, skladišna, energetska, prometna i sl.) u jednu cjelinu, tj. u jedan objekt (može se reći pod jednim krovom). Pod pojmom zona smatra se svaka površina koja se svojim karakteristikama razlikuje od ostalih susjednih površina. Time se ostvaruju kraći transportni putovi, kraće su energetske instalacije te su manji gubici energije, bolje je upravljanje i preglednost proizvodnih procesa, manja izgrađena površina i manja je potrebna površina zemljišta što rezultira nižim investicijskim i režijskim troškovima. Ovakav način gradnje je karakterističan za tekstilnu i farmaceutsku industriju. Nedostatak ovakvog načina gradnje je otežano širenje i ograničena fleksibilnost proizvodnog sustava.

Nekompaktan način gradnje izdvaja sve zone u zasebne objekte s primarnim ciljem sprečavanja nepoželjnih međusobnih utjecaja. Ovakav način gradnje je karakterističan za tešku strojogradnju, metalurgiju i kemijsku industriju. Važna prednost ovakvog načina gradnje je lako izvođenje proširenja bez značajnog ometanja postojeće proizvodnje. Međutim, nedostaci su potrebe za većom mikrolokacijom, dulji transportni putovi, viši investicijski troškovi i dr.

Kombinirani način gradnje nastoji iskoristiti prednosti oba prethodna dva načina gradnje te minimizirati njihove nedostatke. Upravo ovakav način gradnje je prikazan na slici 26. Iz navedenog se može pretpostaviti kako su dominantni transportni učini (s obzirom na značajnu udaljenost između odjela) između objekata što rezultira značajnim iznosom ukupnog transportnog učina proizvodnog sustava. Razmještajem pojedinih radnih mjesta unutar i između objekata nastojat će se minimizirati vrijednost ukupnog transportnog učina proizvodnog sustava uz zadovoljenje postojećih ograničenja. Na slici 26 je prikazani plan mikrolokacije odabranog proizvodnog sustava sa sljedećim pripadajućim zonama:

1. Vanjsko ulazno skladište (USV)
2. Unutarnje skladište 1
3. Operativna priprema i međuskladište (PO)
4. Prazni objekt
5. Glavni objekt za zavarivanje
6. Lakirnica
7. Strojna obrada

8. Strojna obrada i završna kontrola
9. Odmašćivanje, skladište naprava i gotovih proizvoda
10. Upravna zgrada
11. Parking
12. Trafostanica



Slika 26. Skica mikrolokacije poduzeća TMT d.o.o. u Lepoglavi

Kompaktno su izgrađeno objekti 2 i 3, potom 5, 6 i 10, te 7 i 8. Ostali objekti su nekompaktno izvedeni kao i prethodno navedeni objekti međusobno. Važno je napomenuti kako je mikrolokacija vrlo dobro prometno povezana pri čemu ima direktan pristup na dva transportna moda. To su željeznički prijevoz (posjeduje vlastiti kolosijek) te cestovni prijevoz. Kombinacijom ta dva transportna moda se mogu značajno smanjiti transportni troškovi uz istovremenu mogućnost ostvarenja velikog protoka ulaznih sirovina i gotovih proizvoda različitih dimenzija i masa.

Nakon snimanja i analize postojećeg stanja slijedi odabir reprezentantnog proizvoda prikazan u nastavku.

5.2. Izbor reprezentantnog proizvoda

S obzirom kako je prikupljanje, ali i analiza podataka obično vrlo iscrpan i opsežan posao, pravilnim se izborom reprezentantnih proizvoda i dijelova značajno smanjuje obujam ulaznih podataka i vrijeme potrebno za projektiranje dok se neznatno utječe na smanjenje točnosti projektiranja i analize.

Reprezentantni proizvod se može uzeti na temelju kriterija poput procijenjene dobiti, proizvodne količine, tehnološkoj složenosti, količine rada i sl. U dogovoru s poduzećem odabrani je reprezentantni proizvod koji predstavlja prednji dio okvira utovarivača s kotačima.



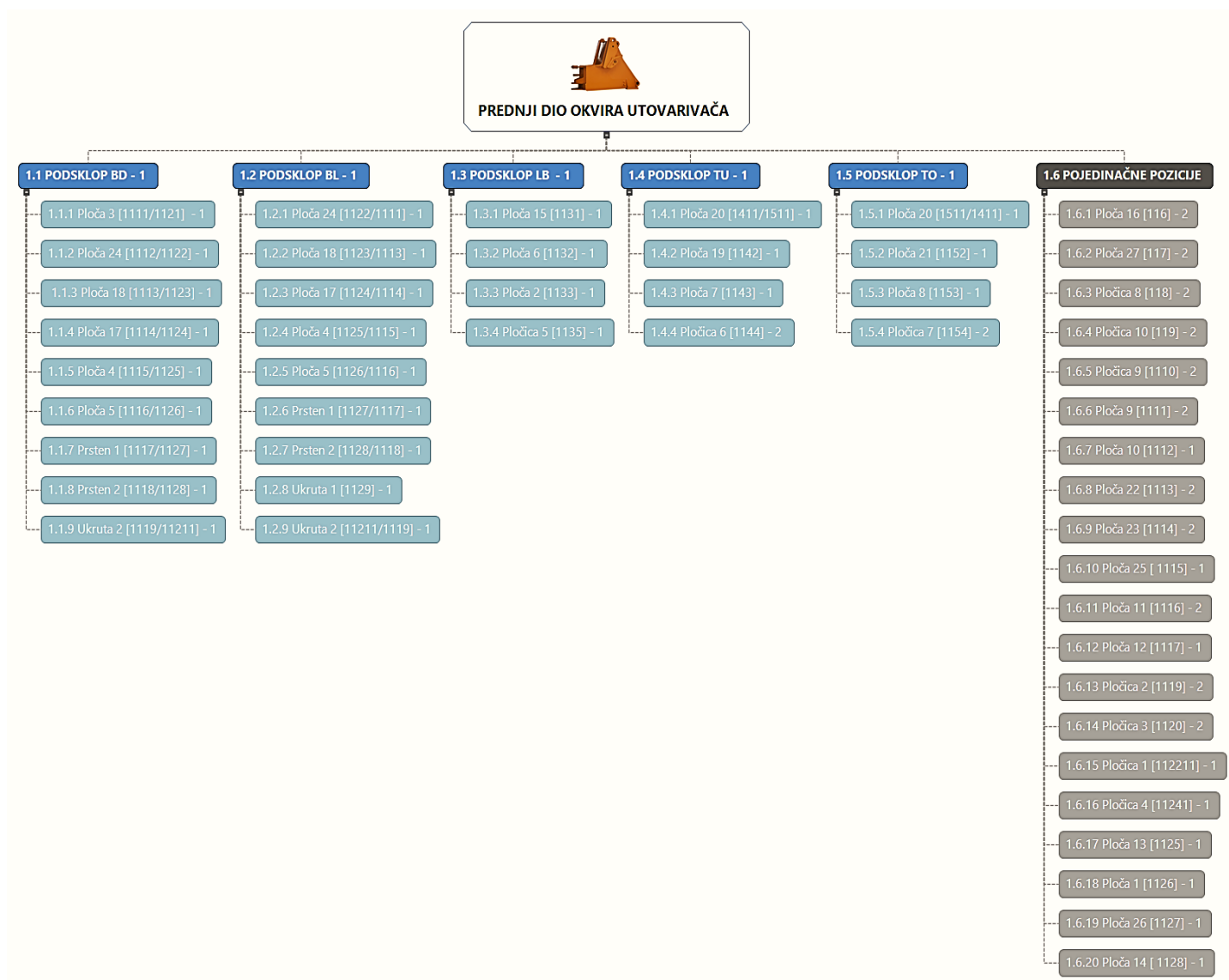
Slika 27. Reprezentantni proizvod: prednji dio okvira utovarivača [14]

Na slici 27 je prikazani reprezentantni proizvod koji predstavlja prednji dio okvira građevinskog stroja. Dimenzije sklopa su približno 2000 mm x 1500 mm x 1300 mm. Promatrano razdoblje iznosi godinu dana gdje se predviđa potreba u iznosu od 150 komada uz veličinu serije od 3 komada.

Uloga prednjeg dijela šasije (reprezentativnog proizvoda) je prihvat nosača radnog uređaja (lopate) kao i prednjeg pogonskog mosta. Zbog toga ima s gornje strane ojačanja na koja se postavlja i učvršćuje podižući nosač radnog uređaja, dok je s donje strane nosač na koji se postavlja i učvršćuje prednji pogonski most. Sklop se u osnovi sastoji od 64 pojedinačnih pozicija koje se dobivaju rezanjem čeličnih ploča debljine od 4 mm do 40 mm određene kvalitete na zadane dimenzije koje potom idu na daljnju obradu.

U nastavku je na slici 28 prikazana struktura reprezentativnog proizvoda dok je u tablici 4 dani popis pojedinačnih pozicija. Uz sam naziv i oznaku pojedine pozicije, u tablici se nalaze podaci o potrebnim količinama, kvaliteti materijala te dimenzije lima za izradu jednog reprezentativnog proizvoda.

Iz slike 24 je vidljivo kako se reprezentativni proizvod sastoji od pet podsklopova i dvadeset zasebnih pozicija. Za izradu reprezentativnog proizvoda potreban je po jedan podsklop BD i BL pri čemu se svaki od njih sastoji od devet pozicija. Podsklopi LB, TU i TO se sastoje od po četiri dijelova u različitim količinama. Osim toga, sklop se sastoji od dvadeset pojedinačnih pozicija. U nastavku je u tablici 4 prikazani popis pojedinih pozicija uz pripadajuće količine, dimenzije i kvalitete materijala.



Slika 28. Struktura reprezentativnog proizvoda

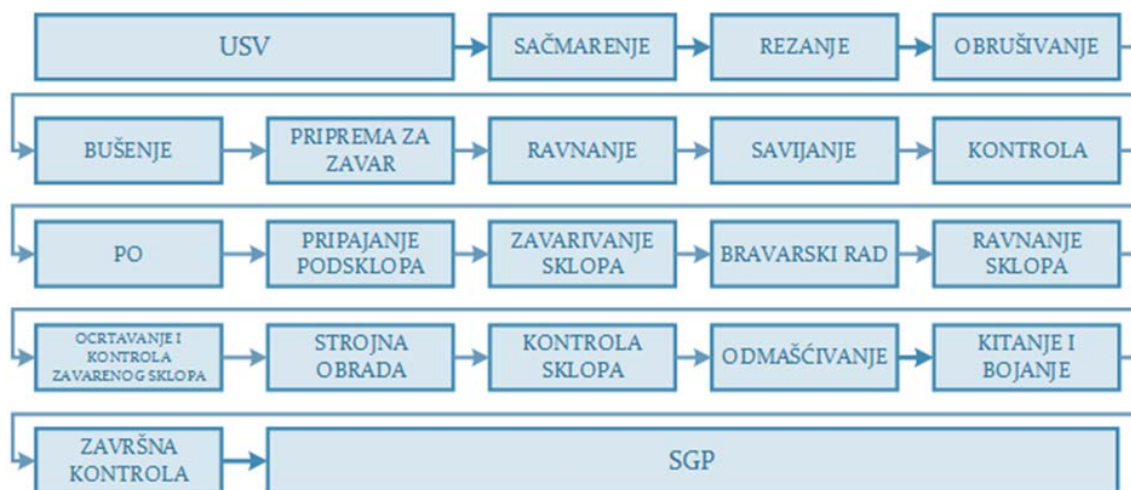
Tablica 4. Popis potrebnih pozicija koje čine reprezentativni proizvod (sklop)

Popis pozicija					
Pozicija	Oznaka	Količina [kom]	Kvaliteta materijala prema DIN 17100	Debljina lima [mm]	D x Š [mm]
Pločica_1	11221	1	1.0978 (W Nr.)	4	90 x 160
Pločica_2	1119	2	ST52-3	5	40 x 70
Pločica_3	1120	2	ST52-3	5	140 x 40
Ukruta_1	1129	1	RST 37-2	6	85 x 95
Pločica_4	11241	1	RST 37-2	6	50 x 80
Ploča_1	1126	1	ST52-3N	8	120 x 250
Ploča_2	1133	1	ST52-3N	10	600 x 800
Pločica_5	1135	1	ST52-3N	10	60 x 80
Pločica_6	1144	2	ST52-3N	10	100 x 170
Pločica_7	1154	2	ST52-3N	10	100 x 120
Pločica_8	118	2	ST52-3N	10	160 x 200
Pločica_9	1110	2	ST52-3N	10	180 x 200
Ploča_3	1111/1121	2	ST52-3N	12	1300 x 1200
Ploča_4	1115/1125	2	ST52-3N	12	140 x 620
Ploča_5	1116/1126	2	ST52-3N	12	140 x 440
Ploča_6	1132	1	ST52-3N	12	660 x 800
Ploča_7	1143	1	ST52-3N	12	110 x 620
Ploča_8	1153	1	ST52-3N	12	110 x 860
Ploča_9	1111	2	ST52-3N	12	300 x 900
Ploča_10	1112	1	ST52-3N	12	600 x 800
Ploča_11	1116	2	ST52-3N	12	130 x 400
Ploča_12	1117	1	ST52-3N	12	100 x 780
Ploča_13	1125	1	ST52-3N	12	100 x 780
Ploča_14	1128	1	ST52-3N	12	175 x 180
Ploča_15	1131	1	ST52-3N	15	560 x 800
Ploča_16	116	2	ST52-3N	15	380 x 430
Ploča_17	1114/1124	2	ST52-3N	15	130 x 600
Ploča_18	1113/1123	2	ST52-3N	20	500 x 850
Ploča_19	1142	1	ST52-3N	20	420 x 850
Ploča_20	1141/1151	2	ST52-3N	20	420 x 800
Ploča_21	1152	1	ST52-3N	20	500 x 800
Pločica_10	119	2	ST52-3N	20	110 x 130
Ploča_22	1113	2	ST52-3N	20	150 x 415
Ploča_23	1114	2	ST52-3N	20	150 x 565
Ploča_24	1112/1122	2	ST52-3N	35	420 x 760
Prsten_1	1117/1127	2	ST52-3N	35	140 x 140
Prsten_2	1118/1128	2	ST52-3N	35	120 x 120
Ploča_25	1115	1	ST52-3N	35	300 x 400
Ploča_26	1127	1	ST52-3N	35	300 x 400
Ukruta_2	1119/11211	2	ST52-3N	40	115 x 510
Ploča_27	117	2	ST52-3N	40	200 x 400

5.3. Opis proizvodnog procesa

Analizom tehnološkog postupka izrade (tehnološkog lista izrade) dobivaju se podaci poput kvalitete i količine potrebnog materijala, vrste priprema, redoslijed operacija, radna mjesta (strojeve), potrebni alati i naprave te režimi obrade, mjerna oprema, vremena (jedinično (norma) vrijeme i pripremno-završno vrijeme), pomoćna oprema te kratak opis pojedinih operacija. Dodatno je u tablici 5 prikazani popis radnih mjesta koji su uključeni u analizu toka materijala.

Opis proizvodnog procesa temelji se na podacima iz tehnoloških listova dobivenih od poduzeća, a proizvodni proces će biti izveden generalizirano na opisnoj razini u cilju zaštite podataka vezanih uz tehnologiju izrade. Ovaj pristup je također primijenjen pri raščlambi reprezentativnog proizvoda na sastavne dijelove kao i kod prikazivanja snimljenog stanja i izrađenih varijanti prostornog rasporeda u obliku (opisnih) skica.



Slika 29. Okvirni tijek proizvodnog procesa izrade reprezentativnog proizvoda

Može se reći da cjelokupni proizvodni proces započinje sačmarenjem primarnog materijala u obliku pločevine koja se nalazi na vanjskom ulaznom skladištu (USV). Za izradu ovog proizvoda koriste se sljedeće čelične ploče:

- Debljine 4 mm (kvalitete prema WNr. 1.0978).
- Debljine 5 mm (kvaliteta prema DIN 17100 ST 52-3).
- Debljine 6 mm (kvalitete prema DIN 17100 RST 37-2).
- Debljine 8 mm (kvalitete prema DIN 17100 ST 52-3N).
- Debljine 10 mm (kvalitete prema DIN 17100 ST 52-3N).
- Debljine 12 mm (kvalitete prema DIN 17100 ST 52-3N).

- Debljine 15 mm (kvalitete prema DIN 17100 ST 52-3N).
- Debljine 20 mm (kvalitete prema DIN 17100 ST 52-3N).
- Debljine 35 mm (kvalitete prema DIN 17100 ST 52-3N).
- Debljine 40 mm (kvalitete prema DIN 171000 ST 52-3N).

Zbog male serije kao i malih dimenzija ploča, pojednostavljeno se pretpostavlja da se svaka vrsta ploče može za jednu seriju prevesti kao jedna transportna jedinica na standardnoj europaleti od vanjskog ulaznog skladišta do sačmarenja i od sačmarenja na rezanje. Nakon sačmarenja ploče, ovisno o debljini idu na rezanje. U razgovoru s poduzećem je dogovoreno kako ploče debljine do uključujući 12 mm idu na rezanje plazmom, dok deblje ploče idu na plinsko rezanje (napomena: lim kvalitete ST 52-3 debljine 5 mm reže se na tračnoj pili, a lim kvalitete RST 37-2 debljine 6 mm na škarama).

Nakon rezanja ploče, ovisno o opterećenju radnih mjesta i stanju površine, idu na obrušivanje ili na ponovno sačmarenje. Nakon toga, ovisno o pojedinoj poziciji, neke idu na bušenje, neke na pripremu za zavarivanje, urezivanje navoja, neke na ravnjanje ili savijanje (ili u nekoj od kombinacija). Potom sve pozicije idu na međufaznu kontrolu nakon koje (ukoliko se utvrdi njihova sukladnost) se stavljaju u skladište za privremeno odlaganje (PO).

Nakon toga se pozicije izuzimaju iz skladišta za privremeno odlaganje i transportiraju na pripajanje. Pritom se također smatra da se sve pozicije potrebne za pripajanje jedne serije proizvoda mogu prevesti kao jedna transportna jedinica. Nakon što se podsklopovi pripoje, vrši se zavarivanje cijelog sklopa. Nakon zavarivanja sklopa vrši se bravarski rad u kojem se sklop kompletno obrađuje. Nakon bravarskog rada slijedi ravnjanje koje se može pojaviti ukoliko dođe do deformacije pojedinih dijelova prilikom zavarivanja.

Nakon toga slijedi ocrtavanje i kontrola zavarenog sklopa. Od trenutka kada su svi podsklopovi zavareni pretpostavlja se da je jedan sklop jedna cijela transportna jedinica s obzirom na dimenzije koje posjeduje. Tako se svaki zavareni sklop zasebno transportira na paleti. Sklop se transportira do strojne obrade (horizontalne glodalice) i do radijalne bušilice za obradu određenih ploha, provrta i urezivanja navoja sukladno nacrtu.

Konačno slijedi kontrola sklopa i ukoliko dimenzije sklopa odgovaraju propisanim tolerancijama, sklop se vozi na odmašćivanje. Nakon odmašćivanja i sušenja slijedi kitanje i bojanje. Nakon bojanja slijedi završna kontrola te se proizvod šalje u skladište gotovih proizvoda (SGP).

Tablica 5. Popis radnih mjesta

Popis radnih mjesta			
Lokacija	Oznaka	Opis	Površina [m ²]
1	USV	Ulazno skladište - vanjsko	2580,00
2	RM1	Tokarenje (klasično) Potisje PA-C 30	9,52
2	RM2	Rezanje na škarama	10,00
2	RM3	Tračna pila	2,80
3	RM4	Obrušivanje 1	28,00
3	RM5	Brušenje kosina+linijski rezač	6,30
3	PO	Privremeno odlaganje (podno + konzolni regali)	/
3	RM6	Savijanje	10,56
3	RM7	CNC savijanje Ermaksan Speed Bend Pro	9,15
3	KM1	Kontrola međufazna 1	8,00
3	RM8	Radijalna bušilica (bušenje+ rezanje navoja)	3,75
5	RM9	Sačmarenje	84,00
5	RM10	Plazma rezanje Microstep MG - P	64,00
5	RM11	Plinsko rezanje Numotaj 50	91,00
5	RM12	Ravnanje	39,25
5	KM2	Kontrola međufazna 2 + ocrtavanje	63,00
5	RM13	Obrušivanje 2	18,00
5	RM14	Privarivanje MAG 1	27,50
5	RM15	Privarivanje MAG 2	31,35
5	RM16	Zavarivanje MAG (Zavarivanje 6 + Severt1)	27,90
6	RM17	Kitanje	/
6	RM18	Bojanje	/
7	RM19	Bušenje + urezivanje navoja	22,50
7	RM20	CNC horizontalna glodalica TOS IV WHN 130Q	35,15
8	RM21	CNC glodalica Union	24,60
8	KZ	Završna kontrola	12,00
9	RM22	Odmašćivanje	/
9	SGP	Skladište gotovih proizvoda	/

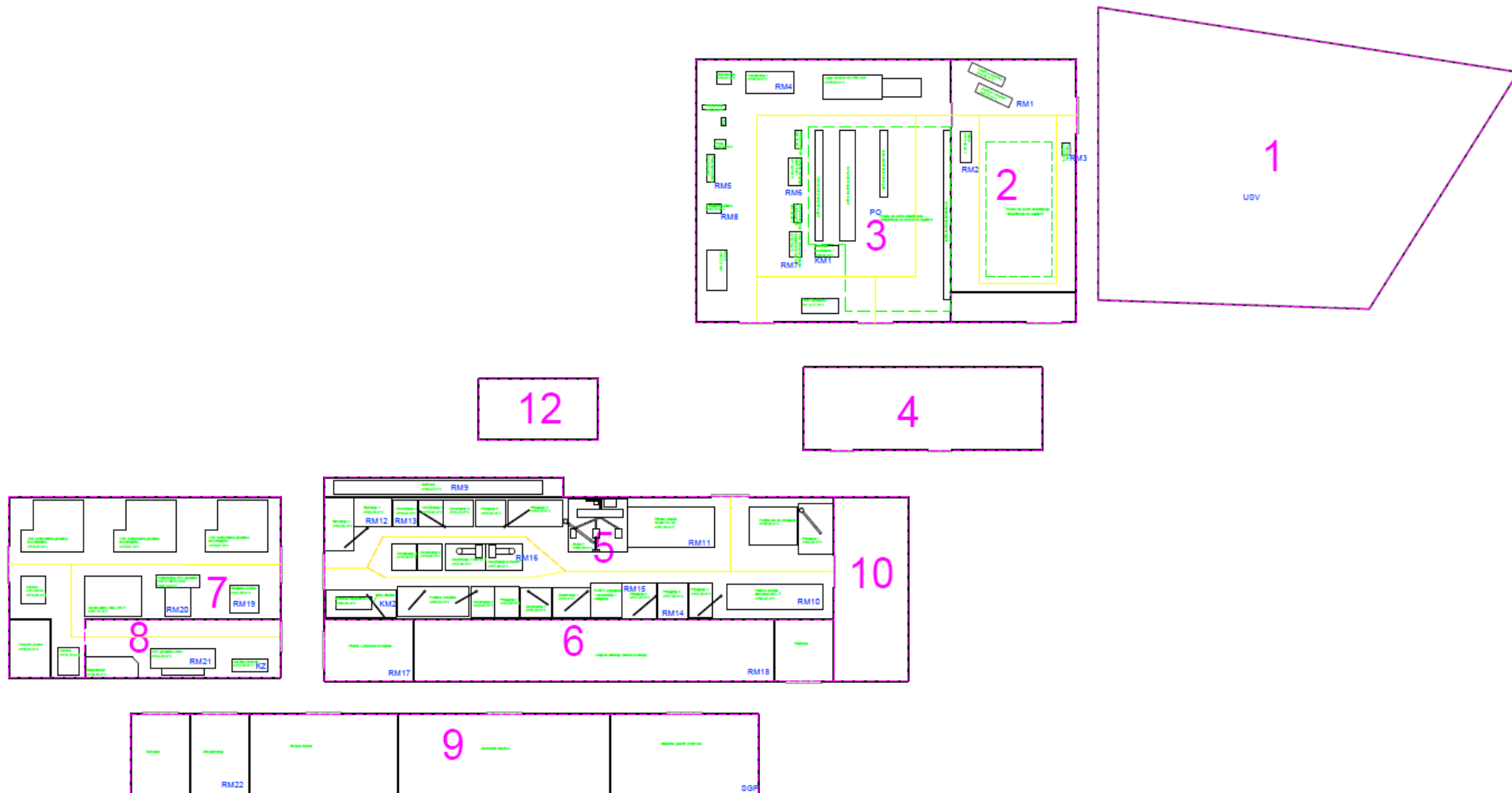
U dogovoru s poduzećem određeno je kako sve površine pojedinih radnih mjesta u tablici 5 u sebi sadrže sve potrebne sastavnice površine radnog mjesta kojima se osigurava siguran i neometan rad pojedinih radnih mjesta (poglavlje 3.8, površina osnovnog radnog mjesta, za posluživanje, održavanje, popravak, odlaganje, zaštitu i sigurnost). Uz to je u tablici 5 navedena oznaka pojedinog radnog mjesta i brojevana oznaka koja opisuje u kojem se objektu promatrano radno mjesto nalazi u snimljenom stanju (slika 26).

5.4. Definiranje tokova materijala i izračun ukupnog transportnog učina

Tokovi materijala proizlaze iz tehnološkog lista u kojem se, kako je već spomenuto, između ostalog definiraju radna mjesta i redosljed operacija. Dobivene matrice transportnog intenziteta, udaljenosti i učinka nalaze se u nastavku (slike 31, 32 i 33) kao i prostorni raspored snimljenog stanja (slika 30).

Na slici 31 prikazana je neorijentirana matrica transportnih intenziteta između pojedinih radnih mjesta s obzirom da za Modificiranu metodu trokuta nije bitno u kom smjeru se odvija transport između promatrana dva radna mjesta već koliko su oni udaljeni i koliko se prijevoza na toj udaljenosti vrši. Tako je dobiveno da za izradu 150 reprezentativnih proizvoda u promatranom razdoblju od jedne godine i s veličinom serije od 3 komada, ukupni transportni intenzitet (kao suma svih transportnih intenziteta), odnosno broj prijevoza između svih radnih mjesta iznosi 7950 prijevoza.

Na slici 32 je prikazana matrica transportnih udaljenosti (vrijednosti izražene u metrima) dobivena na temelju plana mikrolokacije i položaja pojedinih radnih mjesta unutar same mikrolokacije. Izrada plana kao i mjerenje udaljenosti između pojedinih radnih mjesta vršilo se, pomoću aplikacije AutoCAD i to uzduž koordinatnih osi (okomito). Na slici 33 prikazana je matrica ukupnog transportnog učina izračunatog prema izrazu (3.5) Podatak dobiven zbrajanjem svih transportnih učina predstavlja ukupni prijedeni put koji se prevali prilikom izrade svih 150 proizvoda u promatranom razdoblju pri čemu se dobiva važan ulazni podatak za promatranje stvarnog stanja proizvodnog procesa. Tako je ukupni prijedeni put snimljenog stanja proizvodnog sustava u promatranom razdoblju 504700 m, odnosno 504,7 km. Analizom dobivenih rješenja vidi se kako je daleko najveći transportni učin na relaciji ulaznog skladišta vanjskog (USV) i sačmarenja (RM9), gotovo 84 km. Također su značajni transportni učinci na relaciji međuodlagalište (PO) i kontrole međufazne 1 (KM1). Osim toga, veliki udio imaju prijevozi između sačmarenja (RM9) i rezanja limova (RM10 i RM11) te rezanja i obrušivanja. Ovi iznosi transportnog učina posljedica su kombiniranog načina gradnje pri čemu velike udaljenosti, ali i transportni intenziteti između navedenih relacija. Sljedeći korak je poboljšanje vrijednosti funkcije cilja (minimiziranje vrijednosti transportnog učina) izradom varijanti rješenja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava. Prilikom izrade varijanti treba imati na umu da se radi o proizvodnom sustavu sa strojevima impresivnih dimenzija za čije je temeljenje potrebno uložiti značajnu količinu rada i financijska sredstva. Osim temeljenja, potrebno je uzeti u obzir ostale uvijete poput ostalih proizvoda koji u promatranom trenutku kolaju proizvodnim sustavom i koliki je njihov zahtjev za kapacitetima promatranih strojeva. Također se treba uvažiti međusobni neželjeni utjecaj pojedinih radnih mjesta koji ne smiju biti susjedni (pod susjednim smatra se da je jedno radno mjesto u neposrednoj blizini drugog radnog mjesta). Nakon navedenih slika, u sljedećem poglavlju su detaljno prikazane i analizirane varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava.



Slika 30. Skica proizvodnog sustava - snimljeno stanje

OD/KA	1	2			3							5							6		7		8		9			
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		50									400	100																
RM1					50				50																			
RM2									50																			
RM3					50																							
RM4						150		100	250	200	100	250	200			50												
RM5								150	150	100	100																	
PO									1300								100	100										
RM6									350	150	50																	
RM7										50	50																	
KM1											350														100			
RM8												100																
RM9													250	250														
RM10																												
RM11																50												
RM12																50	150	50										
KM2																	150	100	50	150		150	150			150		
RM13																									100			
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																						150					150	
RM18																										150		
RM19																								150				
RM20																												
RM21																												
KZ																												150
RM22																												
SGP																												

Slika 31. Matrica transportnih intenziteta - snimljeno stanje

OD/KA	1	2			3								5								6		7		8		9	
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		85									210	186																
RM1					47					55																		
RM2										57																		
RM3					62						200																	
RM4						24		23		51	30	136	112	118			203											
RM5								14		47	6	127																
PO										24							120	125										
RM6										40	40	126																
RM7										12	14																	
KM1											30															187		
RM8												121																
RM9													92	98														
RM10																												
RM11																	56											
RM12																												
KM2																												
RM13																												
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												
RM18																												
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												
RM22																												
SGP																												

Slika 32. Matrica transportnih udaljenosti - snimljeno stanje

OD/KA	1	2			3							5								6		7		8		9		
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		4250									84000	18600																
RM1					2350					2750																		
RM2										2850																		
RM3					3100						10000																	
RM4						3600		2300		12750	6000	6800	28000	23600		10150												
RM5								2100		7050	600	12700																
PO										31200								12000	12500									
RM6										14000	6000	6300																
RM7										600	700																	
KM1											10500														18700			
RM8																												
RM9												23000	24500															
RM10																												
RM11																2800												
RM12															650	1200	2900											
KM2																3300	6200	2900	5250			4500	6150			9000		
RM13																		3600						5600				
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																						5400					6750	
RM18																									17250			
RM19																								3300				
RM20																												
RM21																												
KZ																												14400
RM22																												
SGP																												

Slika 33. Matrica ukupnog transportnog učina između pojedinih radnih mjesta - snimljeno stanje

6. IZRADA VARIJANTI RJEŠENJA PROSTORNOG RASPOREDA ELEMENATA PROIZVODNOG SUSTAVA

Ovo poglavlje bavi se detaljnim prikazom izrade i analize različitih varijanti rješenja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. počevši od idealnog rasporeda. Prilikom izrade idealnog rasporeda koristi se načelo idealnog projektiranja pri kojem se polazi od toga da rješenja trebaju predstavljati vrhunac trenutalnoga tehnološkog rješenja bez ikakvih ograničenja uzrokovanih mikrolokacijom. Tako izrađeno rješenje predstavljat će referencu te će se ostale varijante uspoređivati sa snimljenim stanjem, ali i s idealnim rasporedom.

6.1. Teorijska varijanta

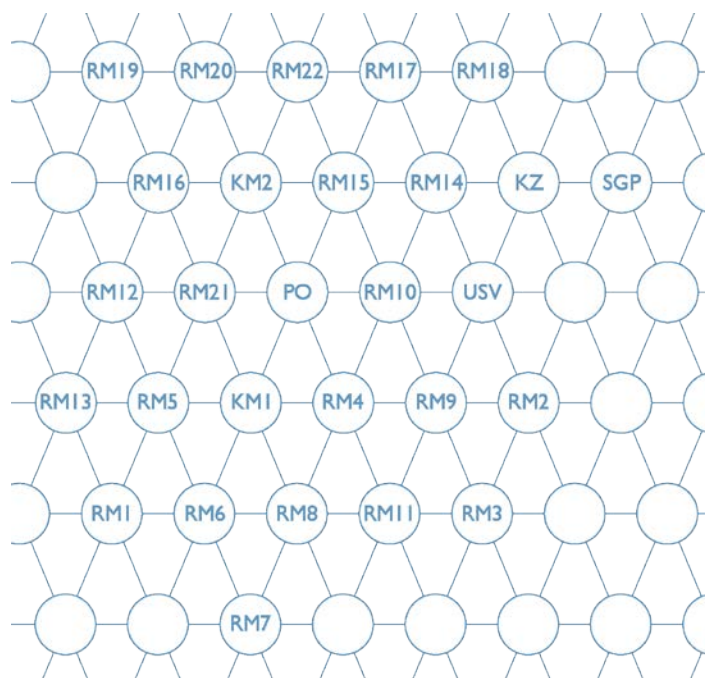
Ova varijanta koristi prednosti kompaktnog načina gradnje pri čemu su sva radna mjesta unutar jednog objekta. Izrađena je kao varijanta koja predstavlja, uz snimljeno stanje, referencu za vrednovanje ostalih varijanti koje su prikazane u ovom radu.

Za izradu teorijske varijante korištena je *Modificirana metoda trokuta* opisana u poglavlju 3.9.1.1. Provedba metode se može pratiti na slici 34, a provedena je na sljedeći način.

Prva dva radna mjesta, odabrana po kriteriju maksimalnog međusobnog transportnog intenziteta su međuodlagalište (PO) i kontrola međufazna 1 (KM1) s iznosom od 1300 prijevoza za zadanu veličinu serije u promatranom razdoblju od jedne godine. U slučaju da postoji više parova radnih mjesta jednake i maksimalne intenzivnosti, odabire se onaj par koji ima veći broj veza s preostalim radnim mjestima, a ukoliko je i broj veza jednak, odabire se proizvoljan par radnih mjesta. Nakon toga slijedi izračun suma intenzivnosti toka materijala između raspoređenih radnih mjesta i s još neraspoređenima pri čemu se odabire element s najvećom sumom, a to je savijanje (RM6).

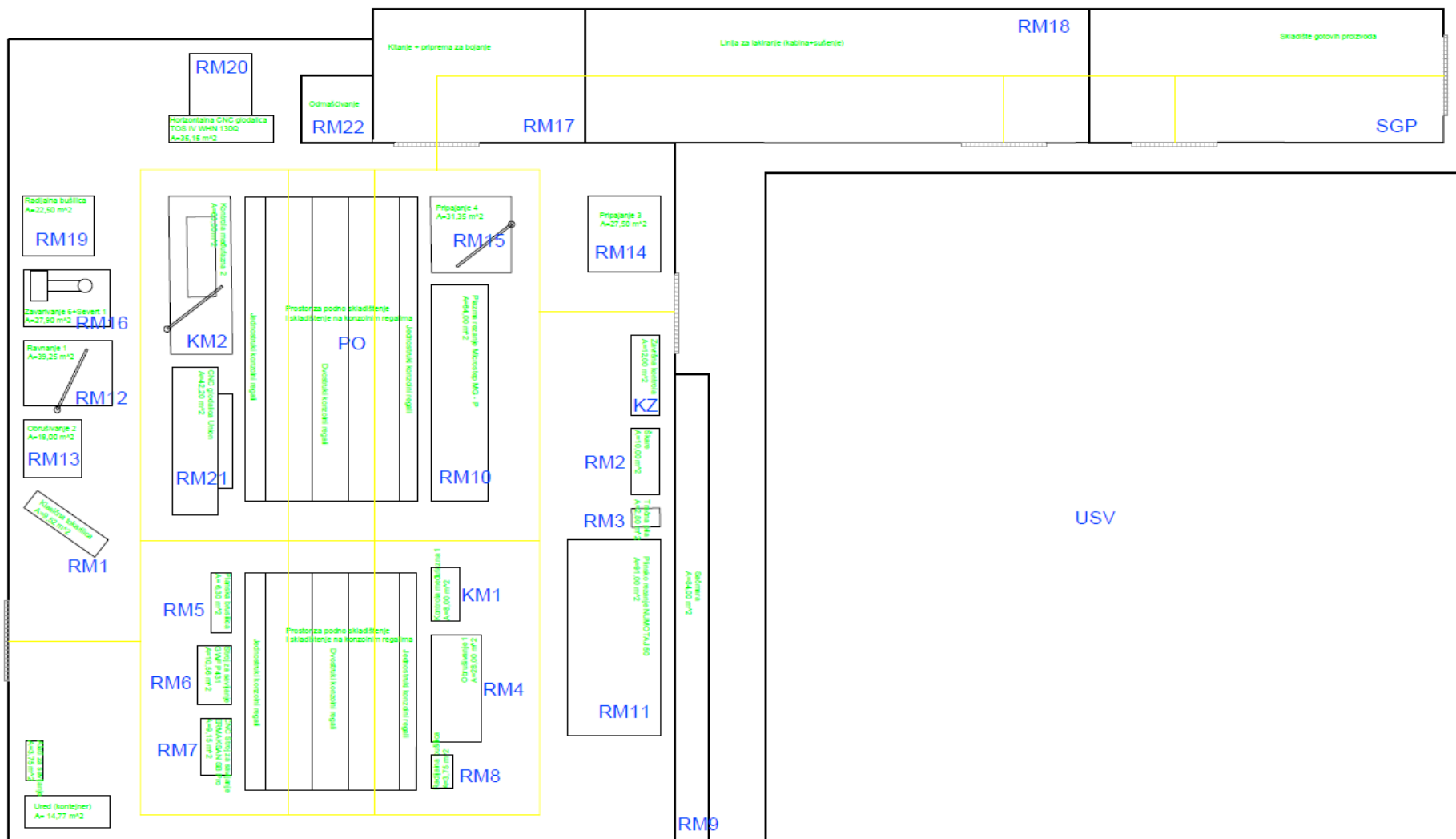
U slučaju da postoji više maksimalnih suma transportnog intenziteta, dodjeljuje se radno mjesto koje ima više veza s još neodijeljenim radnim mjestima. Ako je taj broj jednak, raspoređuje se ono radno mjesto koje posjeduje više veza s već dodijeljenim radnim mjestima. Ako je i taj broj jednak, odabir navedenih radnih mjesta je proizvoljan. Postupak se ponavlja dokle sva radna mjesta nisu dodijeljena.

Nakon što je definirani redosljed dodjeljivanja radnih mjesta u mrežni model lokacija, u susjedne čvorove se dodjeljuju prva dva radna mjesta. Udaljenost između njih je jedinična. Sukladno redosljedu na slici 34 vrši se dodjeljivanje radnih mjesta u mrežu trokuta pri čemu u slučaju da je radno mjesto koje se dodjeljuje u vezi samo s jednim već raspoređenim radnim mjestom, odabiru neposredno susjedni, nezauzeti čvorovi na strani tog radnog mjesta. Ako radno mjesto posjeduje veze s još neraspoređenim radnim mjestima, a slobodnih lokacija ima više, postupak se nastavlja na način koji će rezultirati minimalnim ukupnim transportnim učinkom. U slučaju da je radno mjesto u vezi s dva već raspoređena radna mjesta, tada je najprikladnija lokacija jedan od dva nasuprotna vrha trokuta. Ako su obje lokacije zauzete, odabire se neka od preostalih slobodnih lokacija uz uvjet da odabrana lokacija rezultira minimalnim transportnim učinkom. Također, ako radno mjesto ima veze s više od dva raspoređena radna mjesta, odabire se ono slobodno mjesto koje će rezultirati minimalnim transportnim učinkom. Provođenjem ovog postupka dobiva se mreža prikazana na slici 35.



Slika 35. Mreža trokuta - teorijska varijanta

Na temelju slike 35 izrađuje se prostorni raspored radnih mjesta proizvodnog sustava prikazanog na slici 36. Pritome treba imati na umu da postoji određeno minimalno odstupanje od položaja prikazanog na slici 35 iz razloga kako svako radno mjesto ima određenu površinu čijim postavljanjem dolazi do distorzije mreže trokuta i određena radna mjesta su zamaknuta u odnosu na (idealiziranu) mrežu trokuta. Uz to, odmaščivanje, lakirnica i sačmarenje su fizički odvojene pregradnim zidovima zbog specifičnosti rada tih radnih mjesta.



Slika 36. Skica proizvodnog sustava - teorijska varijanta

OD/KA	1	2			3								5								6		7		8		9	
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		74									28	58																
RM1					62					31																		
RM2										24																		
RM3					37						65																	
RM4						72		56		6	8	63	29	9			57											
RM5								6		24	48	76																
PO										12								65	45									
RM6										36	40	88																
RM7										42	35																	
KM1											28														37			
RM8												73																
RM9													42	63														
RM10																												
RM11																	46											
RM12																												
KM2																		16	5		39							
RM13																												
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												
RM18																												
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												
RM22																												
SGP																												

Slika 37. Matrica transportnih udaljenosti – teorijska varijanta

OD/KA	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV			3700									11200	5800															
RM1					3100					1550																		
RM2										1200																		
RM3					1850							3250																
RM4						10800		5600		1500	1600	3150	7250	1800		2850												
RM5								300		3600	4800	7600																
PO										15600								6500	4500									
RM6										12600	6000	4400																
RM7										2100	1750																	
KM1											9800														3700			
RM8												7300																
RM9													10500	15750														
RM10																												
RM11																	2300											
RM12																800	750		1950									
KM2																	3450	4100	1900	1050			900	3600			3300	
RM13																				3300					1000			
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												1350
RM18																												6750
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												8550
RM22																												
SGP																												

Slika 38. Matrica ukupnog transportnog učinka - teorijska varijanta

Na slici 36 prikazani je prostorni raspored radnih mjesta proizvodnog sustava izvedenog na osnovi kompaktnog načina gradnje, vođen načelom idealnog projektiranja pri čemu je za smještaj radnih mjesta korišten objekt koji dimenzijskim karakteristikama odgovara objektu 3 na slici 26. Osnovni objekt je izveden u kompaktnom načinu gradnje s razlikom da su odmašćivanje, lakirnica i skladište gotovih proizvoda fizički odvojeni od preostalog proizvodnog sustava. Analogno tome izvedeno je radno mjesto RM9 odnosno sačmarenje. Ulazno skladište vanjsko (USV) pravokutnog je oblika i površinom odgovara vanjskom skladištu (oznaka 1) na slici 26.

Ukupni transportni učin ove varijante iznosi 236450 m, što je ušteda u iznosu od 53,15 % u odnosu na snimljeno stanje. Iako ovaj podatak nema praktičnu primjenu, iz njega se može zaključiti sljedeće:

1. Idealna varijanta prikazuje najmanji mogući transportni put u ovom proizvodnom sustavu tj. predstavlja teorijsku granicu do koje se može vršiti poboljšanje prostornog rasporeda promatranog proizvodnog sustava.
2. Temelj je za usporedbu s realnim varijantama.
3. Ako bi se hipotetski proizvodni pogon totalno ili djelomično preuređivao ili selio, da se vidi međusobni položaj strojeva i odjela.

6.2. Varijanta II

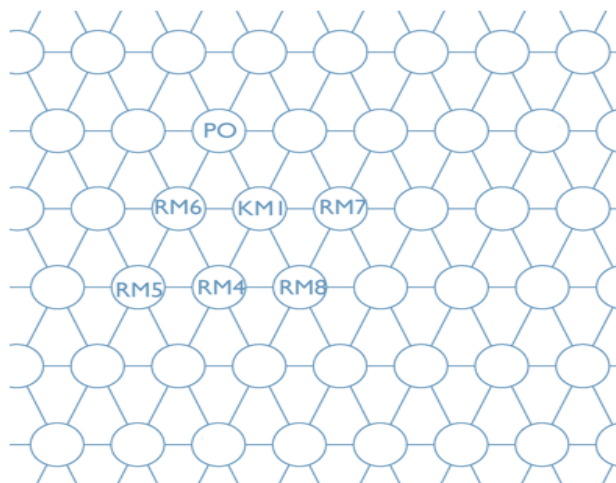
Ova varijanta odstupa od načela idealnog projektiranja jer je izrađena na način da uzima u obzir ograničenja postojećeg proizvodnog sustava u pogledu položaja odjela i dimenzija objekata. Međutim, ova varijanta ne uzima u obzir ograničenja unutar samog promatranog odjela.

Drugim riječima, ova varijanta vrši izmjenu samo onih radnih mjesta koja se nalaze unutar promatranog odjela. S obzirom kako odjeli 3 i 5 (slika 26) jedini imaju više od 3 radnih mjesta koji sudjeluju u procesu izrade reprezentantnog proizvoda, kod njih će se primijeniti Modificirana metoda trokuta, analogno prethodnoj varijanti.

Na slici 39 je vidljivo kako se najviši transportni intenzitet odvija između kontrole međufazne 1 (KM1) i međuskladišta (PO). Stoga su ta dva elementa prva ubačena u mrežu trokuta. Preostali nedijeljeni elementi su dodijeljeni u mrežu trokuta analogno primjeni Modificirane metode trokuta u prethodnoj teorijskoj varijanti. Redoslijed dodjeljivanja varijanti je sljedeći:

kontrola međufazna 1 (KM1) – međuodlagalište (PO) – savijanje (RM6) – obrušivanje 1 (RM4) – brušenje kosina i linijski rezač (RM5) – radijalna bušilica (RM8) – CNC savijanje (RM7). Na desnoj strani slike 39 je prikazani međusobni raspored radnih mjesta u mreži trokuta.

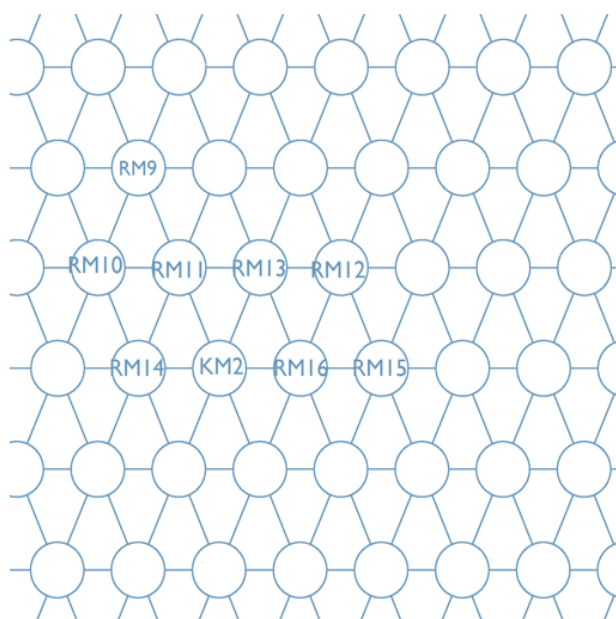
OD/KA	3						
	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8
RM4							
RM5	24						
PO	0	0					
RM6	23	14	0				
RM7	0	0	0	0			
KM1	51	47	24	40	12		
RM8	30	6	0	40	14	30	
Σ							
KM1	250	150		350	50	X	0
PO	0	0	X	0	0		0
Σ	250	150		350	50		0
RM6	100	150		X	0		150
Σ	350	300			50		150
RM4	X	150			0		200
Σ		450			50		350
RM5		X			0		100
Σ					50		450
RM8					50		X
Σ					100		
RM7					X		



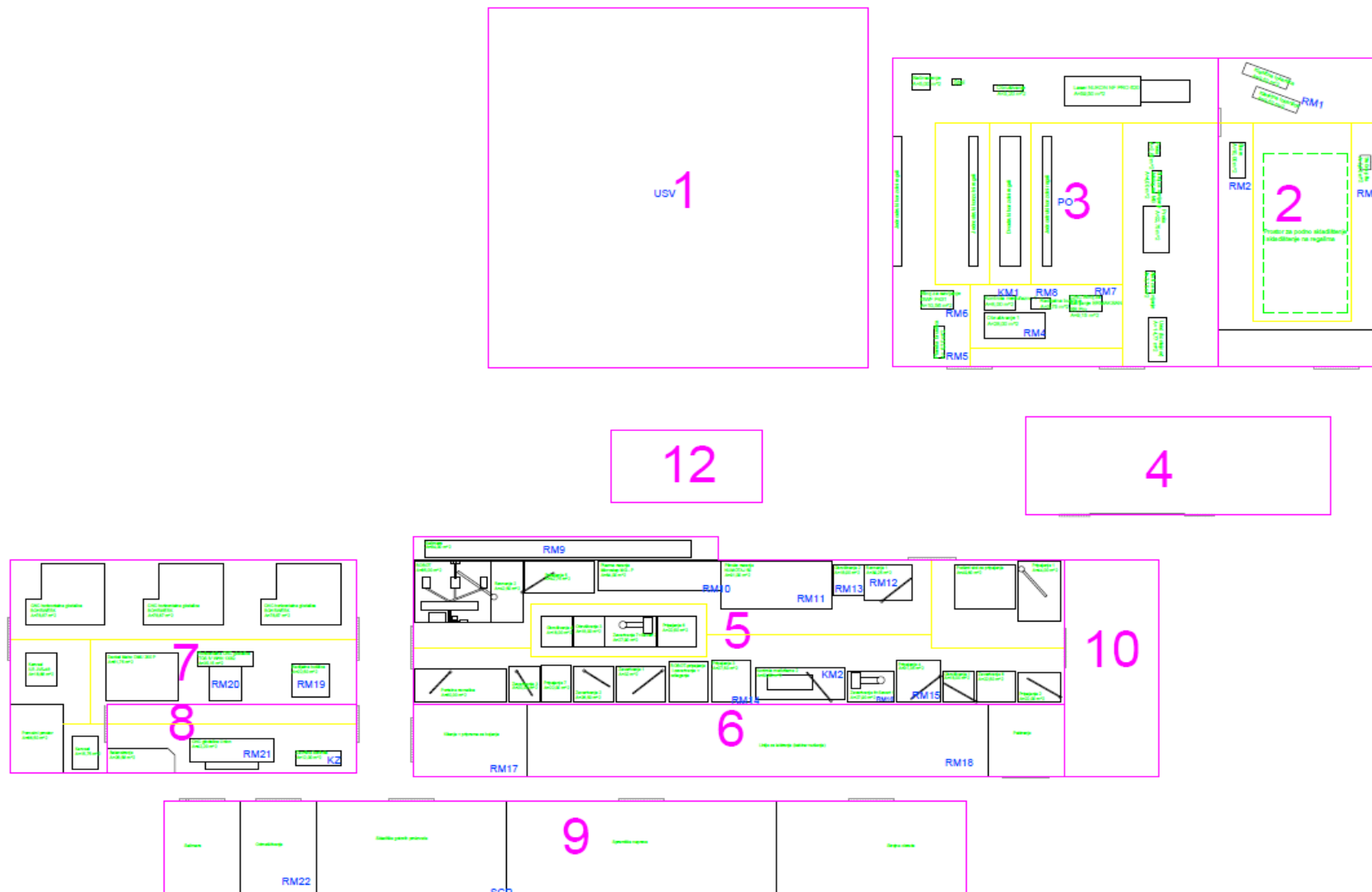
Slika 39. Modificirana metoda trokuta za objekt 3 - varijanta II

Analogno primjeni modificirane metode trokuta na objekt pod brojem 3 (slika 26) određeni je raspored radnih mjesta unutar objekta broj 5 (slika 26). Redoslijed dodjeljivanja elemenata u mrežu trokuta je sljedeći: sačmarenje (RM9) – plinsko rezanje (RM11) – plazma rezanje (RM10) – obrušivanje 2 (RM13) – kontrola međufazna 2 (KM2) – zavarivanje MAG (RM16) – ravnjanje (RM12) – privarivanje MAG 2 (RM15) – privarivanje MAG 1 (RM14). Na desnoj strani slike 40 prikazana je pripadajuća mreža trokuta.

OD/KA	5								
	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16
RM9									
RM10	250								
RM11	250	0							
RM12	0	0	0						
KM2	0	0	0	50					
RM13	0	0	50	150	150				
RM14	0	0	0	0	100	0			
RM15	0	0	0	50	50	0	0		
RM16	0	0	0	0	150	150	0	0	
Σ									
RM9	X	250		0	0	0	0	0	0
RM11		0	X	0	0	50	0	0	0
Σ		250		0	0	50	0	0	0
RM10		X		0	0	0	0	0	0
Σ				0	0	50	0	0	0
RM13				150	150	X	0	0	150
Σ				150	150		0	0	150
KM2				50	X		100	50	150
Σ				200			100	50	300
RM16				0			0	0	X
Σ				200			100	50	
RM12				X			0	50	
Σ							100	100	
RM15							0	X	
Σ							100		
RM14							X		



Slika 40. Modificirana metoda trokuta za objekt 5 - varijanta II



Slika 41. Skica proizvodnog sustava - varijanta II

OD/KA	1	2			3						5						6		7		8		9					
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		155									67	148																
RM1					69					61																		
RM2										66																		
RM3					84						178																	
RM4						5		10		3	21	104	163	87		86												
RM5								9		8	15	98																
PO										12								88	110									
RM6										8	14	107																
RM7										15	5																	
KM1											5															178		
RM8												108																
RM9													99	104														
RM10																												
RM11																		16										
RM12																												
KM2																												
RM13																												
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												
RM18																												
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												
RM22																												
SGP																												

Slika 42. Matrica transportnih udaljenosti - varijanta II

OD/KA	1	2			3						5						6		7		8		9					
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV			155								67	148																
RM1					69					61																		
RM2										66																		
RM3					84						178																	
RM4						5		10	3	21	104	163	87			86												
RM5								9	8	15	98																	
PO										12							88	110										
RM6									8	14	107																	
RM7										15	5																	
KM1											5															178		
RM8												108																
RM9													99	104														
RM10																												
RM11																	16											
RM12																	3		18									
KM2																	14	12	17	7			85	94			111	
RM13																				16					104			
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												45
RM18																											115	
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												37
RM22																												
SGP																												

Slika 43. Matrica transportnog učina - varijanta II

Slika 41 prikazuje prostorni raspored elemenata proizvodnog sustava koji uzima u obzir samo ona radna mjesta koja se nalaze unutar promatranih objekata. Time se ostvarilo slobodno razmještanje radnih mjesta unutar objekata na temelju rješenja dobivenih Modificiranom metodom trokuta. Unutar objekta 3 su sva radna mjesta približena ulazu i izlazu, dok je međuskladište (PO) zamaknuto lijevo u odnosu na snimljeno stanje. Uz to su sva radna mjesta u objektu 5 koncentrirana u središte objekta što je u tom slučaju rezultiralo kompromisom u pogledu transportnih učina u odnosu na preostala radna mjesta u drugim objektima. Dodatno se promijenio položaj ulaznog vanjskog skladišta (USV) i skladišta gotovih proizvoda (SGP) na povoljnije lokacije. Promjenom položaja ulaznog vanjskog skladišta (USV) prema sačmarenju (RM9) u odnosu na snimljeno stanje smanjuje se transportni učin na toj relaciji za 68 %, dok se transportni učin na relaciji završne kontrole (KZ) i skladišta gotovog proizvoda (SGP) smanjuje za 61,46 %.

Ukupni transportni učin proizvodnog sustava kod ove varijante iznosi 391750 m što je ušteda od 22,38 % u odnosu na snimljeno stanje. Iako je ušteda znatno manja nego kod teorijske varijante, ona je važni pokazatelj u kakvom su međusobnom odnosu (u pogledu transportnog učina) radna mjesta unutar objekata. Naime, kod ovog proizvodnog sustava, u kontekstu minimizacije ukupnog transportnog učina značajniji su oni transporti koji se odvijaju između pojedinih objekata, dok su manje značajni oni unutar samih objekata.

6.3. Varijanta III

Ova varijanta se temelji na prethodnoj varijanti (varijanta II) s time da je izvršeno razmještanje radnih mjesta i između objekata. Osim toga, u obzir su uzeta ograničenja u pogledu dimenzija i međusobnog položaja objekata na mikrolokaciji. Drugim riječima, izrada ove varijante krenula je od početnog stanja varijante II s obzirom da ona predstavlja poboljšanje u odnosu na snimljeno stanje.

U odnosu na varijantu II, omogućeni je razmještaj i između pojedinih odjela odnosno, razmještena su sljedeća radna mjesta na povoljnije lokacije:

- Tokarenje klasično (RM1): iz 2 u 3
- Rezanje na škarama (RM2): iz 2 u 3
- Tračna pila (RM3): iz 2 u 3
- Sačmarenje (RM9): iz 5 u 3
- Plazma rezanje (RM10): iz 5 u 3

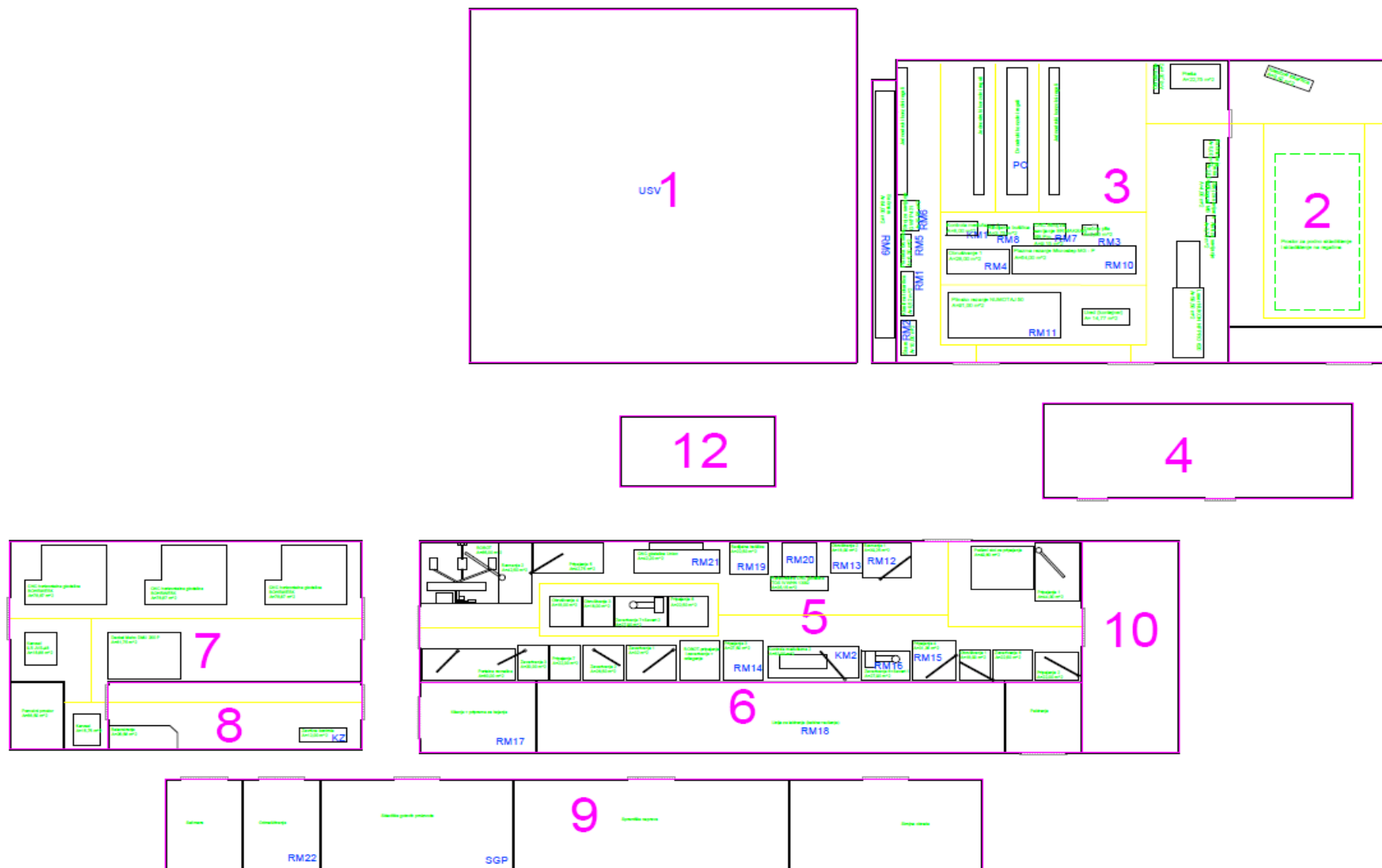
- Plinsko rezanje (RM11): iz 5 u 3
- Obrušivanje 2 (RM13): iz 7 u 5
- CNC horizontalna glodalica (RM20): iz 7 u 5
- CNC glodalica (RM21): iz 8 u 5

U nastavku na slikama 44, 45 i 46 su prikazani tlocrt proizvodnog sustava, matrica transportnih udaljenosti i matrica transportnih učina.

Ukupni transportni učin varijante III iznosi 243150 m, što je poboljšanje u odnosu na varijantu II od 37,93 % a u odnosu na snimljeno stanje iznosi 51,82 % što je vrlo blizu teorijskoj varijanti s odstupanjem ukupnog transportnog učina od samo 1,33 % (u odnosu na teorijsku varijantu) što dokazuje tvrdnju kako su, kod proizvodnog sustava poduzeća, dominantni transportni učini između, a ne unutar objekta. Iako je postignuto značajno poboljšanje u odnosu na varijantu II (time ujedno i na snimljeno stanje), primjena ove varijante iziskuje utrošak puno resursa. Naime, u obzir nisu uzeta nikakva ograničenja vezana uz sama radna mjesta i pretpostavljeno je da su sva radna mjesta slobodna za razmještaj.

Međutim, u stvarnosti to nije tako. Kao što je već spomenuto, treba voditi računa o tome kako je velik dio tih strojeva impresivnih dimenzija i masa čije temeljenje je posebno zahtjevno što bi rezultiralo visokim troškovima i opsežnim radovima što ne opravdava njihov razmještaj. Osim toga, potrebno je uzeti u obzir mogućnost da kroz proizvodni sustav kolaju i drugi proizvodi koji imaju značajno veći udio u utrošku kapaciteta pojedinih radnih mjesta nego što je to promatrani reprezentantni proizvod iz čega proizlazi da su ta radna mjesta potencijalno nedostupna za razmještaj.

Također, zbog samog izvođenja, tehnologije zahtijevaju specijalne uvijete poput pregradnih zidova, dodatnih konstrukcija i komora bilo da se radi o sačmarenju ili kod odmašćivanja i površinske zaštite i sl. Zbog toga će u nastavku biti u obzir uzeta prethodno spomenuta ograničenja s ciljem postizanja realnih i primjenjivih varijanti prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava koje je značajno jednostavnije realizirati.



Slika 44. Skica proizvodnog sustava - varijanta III

OD/KA	1	2			3							5								6		7		8		9		
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV			87									48	111															
RM1					9					13																		
RM2										19																		
RM3					47							74																
RM4						8		12		3	21	42	12	10			92											
RM5								9		8	14	41																
PO										19								96	118									
RM6											7	13	52															
RM7												15	5															
KM1												5													112			
RM8													73															
RM9																												
RM10																												
RM11																												
RM12																												
KM2																												
RM13																												
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												
RM18																												
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												
RM22																												
SGP																												

Slika 45. Matrica transportnih udaljenosti - varijanta III

OD/KA	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV			4350									19200	11100															
RM1					450					650																		
RM2										950																		
RM3					2350							3700																
RM4						1200		1200		750	4200	2100	3000	2000			4600											
RM5								1350		1200	1400	4100																
PO										24700								9600	11800									
RM6										2450	1950	2600																
RM7										750	250																	
KM1											1750														11200			
RM8												7300																
RM9													14750	7500														
RM10																												
RM11																	4250											
RM12																1150	450		900									
KM2																	2100	1200	850	1050			3450	1950			16650	
RM13																				2400					3400			
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																							5700				6750	
RM18																										17250		
RM19																									1800			
RM20																												
RM21																												
KZ																												5400
RM22																												
SGP																												

Slika 46. Matrica ukupnog transportnog učina - varijanta III

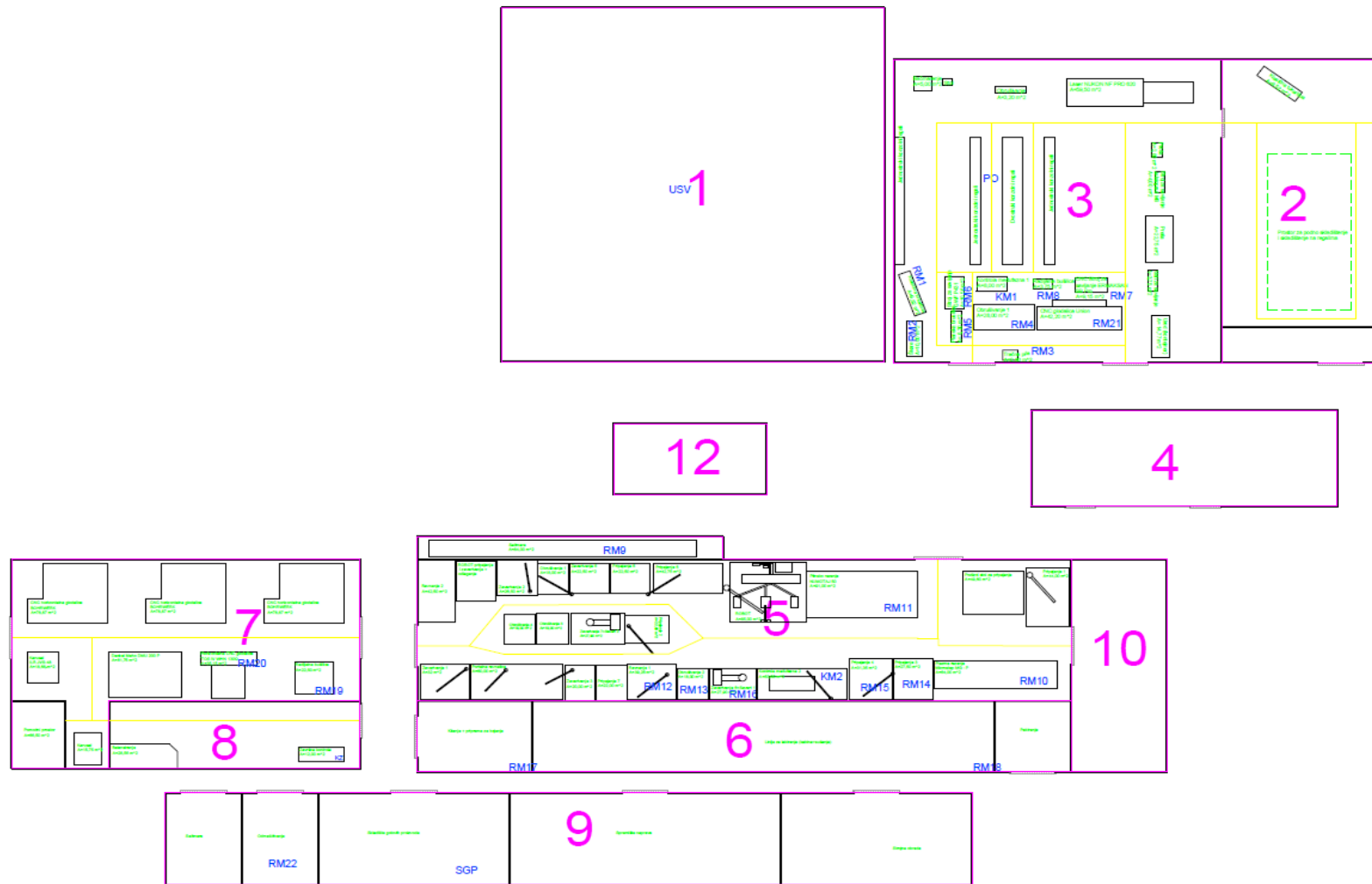
6.4. Varijanta IV

Ova varijanta se temelji na varijanti III uz razliku da u obzir uzima ograničenja kojima se određena radna mjesta ne mogu jednostavno razmjestiti kao što je to prikazano u varijanti III. Stoga se očekuje nešto nepovoljniji iznos ukupnog transportnog učina u odnosu na varijantu III koji se nastoji minimizirati što je više moguće. U razgovoru sa zaposlenicima poduzeća određena su sljedeća fiksna radna mjesta :

- KZ – Završna kontrola
- RM9 - Sačmarenje
- RM10 – Plazma rezanje Microstep MG - P
- RM11 – Plinsko rezanje Numotaj 50
- RM17 - Kitanje
- RM18 - Bojanje
- RM19 – Bušenje + urezivanje navoja
- RM20 – CNC horizontalna glodalica TOS IV WHN 130Q
- RM22 – Odmašćivanje

Kao što je vidljivo na slici 47, u ovoj je varijanta radno mjesto RM21 (CNC glodalica) razmješteno u objekt 3 čime se smanjio transportni učin na relacijama RM21(CNC glodalica) – RM13 (obrušivanje 2) i RM21 (CNC glodalica)– KM1 (kontrola međufazna 1) za 40,33 % u odnosu na snimljeno stanje. Također su sva radna mjesta (RM1 – klasično tokarenje, RM2 – rezanje škarama i RM3 – tračna pila) iz objekta 2 premještena u objekt 3 čime se ostvarila ušteda u transportnom učinku između navedenih radnih mjesta i onih s kojim su u vezi za 59,49 %.

Uzimanjem u obzir prethodno navedena ograničenja i uštede, ukupni transportni učin ove varijante iznosi 331650 m što je 34,29 % manje u odnosu na snimljeno stanje, ali i 26,68 % više u odnosu na varijantu III.



Slika 47. Skica proizvodnog sustava - varijanta IV

OD/KA	1	2			3								5								6		7		8		9	
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		72									56	125																
RM1					24					13																		
RM2										21																		
RM3					4						71																	
RM4						7		10		8	20	102	91	94			117											
RM5								6		9	13	99																
PO										13							90	95										
RM6										5	13	104																
RM7										13	5																	
KM1											13															33		
RM8												113																
RM9													92	84														
RM10																												
RM11																												
RM12																												
KM2																30	5		38					74	85			110
RM13																										112		
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												45
RM18																											115	
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												36
RM22																												
SGP																												

Slika 48. Matrica transportnih udaljenosti – varijanta IV

OD/KA	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV			3600									22400	12500															
RM1					1200					650																		
RM2										1050																		
RM3					200							3550																
RM4						1050		1000		2000	4000	5100	22750	18800			5850											
RM5								900		1350	1300	9900																
PO										16900								9000	9500									
RM6										1750	1950	5200																
RM7										650	250																	
KM1											4550														3300			
RM8												11300																
RM9													23000	21000														
RM10																												
RM11																	1700											
RM12																1500	750		1900									
KM2																	4050	2600	650	1650			11100	12750			16500	
RM13																				900					11200			
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												6750
RM18																											17250	
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												5400
RM22																												
SGP																												

Slika 49. Matrica ukupnog transportnog učina – varijanta IV

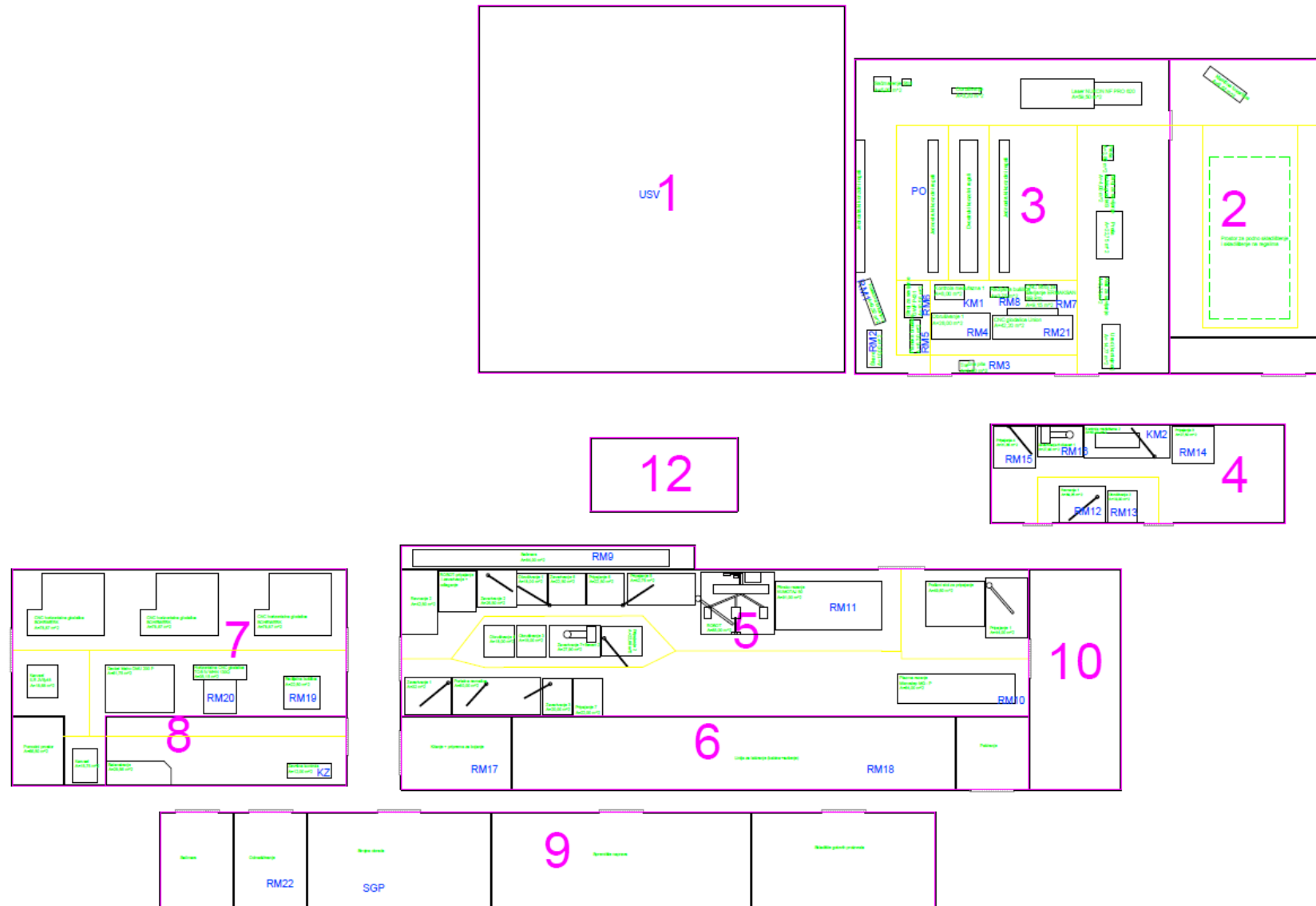
6.5. Varijanta V

U razgovoru sa zaposlenicima odlučeno je razmotriti varijantu u kojoj se nastoji iskoristiti prazni objekt 4 (slika 26) na način da se u njega stave sva radna mjesta iz objekta 5 (osim sačmarenja (RM9), rezanja plazmom (RM10) i rezanje plinom (RM11)), a to su:

- KM2 – kontrola međufazna 2
- RM12 - ravnanje
- RM13 – obrušivanje 2
- RM14 – privarivanje MAG 1
- RM15 – privarivanje MAG 2
- RM16 – zavarivanje MAG

Osnovni prostorni raspored elemenata proizvodnog sustava na temelju kojeg je izrađena varijanta V je varijanta IV. Osnovni cilj je utvrditi da li je moguće upotrebom objekta 4 smanjiti vrijednost ukupnog transportnog učina u odnosu na varijantu IV. Kako zavarivanje predstavlja vrlo zahtjevnu tehnologiju, važno je stvoriti adekvatne uvjete za njeno nesmetano odvijanje. Tako se prijedlog o korištenju praznog objekta 4 nastoji izolirati sve glavne i pomoćne procese vezane uz tehnologiju zavarivanja (u okviru reprezentantnog proizvoda) i iskoristiti prednosti strukture orijentirane na vrstu obrade. U nastavku je prikazani prostorni raspored elemenata proizvodnog sustava za navedenu varijantu, kao i matrice transportnih udaljenosti i ukupnog transportnog učina.

Ukupni transportni učin ove varijante (slika 50) iznosi 350650 m što je poboljšanje u odnosu na snimljeno stanje za 30,52% ali i povećanje vrijednosti ukupnog transportnog učina za 3,77% u odnosu na varijantu IV što znači da se upotrebom objekta 4 ukupni transportni učin čak povećao. Razlog tome je povećanje iznosa transportnog učina na relaciji RM22 (odmašćivanje)– KM2 (kontrola međufazna 2) i RM21 (CNC glodalica) – RM13 (obrušivanje) za 20,86% što je posljedica razmještaja radnih mjesta u objekt 4.



Slika 50. Skica proizvodnog sustava - varijanta V

OD/KA	1	2			3						5						6		7		8		9					
	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV		72									56	125																
RM1					24					13																		
RM2										21																		
RM3					4						71																	
RM4						7		10	8	20	102	91	94			70												
RM5								6	9	13	99																	
PO										13							87	72										
RM6										5	13	104																
RM7										13	5																	
KM1											13														33			
RM8												113																
RM9													92	84														
RM10																												
RM11																	72											
RM12																												
KM2																	20	5	14									
RM13																												
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												
RM18																												
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												
RM22																												
SGP																												

Slika 51. Matrica transportnih udaljenosti - varijanta V

OD/KA	USV	RM1	RM2	RM3	RM4	RM5	PO	RM6	RM7	KM1	RM8	RM9	RM10	RM11	RM12	KM2	RM13	RM14	RM15	RM16	RM17	RM18	RM19	RM20	RM21	KZ	RM22	SGP
USV			3600									22400	12500															
RM1					1200					650																		
RM2										1050																		
RM3					200							3550																
RM4						1050		1000		2000	4000	5100	22750	18800			3500											
RM5								900		1350	1300	9900																
PO												16900						8700	7200									
RM6										1750	1950	5200																
RM7										650	250																	
KM1											4550															3300		
RM8												11300																
RM9													23000	21000														
RM10																												
RM11																	3600											
RM12																	1000	750		700								
KM2																		1200	900	1100	1650			20700	22500			25800
RM13																					2100					9200		
RM14																												
RM15																												
RM16																												
RM17																												6750
RM18																											17250	
RM19																												
RM20																												
RM21																												
KZ																												5400
RM22																												
SGP																												

Slika 52. Matrica ukupnog transportnog učinka - varijanta V

Sukladno zadatku kod kojeg je cilj smanjenjem ukupnog transportnog učina unaprijediti proizvodni proces dominantni kriterij odabira varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava je ukupni transportni učin. Minimizacijom ukupnog transportnog učina ostvaruje se takav prostorni raspored elemenata na način da se ona radna mjesta koja vežu najveći iznosi transportnih intenziteta postave u neposrednu blizinu. Time se također želi utjecati na smanjenje vremena transportnih ciklusa i povećanje preglednosti i proizvodnosti. U nastavku su u tablici 6 prikazani dobiveni iznosi ukupnih transportnih učina različitih varijanti prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava.

Tablica 6. Iznosi transportnih učina kod pojedinih varijanti prostornog rasporeda

PROSTORNI RASPORED	UKUPNI TRANSPORTNI UČIN, m
Snimljeno stanje	504700
Teorijska varijanta	236450
Varijanta II	391750
Varijanta III	243150
Varijanta IV	331650
Varijanta V	350650

Iz tablice 6 je vidljivo kako teorijska varijanta i varijanta III najbolje zadovoljavaju kriterij minimalnog transportnog učina, međutim zbog prethodno spomenutih postojećih ograničenja koja nisu uzeta u obzir, u razgovoru s poduzećem, one se ne razmatraju kao moguća realna rješenja.

Njihova korist je bila u prikazu dokle se može poboljšavati vrijednost ukupnog transportnog učina za promatrani proizvodni sustav te su služile kao temelj za izradu ostalih varijanti. Stoga mogući odabir pada na varijantu II, varijantu IV i varijantu V.

Prednost varijante II je što zahtjeva najmanje promjena u postojećem proizvodnom sustavu što dovodi do najmanjih investicijskih troškova razmještaja i do minimalnog remećenja proizvodnih procesa. Međutim, to također dovodi do skromnog poboljšanja vrijednosti minimalnog ukupnog transportnog učina zbog čega se također i ova varijanta se odbacuje.

Tako odabir leži između varijante IV i varijante V te se u razgovoru s poduzećem odlučilo na odabir varijante IV kao rješenje za preoblikovanje prostornog rasporeda proizvodnog sustava.

Međutim, razmatranjem iznesenog odabira, a posebice osvrtno na teorijski dio prezentiran na početku ovog rada (poglavlja 2 i 3), jasno se dolazi do spoznaje kako minimizacija ukupnog transportnog učina neće uvijek dati odgovor na sva pitanja (ekonomska isplativost, fleksibilnost, sigurnost i sl). Drugim riječima, prilikom oblikovanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava, pa tako i onog u poduzeću TMT d.o.o., osim kriterija minimizacije ukupnog transportnog učina, značajni mogu biti i drugi kako kvalitativni tako i kvantitativni kriteriji koje je potrebno uzeti u obzir kod određenog

proizvodnog sustava. Štoviše, već samo postojanje više varijanti i mogućnosti njihovog odabira implicira kako postoje i drugi kriteriji koji su implicitno uzeti u obzir prilikom izrade pojedine varijante, a sve u cilju izrade i odabira upravo one najpovoljnije.

Upravo je zato kod oblikovanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava često potrebno izraditi nekoliko varijanti gdje se pri odabiru one najpovoljnije nameće potreba korištenja neke od metoda višekriterijalnog odlučivanja. Pritom se odabir one najpovoljnije ne može izvesti kao općeniti slučaj, već kriteriji i njihova značajnost ovisi o promatranom poduzeću.

U sljedećem će poglavlju u prvom dijelu biti ukratko prikazana kratka teorijska osnova i opća podjela dostupnih metoda koje predstavljaju podršku pri višekriterijalnom odlučivanju. U drugom dijelu tog poglavlja biti će odabrana jedna od prethodno spomenutih metoda. Također će biti detaljnije prikazana primjena navedene metode. Sigurnost u dobivene rezultate opisuje analiza njihove osjetljivosti koja ispituje kako se promjena definirane značajnosti kriterija reflektira na promjenu redoslijeda rješenja.

Cilj sljedećeg poglavlja je upotrebom odabrane metode višekriterijalnog odlučivanja podržati donositelja odluke kod koje je potrebno uzeti u obzir velik broj kriterija čiju je važnost potrebno utvrditi i primijeniti ih na nekoliko varijanti (alternativa). Također se javlja potreba utvrđivanja stabilnost tako dobivenih rezultata.

7. PRIMJENA AHP METODE KAO PODRŠKE PRI ODABIRU VARIJANTE PROSTORNOG RASPOREDA ELEMENATA PROIZVODNOG SUSTAVA PODUZEĆA TMT d.o.o.

Odlučivanje predstavlja stalan proces u kojem se na temelju spoznaja o promatranom problemu izabire između dva ili više rješenja tog problema. U kontekstu poslovnog odlučivanja veliki dio tih odluka zahtjeva puno vremena, zahtjeva obradu veće količine podataka, zahtjeva razumijevanje problematike, znanje i iskustvo s obzirom da se odluke reflektiraju u većem ili manjem opsegu na promatrani proizvodni sustav.

Višekriterijalno odlučivanje predstavlja proces donošenja odluke temeljenog na više kriterija koji su vrlo često međusobno u opreci. Pritom ono, prema [15], ne služi samo za isticanje jednog najprikladnijeg rješenja, već se može vršiti rangiranje alternativnih rješenja, njihovo grupiranje u skupinu zadovoljavajućih, ili jednostavno dijeljenje na prihvatljiva i neprihvatljiva rješenja. Problemi kod višekriterijalnog odlučivanja mogu biti vrlo složeni zbog različite važnosti pojedinih kriterija koji se javlja uz veliki broj različitih kriterija. Pritom se postavlja pitanje na koji način ispravno procijeniti važnost postavljenih kriterija, kako odrediti prioritete koji mogu dovesti do izbora najpovoljnije alternative.

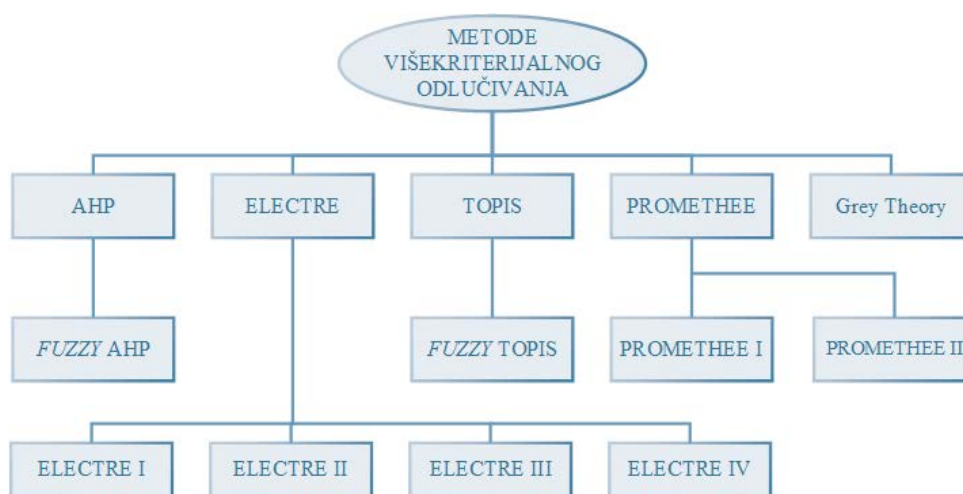
Prema [16], glavni cilj višekriterijalnog odlučivanja je poduprijeti donositelja odluke kada postoji velik izbor alternativnih rješenja za promatrani problem, a odnosi se na strukturiranje, planiranje i rješavanje problema uzimanjem u obzir više kriterija. Koristi se kao tehnika za donošenje odluke u: odabiru najpovoljnijeg rasporeda elemenata proizvodnog sustava, vrednovanju rada zaposlenika, internet bankarstvu, odabiru dobavljača, upravljanjem lancem opskrbe, odabirom strategija održavanja, nabavci stroja, prilikom upravljanja voznim parkom, upravljanju objektima, utjecajem na okoliš, odabir najprikladnijih lokacija, u marketingu, medicini i dr.

7.1. Opća podjela metoda višekriterijalnog odlučivanja

Kada je riječ o metodama višekriterijalnog odlučivanja (slika 53), opća podjela u literaturi ne postoji već se one obično dijele, ovisno o autorima prema nekim kriterijima poput načinu uključivanja donositelja odluke u proces odlučivanja, prema klasama problema koji se rješavaju pomoću tih metoda, prema postupku rješavanja i sl.

Važno je napomenuti kako se one mogu sistematizirati pomoću tih kriterija, a sve su specifične na svoj način zbog čega će se one najkorištenije uvodno prema [16], prikazati u nastavku.

Pritom će se odabir Analitičkog hijerarhijskog procesa (eng. *Analytical Hierarchy Process*, AHP) opravdati i detaljno posebno prikazati u poglavlju 7.2. zbog primjene prilikom odabira najpovoljnije varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o.



Slika 53. Osnovne metode višekriterijalnog odlučivanja prema [16]

Na slici 53 su prikazane osnovne metode višekriterijalnog odlučivanja pri čemu svaka od njih ima svoje izvedenice čija razrada seže van ovog rada te će one biti samo spomenute u okviru osnovnih metoda. S obzirom da će se AHP metoda kasnije detaljnije prikazati, razrada metoda kreće od Metode za eliminaciju i izbor izražavanja stvarnosti (franc. *Elimination et choix la réalité*, ELECTRE).

7.1.1. ELECTRE

Prema [16], ovu metodu je prvi puta predstavio Bernard Roy 1965. godine. Metoda omogućuje donositelju odluke izbor najpovoljnijeg rješenja s maksimalnom prednosti i minimalnim sukobima u funkciji različitih kriterija. Izvorno se, prema [16], ELECTRE metoda koristila za izbor najbolje radnje iz zadanih skupa radnji, ali je s vremenom evoluirala te je nađena primjena za tri glavna problema: sortiranje, rangiranje i odabir. Kroz svoju primjenu ELECTRE metoda se razvila u metodu ELECTRE I (problem odabira), a kasnije u metodu za rješavanje probleme rangiranja ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS i ELECTRE TRI (problem dodjeljivanja). Svim metodama je zajedničko da se temelje na algoritmu kojeg tvore uvjeti suglasnosti i nesuglasnosti i stvarnog indeksa suglasnosti i nesuglasnosti.

7.1.2. TOPIS

Tehnika redoslijeda preferencija prema sličnosti idealnom rješenju (eng. *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*, TOPIS) je prema [16], razvijen od strane Hwanga i Yoona

1981. godine, a temelji se na konceptu koji odabire alternativu koja bi trebala imati najmanju geometrijsku udaljenost od pozitivnog idealnog rješenja i najveću geometrijsku udaljenost od negativnog idealnog rješenja. Uspoređuje alternative određivanjem relativnih važnosti (težina) kriterija, normalizacijom rezultata za svaki kriterij te izračunom geometrijske udaljenosti između idealne alternative i svake pojedine. Koristi se za rangiranje i poboljšavanje performansi rješenja, a rjeđe za same odluke. Pritom ima, prema [16], svoju izvedenicu *Fuzzy TOPIS* metodu koja se koristi za procjenu kriterija u svakoj regiji i konačnom rangiranju svih kriterija s obzirom na regiju.

7.1.3. *PROMETHEE*

Metoda organizacije rangiranja preferencija za obogaćivanje procjene (eng. *Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*, PROMETHEE) je prema [16] razvijena 1982. godine od strane Jean Pierrea Bransa i koristila se za rješavanje problema u zdravstvu, no kasnije se njena primjena proširuje u bankarstvu, turizmu, kemijskoj industriji i sl. Najveća prednost ove metode je primjena u dva koraka od kojih je prvi konstrukcija relacije za svaki kriterij u skupu alternativa, a drugi korištenje konstruiranih relacija za rješavanje višekriterijalnog problema. U prvom se koraku formira složena relacija preferencije koja se temelji na poopćenju pojma kriterija, definira se indeks preferencija i dobiva složena relacija preferencije koja se prikazuje grafom preferencije. Konstruirana relacija preferencije potom se upotrebljava na način da se za svaku alternativu izračunavaju ulazni i izlazni tokovi u grafu. Na donositelju odluke je da li će u skup alternativa uvesti parcijalni uređaj (PROMETHEE I) ili potpuni uređaj (PROMETHEE II).

7.1.4. *Grey Theory*

Siva teorija (eng. *Grey Theory*) je naziv metode koja se koristi za proučavanje nesigurnosti, posebno primjenjiva u matematičkim analizama sustava s neizvjesnim (nepotpunim) informacijama. Prema [17], razvio ju je prof. Dengo 1982. godine, a pokazala se kao vrlo učinkovita metoda u rješavanju problema nesigurnosti, uzrokovanim nepotpunim podacima ili informacija o promatranom sustavu.

Kao što samo ime daje naslutiti, koristi se kod tzv. „sivih sustava“ u vezi s kojima je dostupna mala odn. nedovoljna količina podataka, odnosno podaci su nepoznati ili su djelomično nepoznati, a o njima postoji razmjerno malo znanja. Kada proces odlučivanja nije moguće u potpunosti odrediti, Siva teorija ispituje interakcijsku analizu, postoji veliki broj ulaznih podataka koji se razlikuju ili su nepotpuni. Prema [16], koristi se i u računalnoj grafici, prognoziranju i kontroli sustava.

7.2. AHP metoda

U cilju razumijevanja odabira i upotrebe AHP metode prilikom odabira najpovoljnije varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava, ona će biti detaljnije prikazana u ovom poglavlju uključujući definiciju, osnovne značajke, matematički model te prednosti i nedostatke.

Razlog primjene upravo ove metode leži u njenoj dugogodišnjoj širokoj primjeni u raznim područjima poput menadžmenta, industrije i proizvodnje, inženjerstvu, obrazovanju, upravljanju rizicima, odabir opreme i strategije održavanja itd. U [18] je dani pregled primjene AHP metode gdje se ona u literaturi spominje u preko 200 publikacija (od čega inženjerstvo, proizvodnja i industrija preko 50 publikacija) što dodatno ide u prilog odabiru ove metode.

7.2.1. Definicija i osnovne značajke

Analitički hijerarhijski proces (eng. *Analytical Hierarchy Process*, AHP) je naziv za jednu od najpoznatijih i najčešće korištenih metoda za višekriterijalno odlučivanje kada se proces odlučivanja (izbor raspoloživih alternativa i rangiranje) temelji na više kriterija različitih važnosti. Metoda ima veliku važnost pri rješavanju kompleksnih problema koji se sastoje od ciljeva, alternativa, kriterija i podkriterija. Prema [18], AHP metodu je razvio Thomas Saaty početkom 1970 – ih te omogućava fleksibilnost procesa odlučivanje i olakšava donositelju odluke pri postavljanju prioriteta na temelju kojih se donosi odluka uzimanjem u obzir kvalitativnih i kvantitativnih elemenata vezanih uz odluku. Prema [18], primjena AHP metode omogućava kreiranje hijerarhije problema koja služi kao temelj za odlučivanje, nakon čega se vrši uspoređivanje (u parovima) elemenata hijerarhije (ciljeva, kriterija i alternativa) te se na kraju vrši sinteza izvršenih uspoređivanja i određuju se težinski faktori svih elemenata hijerarhije (normalizacija). Pritom zbroj težinskih koeficijenata elemenata na svakoj razini hijerarhije iznosi i omogućava donositelju odluke rangiranje svih elemenata hijerarhije po važnosti.

Još jedna važna karakteristika AHP metode je što omogućava interaktivnu analizu osjetljivosti koja sagledava kako se promjenom ulaznih podataka utječe na rezultate na izlazu. Time se omogućuje simuliranje važnosti kriterija i podkriterija i promatranje tih promjena na promjena u rangiranju alternativa.

Pritom se u [18] navodi kako je cilj analize utvrđivanje da li je rang lista alternativa dovoljno stabilna u odnosu na prihvatljive promjene nad ulaznim podacima. Smatra se da ako promjena ulaznih podataka za

5 % u svim kombinacijama ne uzrokuje promjenu u rangju alternativa, postignuta je stabilnost dobivenih rezultata.

Također, u [18] se spominje još jedna vrlo važna karakteristika AHP metode, a to je provjera konzistentnosti procjene donositelja odluke. Naime, kroz uspoređivanje parova elemenata hijerarhije, do kraja procedure i sinteze rezultata, provjerava se konzistentnost donositelja odluke prilikom procjene i utvrđuje ispravnost dobivenih težinskih koeficijenata kriterija, ali i prioriteta alternativa.

7.2.2. Matematički model

Prema [18], n predstavlja broj kriterija ili alternativa čije težine w_i treba odrediti na temelju njihovih omjera koji se računaju prema izrazu (7.1):

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (7.1)$$

Na temelju tih omjera se formira matrica relativnih važnosti (matrica usporedba ili matrica odlučivanja) A u kojoj se međusobno uspoređuje svaki redak i stupac, a procjene se upisuju u to predviđeno mjesto u matrici:

$$A = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Matrica A za slučaj konzistentnih procjena kod kojih vrijedi jednađba (7.3.)

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad (7.3)$$

zadovoljava jednađbu (7.4)

$$A \cdot w = n \cdot w \quad (7.4)$$

gdje je w vektor prioriteta.

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = n \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (7.5)$$

Tako se problem rješavanja težina može riješiti u obliku problema rješavanja jednađbe (7.6)

$$A \cdot w = \lambda \cdot w \quad (7.6)$$

uz uvjet:

$$\lambda \neq 0 \quad (7.7)$$

Prema [18], matrica A ima svojstvo da je pozitivna i recipročna (ranga $r(A) = 1$) jer sadrži sve elemente koji zadovoljavaju jednađbu (7.8)

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (7.8)$$

i svi njezini redovi proporcionalni su u prvom redu, zbog čega je samo jedna svojstvena vrijednost matrice A različita od 0 i jednaka n , dok su sve ostale vrijednosti jednake 0. S obzirom kako je suma svojstvenih vrijednosti pozitivne matrice jednaka njenom tragu (tj. sumi na dijagonali), svojstvena vrijednost različita od 0 ima vrijednost n , tj.[18]:

$$\lambda_{max} = n \quad (7.9)$$

Ukoliko prema[18], matrica A sadrži nekonzistentne procjene, vektor težine w može se dobiti rješavanjem jednadžbe (7.10).

$$(A - \lambda_{max} \cdot I) \cdot w = 0 \quad (7.10)$$

Uz uvjet:

$$\sum w_i = 1 \quad (7.11)$$

Pri čemu je λ_{max} najveća svojstvena vrijednost matrice A , ili

$$A \cdot w = n \cdot w = \sum_j a_{ij} \cdot w_j = n w_i \quad (7.12)$$

Izražavanjem w iz jednadžbe (7.12) slijedi jednadžba (7.13):

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_j a_{ij} \cdot w_j, \quad za i = 1, 2, \dots, n \quad (7.13)$$

Zbog jednadžbe (7.14)

$$\sum_i a_{ij} = \frac{w_1 + w_2 + \dots + w_n}{w_j} \quad (7.14)$$

vrijedi jednadžba (7.15) koja glasi:

$$w_j = \frac{1}{\sum_i a_{ij}} \quad (7.15)$$

Iz čega slijedi izraz za izračun pojedine težine alternative (7.16):

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_j \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} \quad (7.16)$$

U cilju boljeg razumijevanja AHP metode važno je navesti aksiome na kojima se AHP metoda temelji [18]:

- *Aksiom recipročnosti* – ako je element A n puta značajniji od elementa B , tada je element B $1/n$ puta značajniji od elementa A .
- *Aksiom homogenosti* – usporedba ima smisla samo ako su elementi usporedivi.

- *Aksiom zavisnosti* – dozvoljava se upotreba među grupom elemenata jedne razine u odnosu na element druge razine, tj. usporedbe na nižim razinama ovise od elemenata na višim razinama.
- *Aksiom očekivanja* – svaka promjena u strukturi hijerarhije zahtjeva ponovno računanje prioriteta u novoj hijerarhiji.

7.2.3. Konzistentnost

Kao što je u poglavlju 7.2.1 spomenuto, AHP metoda omogućuje provjeru konzistentnosti procjena donositelja odluke nakon uspoređivanja elemenata hijerarhije. Zbog svojstva matrice A vrijedi $\lambda_{max} \geq n$ gdje je λ_{max} maksimalna vrijednost matrice, a n broj redova matrice. Razlika $\lambda_{max} - n$ se koristi u mjerenju konzistentnosti procjena i što je, prema [18], razlika manja, procjena je konzistentnija.

Saaty je u cilju procjene konzistentnosti donositelja odluke definirao mjeru (indeks) konzistencije (eng. *Consistency Index*, CI) kao devijaciju konzistencije koju definira izraz (7.17.):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (7.17)$$

Gdje je λ_{max} najveća svojstvena vrijednost dobivena iz jednadžbe (7.18) [20]:

$$\det([A] - \lambda[I]) = 0$$

Nakon toga je potrebno izračunati omjer (ne)konzistentnosti (eng. *Consistency Ratio* – CR) prema izrazu (7.18) [20]:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7.18)$$

Pri čemu je RI oznaka za slučajni indeks konzistentnosti (eng. *Random Index*, RI) čija je vrijednost, ovisno i veličini matrice n dana u nastavku u tablici 7:

Tablica 7. Vrijednosti slučajnog indeksa konzistentnosti RI [20]

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Ako, prema [20], za matricu A vrijedi $CR \leq 0,10$ procjene relativnih važnosti kriterija smatraju se prihvatljivima, odnosno konzistentnim, a u suprotnom je potrebno istražiti razloge nekonzistentnosti.

7.2.4. Proces primjene AHP metode

Prema [20], primjena AHP metode se može prikazati kroz četiri osnovnih koraka, a to su:

1. Strukturiranje problema
2. Određivanje najznačajnijeg kriterija
3. Određivanje najznačajnije alternative

4. Određivanje konačnog rješenja

U prvom se koraku razvija hijerarhijski model problema odlučivanja (kao što je to na slici 54) s postavljenim ciljem na vrhu, kriterijima i podkriterijima na nižim razinama te alternativama na dnu modela. Položaj kriterija na hijerarhijskoj razini određuje njegov utjecaj na konačni rezultat (što je kriterij više, utjecajniji je). U drugom se koraku na svakoj razini hijerarhijske strukture u parovima međusobno uspoređuju elementi strukture pri čemu se procjena donositelja odluke izražava Saatyjevom skalom koja ima 5 stupnjeva i 4 međustupnjeva odgovarajuće numeričke važnosti u rasponu od 1 do 9 (tablica 8).

Neparni brojevi imaju svojstva kojima oni odgovaraju, dok parni brojevi opisuju međuvrijednosti. Težine (važnost) kriterija određuje se usporedbom kriterija u parovima i određivanjem koliko je jedan važniji od drugog.

Tablica 8. Opis Saatyjeve skale prioriteta prema [20]

OCJENA PRIORITETA	OPISNA OCJENA
1	<i>Jednaki prioritet</i>
2	Jednaki do umjereni prioritet
3	<i>Umjereni prioritet</i>
4	Umjereni do jaki prioritet
5	<i>Jaki prioritet</i>
6	Jaki do vrlo jaki prioritet
7	<i>Vrlo jaki prioritet</i>
8	Vrlo jaki do apsolutni prioritet
9	<i>Apsolutni prioritet</i>

Time je procjena pretvorena u brojčanu vrijednost koja se dalje obrađuje i uspoređuje s preostalim kriterijima. Računaju se za svaki kriterij u hijerarhiji i dozvoljavaju usporedbu različitih i često nemjerljivih elemenata na racionalan način. Nakon toga, treći korak je određivanje najznačajnije alternative do koje se dolazi procjenom relativne važnosti elemenata za odgovarajuću razinu hijerarhijske strukture problema pomoću prikladnog matematičkog modela izračunavaju se lokalni prioriteti (težine) kriterija, podkriterija i alternativa koji se sintetiziraju u ukupne prioritete alternativa koji se dobiva na način da se sumiraju svi lokalni prioriteti alternative ponderirani s težinama elemenata više razine. Posljednji korak se sastoji u provođenju analize osjetljivosti.

7.2.5. Prednosti i nedostaci AHP metode

AHP metoda se u praksi dokazala sve boljim uporabnim karakteristikama i vrlo širokim područjem primjene što dovodi do toga da se kod ove metode može izvesti više prednosti u odnosu na nedostatke. No ipak, metoda ima nekoliko nedostataka koji ograničavaju njenu primjenu.

Prema [18] prednosti AHP metode su sljedeće:

- Metoda je dokazana u praksi, osigurava fleksibilnost pri rješavanju kompleksnih problema i područje primjenjivosti je vrlo široko.
- Metoda omogućuje strukturiranje problema odlučivanja i simuliranje procesa donošenja odluka od definiranja cilja, kriterija i alternativa pa sve do uspoređivanja kriterija i alternativa u parovima i utvrđivanje prioriteta svih alternativa u odnosu na postavljeni cilj.
- Defragmentira realni proces odlučivanja na način da razlaže problem u hijerarhijsku strukturu elemenata koji čine problem pri čemu uvažava činjenicu da donositelj odluke prilikom procesa procjene uglavnom ne razdvaja proces procjenjivanja kriterija od alternativa.
- Integrira kvalitativne i kvantitativne elemente pri odlučivanju primjenom apsolutne skale za mjerenje kvalitativnih i kvantitativnih kriterija koji su temeljeni na procjenama eksperta.
- Uspješno identificira i ukazuje na nekonzistentnost donositelja odluke praćenjem nekonzistentnosti u procjenama tijekom cijelog postupka, izračunavanjem indeksa konzistencije.
- Redundantnost pri uspoređivanju dva kriterija ili alternativa dovodi do toga da je AHP metoda neosjetljiva na greške u procjenjivanju.
- Primjena AHP metode u odlučivanju povećava razinu znanja o problemu, a procesom odlučivanja dolazi se do približnog rješenja problema najčešće znatno brže nego na većini sastanaka te s manjim troškovima procesa donošenja odluke.
- Dobiveni rezultati mogu predstavljati ulazne informacije za neki drugi projekt ili studiju izvodljivosti.
- Ukoliko se koristi kod grupnog donošenja odluke, ova metoda poboljšava razinu kvalitete komunikacije između donositelja odluka s obzirom da se moraju usuglasiti oko svakog kriterija i zajedničke procjene koje se unose u matricu. Dodatno, ukoliko se radi o grupnom odlučivanju u kojem svaki član smije unijeti vlastitu procjenu, izbjegava se mogućnost pojave jedinstvenog mišljenja koji može biti posljedica pritiska jednih donositelja odluka na druge.
- Rezultati dobiveni ovom metodom sadrže rang alternativa, ali i informacije o težinskim koeficijentima kriterija u odnosu na cilj i podkriterije u odnosu na kriterije.

- Primjena olakšana sofisticiranim računalnim aplikacijama koje u sebi imaju ugrađenu AHP metodu u kojima je omogućeno jednostavno modeliranje problema (*Expert Choice, SuperDecision, EasyAHP, MakeItRational, Priority Estimation Tool* i sl.)

Kada je riječ o nedostacima AHP metode, njih ima razmjerno malo u odnosu na prednosti iz razloga što se mnogi znanstvenici bave unapređenju te metode u svim područjima primjene. Nedostaci AHP metode koji se mogu posebno izdvojiti su sljedeći [18]:

- Saatyjeva skala relativne važnosti je nedovoljno velika (premale rezolucije) za uspoređivanje kriterija i alternativa u parovima vezano uz probleme odlučivanja.
- Ne dozvoljava neusporedive alternative.
- Postoji veliki broj potrebnih usporedba parova kod većine problema.
- Vrlo je teško postizanje prihvatljivog omjera konzistencije.
- Postoji opasnost gubitka detaljnih i često važnih informacija uslijed agregacije koja može rezultirati kompenzacijom između dobrih rezultata na nekim kriterijima, ali i loših rezultata na drugim kriterijima.

7.3. Primjena AHP metode

U ovom dijelu poglavlja biti će ukratko prikazana primijenjena AHP metode kao podrške za odabir najpovoljnije varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. Za korištenje AHP metode koristit će se računalna aplikacija *Expert Choice VII.5*, a provest će se kroz sljedeće korake:

1. Definicija i analiza kriterija
2. Izračun težina kriterija i provjera konzistentnosti
3. Procjena varijanti u odnosu na kriterije
4. Analiza osjetljivosti

U cilju boljeg razumijevanja koraka prilikom primjene AHP metode kao podrške za odabir varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o., u nastavku će pojedini koraci biti detaljnije prikazani.

7.3.1. Definicija i analiza kriterija

Odabir kriterija predstavlja ključni korak u procesu odabira prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava jer se na temelju njih izrađuju i uspoređuju izrađeni modeli u cilju izbora najprikladnijeg. Kriteriji predstavljaju temelj kojim se nastoje formulirati i izraziti problemi koji se

javljaju prilikom izrade, ali i odabira najpovoljnijeg rješenja. Drugim riječima, predstavljaju temelj za donošenje dobre i kvalitetne odluke. Pritom treba imati na umu koje kriterije uzeti u razmatranje, odnosno potrebno je izabrati one kriterije koji su relevantni i karakteristični za promatrani problem. Na temelju podataka proizašlih iz proučavanja literature [21][22][23] i uzimanjem u obzir potrebe promatranog proizvodnog sustava, odabrani su sljedeći kriteriji:

- Transportni učin
- Trošak razmještaja
- Potreban prostor
- Iskoristivost prostora
- Održavanje
- Fleksibilnost
- Mogućnost proširenja
- Iskoristivost radne snage

Transportni učin predstavlja kriterij definiran jednačbom (3.4) odnosno (3.5) koji se nastoji minimizirati, odnosno nastoji se realizirati takav prostorni raspored elemenata proizvodnog sustava pri kojem su oni strojevi koji imaju najveći broj prijevoza između sebe (transportni intenzitet) smješteni jedan do drugog. Time se nastoji smanjiti vrijednost transportnog učina, skraćanje trajanja transportnog ciklusa, transportne udaljenosti, skraćanje trajanja ciklusa izrade proizvoda i povećanje produktivnosti.

Trošak razmještaja predstavlja ekonomski najznačajniji kriterij koji vrlo jednostavno opisuje opsežnost i složenost procesa određivanja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava. Obuhvaća troškove vezane uz temeljenje, selidbu, montažu i demontažu, puštanje u rad te trošak uslijed smanjenog tehnološkog kapaciteta (ispad stroja iz rada) proizvodnog sustava. U promatranom proizvodnom sustavu, posebice u odjelu strojne obrade, radi se o strojevima impresivnih dimenzija i masa pri čemu je razmještaj, a posebice temeljenje vrlo financijski zahtjevan zahvat koji se u svakom slučaju nastoji izbjeći. Prilikom razmatranja troška razmještaja treba voditi računa o tome da li će rast produktivnosti proizvodnog sustava uslijed novog rasporeda pokriti (između ostalog) trošak razmještaja.

Potreban prostor predstavlja minimalni potreban pravokutni prostor za smještaj svih potrebnih tehnoloških kapaciteta (strojeve, alate, stezne naprave, mjerne uređaje i sl.), pomoćne opreme i prostor za zaposlenike. Nastoje se smanjiti režijski troškovi (grijanje, hlađenje, utrošak električne energije), ali i troškovi uslijed građevinskih zahvata poput kupnje zemljišta, izgradnja proizvodnih hala i slično.

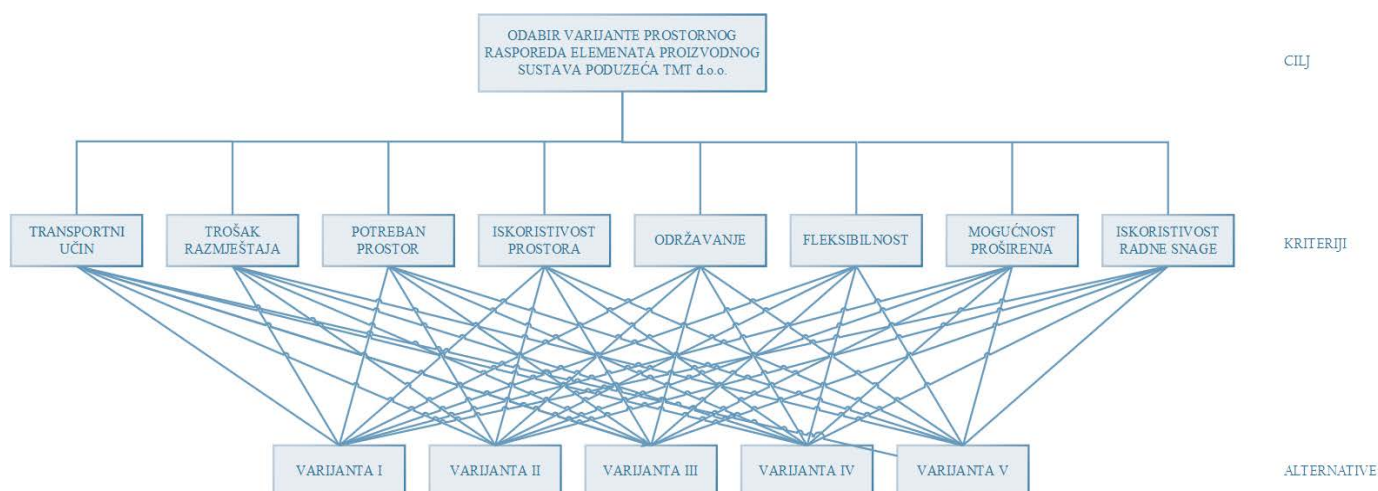
Iskoristivost prostora je kriterij kojim se opisuje na koji način i u kolikoj mjeri se iskoristio dostupni prostor proizvodnog sustava u pogledu zemljišta i objekata na zemljištu.

Održavanje predstavlja kriterij kojim se nastoji povećati sigurnost prilikom rada i povećanja pouzdanosti rada elemenata proizvodnog sustava. Nastoji se povećati sigurnost radne okoline zaposlenika, minimizirati i eliminirati mogućnost pojavljivanja ozljeda u radu, smanjiti vrijeme trajanje popravaka, smanjiti broj ispada opreme iz rada, očuvanje određene razine kvalitete tehnoloških kapaciteta. Drugim riječima, cilj je osigurati stalnu funkcionalnu sposobnost i očuvanje proizvodnih i pomoćnih postrojenja te ostale opreme, uvažavajući pritom potrebne zahtjeve za sigurnosti rada zaposlenika.

Fleksibilnost predstavlja sve značajniji kriterij koji se javlja kao posljedica promjena na tržištu, a njime sa nastoji odrediti u kolikoj mjeri promatrani raspored elemenata proizvodnog sustava može podržati realizaciju i zadovoljenje želja i potreba kupaca u cilju osiguranja visoke poslovne sposobnosti i konkurentske prednosti. Više o fleksibilnosti proizvodnog sustava opisano je u poglavljima 2.1 i 2.2.

Mogućnost proširenja predstavlja kriterij sličan fleksibilnosti koji se međutim prvenstveno odnosi na povećanje tehnoloških kapaciteta širenjem proizvodnih hala, strojeva i opreme. Razlika u fleksibilnosti je prvenstveno u tome što se fleksibilnost odnosi na učinkovitu upotrebu postojećih tehnoloških kapaciteta.

Iskoristivost radne snage predstavlja kriterij kojim se određuje koliko i na koji način zaposlenici obavljaju radne zadatke unutar radnog vremena. Radna snaga predstavlja ključan potencijal proizvodnog sustava koji se nastoji u što većoj mjeri iskoristiti uvažavajući pritom potrebe zaposlenika odgovarajućim oblikovanjem proizvodnog prostora i proizvodnih zadataka.



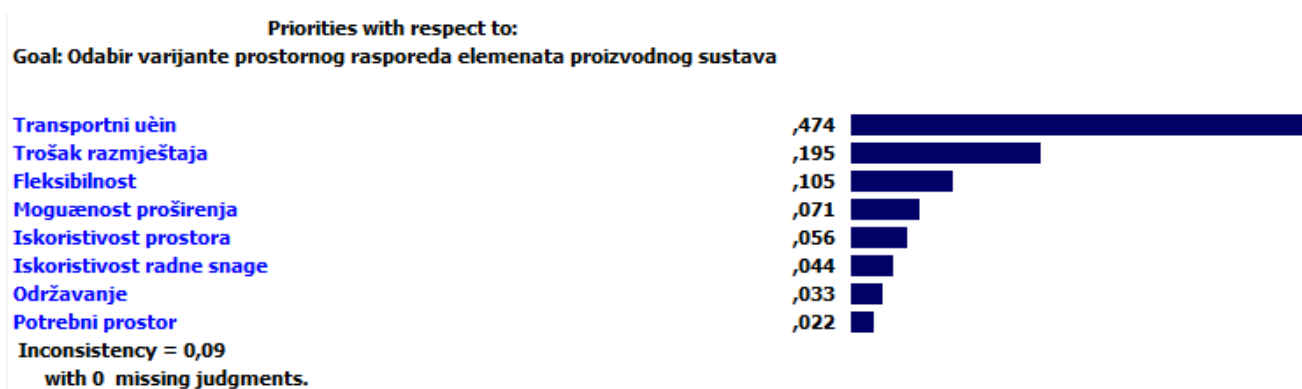
Slika 54. Prikaz hijerarhijskog modela

Na slici 54 prikazana je hijerarhijska struktura problema odabira varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. Struktura se sastoji od tri razine. Na vrhu se nalazi cilj, odabir najpovoljnije varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava. U

srednjem dijelu se nalaze prethodno obrađeni kriteriji dok su alternative na dnu i predstavljaju izrađene varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava prikazanih u poglavlju 6.

7.3.2. Izračun težina kriterija i provjera konzistentnosti

Nakon što su kriteriji definirani, korištenjem računalne aplikacije *Expert Choice VII.5* izvršena je njihova relativna procjena na temelju koje se računaju pripadajuće težine te se provjerava konzistentnost odabira donositelja odluke. Pritom se koristi spomenuta Saatyjeva skala te normalizacija i minimizacija u slučaju kriterija transportnog učina zbog izravnih broječnih vrijednosti. Na slici 55 prikazane su težine kriterija i dobivena konzistentnost.



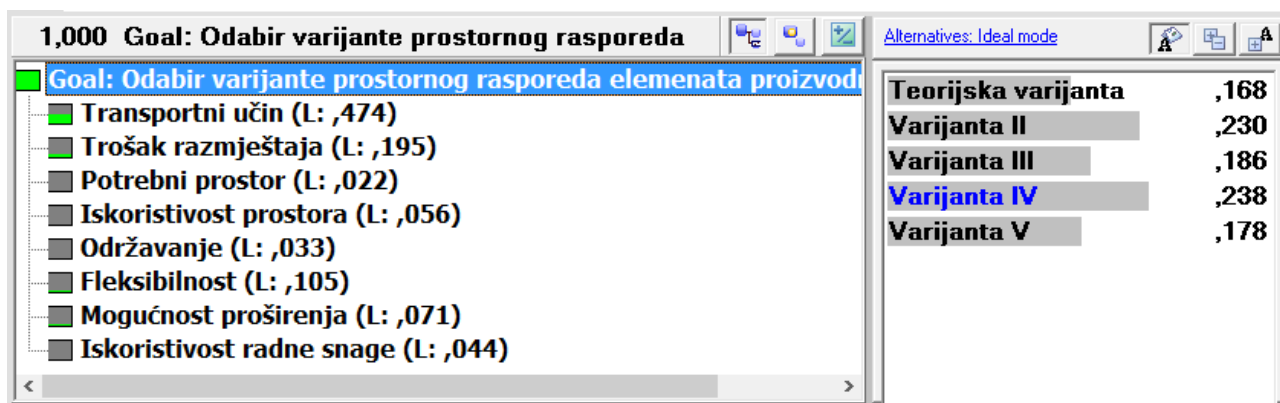
Slika 55. Težine kriterija i konzistentnost

Na slici 55 je vidljivo kako, sukladno zadatku, transportni učin predstavlja daleko najznačajniji i najutjecajniji kriterij s težinom 0,474. Potom slijede troškovi razmještaja (0,195) i fleksibilnost (0,105) dok potrebni prostor predstavlja najneutjecajniji kriterij (0,022). Razlog tome leži u samom planu mikrolokacije (slika 22) na kojem je vidljivo kako (u slučaju javljanja potrebe) postoji značajna količina raspoloživog građevinskog zemljišta, te se promjene režijskih troškova se u svim varijantama pretpostavljaju zanemarive.

Omjer nekonzistentnosti je 0,09 što zadovoljava uvjet iz poglavlja 7.2.3 koji govori kako omjer (ne)konzistentnosti mora biti manji od 0,10 odn. procjene relativnih važnosti kriterija smatraju se prihvatljivima. Nakon izračunatih težina kriterija i provjere (ne)konzistentnosti procjene donositelja odluke slijedi sljedeći korak, a to je vrednovanje varijanti u odnosu na kriterije.

7.3.3. Procjena varijanti u odnosu na kriterije

Nakon što su svi kriteriji uneseni i izračunate su njihove težine, potrebno je rangirati varijante (alternative) u odnosu na pojedine kriterije. Na temelju podataka o pojedinim varijantama donosi se procjena između promatrane dvije varijante (alternative) i to se vrednuje pomoću Saatyjeve skale.



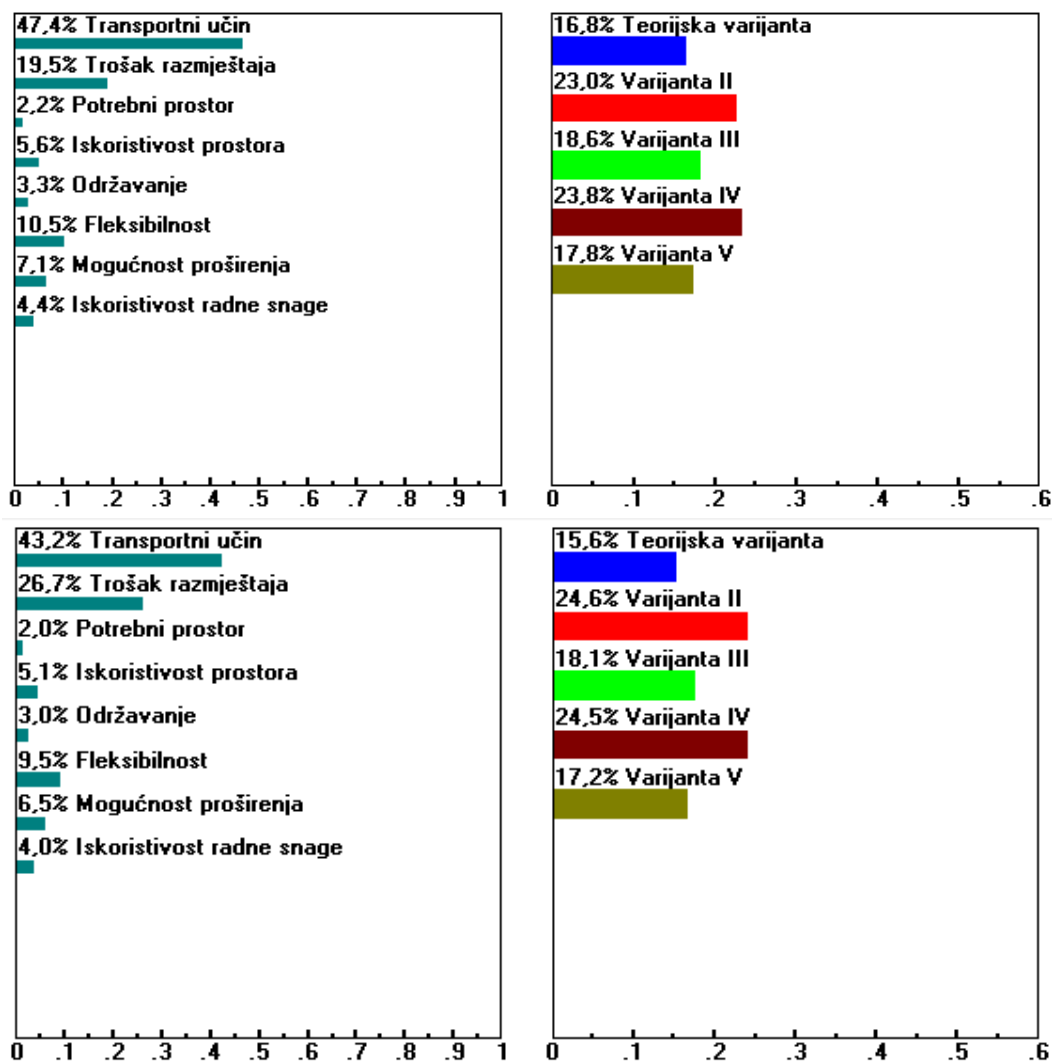
Slika 56. Prikaz rezultata odabira

Na slici 56 je vidljivo kako je rezultat primjene AHP metode rješenje varijanta IV (s težinom od 0,238) što se ujedno poklapa s rezultatom odabira od strane poduzeća. Potom slijede varijanta II (0,230), varijanta III (0,186), varijanta V (0,178) i teorijska varijanta (0,168). Osvrtom na odabranu varijantu u prethodnom poglavlju ustanovljuje se kako je u razgovoru s poduzećem također odabrana varijanta IV koja ujedno predstavlja najprikladnije rješenje za preoblikovanje prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o.

7.3.4. Analiza osjetljivosti

Kao što je već u poglavlju 7.2.1. spomenuto, analiza osjetljivosti se provodi s ciljem utvrđivanja u kolikoj se mjeri promjene nad ulaznim podacima reflektiraju na promjene na izlaznim podacima. Može se očekivati da procjene donositelja odluke mogu varirati u nekim rasponima, a da još uvijek budu u skladu s mišljenjem donositelja odluke. Cilj analize osjetljivosti je utvrditi da li je redoslijed rješenja varijanti (alternativa) dovoljno stabilan u odnosu na prihvatljive promjene ulaznih podataka. Za analizu osjetljivosti koristit će se opcije graf dinamičnosti (eng. *Dynamic*), graf performansi (eng. *Performance*) i graf gradijenta (eng. *Gradient*) koje su prikazane u nastavku.

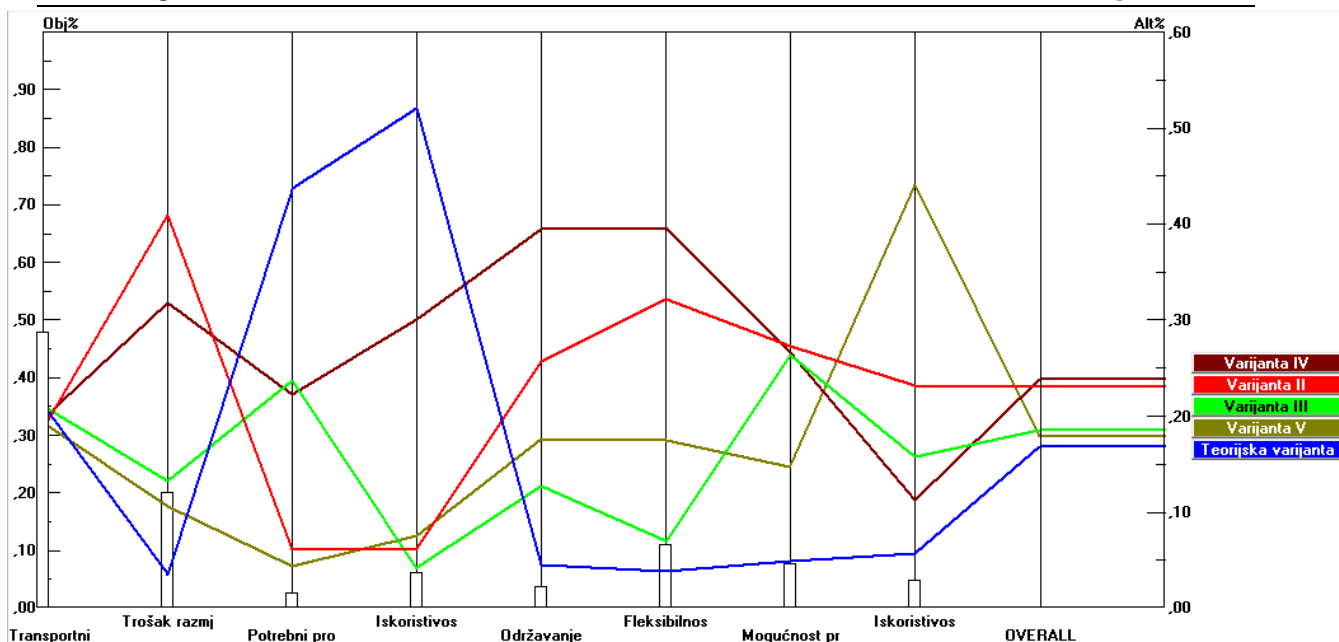
Grafom dinamičnosti moguće je pratiti promjenu prioriteta varijanti (alternativa) u odnosu na promjene težina kriterija. Težine kriterija se mogu promijeniti povlačenjem miša ulijevo ili udesno pri čemu se prilikom promjene jedne, preostale mijenjaju proporcionalno. Prema [18], graf dinamičnosti daje odgovor na pitanje kolika bi trebala biti težina promatranog kriterija da bi željena alternativa bila u prednosti u odnosu na preostale.



Slika 57. Usporedba grafova dinamičnosti

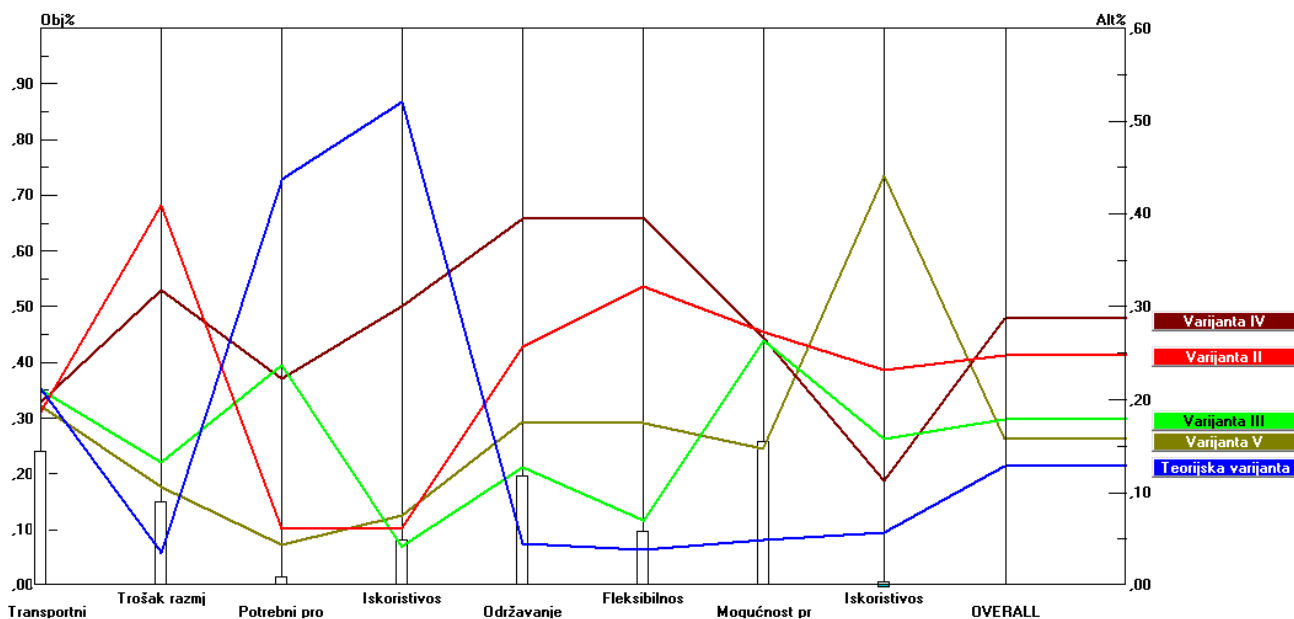
Iz slike 57 je vidljivo koja je potrebna promjena kombinacija težina pojedinih kriterija kako bi prva sljedeća alternativa (varijanta II) dobivala prednost nad početnim rješenjem (varijanta IV).

Analiza osjetljivosti grafom performansi prikazuje prioritete alternativa te ih stavlja u odnos s težinama pojedinih kriterija. Omogućava pregled položaja pojedinih alternativa u odnosu na kriterije. Analiza osjetljivosti se provodi promjenom težina pojedinih kriterija na grafu pri čemu se proučava promjena u prioritetima varijanti (alternativa).



Slika 58. Analiza osjetljivosti - graf performansi dobivenog rješenja

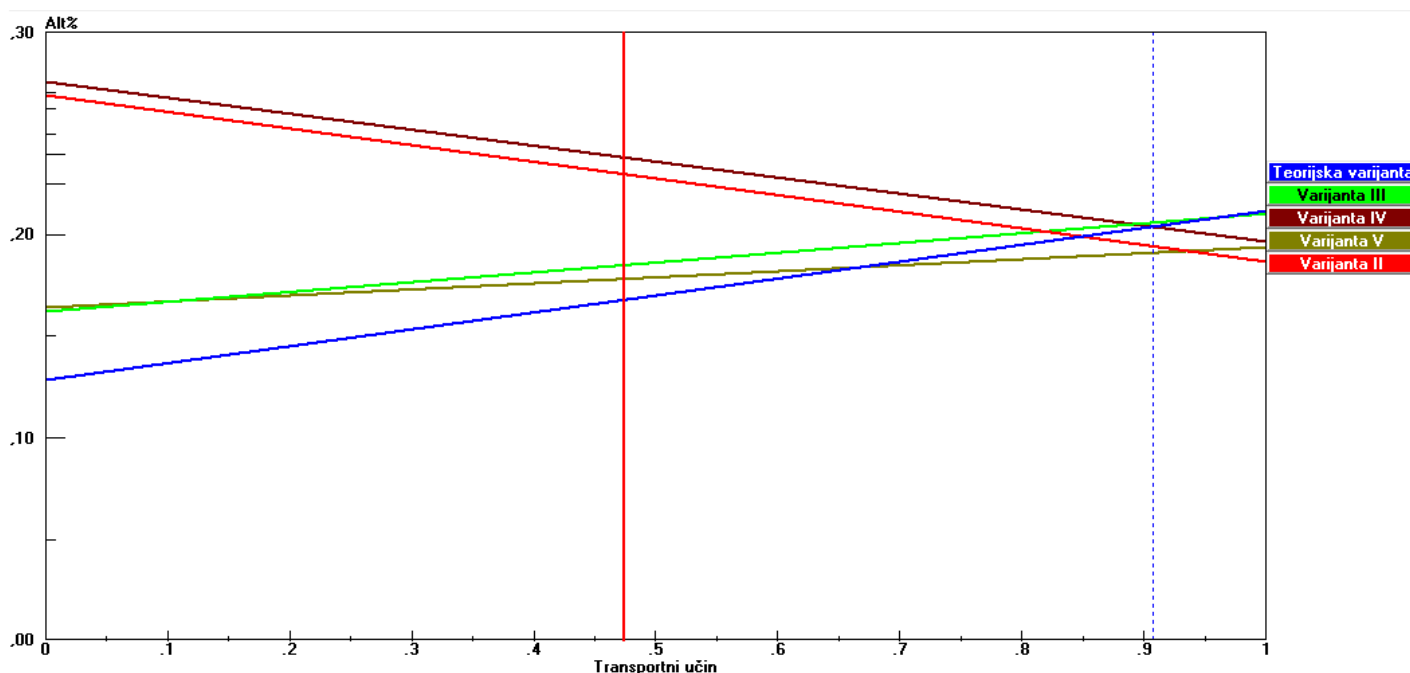
Na desnoj strani y - osi grafa performansi na slici 58 prikazani su prioriteti i redosljed alternativa dobivenog rješenja. Pritom se može očitati kako je najpovoljnija alternativa varijanta IV, a najnepovoljnija teorijska varijanta. Na lijevoj strani y – osi prikazane su težine pojedinih kriterija. Na x - osi grafa prikazani su kriteriji čiji stupci označavaju težine pojedinih kriterija, odnosno njihov utjecaj na pojedinu alternativu. Može se vidjeti kako kriteriji održavanje, fleksibilnost i mogućnost proširenja pozitivno utječu na varijantu IV, dok potrebni prostor i iskoristivost radne snage negativno utječu na varijantu IV.



Slika 59. Analiza osjetljivosti - graf performansi s promijenjenim težinama kriterija

Na slici 59 je prikazano kako ni promjena kriterija iznad 5 % ne utječe na promjenu redoslijeda alternativa. Iz navedenog se zaključuje kako je rang lista alternativa dovoljno stabilna u odnosu na prihvatljive promjene nad ulaznim podacima (koji mogu biti posljedica subjektivnosti donositelja odluke).

Graf gradijenta prikazuje prioritete alternativa u odnosu na težine promatranog kriterija. Za razliku od prethodno navedenih grafova on daje uvid u to koliko su prioritete alternativa osjetljivi na promjene težina promatranih kriterija.



Slika 60. Analiza osjetljivosti – graf gradijenta

Vertikalna crvena linija (slika 60) prikazuje težinu kriterija koja je jednaka onima na slici 55, odnosno jednaka izračunatim težinama kriterija. S desne strane je prikazan redoslijed alternativa kada bi težina kriterija transportni učin bila 1 (odn. 100 %). Isprekidana plava linija prikazuje trenutno odabranu težinu kriterija transportnog učina (0,91) i prikazuje koja bi varijanta (alternativa) predstavljala rješenje u tom slučaju (varijanta III). Također, iz slike 60 je vidljivo kako smanjivanjem težine kriterija transportni učin ne bi došlo do značajno različito g rješenja, jer bi redoslijed alternativa ostao isti, jedino bi varijanta III i varijanta V zamijenile mjesta.

Usporedbom rezultata AHP metode i rezultata odabira temeljenom na ukupnom transportnom učinku opravdavaju i dodatno naglašavaju varijantu IV kao onu varijantu prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava poduzeća TMT d.o.o. koja predstavlja najprikladnije rješenje.

8. ZAKLJUČAK

Projektiranje proizvodnih sustava predstavlja iznimno odgovornu djelatnost s obzirom da uz sebe veže značajna financijska sredstva, a generirana projektna rješenja često imaju utjecaj dulje vremensko razdoblje.

Generalni cilj projektiranja novih i postojećih proizvodnih sustava je dovođenje u sklad svih glavnih i pomoćnih sastavnih elemenata (proizvodne snage). Također je važno osigurati dostupnost i efikasnu iskoristivost potrebnih uvjeta te uspostaviti stabilnu strukturu razmjene informacija koju karakterizira visoka kvalitativna i kvantitativna razina.

Analiza toka materijala poduzeća TMT d.o.o. izvedena je na temelju plana mikrolokacije, podataka iz tehnoloških postupaka izrade i montaže te sastavnica materijala i proizvoda ustupljenih od strane poduzeća. Na temelju tih podataka izrađene su matrice transportnih udaljenosti, intenziteta i učina kao temeljnog kriterija za odabir varijante rješenja prostornog rasporeda proizvodnog sustava. Snimljeno stanje poduzeća i izrada teorijske varijante prostornog rasporeda poslužili su kao temelj za identifikaciju potencijalnih poboljšanja, izradu realnih varijanti rješenja, ali i kao povratna veza nužna za njihovo vrednovanje i odabir.

Uz razne kriterije poput troškova razmještaja, potrebnog prostora, iskoristivosti prostora, održavanja, fleksibilnosti, mogućnosti proširenja i iskoristivosti radne snage u okvirima ovog rada opravdano je dominantan odabir najprikladnijeg rješenja prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava na temelju ukupnog transportnog učina. Valja naglasiti kako je nemoguće generalizirati proces odabira rješenja varijanti prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava, već se pojedini kriteriji mijenjaju ovisno o projektnom zadatku i interesnom području promatranog poduzeća i njegovog menadžmenta.

Rezultati odabira temeljenom na ukupnom transportnom učinku te primjenom višekriterijalnog odlučivanja se u velikoj mjeri poklapaju što dodatno potvrđuje važnost transportnog učina, ali i primjene samog višekriterijalnog odlučivanja. Odstupanje kod rangiranja varijanti postoji kod varijanti II i V iz razloga što varijante II i teorijska varijanta nisu u potpunosti isključene kod primjene AHP metode već se njihova neizvedivost reflektirala kod vrednovanja u odnosu na za to primjerene kriterije odgovarajuće težine. Također se u ovom radu potvrđuje prikladnost AHP metode za odabir najpovoljnije varijante prostornog rasporeda elemenata proizvodnog sustava. Njena primjena omogućuje sistematizirani prikaz međusobnog utjecaja alternativa i kriterija na postavljeni cilj.

Dodatno, upotrebom AHP metode olakšana je i strukturirana komunikacija oko vrednovanja i odabira varijanti čime se nastoji u što većoj mjeri osigurati objektivnost. AHP metoda omogućuje ispitivanje

dobivenih rezultata analizom njihove osjetljivosti, ali i provjerom nekozistentnosti donositelja odluke.

Uz to, omogućuje dinamičku promjenu važnosti kriterija s uvidom kako se promjena težina kriterija reflektira na promjenu ranga varijanti, odnosno na konačno rješenje.

Prilikom izrade varijanti prostornog rasporeda elemenata promatranog proizvodnog sustava, prikazano je kako je moguće postići smanjenje ukupnog transportnog učinka za vrijednosti od 22 % pa sve preko 53 %. što u prijevodu znači smanjenje prijeđene udaljenosti na godišnjoj razini u iznosu od 113 km pa sve do 268 km. Za odabranu varijantu ta ušteda iznosi 173050 m, odnosno 173 km godišnje. Osim skraćanja trajanja ciklusa proizvodnje i povećanje produktivnosti, fleksibilnosti, sigurnosti, smanjenje prijeđenih udaljenost se također pozitivno odražava na sustav rukovanja materijalom.

Ovaj rad predstavlja zaokruženu cjelinu koja, temeljena na teorijskoj osnovi iznesenoj u poglavljima 2 i 3, razrađuje sve procese od analize trenutnog stanja, identifikacije potencijalnih problema (i mogućih mjesta poboljšanja), uz uvažavanje problema i postojećih ograničenja, opisuje izradu varijanti prostornog rasporeda elemenata te njihovo međusobno vrednovanje u cilju dobivanja najpovoljnijeg rješenja koje je u ovom slučaju varijanta IV.

LITERATURA

- [1] Predavanja iz kolegija Projektiranje proizvodnih sustava, Zoran Kunica, FSB Zagreb 2015.
- [2] M. Schenk, S. Wirth, E. Müller, Fabrikplanung und Fabrikbetrieb, Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik (2. izdanje), Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2014.
- [3] Koren Y., Ulsoy G., Vision, Principles and Impact of Reconfigurable Manufacturing Systems, University of Michigan, Powertrain International, Volume 5, Number 3, 2002.
- [4] Doboviček S., Optimiranje konceptualnog modela kontrolnog sustava pri projektiranju proizvodnog sustava, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, doktorski rad, Rijeka, 2014.
- [5] Koren Y., General RMS Characteristics. Comparison with Dedicated and Flexible Systems, Springer 2006.
- [6] Dileep R. Sule, Manufacturing Facilities – Location, Planning and Design, Taylor & Francis Group, 2008.
- [7] Yusuf Y. Y., Sarhadi M., Gunasekaran A., Agile Manufacturing: The drivers, concepts and attributes, Elsevier 1999.
- [8] Gunasekaran A., Agile Manufacturing: Enablers and an Implementation Framework, Taylor & Francis, 2010.
- [9] Tompkins J., White J., Bozer Y., Frazelle E., Tanchoco J., Trevino J., Facilities Planning, 2. izdanje, 1996.
- [10] Heragu S. Sunderesh, Facilities Design Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Group, 2008
- [11] Nurul N.N., Lai – Soon L., Heuristics and Metaheuristics Approaches for Facility Layout Problems: A Survey, University Putra Malaysia Press 2016.
- [12] Talbi, El-Ghazali. 2009. Metaheuristics - From design to implementation. John Wiley & Sons. Hoboken.
- [13] [https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-planning/factory-design/factorycad.shtml#lightview%26url=/en_us/Images/4919_tcm1023-4949.pdf%26title=FactoryCAD%26description=FactoryCAD Fact Sheet%26docType=pdf](https://www.plm.automation.siemens.com/en_us/products/tecnomatix/manufacturing-planning/factory-design/factorycad.shtml#lightview%26url=/en_us/Images/4919_tcm1023-4949.pdf%26title=FactoryCAD%26description=FactoryCAD%20Fact%20Sheet%26docType=pdf) (Pristupljeno: 15.5.2017.)

-
- [14] <http://www.tmt.hr> (Pristupljeno: 10.02.2017.)
- [15] Multi-criteria analysis: a manual, Department for Communities and Local Government London, 2009.
- [16] Aruldoss, M., Lakshmi, M., T., Venkatesan, P., V.: A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications, American Journal of Information Systems, Vol.1, No. 1, Science and Education Publishing, 2013.
- [17] Li, G., D., Yamaguchi, D., Nagai, M.: A Grey based Approach to Suppliers Selection Problem, Proceedings of the International Conference on Parallel and Distributed Processing Techniques and Applications, Vol. 2, 2006.
- [18] Doktorski rad: Nina Begičević, Višekriterijski modeli odlučivanja u strateškom planiranju uvođenja e-učenja, Fakultet organizacije i informatike Varaždin, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [19] Saaty T., Decision making with the analytic hierarchy process, Int. J. Services Science, 2008.
- [20] Lisjak D., Tošić M., Analitički hijerarhijski proces, vježbe iz kolegija Održavanje, FSB, 2015.
- [21] Yang L., Deuse J., Multiple-attribute Decision Making for an Energy Efficient Facility Layout Design, SciVerse ScienceDirect, 2012.
- [22] Hadi-Vencheh A., Mohamadghasemi A., An integrated AHP-NLP methodology for facility layout design, Jorunal of Manufacturing Systems, 2012.
- [23] Partovi F., Burton J., An Analytical Hierarchy Approach to Facility Layout, 1992.
- [24] <https://www.youtube.com/watch?v=VW3S0MILnAI> 29.06.2017.
- [25] <https://www.youtube.com/watch?v=X-MjtUDWFUo> 29.06.2017.
- [26] <https://i.ytimg.com/vi/2X8QWpfAjGs/maxresdefault.jpg> 29.06.2017.

PRILOZI

I. CD-R disc