

# Višekriterijalno odlučivanje u procesu odabira prostornog rasporeda proizvodnog pogona

---

**Mudrinić, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*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:235:425899>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Mudrinić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Goran Đukić, dipl. ing.

Student:

Ivan Mudrinić

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem se obitelji i Matei na pruženoj podršci i ljubavi tokom cijeloga obrazovanja. Posebno se zahvaljujem mentoru dr. sc. Goranu Đukiću i njegovom asistentu dr. sc. Tihomiru Opetuku koji su mi svojim savjetima i sugestijama omogućili da uspješno završim ovaj rad.

Ivan Mudrinić



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 i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 08-07-2016 ilog
Klasa: 602-04/16-613
Ur.broj: 15-1703-16-291

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Ivan Mudrinić** Mat. br.: 0035187231

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Višekriterijalno odlučivanje u procesu odabira prostornog rasporeda proizvodnog sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Multi-criteria decision making in selection of plant layout**

Opis zadatka:

U procesu oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnog pogona osim kriterija minimizacije transportnog učina, kao dominantnog u modelima određivanja optimalnog prostornog rasporeda, realno su važni i mnogi drugi kvantitativni i kvalitativni kriteriji. Iz tog razloga metodologija oblikovanja prostornog rasporeda zahtijeva izradu više varijanti i odabir najpogodnije, te se nameće nužnost primjene procesa višekriterijalnog odlučivanja. To podrazumijeva određivanje bitnih kriterija, određivanje njihove važnosti te ocjenjivanje varijanti prema odabranim kriterijima.

U radu je potrebno:

- Objasniti problematiku određivanja najpogodnijeg prostornog rasporeda proizvodnog sustava.
- Temeljem pretraživanja relevantnih izvora provesti analizu i sistematizaciju mogućih kriterija odlučivanja.
- Temeljem pretraživanja relevantnih izvora dati prikaz metoda višekriterijalnog odlučivanja koje se koriste (ili se mogu koristiti) za odabir najpogodnije prostornog rasporeda proizvodnog sustava.
- Na konkretnom primjeru oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnog pogona ilustrirati problem odabira najpogodnije varijante prostornog rasporeda.
- Za odabranu metodu višekriterijalnog odlučivanja prikazati cijeli proces određivanja kriterija, njihove važnosti te ocjenjivanja varijanti.


Zadatak zadan:  
5. svibnja 2016.

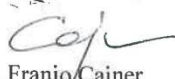
Rok predaje rada:  
7. srpnja 2016.

Predvideni datum obrane:  
13., 14. i 15. srpnja 2016.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

  
Izv.prof. dr.sc. Goran Đukić

  
Prof. dr. sc. Franjo Čajner

## SADRŽAJ

1. UVOD.....	9
2. PROSTORNI RASPORED PROIZVODNOG SUSTAVA.....	10
2.1. Osnovno o oblikovanju prostornog rasporeda .....	10
2.2. Problematika određivanja najpovoljnijeg prostornog rasporeda.....	10
2.3. Problemi odlučivanja u procesu odabira prostornog rasporeda .....	12
2.4. Proces planiranja proizvodnog pogona .....	13
2.5. Načela projektiranja proizvodnog pogona .....	16
2.6. Metode izrade prostornog rasporeda .....	18
2.6.1. Izrada prostornog rasporeda prema vrsti obrade .....	18
2.6.2 Izrada prostornog rasporeda prema predmetu rada .....	19
2.7. Optimiranje prostornog rasporeda proizvodnog sustava .....	22
2.7.1 Mađarska metoda .....	22
2.7.2 Modificirani postupak trokuta.....	23
2.7.3. Kompjuterski potpomognuta izrada prostornog rasporeda .....	27
3. KRITERIJI ODLUČIVANJA U PROCESU ODABIRA PROSTORNOG RASPOREDA PROIZVODNOG SUSTAVA .....	29
3.1. Analiza kriterija.....	29
3.2. Sistematizacija kriterija .....	33
4. VIŠEKRITERIJALNO ODLUČIVANJE .....	35
4.1. Metode višekriterijalnog odlučivanja.....	36
4.1.1. ELECTRE .....	37
4.1.2. TOPSIS.....	37
4.1.3. PROMETHEE.....	38
4.2. Primjena metoda višekriterijalnog odlučivanja.....	39
5. AHP METODA VIŠEKRITERIJALNOG ODLUČIVANJA.....	41
5.1. Definicija, struktura i način primjene AHP metode .....	41
5.2. Konzistentnost .....	44
5.3. Matematički temelj AHP metode .....	46
5.4. Prednosti i nedostaci AHP metode.....	47

---

6. PRIMJENA AHP METODE U PROCESU ODABIRA PROSTORNOG RASPOREDA NA KONKRETNOM PRIMJERU .....	50
6.1. Snimanje postojećeg stanja .....	51
6.2. Izrada varijanti prostornog rasporeda proizvodnog sustava.....	55
6.3. Provedba AHP metode u procesu izbora prostornog rasporeda proizvodnog sustava..	64
6.3.1. Ocjenjivanje i izračun težina kriterija .....	65
6.3.2. Ocjenjivanje varijanti prema kriterijima .....	69
6.3.3. Analiza osjetljivosti rezultata .....	79
7. ZAKLJUČAK.....	89
8. LITERATURA .....	91

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Prikaz prostornog rasporeda strukturiranog prema vrsti obrade [1].....	19
Slika 2.	Prikaz izradbene linije [1] .....	20
Slika 3.	Prikaz izradbenih stanica [1] .....	21
Slika 4.	Izgled mrežnog trokutnog modela lokacija .....	24
Slika 5.	Orijentirana matrica toka materijala.....	25
Slika 6.	Izgled neorijentirane matrice toka materijala nakon transformacije .....	26
Slika 7.	Hijerarhijska struktura AHP metode [11] .....	42
Slika 8.	Prikaz problema konzistentnosti [11].....	44
Slika 9.	Matrica toka materijala.....	52
Slika 10.	Matrica transportnih udaljenosti za trenutno stanje .....	53
Slika 11.	Matrica ukupnog transportnog učina za trenutno stanje .....	54
Slika 12.	Matrica ukupnog transportnog učina – varijanta 1 .....	57
Slika 13.	Matrica ukupnog transportnog učina – varijanta 2.....	58
Slika 14.	Matrica ukupnog transportnog učina – varijanta 3.....	59
Slika 15.	Matrica ukupnog transportnog učina – varijanta 4.....	60
Slika 16.	Modificirana metoda trokuta – jedan odjel .....	61
Slika 17.	Modificirana metoda trokuta – drugi odjel.....	62
Slika 18.	Modificirana metoda trokuta – između odjela .....	62
Slika 19.	Matrica ukupnog transportnog učina – teorijska/optimalna varijanta.....	63
Slika 20.	Ocjenjivanje važnosti kriterija – verzija s 7 kriterija .....	66
Slika 21.	Ocjenjivanje važnosti kriterija – verzija s 5 kriterija .....	67
Slika 22.	Usporedba kriterija u parovima prema Saaty-evoj skali .....	68
Slika 23.	Težine kriterija – verzija 7 kriterija .....	68
Slika 24.	Težine kriterija – verzija 5 kriterija .....	69
Slika 25.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na sigurnost .....	70
Slika 26.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta .....	70
Slika 27.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij troška preseljenja/isplativosti investicije.....	71



Slika 28.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij logičkog redosljeda proizvodnje.....	71
Slika 29.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij troška transporta .....	72
Slika 30.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij mogućnosti proširenja ..	72
Slika 31.	Usporedba alternativa u parovima s obzirom na iskoristivost radne snage .....	73
Slika 32.	Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij sigurnosti ....	73
Slika 33.	Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta .....	74
Slika 34.	Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij logičkog rasporeda proizvodnje .....	74
Slika 35.	Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij troška transporta.....	75
Slika 36.	Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij mogućnosti proširenja .....	75
Slika 37.	Ukupni prioriteti varijanti – verzija 7 kriterija .....	76
Slika 38.	Graf usporedbe varijante 4 i varijante 1 .....	76
Slika 39.	Graf usporedbe varijante 4 i varijante 2 .....	77
Slika 40.	Graf usporedbe varijante 4 i varijante 3 .....	77
Slika 41.	Graf usporedbe varijante 4 i teorijske/optimalne varijante .....	77
Slika 42.	Ukupni prioriteti varijanti – verzija 5 kriterija .....	78
Slika 43.	Usporedba dobivenih rezultata dvaju verzija provedbe AHP metode .....	78
Slika 44.	Graf dinamičnosti – verzija 7 kriterija .....	80
Slika 45.	Graf dinamičnosti – verzija 5 kriterija .....	80
Slika 46.	Graf dinamičnosti – primjer promjena težina kriterija.....	81
Slika 47.	Graf performansi .....	81
Slika 48.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij sigurnosti .....	82
Slika 49.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta ..	83
Slika 50.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij isplativosti investicije .....	84
Slika 51.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij logičkog redosljeda proizvodnje .....	85
Slika 52.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij troška transporta .....	86
Slika 53.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij mogućnosti proširenja .....	87
Slika 54.	Graf gradijenta s obzirom na kriterij iskoristivosti radne snage .....	88

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1. Saaty-eva skala [2] .....	43
Tablica 2. Vrijednosti indeksa konzistentnosti [12].....	45

**POPIS KRATICA**

KRATICA	IZVORNI NAZIV
CRAFT	Computerized Relative Allocation of Facilities Technique
MIP	Mixed Integer Programming
LOGIC	Layout Optimization with Guillotine Induced Cuts
MULTIPLE	Multi-floor Plant Layout Evaluations
ELECTRE	Elimination Et Choice Translating Reality
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution
PROMETHEE	Preference Ranking Organization Methods for Evaluation
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANP	Analytic Network Process
DEA	Data Envelopment Analysis
SMART	Simple Multi Attribute Rating Technique
GRA	Grey Relational Analysis
AIRM	Agregated Indices Randomization Method
OCRA	Operational Competitiveness Rating Analysis
WPM	Weighted Product Model
ER	Evidential Reasoning Approach

## SAŽETAK

U prvome dijelu ovoga rada daje se uvod u problematiku višekriterijalnog odlučivanja u procesu odabira prostornog rasporeda proizvodnog sustava. Ovdje je opisana i objašnjenja problematika pri tome procesu, te je dan uvid u metode izrade prostornog rasporeda, kao i načela prema kojima se one rade.

U drugom dijelu se temeljem pretraživanja relevantnih izvora provela analiza i sistematizacija mogućih kriterija odlučivanja. U analizi su svi kriteriji detaljno objašnjeni, dok se u sistematizaciji pristupilo grupiranju kriterija u veće cjeline.

U trećem dijelu rada definirane su metode višekriterijalnog odlučivanja, te su one najvažnije i opisane. Pristupilo se detaljnom opisu analitičkog hijerarhijskog procesa (AHP), gdje je prikazana matematička osnova navedene metode i njezine prednosti i nedostaci.

U posljednjem dijelu rada je na konkretnom primjeru oblikovanja prostornog rasporeda proizvodnog pogona ilustriran problem odabira najpogodnije varijante, te je za odabranu metodu višekriterijalnog odlučivanja prikazan cijeli proces određivanja kriterija, njihove važnosti te ocjenjivanja varijanti.

Ključne riječi: Višekriterijalno odlučivanje, najpogodniji prostorni raspored, analitički hijerarhijski proces, *Expert Choice*.

## SUMMARY

The first part of this paper provides an introduction to the issues related to multi-criteria decision making in selection of plant layout. It describes and explains the issues related to this analysis, provides an overview of methods of preparation of layout design, as well as the underlying principles this process follows.

The second part includes the analysis and systematisation of potential decision making criteria based on research of relevant sources. The analysis explains in detail all criteria, while the approach to systematisation entails grouping of criteria in larger sections.

The third part defines methods of multi-criteria decision making, and describes the most relevant ones. A detailed overview of analytical hierarchy process (AHP) is provided, which includes the mathematical basis of the relevant methods, along with its advantages and disadvantages.

The last part of the paper provides an illustrative example of issue related to selection of the most appropriate method, through an example of creation of the layout design. It provides a criteria selection process overview, clarifies the significance of each criterium and the assessment of variances, though the selected method of multi-criteria decision making.

Key words: Multi-criteria decision making, optimal layout, analytical hierarchy process, *Expert Choice*

## 1. UVOD

Odabir najpogodnijeg prostornog rasporeda proizvodnog sustava je jedna od najvažnijih odluka poduzeća. Budući da nema univerzalne metode koja će zadovoljiti sve potrebe proizvodnje, potrebno je pomoću postavljenih kriterija i metodom višekriterijalnog odlučivanja, izabrati varijantu koja će biti najpovoljnija za proizvodni sustav.

Zbog mnogih kriterija koji se uzimaju u obzir, jer je potrebno zadovoljiti razne potrebe proizvodnog sustava, na ovaj problem se gleda kao na višekriterijalni. Za višekriterijalno odlučivanje se smatra donošenje odluke kada je prisutno više kriterija, i većina ih je suprotstavljena. Cilj je da ova metoda pruži podršku donositelju odluke da donese pravilnu i kvalitetnu odluku kada je veliki izbor alternativa za promatrani problem koji se želi riješiti.

Cilj ovoga rada je pružiti teorijsku podlogu o načinima formiranja prostornoga rasporeda i problematici koja se javlja pri odabiru najpogodnijeg prostornog rasporeda. Također biti će opisani i kriteriji i metode višekriterijalnog odlučivanja pomoću kojih će se na konkretnom problemu prikazati cijeli proces donošenja odluke. Za provedbu metode višekriterijalnog odlučivanja koristiti će se programski paket *Expert Choice*.

## **2. PROSTORNI RASPORED PROIZVODNOG SUSTAVA**

### ***2.1. Osnovno o oblikovanju prostornog rasporeda***

Oblikovanje i projektiranje proizvodnog sustava ima za cilj definiranje elemenata prostornog rasporeda koji će osigurati neometano odvijanje proizvodne djelatnosti i smještaj svih strojeva, opreme i ljudi potrebnih za proizvodnju. Također prostorni raspored mora biti takav da omogući što jednostavnije rukovanje i transport materijala između strojeva unutar proizvodnje te između proizvodnje i skladišta.

Osnovni cilj pri oblikovanju proizvodnog sustava je postići takav raspored koji će omogućiti što profitabilniju proizvodnju uz što niže troškove i konkurentsku cijenu proizvoda.[1]

### ***2.2. Problematika određivanja najpovoljnijeg prostornog rasporeda***

Pri oblikovanju prostornog rasporeda pokušavaju se iskoristiti sve prednosti koje poduzeće posjeduje, poput strojeva, ljudi, znanja, tehnologija, prostora i sigurnosti, stoga se pri odabiru najpovoljnijeg prostornog rasporeda razmatraju različiti problemi.

Jedan od problema je sniženje troškova, koji je u većini slučajeva i najveći problem koji poduzeća žele riješiti. U današnje doba sve bržih trendova i sve većih promjena na tržištu, te također sve veće konkurencije koja se nalazi u okruženju poduzeća, vrlo je važno minimizirati troškove na svim mogućim mjestima unutar poduzeća, pa tako i u proizvodnji. Minimiziranje troškova se uvjetuje preko svih ostalih problema koji će biti navedeni.

Najvažniji problem kojim se pri odabiru prostornog rasporeda bavi je povećanje sigurnosti. Važno je zaštititi zdravlje radnika od različitih invazivnih kemikalija ili para i stvoriti zdravo i sigurno okruženje za rad. Također potrebno je isplanirati proizvodni pogon tako da radnik tokom rada na strojevima ili rukovanja materijalom ne bude u opasnosti, odnosno da ona bude svedena na minimum. Druga sigurnost na koju treba obratiti pozornost je sigurnost materijala i proizvoda. Ona se očituje kroz smanjenje rizika oštećenja materijala ili sniženja njegove kakvoće. Treba osigurati takav prostorni raspored koji će to sve omogućiti, a to znači da

radnik i stroj trebaju imati odgovarajuću veličinu i položaj radnog mjesta kako bi se taj rizik sveo na minimum. Također važno je razmotriti problem skladištenja, gdje proizvodi i materijali trebaju biti uskladišteni na adekvatan način kako ne bi došlo do njihovog propadanja ili oštećenja.

Problem skladištenja se također razmatra iz konteksta efikasnosti, gdje ga je potrebno smjestiti na mjesto koje će omogućiti nesmetanu i brzu komunikaciju sa svim dijelovima proizvodnog pogona i okolinom. Također važna je i organiziranost unutar skladišta kako bi se uvijek mogle pratiti količine zalihe kako ne bi došlo do njihovog manjka, te kako bi se smanjilo vrijeme ostavljanja i uzimanja materijala iz skladišta poznavanjem i obilježavanjem mjesta gdje određeni materijal stoji.

Dobro izvedenim prostornim rasporedom može se riješiti problem zalaganja, odgovornosti i zadovoljstva zaposlenika, gdje ako oni uvide da rade u zdravom okruženju, gdje sve funkcionira, i u svakom trenutku mogu pristupiti svim podacima i postoji izvrsna komunikacija između odjela, tada će se i njihov trud i efikasnost povećati.

Još jedna velika problematika s kojom se susrećemo je povećanje proizvodnosti i produktivnosti postrojenja. Ona se očituje kroz manji broj zastoja materijala na strojevima, i manjem vremenu čekanja na sljedeću operaciju. Zatim tu je i smanjena potreba za rukovanje materijalom, gdje će materijal na radna mjesta dolaziti u točno onom položaju koje je idealno za izvršenje daljnje operacije. Ubrzanje i pojednostavljenje toka materijala i kraće vrijeme izradbe i sklapanja proizvoda će također osim na produktivnost, utjecati i na konkurentsku prednost, jer će poduzeće biti sposobno izraditi proizvode u što kraćem roku. Također smanjenjem zakrčenosti i zbrke u pogonu će se osim na produktivnosti, dobiti i na sigurnosti, jer će radnici raditi u puno sigurnijem okruženju i neće im prijetiti različite ozljede na radu.

Olakšano održavanje je također još jedan od problema koji u sebi isprepliće povećanu dozu sigurnosti i manje zastoja u proizvodnji, jer je popravak znatno olakšan, a samim time i smanjenje troškova.



Jedni od najbitnijih faktora problema smanjenja troškova pri odabiru varijanti prostornog rasporeda proizvodnog pogona je ušteda u prostoru, jer osim što se smanjuju troškovi veličine posjeda i tvornice, smanjuju se i troškovi njezinoga održavanja, grijanja, hlađenja i rasvjete.

Pri odabiru najpovoljnijeg prostornog rasporeda trebalo bi se težiti što većem iskorištenju vlastitih sredstava koje poduzeće posjeduje, te bi se trebala ispitati rentabilnost svakog stroja koji poduzeće posjeduje, te na temelju toga odlučivati da li je taj stroj potreban unutar poduzeća ili je moguće operacije koje su na njemu trebale biti izvršene davati kooperantima. Također teži se i što većem iskorištenju ljudskog rada kako bi se dobila što produktivnija i efektivnija proizvodnja. Ljudska snaga bi trebala biti što fleksibilnija i imati što širi spektar znanja kroz koji bi se ona onda iskorištavala za razne poslove i time ne bi dolazilo do perioda u kojima radnik nije zaposlen. Kroz ovaj primjer vidljiv je i problem koji se javlja u današnje doba a koji iziskuje da proizvodnja budu što fleksibilnija kako bi mogla brzo i efikasno odgovarati na sve zahtjeve kupaca i tržišta. To se omogućava pametnim odabirom zaposlenika, opreme i organiziranjem proizvodnog pogona.[1]

Svi ovi problemi vezani su isključivo uz proizvodni pogon i poduzeće i oni govore na što je potrebno obratiti pažnju, i što je sve potrebno uzeti u obzir prilikom planiranja i izrade proizvodnog pogona. U sljedećem poglavlju biti će objašnjeni problemi koji nisu vezani isključivo za proizvodni pogon, već za sam proces planiranja i izrade proizvodnog pogona, odnosno na ljude koji to rade.

### ***2.3. Problemi odlučivanja u procesu odabira prostornog rasporeda***

Proces odlučivanja je stalan proces i odluke koje se donose u poslovnom svijetu od njihovog donositelja iziskuju puno vremena, znanja i truda. Pri poslovnom odlučivanju odluke se reflektiraju na veliki broj ljudi i resursa, stoga je to iznimno zahtjevan posao u kojem se mogu pronaći različiti problemi vezani uz proces odlučivanja.

Jedan od problema poznat je i pod nazivom „vizija tunela“ a on opisuje trenutak kada donositelj odluka ne može donijeti objektivnu i uspješnu odluku zbog različitih predrasuda koje on ima prema određenom rješenju.

Sljedeći problem je nedostatak kreativnosti i imaginacije koji dovodi do toga da donositelj odluke odbacuje dobre ideje radi nepoznavanja toga područja. Također tu je vidljiv i nedostatak hrabrosti da donositelj odluke proba neki sasvim novi pravac koji može polučiti iznimne uspjehe.

Favoriziranje određenih varijanti rješenja je najopasniji problem koji se javlja, jer donositelj odluke na početku izabire favoriziranu verziju i na temelju nje uspoređuje ostale verzije i na kraju odabire tu favoriziranu verzije iako ona nužno nije najbolja već se najviše podudara sa njegovim osobnim kriterijima.

Još jedan problem je prebrzo odlučivanje, odnosno odlučivanje koje se provodi u vrlo kratkom vremenskom roku zbog različitih vremenskih zahtjeva koji pritišću donositelja odluka. Prilikom takvog oblika odlučivanja ne uzima se dovoljno vremena za razgledavanje svih kriterija i svih varijanti te je na kraju moguć odabir varijante koja nije najpovoljnija.[2]

#### ***2.4. Proces planiranja proizvodnog pogona***

Planiranje proizvodnog pogona je najbolje opisati kroz životni ciklus postrojenja. Iako je proizvodni pogon planiran samo jednom, on je često rekonstruiran kako bi uskladio izgled proizvodnog pogona sa proizvodnjom. Ovaj postupak je kontinuiran i pokušava se konstantno poboljšavati proizvodni pogon i proces kako bi se na što bolji način moglo odgovoriti na izazove stavljene pred poduzeće.

Iako proces planiranja proizvodnog pogona nije egzaktna znanost, njega se može koristiti kroz organiziran i sistematičan pristup. Tradicionalni proces se sastoji od sljedećih koraka:[3]

1. Definiranje problema
2. Analiziranje problema
3. Izrada različitih varijanti i alternativa
4. Procjena različitih varijanti i alternativa
5. Izbor najpogodnije varijante
6. Implementacija

Kroz ovaj proces je potrebno za početak odrediti ciljeve proizvodnog pogona. Bitno je da proizvodi koji trebaju biti provedeni ili usluge koje trebaju biti uslužene budu valjano iskazane, a po mogućnosti bi to trebalo biti kvantitativno. Nakon toga potrebno je odrediti koje su primarne aktivnosti poduzeća, a koje pomoćne aktivnosti kojima se služi pri ostvarenju zadanoga cilja. One bi trebale biti opisane kroz operacije, opremu i kretanje materijala potrebno za njihovo izvršenje. Pomoćne aktivnosti omogućavaju primarnim aktivnostima da rade uz minimalne poteškoće i zastoje.

Sljedeći korak je određivanje svih unutarnjih veza između svih objekata u proizvodnji. Potrebno je postaviti red operacija potreban za izradu nekog proizvoda, te prikazati kako određene aktivnosti su povezane jedna sa drugom i koje su njihove veze. Potrebno je i odrediti potreban prostor za svu opremu i zaposlene, a samim time i za izvršavanje svih aktivnosti u proizvodnji. U ovim koracima potrebno je uzeti u obzir sve aktivnosti, opremu i zaposlene te prikazati dobivene rezultate u kvantitativnom i kvalitativnom zapisu.

Tada se pristupa izradi različitih varijanti prostornoga rasporeda. U ovom koraku će se prikazivati i različite lokacije za potrebno postrojenje, te različito njegovo interno uređenje. Ove varijante će sadržavati različite prostorne rasporede, strukturalnu konstrukciju i različite metode kretanja i upravljanja materijalom. Ovisno o situaciji odluka o lokaciji proizvodnog, kao i njegovog prostornog rasporeda mogu biti odvojene.

Nakon izrade velikog broja različitih varijanti pristupa se procjeni tih varijanti. Ona je moguća na različite načine, a u ovome radu biti će prikazana procjena i odabir pomoću metode višekriterijalnog odlučivanja, u kojoj se definiraju kriteriji, i zatim ekspertna skupina poduzeća procjenjuje važnost pojedinih kriterija. Nakon toga uz pomoć neke od metoda višekriterijalnog odlučivanja ti kriteriji budu uspoređeni i napravi se rangiranje pojedinih varijanti gdje je vidljiva najpogodnija.

Odabir varijante je najbitniji i najteži korak, a temelji se na tome da donosioc odluke na temelju dobivenih rezultata i usporedaba različitih varijanti mora odlučiti koja od navedenih varijanti će najbolje zadovoljiti postavljene ciljeve. Nakon odabira varijante ide njena implementacija, gdje dolazi do izgradnje novog postrojenja ili rekonstrukcije staroga. Potrebno je nadgledati provođenje implementacije, kako ne bi došlo do neželjenih pogrešaka.

Također je potrebno obaviti testiranje i uvođenje u rad, kako bi se vidjelo da li je taj plan i u praksi zadovoljavajuć, te kako bi se u početku mogle otkloniti eventualne teškoće.

Nakon što je uveden novi prostorni raspored potrebno ga je održavati na adekvatan način te u svakom mogućem trenutku ga poboljšavati i prilagođavati novim ciljevima koji su stavljeni pred poduzeće. Također bitno je i konstantno ispitivati da li su ciljevi poduzeća pravilni, i da li postojeći prostorni raspored na pravilan način podupire proizvodnost i profitabilnost poduzeća.

Postoje i noviji moderniji pristupi u procesu planiranja proizvodnog sustava koji se sastoje od nekoliko glavnih sastavnica:[3]

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

U početku je potrebno prije samoga planiranja proizvodnoga pogona osigurati da postoji dovoljno znanje o organiziranju proizvodnog pogona te educirati sve koji rade na tome. Nakon toga potrebno je razumijeti sve unutarnje i vanjske probleme koji postoje u poduzeću. Razumijevanje unutarnjih problema očituje se kroz poznavanje svih tehnologija i opreme koja se nalazi unutar proizvodnih pogona te poznavanje svih aktivnosti koje se događaju u proizvodnji. Također potrebno je znati i strukturu i organizaciju poduzeća te vrste komunikacija kojima se služe unutar poduzeća. U razumijevanju vanjskih problema ključno je shvatiti okruženje u kojem se nalazi poduzeće te napraviti usporedbu između rezultata koje poduzeće sada postiže i ciljeva kojima bi poduzeće težilo. Sljedeći korak je uspostava kriterija važnosti pri planiranju i izradi različitih varijanti prostornog rasporeda kako bi se znalo kako će se ocjenjivati varijante i u kojem smjeru želimo da se te varijante razvijaju. Bitno je i da menadžment u poduzeću, koji će odlučivati o izboru varijante, izrazi obvezu prema kojoj mora provesti poboljšanja za koja se dokaže da su potrebna u proizvodnom pogonu.

Sada se kreće u izradu različitih varijanti prostornog rasporeda i prvi korak u tome je formiranje ekspertnih skupina koje će izrađivati model, pratiti sam proces izrade modela i procjenjivati dobivene varijante. Formiranje skupina mora biti vrlo mudro i pomno smišljeno kako bi se pokrilo znanje u svim sferama proizvodnje, da neka područja u proizvodnji, pri izradi i odabiru varijanti ne bi bila zapostavljena.

Ukoliko se radi o rekonstrukciji i procesu adaptiranja i poboljšanja postojećeg proizvodnog pogona, tada se prvo treba snimiti trenutno stanje, kako bi se na osnovu njega dobile informacije i snimka trenutnog stanja, koje će kasnije poslužiti za usporedbu i evaluaciju različitih varijanti prostornog rasporeda. Također potrebno je postaviti ciljeve koji su mjerljivi za svaki od postavljenih kriterija prema kojima će se odlučivati i provoditi analiza.

Pri izgradnji različitih varijanti prostornog rasporeda vrlo bitna je i kreativnost i inovativnost. Važno je pokušati uvesti različite sisteme, procedure, opremu i metode kako bi se što bolje ostvarili zadani ciljevi. Nakon što su izrađene sve moguće alternative pristupa se procjeni tih varijanti prema kriterijima koji su bili definirani na početku ovoga procesa. Ovdje se također koristi metoda višekriterijalnog odlučivanja koja na kraju daje rangirane alternative prema pogodnosti za opisanu proizvodnju. Slijedi pristupanje implementaciji te alternative, gdje se gleda najpovoljniji pristup za implementaciju. Radi se raspored izgradnje te alternative i potrebnih troškova.

Na kraju ove metode potrebno je uvjeriti menadžment kako je upravo ta odluka i varijanta najpogodnija za poduzeće, te je potrebno dokumentirati sve varijante i njihovu procjenu i pomoći menadžmentu da vizualiziraju rješenje postojećeg problema.

## ***2.5. Načela projektiranja proizvodnog pogona***

Kako je već opisano, prilikom planiranja i izrade proizvodnog pogona nailazi se na mnogo problema i poteškoća koje je potrebno uzeti u obzir kako bi se dobilo što kvalitetnije rješenje. Na osnovu toga razvijena su i neka rješenja koja na osnovu toga koji od navedenih problema je najvažniji i koji ima najveći utjecaj pri odabiru proizvodnog pogona, pomaže pri izradi modela, a to su:[1]

1. **Načelo kretanja materijala najkraćim udaljenostima** – unutar ovoga načela glavni kriterij je udaljenost između radnih jedinica koje materijal treba preći te se ovim modelom želi minimizirati ukupni transportni učin.
2. **Načelo integracije svih utjecajnih činilaca** – unutar ovoga modela pokušava se dovesti ljude, opremu, sredstva, materijal i sve ostale utjecajne elemente u takav odnos koji ishodi najboljim kompromisom. Cilj je uravnoteženo iskoristiti sve potencijale poduzeća.
3. **Načelo toka** – ovaj model želi osigurati da varijante prostornog rasporeda budu orijentirane na redoslijed pojedinih tehnoloških procesa te da ih prate. Ovim procesom želi se stvoriti lančana struktura gdje će operacije unutar postrojenja slijediti jedna iza druge.
4. **Načelo kugle** – želi se maksimalno iskoristiti sav raspoloživi prostor i u vertikalnom i u horizontalnom smjeru. Kao primjer mogu poslužiti regalna skladišta kao iskorištenje vertikalnog prostora.
5. **Načelo zadovoljstva i sigurnosti zaposlenih** – ovim modelom želi se poboljšati ono što se smatra najvećim problemom proizvodnje, a to je sigurnost. Također bitno je organizirati pravilnu strukturu koja pouzdano podupire svoje zaposlenike kako bi oni bili što zadovoljniji i odgovorniji.
6. **Načelo fleksibilnosti** - u današnja vremena gdje se prilike na tržištu brzo mijenjaju i potrebno je često i brzo donositi odluke, ovaj model pomaže da se napravi prilagodba sustava na nove uvjete uz minimalne troškove i poteškoće.
7. **Načelo cjelovitosti** – ovim modelom nastoji se objediniti više raznovrsnih rješenja za niz različitih zadataka u jednu cjelinu uz optimalno rješenje. Većinom optimum cjeline neće biti jednak optimumima pojedinačnih rješenja.
8. **Načelo postupnosti i iterativnosti** – ovaj model se služi iteracijom jer se smatra da do rješenja nije moguće stići odmah i u jednome koraku, već se vrijednosti određenih rješenja vide tek u sljedećim koracima, stoga će se u slučaju nedovoljno dobrih vrijednosti rješenja postupak morati iterativno ponoviti.
9. **Načelo varijantnosti** – prema ovome načelu izrađuju se različita rješenja koja se onda kasnije mogu ocjenjivati s obzirom na postavljene kriterije. Samo se sa više različitih varijanti može donijeti objektivna odluka.

10. **Načelo idealnog projektiranja** - ovo načelo se temelji na tezi da rješenja trebaju predstavljati vrhunac trenutnog tehnološkog razvoja bez ikakvih ograničenja unutar postrojenja. Ovakvi modeli služe kako bi se s njima moglo usporediti konačno rješenje i vidjeti koliko je postojeće stanje daleko od idealnog.
11. **Načelo ekonomičnoga projektiranja** – ovim načelom želi se izbjeći preprojektiranje i potprojektiranje. Potprojektiranjem se stvara projekt u relativno kratkome vremenu, koji je brzo napravljen te u pravilu u njemu neće biti osigurana zadovoljavajuća kvaliteta rješenja ili će doći do neočekivanih poteškoća. Preprojektiranjem se dolazi do izrade vrlo kvalitetnih rješenja, na čiju će se izradu utrošiti previše vremena, a ta rješenja neće biti potrebna u projektu.
12. **Načelo interdisciplinarnosti** – ovo načelo naglašava da oblikovanje proizvodnog sustava zahtjeva različita specijalistička znanja iz različitih grana znanosti, stoga se stvaraju interdisciplinarni timovi stručnjaka iz različitih grana proizvodnje.

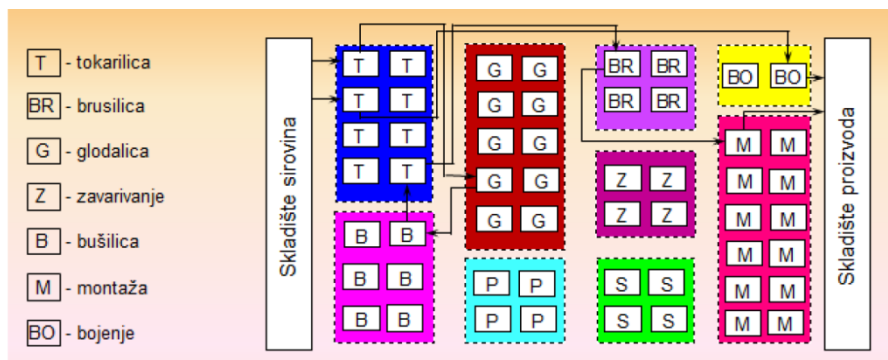
## ***2.6. Metode izrade prostornog rasporeda***

Cilj oblikovanja prostornog rasporeda je minimizirati trajanje proizvodnog ciklusa i troškove proizvodnje, uz maksimalno iskorištenje potencijala i povećanje efikasnosti. Razlikujemo dvije osnovne verzije izrade prostornog rasporeda, a to su prema vrsti obrade i prema predmetu rada.[1]

### **2.6.1. Izrada prostornog rasporeda prema vrsti obrade**

Ovaj model karakterizira grupiranje strojeva i opreme koji su namijenjeni za jednu vrstu operacija. To znači da će strojevi za glodanje tvoriti jedan zaseban odjel, strojevi za tokarenje drugi, strojevi za zavarivanje treći, montaža četvrti, itd. To će omogućiti da tok materijala ide većinom između odjela, a rijetko kad unutar samog odjela, jer su to operacije sličnog karaktera. Ovom metodom se postiže jednostavna raspodjela posla, jer se grupiraju funkcionalno slični strojevi i ljudi sa sličnim znanjima. Također postiže se dobro iskorištenje sredstava za proizvodnju i visoka fleksibilnost proizvodnje. Ona se očituje kroz mogućnost izrade širokog asortimana različitih proizvoda, odgovarajući na zahtjeve tržišta. Dobro iskorištenje sredstava je moguće jer postoji grupacija funkcionalno sličnih strojeva na jednom

mjestu, te je moguć odabir najboljeg stroja za određenu operaciju. Na sljedećoj slici vidljiv je prikaz izgleda proizvodnog sustava strukturiranog prema vrsti obrade.



**Slika 1. Prikaz prostornog rasporeda strukturiranog prema vrsti obrade [1]**

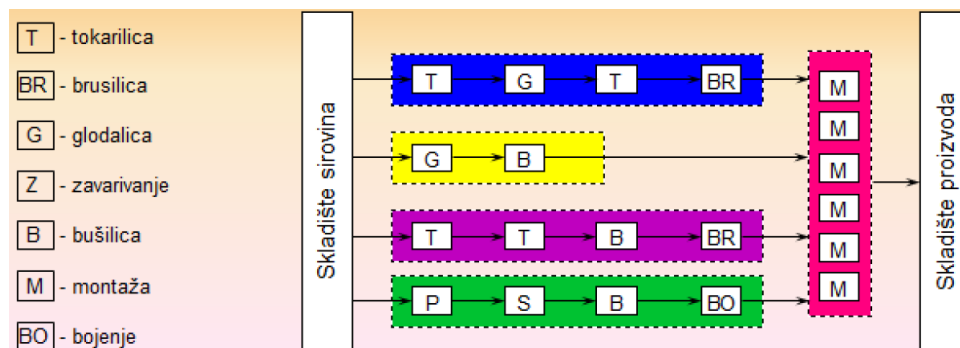
Postoje i nedostaci ovakvog sustava, a to su dugi transportni putevi i veliki broj povratnih tokova, te dugo vrijeme čekanja između pojedinih operacija i velika nepreglednost u proizvodnji, što onda dovodi do pada proizvodnosti i profitabilnosti sustava. Također potrebno je veliko znanje i iskustvo radnika, kao i njegova fleksibilnost budući da mora često mijenjati poslove i raditi na drugačijim operacijama i materijalima. Pripremno-završna vremena također su jako dugačka zbog čestih izmjena na strojevima i proizvodima, stoga je ova metoda idealna za maloserijsku proizvodnju više tipova proizvoda, jer bi pri velikoserijskoj proizvodnji došlo do otežanog planiranja, praćenja i vođenja proizvodnje zbog ispreplitanja različitih tokova materijala, što dovodi do dugačkih ciklusa proizvodnje i povećanih potreba za zalihama i mjestima za odlaganje materijala.

### 2.6.2 Izrada prostornog rasporeda prema predmetu rada

Nastala je kao odgovor na sve nedostatke koje je imao proizvodni sustav strukturiran prema vrsti obrade. Prvo su se razvile izrabbene linije koje su bile namijenjene masovnoj proizvodnji, a tek kasnije su se razvile izrabbene stanice koje su slijedile koncept grupne tehnologije. Izrabbene linije su orijentirane na proizvod, a sastoje se od funkcionalno različitih strojeva koji su poredani po redoslijedu operacija potrebnih za izradu nekog konkretnog proizvoda. Karakterizira ih iznimno niski udio pripremno-završnog vremena jer ne dolazi do čestih promjena operacija na strojevima. U ovom sustavu koristi se jednosmjerni tok materijala sa kratkim transportnim udaljenostima, koji rezultiraju kratkim proizvodnim



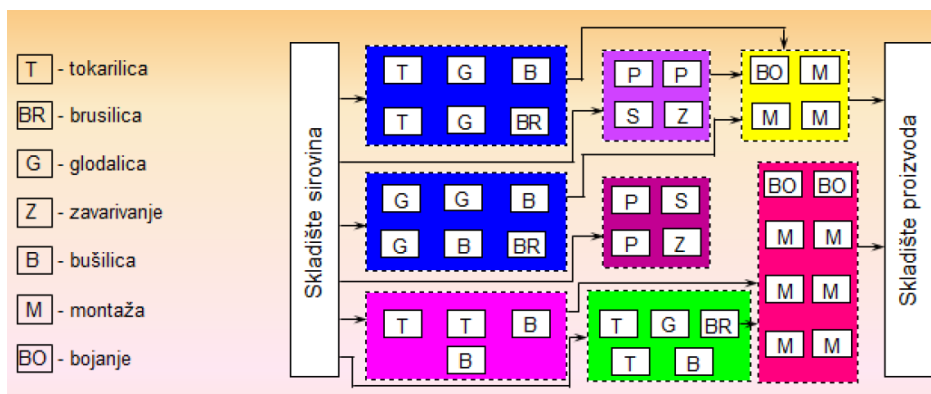
ciklusima izrade i visokom proizvodnošću i efikasnošću. Na sljedećoj slici vidljiv je primjer jedne izradbene linije.



Slika 2. Prikaz izradbene linije [1]

Naravno vidljivi su i neki nedostaci ovog modela, a najveći je osjetljivost na zastoje, gdje zbog kvara jednog stroja u liniji, svi ostali strojevi također stoje, jer je nemoguć dolazak materijala na njih. Također ovi sustavi su jako nefleksibilni i ne mogu brzo odgovoriti na različite zahtjeve kupaca. Ciklus proizvodnje ovisi o najdužoj operaciji u nizu, stoga je nemoguća maksimalna iskoristivost svih strojeva u liniji. Veliki su i investicijski troškovi, a potreban je i veliki prostor za smještaj tih linija.

Upravo zbog ovih nedostataka razvile su se izradbene stanice. U izradbenim stanicama grupirani su strojevi u skladu sa izradbenim procesom tehnološki sličnih proizvoda. Struktura same stanice je slična podjeli prema vrsti obrade. Posjeduje određenu fleksibilnost, a prostorni raspored je napravljen na temelju toka materijala za definirani proizvod. Ovaj model je kombinacija izradbene linije i prostornog rasporeda strukturiranog prema vrsti obrade, pa ono posjeduje efikasnost linija, ali i povećanu fleksibilnost dobivenu organizacijom strojeva unutar stanica. Na sljedećoj slici prikazan je prostorni raspored izrađen od izradbenih stanica.



Slika 3. Prikaz izradbenih stanica [1]

Izradom prostornog rasporeda pomoću izradbenih stanica sustav se dijeli na manje podsustave i time se pojednostavljuje tok materijala i olakšava se planiranje, praćenje i vođenje proizvodnje. Izradbene stanice su sposobne samostalno obraditi neku grupu proizvoda, stoga će rijetko biti interakcije sa ostalim stanicama, već većinom sa skladištem. Također ovim oblikom proizvodnog pogona dolazi do velikog iskorištenja strojeva i povećanog zadovoljstva radnika, jer ova vrsta rasporeda omogućava timski rad i praćenje proizvodnog procesa u svakom trenutku. Ujedno traži se i velika razina znanja i opremljenosti radnika, ali i menadžmenta, jer je potreban širok spektar znanja o raznim tehnologijama, kako bi se pokušali ujednačiti tokovi na svim stanicama, da bi se smanjilo opterećenje sa određenih stanica.

Postoji i jedan specifičan oblik prostornog rasporeda proizvodnog sustava koji se rijetko koristi, a to su samostalne radne jedinice sa sposobnošću potpune izrade. One se sastoje od jednog radnog mjesta na kojem se odvijaju sve operacije potrebne za izradu nekog proizvoda. Nema toka materijala sa drugim radnim jedinicama unutar proizvodnog pogona, već samo sa skladištem. Primjena ovog oblika je moguća kod specifičnih vrsta rada poput ručnih radova ili unutar proizvodnje koja je koncentrirana na jedan stroj sa mogućnošću više operacije poput CNC-strojeva u automatiziranoj proizvodnji.

Prilikom izrade prostornog rasporeda proizvodnog sustava prema jednoj od ovih metoda, potrebno je pristupiti optimizaciji tog sustava, kako bi ono dalo što bolju efikasnost i proizvodnost uz što manje troškove i zastoje.

## 2.7. Optimiranje prostornog rasporeda proizvodnog sustava

Cilj optimiranja prostornog rasporeda je da se unutar već prije definirane strukture proizvodnog sustava odredi najpogodniji raspored elemenata. Pravilnim oblikovanjem nastoji se maksimizirati proizvodnost, fleksibilnost i iskorištenje kapaciteta, a minimizirati ciklus proizvodnje, transportne puteve i troškove. Vidljivo je da su neki od ovih ciljeva u opreci, stoga je cilj optimiranja prostornog rasporeda pronaći kompromis između zadanih ciljeva koji će biti najpovoljniji za proizvodni proces. Optimiranje se većinom vrši prema dva kriterija, a to su minimiranje povratnog kretanja materijala, čijom se primjenom želi osigurati što jednosmjerniji tok materijala, i minimiranje ukupne transportne udaljenosti odnosno ukupnog transportnog učina.

Optimiranje prema kriteriju minimalnog transportnog učina može se podijeliti na mađarsku metodu i modificirani postupak trokuta.

### 2.7.1 Mađarska metoda

Ova metoda se koristi za strukture sa elementima bez međusobnih veza poput izradbenih stanica i samostalnih radnih mjesta sa sposobnošću potpune izrade. Njih karakterizira da nemaju međusobnih transportnih veza, već samo sa drugim elementima u sustavu koji su već raspoređeni negdje. Ova metoda se sastoji od toga da se elementi sustava dodjeljuju na raspoloživa mjesta unutar sustava sa ciljem što manjeg transportnog učina.

Koraci pri provedbi mađarske metode su:[4]

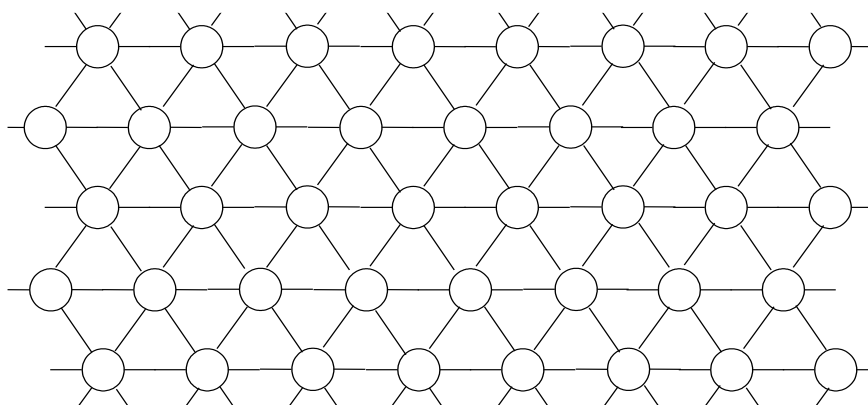
1. **Formiranje matrice udaljenosti** - dobiva se mjerenjem udaljenosti između ponuđenih lokacija.
2. **Formiranje matrice transportnog intenziteta** – dobiva se na temelju popisa redosljeda operacija, gdje se gleda količina prijevoza između dva elementa
3. **Formiranje matrice transportnog učina** – dobiva se kao množenjem udaljenosti i transportnog intenziteta za svaku lokaciju

4. **Redukcija matrice transportnog učina po stupcima i recima** – u svakom retku pronade se najmanji element i oduzme se od svakog elementa tog reda, i ista stvar se ponovi za stupce, te se dobije matrica čiji su svi elementi veći od nule, ali u svakom retku i stupcu postoji barem jedna nula.
5. **Traženje nezavisnih nula** – ispituju se redovi po redu i gdje se nađe na jednu nulu u redu ona se označava sa  $\square$ , a ostale nule u stupcu sa X. Isti postupak ponavlja se za stupce i završava se kad nijedna nula ne ostane neoznačena. Rješenje koje ima samo jednu nulu u stupcu i retku se smatram optimalnim, a markirana nula znači da je na tom mjestu došlo do dodjele lokacije.
6. **Provjera rješenja** – ukoliko je broj nezavisnih nula jednak broju elemenata koje treba dodijeliti, dobiveno je optimalno rješenje te se pristupa izračunu ukupnog transportnog učina, a ukoliko nije tada se prelazi na traženje linija pokrivanja i transformacije matrice.
7. **Traženje linije pokrivanja i transformacije matrice** – označe se svi stupci u kojima nema nezavisnih nula, svi retci koji imaju prekrižene nule u označenim stupcima, i svi stupci koji imaju označene nezavisne nule u označenim recima. Nakon toga se povuku linije pokrivanja kroz neoznačene stupce i označene retke te se određuje najmanji nepokriveni element matrice i slijedi transformacija matrice u kojoj elementi matrice pokriveni jednom linijom ostaju nepromijenjeni, od nepokrivenih elemenata oduzima se najmanji nepokriveni element, a dvostruko pokrivenim elementima se pridodaje. Nakon što se ovo dovrši prelazi se na korak 5.

### 2.7.2 Modificirani postupak trokuta

Ova metoda se koristi kod proizvodnih procesa u kojima se tok materijala pojavljuje između bilo kojih elemenata unutar sustava, a to su proizvodni sustavi strukturirani prema vrsti obrade, izradbene linije i izradbene stanice. Pošto je raspored elemenata u izradbenoj liniji definiran redoslijedom operacija potrebnim za izradu određene grupe proizvoda, nepotrebno je primjenjivati ovu metodu, ali u ostalim slučajevima se primjenjuje. Većinom se primjenjuje metoda sa neograničenim izborom lokacija u kojoj je broj mogućih lokacija puno veći od broja elemenata sustava, stoga ne postoje nikakva ograničenja.

Osnovna stvar koju je potrebno formirati za ovu metodu je matrica transportne intenzivnosti u kojoj je opisan broj prijevoza između svih strojeva. Također za izradu je potreban i mrežni trokutni model lokacija koji se sastoji od neograničenog broja istostraničnih trokuta u čijim vrhovima se nalaze lokacije u koje će se smještati strojevi. U ovom modelu se pretpostavlja da su radna mjesta približno jednakih dimenzija, pa se njihove površine mogu zanemariti. Za funkciju cilja ove metode uzima se minimalni transportni učinak. Na sljedećoj slici prikazan je izgled mrežnog trokutnog modela lokacija.



**Slika 4. Izgled mrežnog trokutnog modela lokacija**

Osnovno pravilo ove metode je da se jednoj lokaciji može pridružiti samo jedan element i polazi se od teze da će se minimalni transportni učinak osigurati ako će se prvo raspoređivati elementi sa najvećim transportnim intenzitetom. S time se osigurava da elementi koji najviše utječu na funkciju cilja budu na najpovoljnijim pozicijama, odnosno jedni pokraj drugih. Ovdje nije bitan smjer kretanja materijala stoga se i koristi neorijentirana matrica toka materijala u kojoj su svi transporti prebačeni na jednu stranu dijagonale. Na sljedećim slikama će biti prikazano transformiranje matrice iz orijentirane matrice toka materijala, koja pokazuje i količinu toka materijala između elemenata sustava i smjer tog toka, u neorijentiranu matricu toka.

$k \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2			5					20		
3	5				10					
4										
5		5						15		
6				10						
7										
8			30		5					
9						20				
10									10	

Slika 5. Orijentirana matrica toka materijala

Prednost ovakvog izgleda matrice toka materijala je što je olakšano praćenje materijala, odnosno u svakom trenutku je poznato u kojem smjeru se kreće tok materijala. No budući da za modificiranu metodu trokuta smjer kretanja toka materijala nije potreban, i radi lakšeg računanja, pristupa se transformaciji matrice u neorijentiranu. Primjer transformacije je vidljiv iz slike 5. gdje tok materijala sa elementa 8 na element 5 iznosi pet, a sa elementa 5 na element 8 iznosi 15. Stoga će se ti tokovi materijala zbrojiti i oni će iznositi 20 te će biti zapisani kako je prikazano na slici 6. u neorijentiranoj matrici.

$k \setminus j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1			5							
2			5		5			20		
3					10			30		
4						10				
5								20		
6									20	
7										
8										
9										10
10										

Slika 6. Izgled neorijentirane matrice toka materijala nakon transformacije

Nakon što je napravljena neorijentirana matrica toka materijala pristupa se odabiru prvih dvaju elemenata koji će se rasporediti. Oni se biraju prema kriteriju maksimalne transportne intenzivnosti te će to biti ona dva elementa između koji je najveća transportna intenzivnost, a to su u ovom slučaju elementi 3 i 8. Nakon što se ta dva elementa rasporede u jedan od čvorova u mrežnom trokutnom modelu lokacija, pristupa se raspoređivanju ostalih elemenata, koje 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 i taj postupak se nastavlja sve dok svi elementi ne budu raspoređeni. Nakon toga se pristupa grafičkom prikazu koji je ostvaren putem mrežnog trokutnog modela lokacija. [5]

Ova metoda je jednostavna i može se koristiti bez pomoći računala, no u slučaju velikog broja elemenata sustava, korištenje računala bi uvelike ubrzalo proces. U ovoj metodi ne mora se nužno gledati razmještaj strojeva unutar sustava, već se ona može koristiti i za veće jedinice poput raznih odjela nekog proizvodnog pogona ili zgrada u kojima se proizvodni proces odvija.

### 2.7.3. Kompjuterski potpomognuta izrada prostornog rasporeda

Iako trenutni algoritmi koji se koriste u računalnim programima ne mogu nadomjestiti ljudsko iskustvo i zaključivanje, oni mogu potpomognuti izradu raznih varijanti prostornog rasporeda i povećati produktivnost planera kao i kvalitetu finalne varijante. Algoritmi mogu izraditi veliki broj raznih prostornih rasporeda u vrlo kratkom vremenu, te time ubrzati proces izrade varijanti prostornog rasporeda te njihovu analizu.

CRAFT (engl. *Computerized Relative Allocation of Facilities Technique*) je jedan od najstarijih algoritama za izradu prostornog rasporeda i on se bazira na od-do grafikonima kao ulaznim podacima za tok materijala. Većinom se ovaj algoritam započinje sa aktualnim stanjem proizvodnog sustava ili sa proizvodnim sustavom koji je dao neki drugi algoritam, te se onda on poboljšava. Algoritam računa centroide različitih odjela i računa udaljenosti između centroida odjela koje zapisuje u matricu udaljenosti. Nakon toga algoritam razmatra sve moguće izmjene tih odjela i na kraju izabire onaj koji donosi najmanji transportni učinak. Pošto je to iterativan postupak, algoritam provodi te korake sve dok ne da finalno rješenje u kojem nijedna izmjena odjela ne bi dovela do smanjenja transportnog učina. Najveća mana ovoga algoritma je što većinom daje rezultate prostornog rasporeda u kojima nema pravilnog oblika postrojenja, odnosno nema ravnih prolaza kojima se teži u proizvodnom sustavu.

MIP (engl. *Mixed Integer Programming*) algoritam se koristi kada su svi odjeli unutar postrojenja pravokutni. Tada za opis odjela su nam potrebni njihova dužina, širina i položaj centroida. U ovom algoritmu nije potreban inicijalni model koji će onda ovaj algoritam nadograđivati, već mu je za početak potreban samo opis odjela i ograničenja prostora koje poduzeće zada. Tada on pomoću podataka koji su zadani, a to su dimenzije zgrade, koordinate centroida odjela i njihova visina i širina, te ograničenja u veličini odjela, raspoređuje elemente. Mana ovog algoritma je što ne daje optimalno rješenje, ali ono je uvijek unutar 5 % od optimalnog rješenja.

LOGIC (engl. *Layout Optimization with Guillotine Induced Cuts*) također koristi kao i algoritam CRAFT od-do grafikone kao ulazne podatke toka materijala. Odjeli koje izrađuje ovaj algoritam su pravokutni, kao i zgrada u kojoj se nalazi postrojenje. Iako se algoritam može koristiti za optimiranje prostornog rasporeda, primarno se smatra kao algoritam za



konstruiranje. On se temelji na podjeli zgrade na sve manje i manje dijelove, tako da vuče linije s jednog kraja zgrade na drugi. Svaka linija je ili vertikalna ili horizontalna. Svakim rezom neki odjel se dodijeljuje sjevernoj ili južnoj strani, ili zapadnoj i istočnoj strani i na kraju se pristupa izradi prostornog rasporeda.

MULTIPLE (engl. *MULTI-floor Plant Layout Evaluation*) je algoritam koji je proizveden za rješavanje problema prostornog rasporeda proizvodnog sustava sa više katova. Jako je sličan CRAFT algoritmu i ulazni podaci toka materijala također se uzimaju iz od-do grafikona. Oblik odjela ne mora nužno biti pravokutnog oblika. Također i on starta sa nekim inicijalnim modelom i tada iterativnim postupkom radi zamjene odjela kako bi minimizirao ukupni transportni učin.[3]

Iz svih ovih algoritama vidljivo je kako su oni jako korisni i mogu jako puno doprinijeti u procesu izrade raznih varijanti prostornog rasporeda. Njihovim korištenjem planer u vrlo kratkom vremenu dobiva veliki broj različitih varijanti, od kojih neke sam ne bi nikada izradio te time dobiva na kvaliteti, produktivnosti i efikasnosti. Svejedno potrebno je u cijeli taj proces uključiti i planerovo znanje i iskustvo kako bi se došlo do najboljeg rješenja.

### **3. KRITERIJI ODLUČIVANJA U PROCESU ODABIRA PROSTORNOG RASPOREDA PROIZVODNOG SUSTAVA**

Kriteriji odlučivanja u procesu odabira prostornog rasporeda su ključni, jer pomoću njih se izrađuju i procjenjuju modeli. Kriteriji su napravljeni kako bi se formulirali problemi koji se javljaju pri izradi i odabiru najpogodnijeg rješenja, te kako bi se na temelju njih mogla donijeti dobra i kvalitetna odluka. Bitan je i izbor kriterija, koji za cilj ima uzeti one kriterije koji su relevantni za promatrani proces. Problemi koji se javljaju pri odabiru najpovoljnijeg prostornog rasporeda su navedeni u prvom poglavlju, a pregledom stručne literature i relevantnih izvora pokušat će se vidjeti kako su i u kojem smjeru formulirani kriteriji. Napravit će se njihova analiza, odnosno objasniti će se što pod te kriterije spada, i sistematizacija gdje će se probati pronaći poveznice među kriterijima pomoću kojih ćemo ih grupirati.

#### ***3.1. Analiza kriterija***

Pregledom stručne literature naišlo se na nekoliko autora koji su napravili radove na temu korištenja metoda višekriterijalnog odlučivanja pri odabiru najpovoljnijeg prostornog rasporeda za određeni proces. U svojim radovima naveli su kriterije kojima će se služiti, a ovdje će se pokušati napraviti njihova dublja analiza.

Prema prvim autorima kriteriji koji se javljaju pri odabiru najpovoljnijeg prostornog rasporeda proizvodnog procesa su:[6]

- Potreban prostor
- Transportni učinak
- Ušteda u energiji
- Investicijski iznos premještanja strojeva
- Pitanja okoliša

Kriterij potrebnog prostora jednak je minimalnom potrebnom pravokutnom prostoru za smještaj svih potrebnih strojeva, alata, opreme i zaposlenika. Kroz ovaj kriterij želi se regulirati veličina proizvodnog pogona i time se smanjiti troškovi koji se javljaju u vidu grijanja, hlađenja, rasvjete i održavanja, te također i u veličini zemljišta na kojem se proizvodni pogon nalazi, pogotovo ako se nalazi u područjima gdje je cijena zemljišta vrlo visoka.

Kriterij transportnog učina ima za cilj minimizirati ukupni transportni učinak, odnosno postaviti takav prostorni raspored u kojem će strojevi sa najvećim transportnim intenzitetom biti smješteni što bliže jedan drugome. Kroz ovaj kriterij želi se utjecati i na smanjeno vrijeme putovanja materijala od jednog radnog mjesta ka drugom, kao i na povećanje proizvodnosti sustava.

Uštedama u energiji želi se naglasiti da se elementi sustava žele postaviti u takav raspored kako bi minimizirali njihovo trošenje energije te samim time i troškove vezane uz korištenje te energije. Ovaj kriterij se evaluira tako da se uspoređuje sa trošenjem energije u postojećem stanju.

Investicijski iznos premještanja strojeva je jedan od ekonomskih i najvažnijih kriterija, gdje se ispituje koliko iznosi trošak razmontiranja, preseljenja i ponovnog montiranja u proizvodni pogon na novo mjesto. Želi se i ispitati ekonomska isplativost tog premještanja strojeva, odnosno da li će povećana produktivnost isplatiti investicijski iznos koji je uloženi u preseljenje i izradu novog prostornog rasporeda.

Zadnji kriterij ovih autora su različita pitanja o vezi utjecaja promatrane proizvodnje na okoliš. Unutar toga postoje razni kriteriji poput utjecaja buke ili vibracija strojeva koji su u blizini, međusobno jedan na drugoga ili na zdravlje zaposlenika. Također ispituje se mogućnost zagađenja i njegovo sprječavanje i mogućnost brze reakcije, kao i prevencija od požara u pogonu.

U sljedećem radu kriteriji su malo izmijenjeni te uzimaju neke druge probleme koji se pojavljuju prilikom procjene različitih varijanti prostornog rasporeda proizvodnog pogona. Ti kriteriji su:[7]

- Udaljenosti pri rukovanju materijalom
- Pristupačnost
- Omjer oblika
- Održavanje
- Fleksibilnost

Vidljivo je da su ovi kriteriji mnogo drugačiji od prethodnih. Ovdje se u razmatranje ne uzima minimiziranje ukupnog transportnog učina, već minimiziranje udaljenosti između elemenata sustava koje materijal mora proći u procesu. Razlog leži u tome što se ovim procesom želi postići što veća fleksibilnost, kako bi cijeli proizvodni pogon mogao u vrlo kratkom vremenu odgovoriti na različite promjene i kako se ne bi nekom promjenom redoslijeda operacija višestruko povećao ukupni transportni učinak.

Sljedeći kriterij je pristupačnost gdje se želi osigurati da se svakom radnom mjestu i stroju može vrlo jednostavno pristupiti, sa minimalnom šansom za oštećenje materijala ili ozljede zaposlenika. Također u ovom kriteriju se gleda položaj različitih odjela, pa bi na primjer idealno bilo da skladište ima centralni položaj gdje se iz svih odjela vrlo jednostavno i brzo dođe do njega, ili da se skladišta nalaze blizu utovarnih i istovarnih rampa, kako bi se taj proces obavio što brže i sigurnije, bez da ometa rad ostalih odjela.

Održavanje je još jedan kriterij s kojim se želi povećati sigurnost i minimizirati šanse za ozljede zaposlenika, ali također želi se i smanjiti vrijeme čekanja pogona u zastoju zbog popravka, odnosno ubrzati vrijeme povratka. To se donekle očituje i kroz pristupačnost gdje se želi osigurati da se svim dijelovima stroja može pristupiti bez problema radi što bržeg identificiranja kvara i popravka.

Fleksibilnost kao kriterij se javlja u današnje vrijeme zbog sve većih zahtjeva koje tržište stavlja pred proizvodnju. Ovim kriterijem želi se procijeniti koliko je prostorni raspored

podložan brzim promjenama elemenata i redoslijeda operacija. Time se osigurava konkurentna prednost i spremnost na izradu različitih specifičnih proizvoda.

U još jednom radu koji se bavi višekriterijalnim odlučivanjem u proces odabira prostornog rasporeda navedeni su još neki kriteriji koji se mogu razmatrati i služiti kao osnova za procjenu varijanti prostornog rasporeda. Navedeni kriteriji su:[8]

- Efikasnost rukovanja materijalom
- Iskoristivost prostora
- Estetika
- Sigurnost
- Buka
- Jednostavnost nadzora
- Mogućnost proširenja
- Iskoristivost radne snage
- Povezanost s organizacijskom strukturom
- Fleksibilnost

Estetika je kriterij koji nije toliko povezan uz proizvodni proces, već je on kao kriterij bitan menadžmentu. Oni žele stvoriti oku ugodan i jednostavan radni prostor, kako bi ga jednog dana u slučaju preseljenja poduzeća što lakše prodali. Pri ocjenjivanju ovoga kriterija, jako je teško postići objektivnost.

Sigurnost je vrlo važan kriterij svim proizvodnim poduzećima i njime se želi minimizirati šansa za ozljede zaposlenika. Kritične stvari koje se gledaju u sigurnosti su rad na strojevima i interakcija zaposlenika i strojeva za prijevoz materijala poput viličara i kranova. Radi toga radna mjesta moraju biti što jednostavnija i pristupačnija, a prostor za transport ako je moguće što više odvojiti od prostora za kretanje zaposlenika.

Jednostavan nadzor je potreban u proizvodnji kako bi nadzornik mogao pravovremeno reagirati na moguće probleme unutar proizvodnje, i kako bi mogao nadgledati rad svih odjela. Stoga je pozicija njegovoga ureda vrlo bitna.[9]

Efikasnost rukovanja alatom može se poistovjetiti sa kriterijem minimiziranja ukupnog transportnog učina, kao i iskoristivost prostora sa potrebnim prostorom za proizvodni pogon. Buku je također vrlo bitno smanjiti radi očuvanja zdravlja zaposlenika, ali i njegovog općenitog zadovoljstva i motiviranosti, jer će u nezdravoj okolini ona biti jako mala.

Mogućnost proširenja je stavka gdje se gleda koliko je proizvodni pogon spreman povećavati se u budućnosti, i ovisno o strategiji i planovima poduzeća ocjenjuje se njegova važnost. Ovo je vrlo bitan kriterij za planiranje daljnjeg razvoja poduzeća.

Iskoristivost radne snage, kao i iskoristivost prostora gleda omjer koliko je radnik bio u funkciji, odnosno koliko nije bio. Cilj je da se ta iskoristivost maksimizira, odnosno da se ne dogodi trenutak u kojem radnik zbog zastoja neće imati šta za raditi. Također ona se može povećati i edukacijom zaposlenika kojim se povećava spektar njihovoga znanja, te se dobiva fleksibilna struktura u kojoj radnik može raditi na više radnih mjesta.

Još jedan kriterij koji je ostao je povezanost sa organizacijskom strukturom, koji gleda koliko je pozicija proizvodnog pogona dobro ukomponirana u organizacijsku strukturu poduzeća te da li ima pravovremene informacije, pravo u odlučivanju i koliko kvalitetno može komunicirati sa ostalim odjelima poduzeća.

Nabrajajući i analizirajući sve ove kriterije, vidljivo je da oni odgovaraju na sve moguće probleme koji su navedeni u prvome poglavlju. Svi ovi kriteriji su dobro strukturirani, i ovisno o strategiji i cilju bavljenja poduzeća, za multikriterijalno odlučivanje pri odabiru prostornog rasporeda proizvodnog sustava potrebno je odabrati one kriterije koji će najviše utjecati na izbor najpovoljnije varijante, odnosno koji su najvažniji za proizvodni sustav. Vidljive su i sličnosti među određenim kriterijima pa se može napraviti njihova sistematizacija koja će biti opisana u nastavku.

### ***3.2. Sistematizacija kriterija***

Prikazujući i analizirajući svaki pojedini kriterij naveden u prošleme poglavlju, bilo je vidljivo da su pojedini kriteriji vrlo slični, te da bi se mogla napraviti njihova sistematizacija, koja je provedena, te su kriteriji podijeljeni u tri skupine:

- Kriteriji vezani za okoliš
- Ekonomsko-tehnološki kriteriji
- Sigurnosni kriteriji

Među kriterije vezane za okoliš spadaju razna pitanja koja se otvaraju u vezi utjecaja buke i vibracija na okoliš, kao i mogućnosti zagađenja i pojavljivanja požara. Također tu spadaju i razni kriteriji energetske učinkovitosti, kojima se želi povećati stupanj iskorištenja energije.

U ekonomsko-tehnološke spada najveći broj kriterija počevši od minimizacije ukupnog transportnog učina, koji ima za cilj smanjiti troškove i skratiti vrijeme ciklusa proizvodnje i time povećati produktivnost. Tu su i iskorištenje prostora i ljudskih resursa, kao i fleksibilnost kojima se želi osigurati konkurentna prednost i sposobnost na izradu specifičnih proizvoda. Vrlo bitan ekonomski kriterij je investicijski iznos premještanja strojeva i opreme, koji uzima u obzir, koliko će se planirana investicija isplatiti u budućnosti, odnosno da li će dovesti do veće zarade. Kriteriji koji tu spadaju su jednostavnost nadzora i povezanost sa organizacijskom strukturom poduzeća koji osiguravaju da u svakom trenutku se ima pravovremena i pravovaljana informacija koji procesi se izvode u pogonu i koji proizvodi su spremni. Zadnji kriterij koji je preostao je mogućnost proširenja koji je bitan kod planiranja i definiranja strategije poduzeća u budućnosti.

Sigurnosni kriteriji su pristupačnost i održavanje koji osiguravaju da se svim dijelovima strojeva i opreme može lako pristupiti i upravljati, te uz minimalne rizike održavati. Također tu su estetika prostornog rasporeda i općenita sigurnost zaposlenika unutar poduzeća koja se brine da oni imaju što sigurnije okruženje za rad, praveći njihova mjesta sigurnima i odvajajući transportna vozila od zone kretanja zaposlenika. Nakon šta su se analizirali i sistematizirali kriteriji, prikazat će se metode višekriterijalnog odlučivanja.

#### 4. VIŠEKRITERIJALNO ODLUČIVANJE

Nakon pregleda metoda izrade i planiranja prostornog rasporeda proizvodnog sustava i analiziranja i sistematiziranja kriterija odlučivanja potrebno je proučiti i objasniti pojam višekriterijalnog odlučivanja te analizirati metode koje se javlja unutar njega.

Definicija višekriterijalnog odlučivanja je da je to odlučivanje zasnovano na različitim kriterijima pomoću kojih se ocjenjuju različite varijante rješenja problema. Metode višekriterijalnog odlučivanja ne služe samo za isticanje jedne najpogodnije opcije, već se mogu koristiti i za rangiranje alternativa, zatim za izdvajanje alternativa koje su zadovoljavajuće, ili jednostavno za odvajanje prihvatljivih alternativa od neprihvatljivih.[10]

Odlučivanje je stalan proces koji se odvija u svakom trenutku života. To je proces u kojem se izabire između dvije ili više različitih mogućnosti rješavanja nekog problema. U poslovnome svijetu valja razlikovati operativne, taktičke i strateške odluke. Strateške odluke su one najvažnije i to je proces odlučivanja najvišeg ranga. Za donošenje strateških odluka potreban je veliki broj ljudi koji će uz pomoć informacijskih sustava pokušati pružiti podršku donositelju odluke, koji u to sve mora uključiti svoje znanje i iskustvo. Donošenje strateških odluka je vrlo zahtjevan proces jer ima dalekosežne posljedice i utječe na velik broj ljudi, stoga se u svim uspješnijim organizacijama kao pomoć pri donošenju odluka koriste metode višekriterijalnog odlučivanja.

Treba razlikovati i individualno od grupnog odlučivanja. Obilježja individualnog odlučivanja su da ih donosi pojedinac, u pravilu su brže i jednostavnije, ali ne nužno i lakše. Odgovornost snosi pojedinac koji je donositelj odluke, ali se zato koristi za rješavanje jednostavnijih problema za koje je potrebno znanje samo jedne osobe. Prednosti su što je taj proces odlučivanja izričito brz i donosi ga većinom stručnjak za to područje, dok je mana što je većinom mali broj generiranih alternativa rješenja problema.[11]



Problemi višekriterijalnog odlučivanja mogu biti vrlo kompleksni, ne samo zbog velikog broja različitih kriterija, već i zbog različite važnosti tih kriterija. Stoga je vrlo bitno taj proces obaviti što objektivnije i strukturiranije kako bi se donijele što bolje i kvalitetnije odluke.

Već je rečeno da je glavni cilj metoda višekriterijalnog odlučivanja pružiti podršku donositelju odluke u procesu odlučivanja pri velikom broju varijanti rješenja problema. No također u faktor odlučivanja se uzimaju i osobne želje donositelja odluke, te njegovo iskustvo i znanje pri donošenju odluka. Metode višekriterijalnog odlučivanja nalaze primjenu u vrlo širokom spektru grana znanosti i industrije poput: ulaganja u projekte, upravljanju objektima, utjecaju na okoliš, odabir najpogodnijih lokacija, odabiru najpovoljnijeg prostornog rasporeda proizvodnog sustava, odabiru najpovoljnijeg prometnog pravca, internet bankarstvu, odabiru dobavljača, odabiru strategije održavanja, itd.

#### ***4.1. Metode višekriterijalnog odlučivanja***

Opća, standardizirana podjela metoda višekriterijalnog odlučivanja ne postoji, već se one mogu pronaći prema nekom od kriterija koje autori imaju. Tako postoji podjela metoda prema postupku rješavanja, prema načinu uključivanja donositelja odluke u proces odlučivanja, prema vrsti problema koje te metode rješavaju, itd. Međutim iako se te metode mogu sistematizirati pomoću navedenih kriterija, one su sve specifične na svoj način te ih je najbolje predstaviti zasebno svaku za sebe. Neke od najvažnijih metoda su:

- ELECTRE
- TOPSIS
- PROMETHEE
- AHP
- ANP
- DEA
- SMART
- GRA
- AIRM
- OCRA

- WPM
- ER
- Fuzzy AHP

Nekoliko od ovih metoda koje se najčešće koriste u praksi biti će prikazane u sljedećim poglavljima, dok će se AHP (engl. *Analytical Hierarchy Process*) metoda detaljno objasniti budući da će se ona koristiti u ovome radu kao metoda pomoću koje će se vršiti odlučivanje u procesu odabira najpogodnijeg prostornog rasporeda u proizvodnom procesu. Prikazati će se matematičke osnove, primjena te metode i njezine prednosti i mane.

#### **4.1.1. ELECTRE**

ELECTRE (engl. *Elimination Et Choice Translating Reality*) metodu prvi puta je predstavio Bernard Roy 1965. Godine, a u prijevodu bi značila eliminacija i izbor izražavanja stvarnosti. U početku se ELECTRE metoda koristila za izbor najbolje radnje iz zadanoga skupa radnji, no s vremenom je evoluirala te je nađena primjena za 3 glavna problema, a to su sortiranje, rangiranje i odabir. ELECTRE metoda se dalje grana na ELECTRE I, ELECTRE II, ELECTRE III, ELECTRE IV, ELECTRE IS i ELECTRE TRI. Sve metode se zasnivaju na algoritmu kojega tvore uvjeti suglasnosti i nesuglasnosti koji se definiraju pomoću željene razine suglasnosti i nesuglasnosti i stvarnog indeksa suglasnosti i nesuglasnosti. Međutim ove se metode razlikuju u operativnom smislu te je metoda ELECTRE I zadužena za donošenje odluka, a metode ELECTRE II, III, IV za probleme rangiranja rješenja. Metoda ELECTRE TRI služi za probleme dodjeljivanja.[12]

Prednosti ove metode su neograničen broj kriterija pomoću kojih bi se rangirale alternative, te mogućnost i kvantitativnog i kvalitativnog iskazivanja kriterija i njihove važnosti. Nedostatak ove metode je nemogućnost primjene u uvjetima u kojima donositelj odluke nije iskazao prednost određenim kriterijima ispred drugih.

#### **4.1.2. TOPSIS**

TOPSIS (engl. *Technique for Order of Preference by Similarity to ideal Solution*) je metoda koju su razvili Hwang i Yoon. U prijevodu bi ova metoda značila tehnika redosljeda

preferencija prema sličnosti idealnom rješenju. Ova metoda se temelji na odabiru alternative koja bi trebala imati najveću geometrijsku udaljenost od najlošijeg rješenja i najmanju geometrijsku udaljenost od idealnog rješenja.

Pretpostavka ove metode je da se kriteriji unutar nje jednoliko povećavaju ili smanjuju što dovodi do definiranja idealnog i negativnog idealnog rješenja. Ta metoda uspoređuje važnosti kriterija, normalizira rezultate i računa geometrijsku udaljenost između idealnog rješenja i svake pojedine alternative. Usporedbama ovih udaljenosti osigurava se rangiranje alternativa. Ova metoda se većinom koristi za rangiranje i poboljšavanje performansi rješenja, a rjeđe se koristi za same odluke. [13]

#### **4.1.3. PROMETHEE**

Metoda PROMETHEE (engl. Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations) je razvijena 1982. godine od strane Jean-Pierrea Bransa i prvotno je rješavala probleme u zdravstvu, no brzo je razvijena i za različite primjene u bankarstvu, medicini, turizmu, kemijskoj industriji, itd. Najveća prednost ove metode je njezina lakoća primjene. Primjena PROMETHEE metode sadrži dva koraka:

- Konstrukcija relacije za svaki kriterij u skupu alternativa
- Korištenje tih relacija za rješavanje višekriterijalnog problema

U prvome koraku formira se složena relacija preferencija koje se temelje na poopćenju kriterija. Definiraju se indeksi preferencija i ta složena relacija preferencija se prikazuje pomoću grafa preferencija. Bit ovog koraka je da donositelj odluke mora izraziti svoje preferencije između dviju alternativa po svakom od kriterija. Na taj način konstruirana relacija preferencije upotrebljava se tako da se za svaku alternativu izračunaju izlazni i ulazni tokovi u grafu. Na temelju tih tokova donositelj odluke može u skup alternativa uvesti parcijalni uređaj (PROMETHEE I) ili potpuni uređaj (PROMETHEE II). [14]

## **4.2. Primjena metoda višekriterijalnog odlučivanja**

Rečeno je da su metode višekriterijalnog odlučivanja primijenjene u širokom spektru grana znanosti i industrije poput bankarstva, investicija, različitim proizvodnim problemima, različitim logističkim problemima, različitim problemima onečišćavanja i očuvanja okoliša itd.

Jedna od primjena metoda višekriterijalnog odlučivanja bila je u procesu procjenjivanja prioritetnih država za izravna strana ulaganja. Uzete su Sjedinjene Američke Država kao zemlja domaćin koja želi izravno ulagati u jednu od 11 izabranih stranih razvijenih država. U tom procesu korištene su AHP metoda za određivanje težine kriterija u svakom od tri razdoblja koja su promatrana, i TOPSIS metoda za rangiranje alternativa. Neki od kriterija su bili produktivnost, razvijenost, porez, korupcija, jačina valute, rast BDP-a, itd. Nakon što su određene težine kriterija i formirane matrice, pristupilo se normalizaciji svih matrica kako bi se one mogle uspoređivati. Nakon što je i to odrađeno pomoću TOPSIS metode je dobivena rang lista zemalja pogodnih za strana ulaganja za svaki od perioda za koji su bile ocjenjivane. Primjenom ovih metoda dobivena je informacija u koje zemlje je najbolje ulagati, ali osim toga mogu se pratiti trendovi zemalja budući su bila ispitivana tri različita vremenska perioda.[15]

Metode višekriterijalnog odlučivanja imaju široku primjenu i u zdravstvenoj zaštiti, gdje ima mnogo primjera njihovog iskorištavanja, poput onoga pri procjeni zdravstvenih tehnologija, gdje je jedan institut u Njemačkoj izveo istraživanje na 7 liječnika i 12 pacijenata, gdje su oni morali procjenjivati različite tehnike liječenja hepatitisa C. Bilo je zanimljivo vidjeti kako liječnici i pacijenti daju drugačije težine određenim kriterijima, i dalo je uvid u razne varijante liječenja bolesti. Također metode su bile primjenjene u jednoj farmaceutskoj tvrtci u kojoj su dioničari te firme procjenjivali u kojem smjeru bi se trebao kretati sektor istraživanja i razvoja na temelju kriterija buduće financijske vrijednosti, vjerojatnosti uspjeha razvoja, potražnji u zdravstvu i sadašnjoj vrijednosti.[16]

Vrlo važna primjena metoda višekriterijalnog odlučivanja je i u odabiru najpovoljnijih ponuda za nabavu robu za koju postoji mogućnost nabave od više dobavljača. Kao kriteriji koji se tu

možu pojaviti su cijena, vrijeme isporuke, način plaćanja, kvaliteta robe, itd. Primjenom grupnog odlučivanja u kojem sudjeluje više osoba, dolazi do objektivnijeg ocjenjivanja kriterija i alternativa, te samim time do bolje i kvalitetnije odluke. Primjenom ovih metoda, osim što se dobiva najpogodnija, dobiva se i rang lista alternativa, koja se može koristiti ukoliko dođe do problema sa dobavljačem koji nudi najbolju ponudu. Također i rezultati ovih metoda su transparentni, čime se minimizira mogućnost korupcije pri javnim nabavama.[17]

Još jednu od primjena metoda višekriterijalnog odlučivanja je moguće pronaći pri planiranju i projektiranju trase željezničke pruge. U povijesti je bilo mnogo problema i promašaja pri izgradnji željezničkih pruga, a svi su bili vezani uz to da je glavni i jedini kriterij koji se gledao prilikom planiranja bio financijski. Radi pronalaženja boljih dugoročnih rješenja koji će povećati kvalitetu prijevoznih usluga, očuvati kvalitetu životne sredine i racionalno iskoristiti prirodne resurse, potrebno je iskoristiti neku od metoda višekriterijalnog odlučivanja. Pri tome je za kriterije osim financijsko-ekonomskih potrebno uzeti u obzir i tehničko-tehnološke, prometne, prostorne i ekološke kriterije. U ovom se primjeru pružila mogućnost formiranja četiri nove varijante trase željezničke pruge koja je u planu. Za kriterije su se koristili veličina investicije za izgradnju pruge, troškovi upravljanja i održavanja pruge, kapacitet željezničke pruge, posljedice trase na prostorni razvoj i utjecaj trase na životnu sredinu. Budući da se kriteriji nisu ocjenjivali, već su se mogli analitički izračunati, u obradi tih podataka sudjelovali su planeri i nezavisni eksperti. Provođenjem metode višekriterijalnog odlučivanja i provođenjem analize osjetljivosti za dobivene podatke, dobivene su rang liste za slučajeve kada bi jedan od kriterija bio najvažniji. Ti podaci će dati podršku pri odlučivanju investitora, u ovisnosti o tome koji si oni kriterij uzmu kao najvažniji.[18]

## 5. AHP METODA VIŠEKRITERIJALNOG ODLUČIVANJA

### 5.1. Definicija, struktura i način primjene AHP metode

Metoda analitičkog hijerarhijskog procesa (engl. *The Analytic Hierarchy Process*) spada u najpoznatije i najčešće korištene metode za višekriterijalno odlučivanje kada se proces odlučivanja, odnosno izbor neke od raspoloživih alternativa ili njihovo rangiranje, temelji na više kriterija koji imaju različitu važnost i koji se izražavaju pomoću različitih skala. AHP metoda omogućava fleksibilnost procesa odlučivanja i pomaže donositeljima odluka da postavе kriterije po važnosti i donesu kvalitetnu odluku.[19]

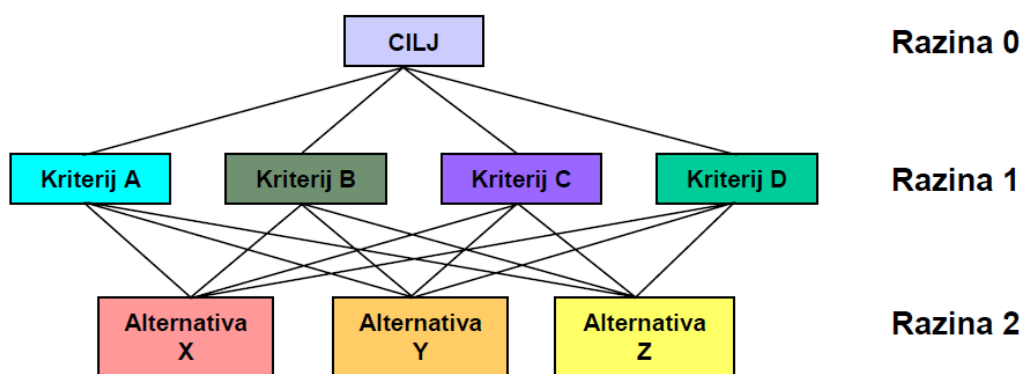
AHP metodu je razvio Thomas Saaty početkom sedamdesetih godina dvadesetog stoljeća, a ona predstavlja vrlo važnu metodu za višekriterijalno odlučivanje koja ima svoju primjenu u rješavanju kompleksnih problema čije elemente čine ciljevi, kriteriji i alternative.

AHP metoda ima veliku važnost u strukturiranju problema i procesu donošenja odluke. Primjenom AHP metode omogućava se interaktivno kreiranje hijerarhije problema koja služi kao priprema za odlučivanje, a zatim se uspoređuju parovi kriterija i alternativa, te se na kraju vrši sinteza svih uspoređivanja i određuju se težinski koeficijenti svih elemenata hijerarhije. Zbroj težinskih koeficijenata elemenata na svakoj razini hijerarhije jednak je 1 i omogućava donositelju odluke da rangira sve elemente hijerarhije po važnosti.

AHP omogućava i interaktivnu analizu osjetljivosti. Analizom osjetljivosti sagledava se kako svaka promjena ulaznih podataka utječu na izlazne rezultate s ciljem otkrivanja zašto je baš ta alternativa ispala najbolja i što bi se dogodilo ako bi se kriteriji malo promijenili s ciljem dobivanja šire slike rješenja problema. U analizi osjetljivosti mogu se simulirati važnosti kriterija i promatrati promjene u rangi alternativa. Analiza se izvodi kako bi se utvrdilo da li je rang lista alternativa dovoljno stabilna u odnosu na prihvatljive promjene ulaznih podataka, odnosno da li će male promjene u ulaznim podacima dovesti do velikih promjena u rangi alternativa. Ukoliko promjenom ulaznih podataka za 5% u svim mogućim kombinacijama, ne dođe do promjene u rangi alternativa, smatra se da je postignuta stabilnost rezultata.[19]

Vrlo važan faktor u primjeni AHP metode je i konzistentnost procjena donositelja odluke. Tijekom uspoređivanja različitih kombinacija kriterija, provjerava se konzistentnost procjena donositelja odluke i utvrđuje ispravnost dobivenih težinskih koeficijenata kriterija i prioriteta alternativa. To će biti objašnjeno u sljedećem poglavlju.

Hijerarhijska struktura AHP metode je prikazana na sljedećoj slici a sastoji se od cilja ispod kojeg se na prvoj razini nalaze kriteriji, dok se na zadnjoj razini nalaze alternative.



Slika 7. Hijerarhijska struktura AHP metode [11]

U AHP metodi koristi se tablični zapis za rangiranje i uspoređivanje alternativa. Unutar njih se zapisuju prednosti jednog kriterija ili alternative nad drugom. Nakon toga metoda gleda prednosti i nedostatke pojedinih alternativa i kao rezultate rangira alternative. Pri usporedbi pojedinih kriterija ne koriste se neke standardne jedinice već se koristi tzv. Saaty-eva skala koja je prikazana i objašnjena u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Saaty-eva skala [2]

Intenzitet važnosti	Definicija	Objašnjenje
1	Jednako važno	Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju
3	Umjereno važnije	Na temelju iskustva i procjena daje se umjerena prednost jednoj aktivnosti u odnosu na drugu
5	Strogo važnije	Na temelju iskustva i procjena strogo se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu
7	Vrlo stroga, dokazana važnost	Jedna aktivnost izrazito se favorizira u odnosu na drugu, njezina dominacija dokazuje se u praksi
9	Ekstremna važnost	Dokazi na temelju kojih se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu, potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću
2,4,6,8	Međuvrijednosti	
1.1 – 1.9	Decimalne vrijednosti	Pri usporedbi aktivnosti koje su po važnosti blizu jedna drugoj, potrebna su decimalne vrijednosti kako bi se preciznije izrazila razlika u njihovoj važnosti.

Skala se sastoji od devet numeričkih ocjena pomoću kojih donositelj odluke razlikuje intenzitet odnosa između dvaju elemenata. Neparnim brojevima dana su svojstva kojima ona odgovaraju, dok parni brojevi opisuju njihove međuvrijednosti. Težine kriterija, odnosno njihova važnost, određuju se uspoređivanjem kriterija u parovima, te određivanjem koliko je jedan kriterij važniji od drugog.

Primjena AHP metode se sastoji od sljedećih koraka:[20]

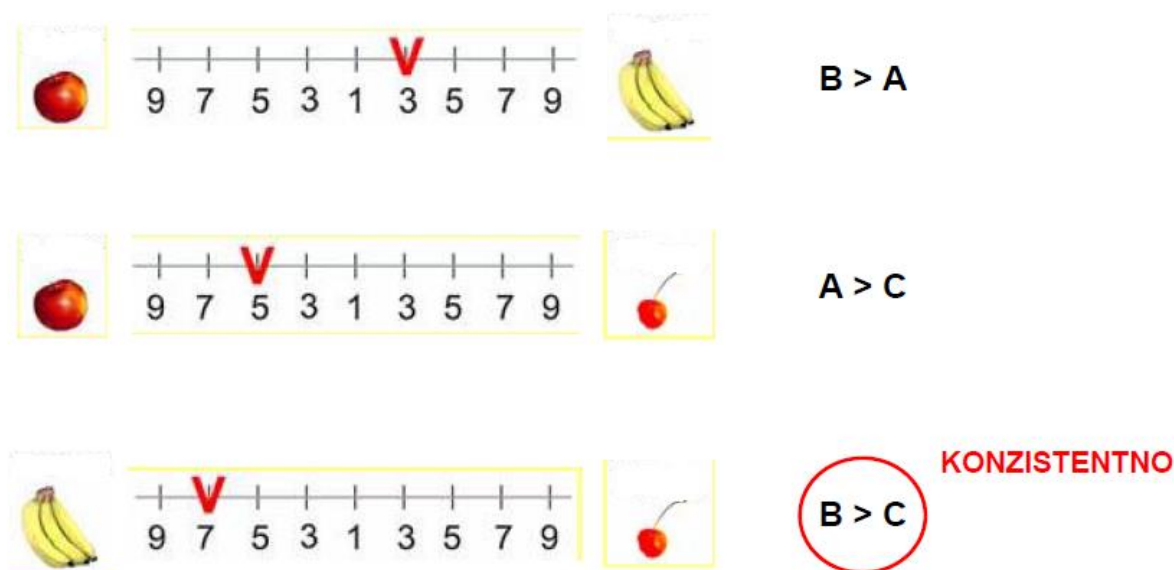
1. Razvija se hijerarhijski model problema odlučivanja s ciljem na vrhu, kriterijima i podkriterijima na nižim razinama, te alternativama na dnu modela.



2. Na svakoj razini hijerarhijske strukture u parovima se međusobno uspoređuju elementi te strukture, pri čemu se usporedbe donositelja odluke izražavaju uz pomoć Saaty-eve skale relativne važnosti koja ima odgovarajuće numeričke vrijednosti u rasponu od 1 do 9.
3. Iz procjena relativnih važnosti elemenata odgovarajuće razine hijerarhijske strukture problema pomoću matematičkog modela izračunavaju se težine kriterija, podkriterija i alternativa i rangiraju alternative.
4. Provodi se analiza osjetljivosti.

## 5.2. Konzistentnost

AHP metoda omogućuje provjeru konzistentnosti procjena donositelja odluke nakon uspoređivanja kriterija. Problem konzistentnosti je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 8. Prikaz problema konzistentnosti [11]

Iz ovog primjera je vidljivo da je kriterij B važniji od kriterija A, ali i da je kriterij A važniji od kriterija B. Stoga se logički može zaključiti da je kriterij B puno važniji od kriterija C što se prema ovoj slici može i vidjeti da je i da je ovaj primjer konzistentan. Problem bi se javio

da prilikom usporedbe je došlo do nekonzistentnosti i da je kriterij C prikazan kao važniji od kriterija B. Upravo provjeru takvih nepravilnosti nam omogućava AHP metoda uz pomoć indeksa konzistentnosti gdje je:[2]

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - n)}{(n - 1)} \quad (4.1)$$

gdje  $\lambda_{\max}$  predstavlja maksimalnu vrijednost matrice odlučivanja, a  $n$  broj redova matrice.

Nakon toga se izračunava omjer konzistentnosti:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.2)$$

gdje  $RI$  predstavlja indeks konzistentnosti, a za njegovo određivanje pomoću brojeva redova matrica koristi se tablica s izračunatim vrijednostima.

**Tablica 2. Vrijednosti indeksa konzistentnosti [12]**

<b>n</b>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>RI</b>	0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Kada je iznos  $CR$  manji od 0,1 tada se prihvaća da je procjena donositelja odluke konzistentna, a u ostalim slučajevima valja istražiti zašto je došlo do nekonzistentnosti.

### 5.3. Matematički temelj AHP metode

Uzmimo da je  $n$  broj kriterija ili alternativa čije težine  $w_i$  treba odrediti na temelju njihovih omjera koji se izračunavaju na sljedeći način:[19]

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \quad (4.3)$$

Od tih omjera formira se matrica relativnih važnosti A:

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} w_2/w_1 \\ w_n/w_1 \end{matrix} & \begin{matrix} w_2/w_2 & w_2/w_2 & w_2/w_n \\ w_n/w_2 & w_n/w_2 & w_n/w_n \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} a_{11} & a_{12} & a_{1n} \\ a_{12} & a_{22} & a_{2n} \\ a_{1n} & a_{n2} & a_{nn} \end{matrix} \quad (4.4)$$

Matrica A za slučaj konzistentnih procjena za koje vrijedi  $a_{ij} = a_{ik} * a_{kj}$  zadovoljava jednadžbu  $A*w=n*w$ , gdje je  $w$  vektor prioriteta. Problem rješavanja težina može se riješiti kao problem rješavanja jednadžbe  $A*w= \lambda*w$ , gdje je  $\lambda$  različit od nule.

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = n * \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Matrica A ima svojstva da je pozitivna, i recipročna jer sadrži elemente koji zadovoljavaju jednadžbu  $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$ . Ona je ranga  $r(A)=1$  i svi njezini redovi proporcionalni su prvom redu, zbog čega je samo jedna njezina svojstvena vrijednost različita od 0 i jednaka je  $n$ . Budući da je suma svojstvenih vrijednosti pozitivne matrice jednaka tragu te matrice, tj. sumi na dijagonali, svojstvena vrijednost različita od nule ima vrijednost  $n$ :

$$\lambda_{max} = n \quad (4.6)$$

Ukoliko matrica A sadrži nekonzistentnost, vektor težine  $w$  se može izračunati sustavom sljedećih jednažbi:

$$(A - \lambda_{max} * I) * w = 0 \sum_i w_i = 1 \quad (4.7)$$

Uzevši u obzir gore navedenu jednažbu vrijedi sljedeće:

$$A * w = n * w \quad (4.8)$$

$$\sum_i w_i = n * w \quad (4.9)$$

$$w = \frac{1}{n} \sum a_{ij} * w_i \quad (4.10)$$

$$\sum_i a_{ij} = \frac{w_1 + w_2 + w_n}{w_j} \quad (4.11)$$

$$w_j = \frac{w_1 + w_2 + w_n}{\sum_i a_{ij}} \quad (4.12)$$

Iz čega slijedi da težina pojedine alternative iznosi:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum \frac{a_{ij}}{\sum_i a_{ij}} \quad (4.13)$$

#### **5.4. Prednosti i nedostaci AHP metode**

Od značajnijih prednosti AHP metode valjalo bi istaknuti sljedeće:[19]

- AHP metoda integrira i kvalitativne i kvantitativne faktore u odlučivanju. Prije uvođenja AHP metode nije se u obzir uzimala važnost kvalitativnih faktora u odlučivanju, te se time odbacivala teza da su svi ljudski problemi kombinacija psiholoških i fizičkih aktivnosti, kvalitativnih i kvantitativnih elemenata. AHP je teorija

relativnog mjerenja u kojoj se koristi apsolutna skala za mjerenje kvalitativnih i kvantitativnih kriterija koji su temeljeni na procjenama eksperata.

- Redundantnost pri uspoređivanju dvaju kriterija ili alternativa dovodi do toga da je AHP metoda vrlo malo osjetljiva na greške u procjenjivanju.
- Odlučivanje pomoću AHP metode povećava znanje o problemu i snažno i brzo motivira donositelje odluke. Procesom odlučivanja dolazi se do približnog rješenja problema i to puno brže nego na većini sastanaka te s manjim troškovima procesa donošenja odluke. Dobiveni rezultati mogu se koristiti i kao ulazni podaci za neki drugi projekt ili studiju izvodljivosti, u kojima se mora donijeti puno kompleksnija odluka.
- Omogućuje se donositelju odluke analiza osjetljivosti rezultata pomoću koje se provjerava stabilnost dobivenih rezultata, odnosno koliko promjene u važnosti kriterija mogu promijeniti izlazne rezultate.
- Ova metoda uspješno simulira proces donošenja odluka od definiranja cilja, kriterija i alternativa, do uspoređivanja kriterija i alternativa u parovima i dobivanja rezultata, odnosno utvrđivanja prioriteta svih alternativa u odnosu na postavljeni cilj.
- AHP uspješno identificira i ukazuje na nekonzistentnost donositelja odluka praćenjem nekonzistentnosti u procjenama tijekom cijelog postupka, izračunavanjem indeksa i omjera konzistencije. Ovo je važno budući da se donositelji odluka rijetko kada konzistentni u svom procjenjivanju.
- Ukoliko se koristi kod grupnog donošenja odluka ova metoda će bitno poboljšati komunikaciju među članovima grupe budući da se oni moraju usuglasiti oko svakog kriterija i zajedničke procjene koja će se unijeti u matricu. Ukoliko se radi o grupnom odlučivanju u kojem svaki član smije unijeti vlastitu procjenu, izbjegava se mogućnost pojave jedinstvenog mišljenja koje se javlja zbog pritiska jednih članova na druge.
- Rezultati odlučivanja u ovoj metodi sadrže rang alternativa, ali i informacije o težinskim koeficijentima kriterija u odnosu na cilj i podkriterija u odnosu na kriterije.
- Velika prednost je postojanje kvalitetnih programskih alata koji podržavaju AHP metodu poput *Expert Choice-a* i *SuperDecisions-a*, u kojima je omogućeno jednostavno modeliranje i sučelje je prilagođeno prosječno informatički obrazovanoj osobi.

Nedostaci AHP metode su:

- Veliki broj usporedbi parova kod velike većine problema.
- Postizanje konzistencije je vrlo teško.
- Nedovoljna velika skala za uspoređivanje kriterija i alternativa, gdje se smatra da procjenjivač ne može dovoljno kvalitetno opisati razliku u važnosti između pojedinih kriterija i alternativa.
- Nemogućnost korištenja neusporedivih alternativa.

## 6. PRIMJENA AHP METODE U PROCESU ODABIRA PROSTORNOG RASPOREDA NA KONKRETNOM PRIMJERU

Nakon što je u prethodnim poglavljima iznijeta teorijska osnova planiranja prostornog rasporeda, primjene metoda višekriterijalnog odlučivanja i analiza kriterija, u ovome poglavlju će se pristupiti rješavanju konkretnog problema.

Jedno proizvodno poduzeće koje se bavi proizvodnjom robotiziranih strojeva i opreme koji imaju specijalnu primjenu, odlučilo je napraviti promjene u prostornom rasporedu njihovoga pogona, kako bi povećali učinkovitost i smanjili troškove, ali su i ujedno zbog novih situacija unutar poduzeća bili prisiljeni napraviti razmještaj strojeva i opreme. Kontaktirali su *Fakultet strojarstva i brodogradnje*, gdje se oformio studentski tim sa mentorom, koji će im snimiti trenutno stanje i izraditi nekoliko varijanti mogućih rješenja koji će se zatim putem AHP metode višekriterijalnog odlučivanja rangirati i izabrati najpogodniju alternativu. Njihova proizvodnja se može okarakterizirati kao maloserijska, prototipna proizvodnja, gdje je za zadatak dano da se varijante izgleda prostornog rasporeda proizvodnog sustava izrađuju za njihov najprodavaniji proizvod, i to metodom planiranja prostornog rasporeda prema vrsti obrade.

Proces se sastojao od nekoliko faza:

1. Snimanje postojećeg stanja i izrada matrica toka materijala, transportnih udaljenosti i ukupnog transportnog učina.
2. Izrada četiri varijante izgleda prostornoga rasporeda prema uputama i ograničenjima ekspertne skupine poduzeća, i jedne teorijske za koju ne vrijede postavljena ograničenja.
3. U kontaktu sa ekspertnom skupinom poduzeća provedba AHP metode za izbor najbolje alternative i analiza osjetljivosti.

U daljnjem tekstu rada će se koristiti izraz „poduzeće“ za već spomenuto proizvodno poduzeće, kako bi se zaštitili njihovi podaci. Također radi zaštite podataka ovom radu neće biti priloženi tlocrti prostornog rasporeda proizvodnog sustava.

## 6.1. Snimanje postojećeg stanja

Prema tehničkoj dokumentaciji koja je dobivena od strane ekspertne skupine, a koja se sastojala od tlocrta proizvodnog sustava i popisa pozicija i redoslijeda svih operacija potrebnih za izradu zadanog proizvoda pristupilo se izradi matrice toka materijala. Izrađena je neorijentirana matrica toka materijala budući da nije bitan smjer toka materijala, a pri provedbi modificirane metode trokuta potreban je upravo taj oblik matrice kako bi se metoda provela. Dobivenu matricu toka materijala moguće je vidjeti na slici 9.

Nakon što je napravljena matrica toka materijala, pristupilo se izradi matrice transportnih udaljenosti, koja se dobiva mjerenjem udaljenosti između svih elemenata unutar proizvodnog pogona. Za mjerenje se koristio programski paket *AutoCAD*, a izgled matrice transportnih udaljenosti nalazi se na slici 10.

Ukupni transportni učinak dobiva se zbrajanje svih tokova materijala između elemenata sustava, sa njihovom transportnom udaljenošću. Podatak koji se dobije zbrajanjem svih transportnih učina je ukupan transportni put koji vozilo mora proći kako bi se proizvod izradio. Taj podatak je vrlo važan za ekonomske kriterije pri AHP metodi, gdje će se težiti što kraćem ukupnom transportnom putu. Matricu ukupnog transportnog učina postojećeg stanja je moguće vidjeti na slici 11. Pomoću nje je izračunato da vozilo pređe približno 211 kilometara prilikom izrade zadanog proizvoda.



OD/KA	SL	SSM	RM53	RM01	RM02	RM04	RM05	RM06	RM07	RM08	RM56	RM09	RM10	RM13	RM15	RM17	RM47	RM19	RM20	RM26	RM27	RM28	RM29	RM30	RM31	RM32	RM33	RM54	RM36	RM35	US
SL	0																														
SSM	0																														
RM53	168	0																													
RM01	0	0	160																												
RM02	0	0	19	0																											
RM04	0	0	80	0	0																										
RM05	0	0	0	0	0	0																									
RM06	1	0	0	0	0	0	20																								
RM07	0	0	0	113	24	35	37	0																							
RM08	0	0	0	0	10	0	1	0	1																						
RM56	0	0	0	0	0	0	5	1	2	0																					
RM09	0	115	4	0	0	0	11	0	7	0	0																				
RM10	0	2	0	0	0	0	7	0	25	2	0	18																			
RM13	0	62	0	2	0	1	0	0	18	0	0	52	11																		
RM15	0	2	0	0	0	0	2	0	9	1	0	35	29	29																	
RM17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	1																
RM47	0	0	0	0	0	1	8	0	11	0	0	0	3	4	0	0															
RM19	0	1	0	0	0	0	12	16	24	2	2	7	24	3	10	16	0														
RM20	2	0	1	0	0	0	2	0	1	0	0	6	5	7	1	0	0	0													
RM26	0	0	0	0	0	0	0	0	17	0	0	0	0	2	3	0	1	4	0												
RM27	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0											
RM28	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0										
RM29	0	0	0	0	0	0	0	0	1	14	0	0	0	2	1	0	0	3	12	0	4	0									
RM30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0								
RM31	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
RM32	12	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RM33	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
RM54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24	1	0	0	0	0	0	
RM36	0	0	5	0	0	5	11	0	29	5	0	14	52	102	40	18	14	58	3	2	26	0	32	0	8	17	1	0	0	0	
RM35	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	355	0	
US	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	2	0	0	0	4	0	1	440	22	

Slika 9. Matrica toka materijala

OD/KA	SL	SSM	RM53	RM01	RM02	RM04	RM05	RM06	RM07	RM08	RM56	RM09	RM10	RM13	RM15	RM17	RM47	RM19	RM20	RM26	RM27	RM28	RM29	RM30	RM31	RM32	RM33	RM54	RM36	RM35	US
SL																															
SSM																															
RM53	23																														
RM01			25																												
RM02			5																												
RM04			20																												
RM05																															
RM06	35						85																								
RM07				40	60	90	75																								
RM08					60		70	15	10																						
RM56							85		10																						
RM09		10	235				260		185																						
RM10		53					290		215	220		50																			
RM13		55		240		290			215			40	10																		
RM15		45					280		205	210		40	10	10																	
RM17												35			15																
RM47					260	255		180					40	45																	
RM19		40					240	165	170	175	170	60	110	110	90	80															
RM20	275		240				270		195			115	115	110	90																
RM26									170					130	100		80	80													
RM27	310	65											65																		
RM28		85																													
RM29									165	175				360	730			310	330		195										
RM30										40																					
RM31	220	145																													
RM32	220	145																				125									
RM33		145																													
RM54																								3	10						
RM36			270			300	300		215	235		100	55	55	65	70	100	64	165	130	135		360		195	195	195				
RM35																															
US			170					125	125					30												95		95	130		

Slika 10. Matrica transportnih udaljenosti za trenutno stanje



## 6.2. Izrada varijanti prostornog rasporeda proizvodnog sustava

Nakon što je snimljeno postojeće stanje i izrađene su matrice toka materijala, transportnih udaljenosti i ukupnog transportnog učina, pristupilo se izradi četiri varijante izgleda prostornog rasporeda proizvodnog sustava, koje su se izrađivale prema uputama i ograničenjima ekspertne skupine poduzeća, i jedne teorijske/optimalne varijante za koju nisu vrijedila ta ograničenja.

Ograničenja su se prvenstveno odnosila na fiksna, odnosno već unaprijed zadana mjesta određenih radnih mjesta, pa su tako za varijantu 1 fiksna radna mjesta bila RM 17, RM 19, RM 27, RM 28 i RM 47. Za varijante 2, 3 i 4 se broj fiksnih radnih mjesta smanjio pa su to bili RM 17, RM 27, RM 28 i RM 47. Za teorijsku/optimalnu varijantu nije bilo ograničenja u tom smislu, odnosno sva radna mjesta su bila pokretna.

Također organiziran je posjet proizvodnom pogonu u kojem su se definirale pomoćne površine radnoga mjesta, kao i dodatna mjesta za odlaganje materijala. Definirane je i koja radna mjesta ne smiju biti blizu. Pod „blizu“ se smatraju susjedna radna mjesta ili mjesta odijeljena transportnim putem. Smjernice koje su dobivene su sljedeće:

- RM 07 - 3x4 m cijelo radno mjesto koje uključuje pomoćne površine za manipulaciju
- RM 56 - na radno mjesto dodati po 3 m sa svake glavne strane te 1,5 m sa bočnih
- RM 01 - radni dio stroja je dugačak oko 7 m te na tom dijelu treba biti dodatak od 3,5 m sa strane sa koje se skidaju obradci (tih 3,5 m može biti dio transportnog puta). Za ostalu dužinu stroja treba postojati dodatak od 2 m (prostor za operatera i radni stol)
- RM 02 - isto kao za RM 01 samo što je dodatak od 3,5 m po cijeloj dužini
- RM 04 - s bočne strane ništa, po 3 m sa strane utovara
- RM 05 - poželjan smještaj odmah poslije RM 01, RM 02, RM 04, s bočne strane dodatak od 1,5 m, s prednje 3 m, a iza 1 m
- RM 08 - ukupna površina 1,5x1,5 m te sa dvije strane potreban dodatak za paletu
- općenito za gornju skupinu radnih mjesta: potreban je prostor za odlaganje materijala 4x5 m ili iste površine podijeljene na nekoliko dijelova, kao i prostor za odlaganje gotovih dijelova, također 4x5 m

- RM 13, RM 15 i RM 17 treba promatrati kao blokove/površine dimenzija otprilike kao i na početnom prostornom rasporedu, gdje je uključena sva potrebna površina radnog mjesta
- iznimka je RM 09 čija ukupna površina iznosi 10x3 m te treba pripaziti da se ne nalazi na putu kranu
- RM 26 - 2 m sa prednje i stražnje strane, s jednog boka dodatak od 1,5 m
- potrebna je površina od otprilike 7x3 m za ulazni materijal koji dolazi od dobavljača (poluproizvodi koji idu na kontrolu prije obrade)
- RM07 ne smije biti blizu: RM05, RM13, RM15, RM17, RM47, RM21, RM47, RM57.
- RM04 ne smije biti blizu RM13, RM15, RM17, RM47
- RM54, RM30, RM31, RM32, RM33, RM08 treba biti grupirano unutar jednog prostora
- RM28 ne smije biti nigdje blizu bravarije niti rezaone

Nakon što su dobivene smjernice i definirana ograničenja, izradile su se četiri različite varijante prostornog rasporeda proizvodnog sustava. Nakon što su izrađene, za svaku varijantu su napravljene matrice transportnih udaljenosti i ukupnog transportnog učina. Nakon što je iz njih izračunat ukupan transportni put koje vozilo mora proći za svaku pojedinu varijantu, taj iznos je uspoređen sa ukupnim transportnim putem koje vozilo treba proći u trenutnom izgledu proizvodnog sustava i dobivena je postotna ušteda u ukupnom transportnom putu. Za varijantu 1 ona iznosi 30 %, za varijantu 2 iznosi 50 %, za varijantu 3 iznosi 51 %, a za varijantu 4 je postignuta najveća ušteda u ukupnom transportnom putu i ona iznosi 64 %. Dobivene matrice ukupnog transportnog učina i postotne uštede prikazane su na sljedećim slikama.



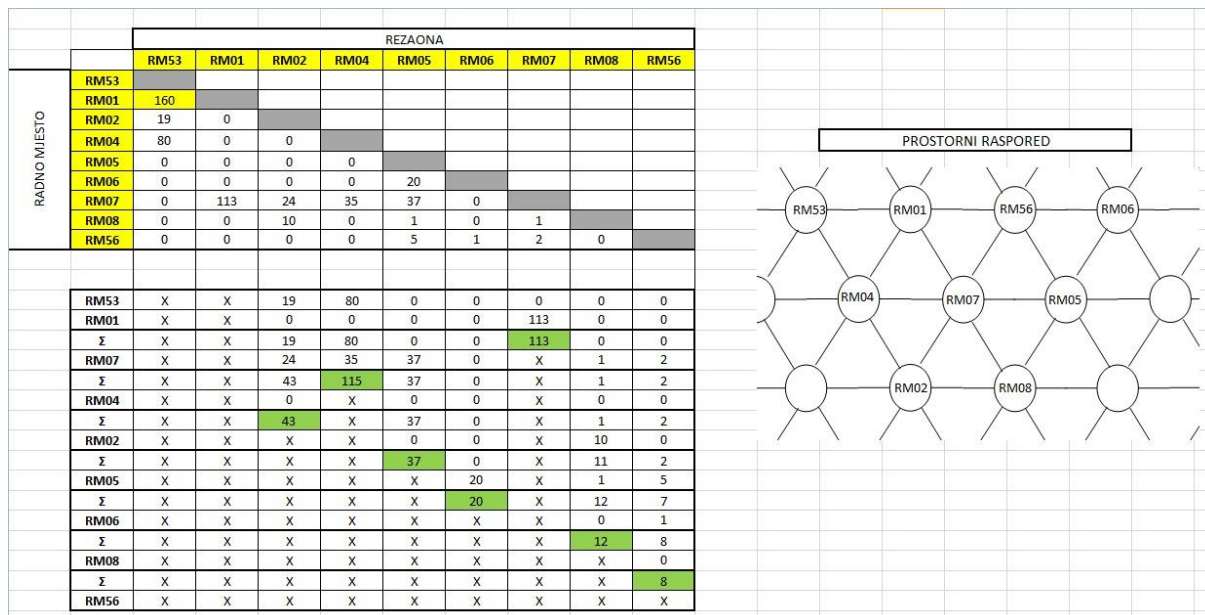




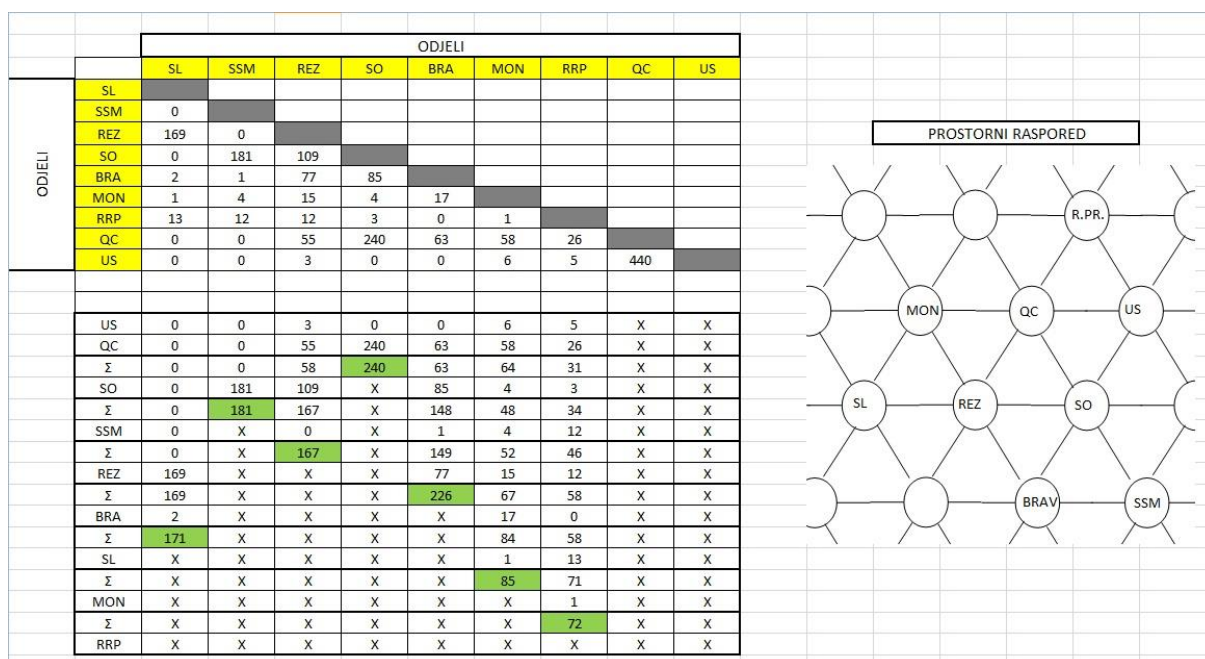








Slika 17. Modificirana metoda trokuta – drugi odjel



Slika 18. Modificirana metoda trokuta – između odjela

Nakon što su provedene modificirane metode trokuta unutar odjela i između odjela, koje su temeljene na matrici toka materijala, dobivene su nove matrice transportnih udaljenosti i ukupnog transportnog učina koja je prikazana sljedećoj slici.



Optimalna varijanta pokazuje uštedu transportnih puteva od 86%. Glavne prednosti dobivenog idealnog rasporeda su uz manji transportni intenzitet, preglednija i organiziranija proizvodnja, te bolja iskorištenost proizvodnih površina. Kao glavni nedostatak moguće je navesti probleme koji se mogu javiti u slučaju povećanja proizvodnih kapaciteta ili širenja proizvodnje.

Svrha izrade ove teorijske/optimalne varijante je:

- 1) Da se vidi koji je najmanji mogući transportni put u ovom proizvodnom procesu tj. do kuda se može najdalje ići sa smanjenjima i uštedama transportnih puteva,
- 2) Da se uspoređi sa ranije izloženim, realnim varijantama 1, 2, 3 i 4
- 3) Ako bi se hipotetski proizvodni pogon totalno ili djelomično preuređivao ili selio, da se vidi koja radna mjesta valja pozicionirati pokraj kojih, te koje odjele valja pozicionirati pokraj kojih.

### ***6.3. Provedba AHP metode u procesu izbora prostornog rasporeda proizvodnog sustava***

Nakon što su izrađene varijante, dolazi se do provedbe AHP metode višekriterijalnog odlučivanja i ona će se sastojati od sljedećih koraka:

1. Prijedlog mogućih kriterija za odabir varijante prostornog rasporeda ekspertnom timu poduzeća.
2. Definiranje koji kriteriji bi bili relevantni.
3. Izrada podloga za međusobno ocjenjivanje važnosti kriterija.
4. Ocjenjivanje važnosti kriterija od strane ekspertnog tima
5. Izračun težina kriterija i provjera konzistentnosti.
6. Izrada podloga za ocjenjivanje varijanti prema odabranim kriterijima.
7. Ocjenjivanje varijanti prema kriterijima od strane ekspertnog tima.
8. Rangiranje varijanti prema svim kriterijima i konačno s obzirom na cilj.
9. Analiza osjetljivosti i prezentacija najbolje varijante.

### 6.3.1. Ocjenjivanje i izračun težina kriterija

Mogući kriteriji su analizirani i sistematizirani u 2. poglavlju ovoga rada, te su oni bili ponuđeni ekspertnom timu poduzeća kao mogući kriteriji za odabir varijante prostornog rasporeda.

Nakon sastanka ekspertne grupe zaključeno je da su im bitni kriteriji:

1. Sigurnost
2. Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta
3. Trošak preseljenja/isplativost investicije
4. Logički redoslijed proizvodnje (grupiranje tehnologija)
5. Trošak transporta
6. Mogućnost proširenja
7. Iskoristivost radne snage

Postojala je nesigurnost u tome da li su kriteriji sigurnosti i utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta valjani za ovu analizu budući da će ih biti teško adekvatno ocijeniti u međusobnom kompariranju varijanti. Postojala su dva rješenja toga problema, a jedno je da ukoliko je mišljenje da ti kriteriji nisu važni kao ostali i da su sve varijante bliske prema njima, tada će se ti kriteriji izuzeti jer je za očekivati da neće bitno utjecati na redoslijed varijanti. Ukoliko rezultat ispadne takav da su dvije najbolje varijante približno jednake, moguće je provesti dodatnu analizu tih varijanti prema spomenutim kriterijima. Drugo rješenje je da ukoliko je mišljenje da ima razlika između varijanti prema tim kriterijima, i da su ti kriteriji važni za odluku, tada će ih se zadržati.

Odlučeno je da će se provesti metoda na dva načina, s 5 kriterija i sa 7 kriterija. Nakon šta su izrađene podloge za međusobno ocjenjivanje važnosti kriterija one su poslane na ocjenjivanje ekspertnom timu poduzeća. Na sljedećim slikama se mogu vidjeti ispunjene podloge.

Sigurnost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta
Sigurnost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak preseljenja/isplativost investicije
Sigurnost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Logički redoslijed proizvodnje
Sigurnost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak transporta
Sigurnost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Sigurnost	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak preseljenja/isplativost investicije
Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Logički redoslijed proizvodnje
Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak transporta
Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Logički redoslijed proizvodnje
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak transporta
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Logički redoslijed proizvodnje	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak transporta
Logički redoslijed proizvodnje	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Logički redoslijed proizvodnje	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Trošak transporta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Trošak transporta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Mogućnost proširenja	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage

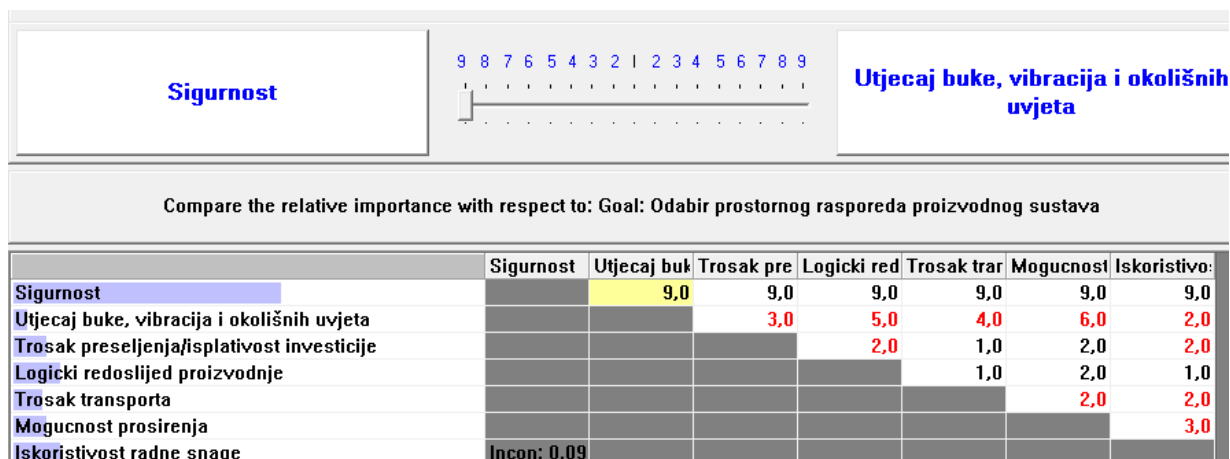
Slika 20. Ocjenjivanje važnosti kriterija – verzija s 7 kriterija

Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Logički redoslijed proizvodnje
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak transporta
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Trošak preseljenja/isplativost investicije	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Logički redoslijed proizvodnje	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Trošak transporta
Logički redoslijed proizvodnje	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Logički redoslijed proizvodnje	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Trošak transporta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Mogućnost proširenja
Trošak transporta	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage
Mogućnost proširenja	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Iskoristivost radne snage

Slika 21. Ocjenjivanje važnosti kriterija – verzija s 5 kriterija

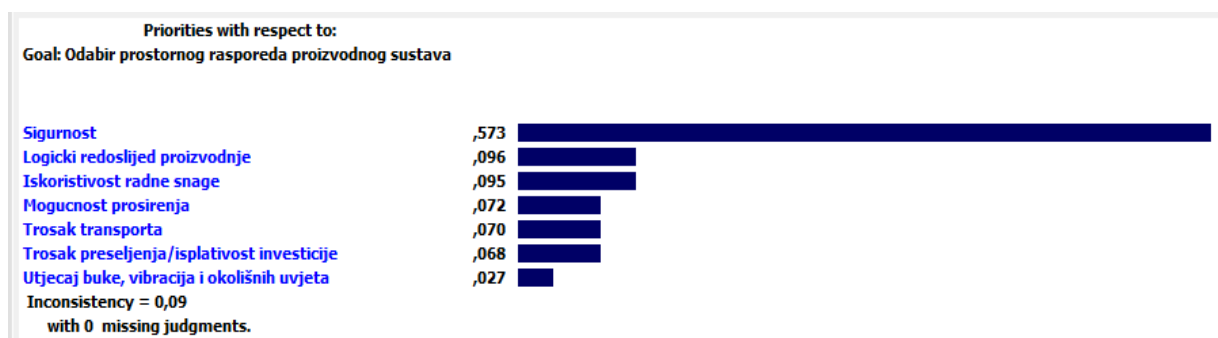


Nakon što je ekspertni tim poduzeća ocijenio važnosti kriterija, pristupilo se izračunu težine kriterija i provjeravanju konzistentnosti. Za taj postupak se koristio programski alat *Expert Choice*, u kojem se koristila funkcija usporedbe kriterija u parovima prema Saaty-evoj skali. Postupak je prikazan na sljedećoj slici.



Slika 22. Usporedba kriterija u parovima prema Saaty-evoj skali

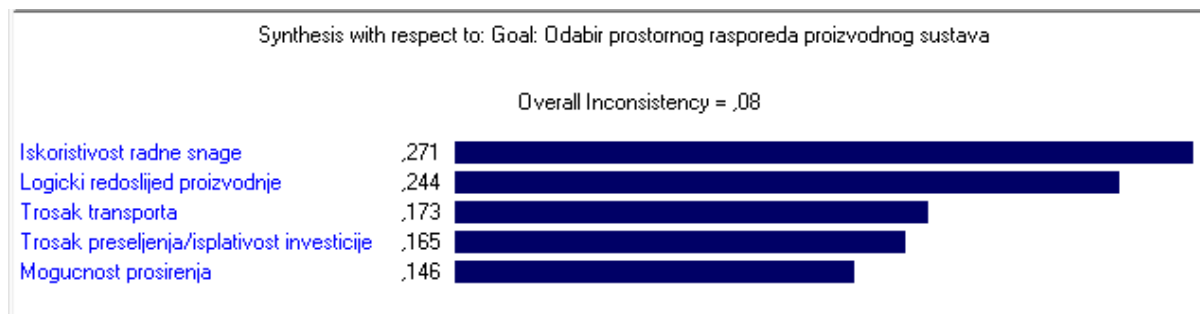
Iz uvrštenih podataka dobivena je težina kriterija i razina nekonzistentnosti koji su prikazani na sljedećoj slici.



Slika 23. Težine kriterija – verzija 7 kriterija

Vidljivo je da je kriterij sigurnosti uvjerljivo najvažniji i najutjecajniji, dok se kriterij utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta u već spomenutom razmatranju mogao odbaciti jer skoro pa ni nema težine. Razina nekonzistentnosti je ispod granične stoga se ovo ocjenjivanje prihvaća.

Isti postupak se ponovio za verziju sa 5 kriterija, te se na idućoj slici nalazi prikaz dobivenih težina kriterija i nekonzistentnosti.



**Slika 24. Težine kriterija – verzija 5 kriterija**

U ovoj verziji je vidljivo kako su težine kriterija ravnomjernije raspodijeljene, no izdvajaju se iskoristivost radne snage i logički redoslijed operacija kao dva najvažnija kriterija. Nekonzistentnost iznosi 0,08 te je unutar granične vrijednost, stoga se i ovo ocjenjivanje prihvaća kao valjano.

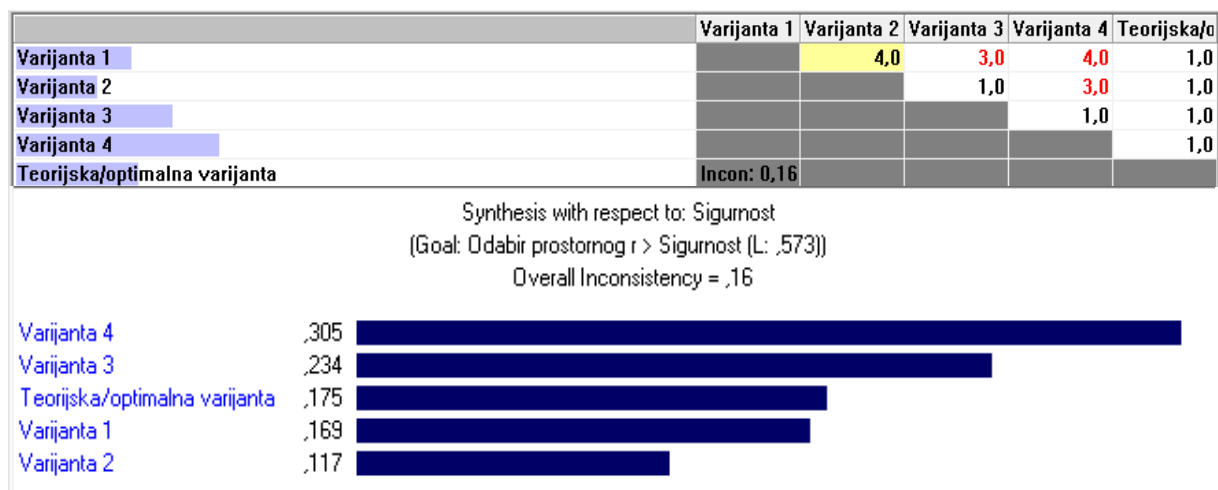
Nakon što su izračunate težine kriterija i provjerena je konzistentnost ocjenjivanja pristupa se sljedećem koraku provedbe AHP metode, a to je ocjenjivanje varijanti prema kriterijima.

### 6.3.2. Ocjenjivanje varijanti prema kriterijima

Nakon što je provedeno ocjenjivanje i izračun težina kriterija, pristupilo se izradi podloga za ocjenjivanje alternativa u parovima s obzirom na pojedini kriterij, koje je provodio ekspertni tim poduzeća.

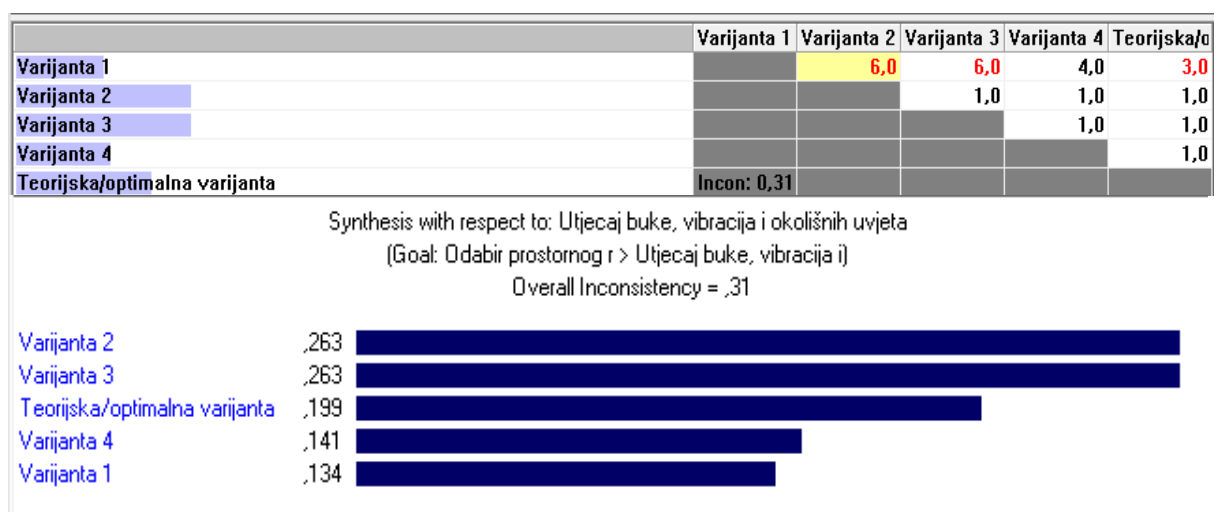
#### 6.3.2.1. Verzija sa 7 kriterija

Prvo je provedeno ocjenjivanje za verziju sa 7 kriterija, a postupak usporedbe alternativa s obzirom na kriterij sigurnosti je vidljiv na sljedećoj slici.



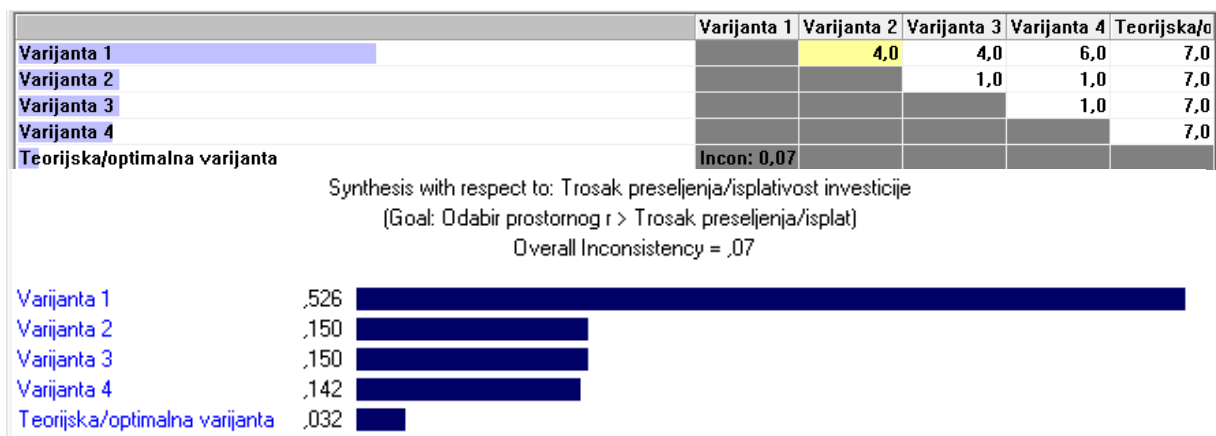
Slika 25. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na sigurnost

Iz slike je vidljivo da omjer nekonzistentnosti iznosi 0,16, a to je iznad granične vrijednosti, stoga se ovo ocjenjivanje ne smatra ispravnim. Ocjenjivanje varijanti se nastavlja dalje prema kriteriju utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta. Usporedba i dobiveni rangovi varijanti su vidljivi na sljedećoj slici.



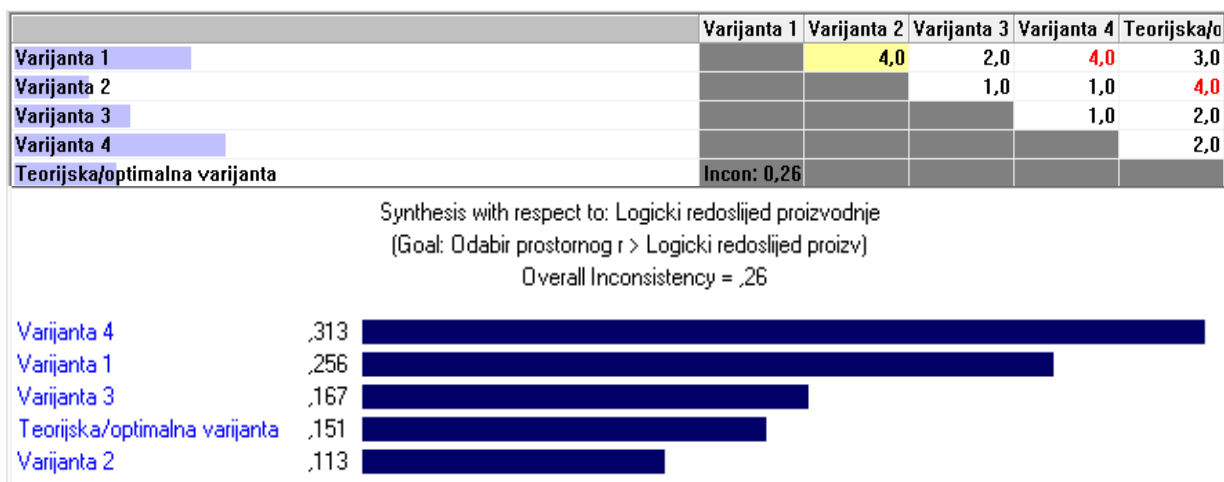
Slika 26. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na utjecaj buke, vibracija i okolišnih uvjeta

Iz slike 26. je vidljivo da je ovdje omjer nekonzistentnosti još veći, te iznosi 0,31. Stoga se ni ova usporedba alternativa u parovima ne smatra ispravnom. Sljedeći kriterij je trošak preseljenja, odnosno isplativost investicije, i usporedba alternativa prema tom kriteriju je prikazana na sljedećoj slici.



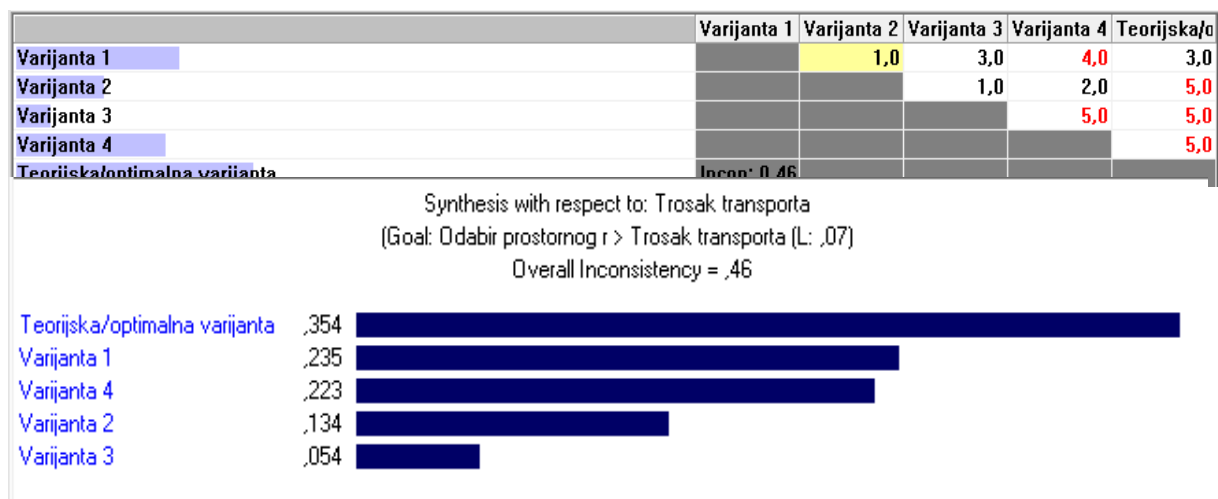
**Slika 27. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij troška preseljenja/isplativosti investicije**

Iz prethodne slike je vidljivo da je omjer nekonzistentnosti zadovoljavajuć, odnosno da je ispod granične vrijednosti, a varijanta 1 uvjerljivo najpovoljnija pri kriteriju isplativosti investicije. Sljedeći kriterij prema kojem će se raditi usporedbu alternativa u parovima je kriterij logičkog redosljeda proizvodnje.



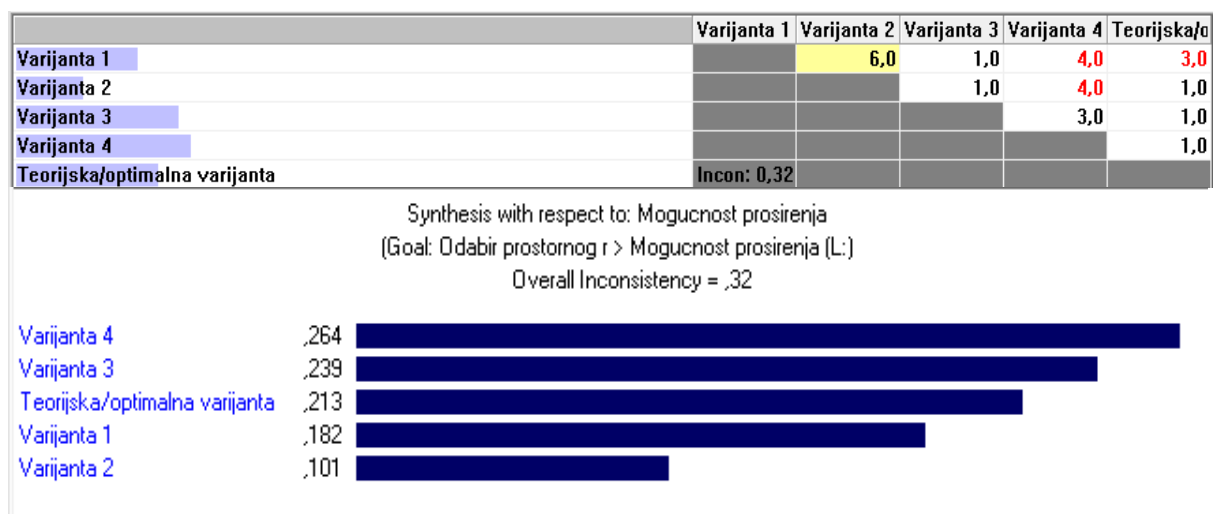
**Slika 28. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij logičkog redosljeda proizvodnje**

I u ovoj usporedbi alternativa u parovima dolazi do prevelike nekonzistentnosti čiji omjer iznosi 0,26 i iznad granične je vrijednosti. Sljedeći kriterij prema kojem će se ocjenjivati alternative je trošak transporta.



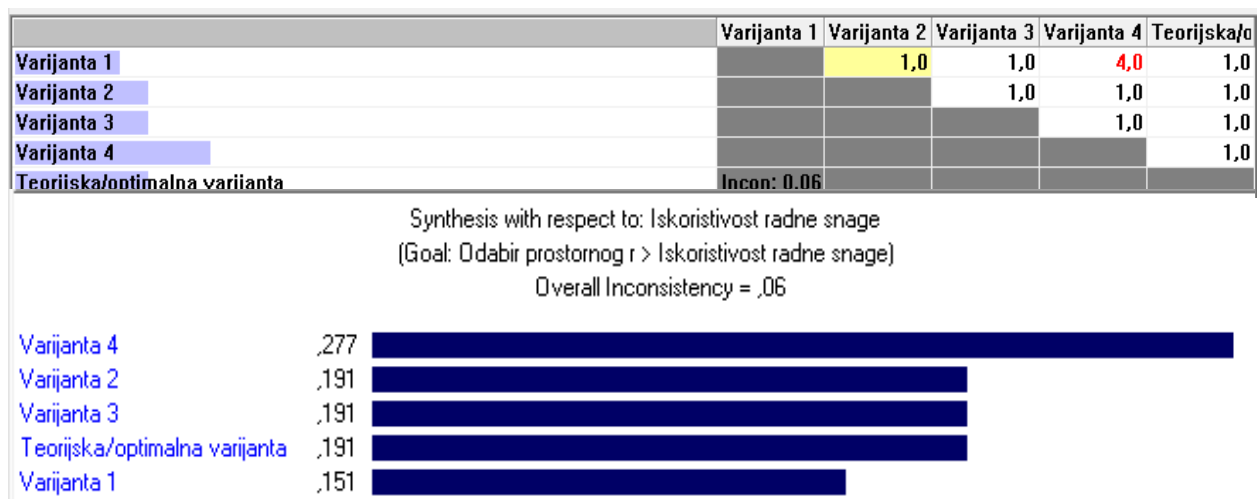
Slika 29. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij troška transporta

Iz slike 29. je vidljivo da je pri ovome ocjenjivanju došlo do najveće nekonzistentnosti dosad, te se i ono smatra neispravnim. Još jedan kriterij prema kojem su se ocjenjivale alternative je mogućnost proširenja i dobiveni rezultati su prikazani na sljedećoj slici.



Slika 30. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij mogućnosti proširenja

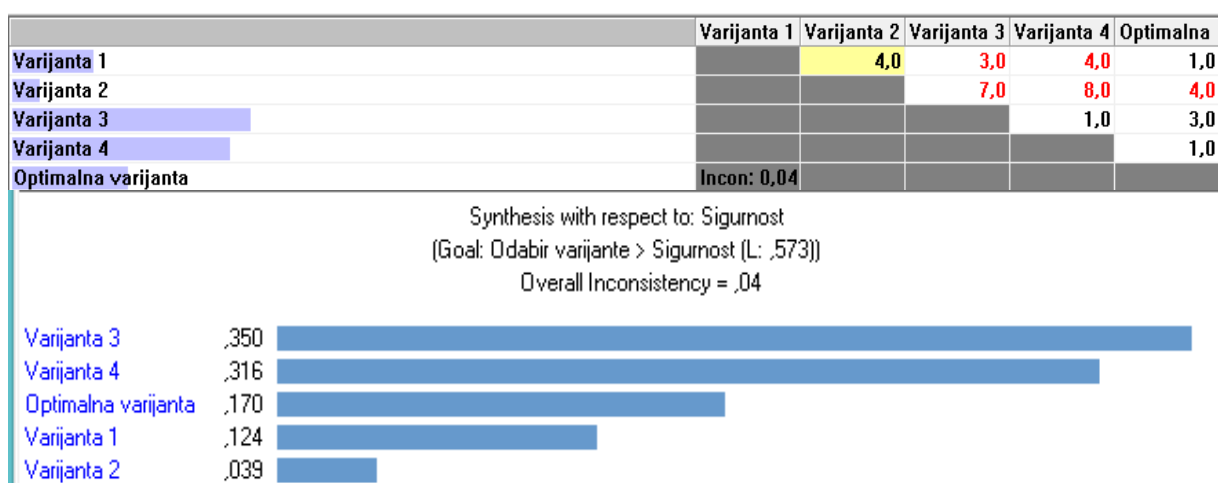
I u usporedbi alternativa prema kriteriju mogućnosti proširenja dolazi do prevelike nekonzistentnosti. Zadnji kriterij prema kojem će se ocjenjivati varijante je kriterij iskoristivosti radne snage.



**Slika 31. Usporedba alternativa u parovima s obzirom na iskoristivost radne snage**

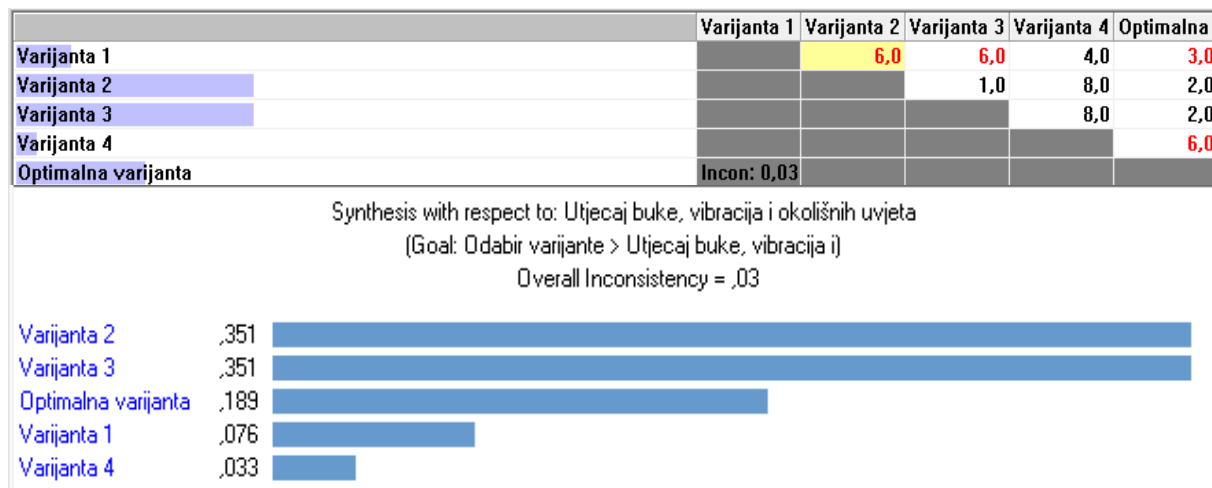
Iz slike 31. je vidljivo da je ovdje omjer nekonzistentnosti zadovoljavajuć, te da je varijanta 4 najpogodnija. Nakon nje su izjednačene varijante 2 i 3 i teorijska/optimalna varijanta.

Iz dobivenih rezultata je vidljivo da je pri usporedbi alternativa prema pet različitih kriterija došlo do prevelike nekonzistentnosti, stoga su podloge za ocjenjivanje poslane natrag ekspertnom timu poduzeća, kako bi ispravili te pogreške. Nakon ponovljenog ocjenjivanja dobiveni su sljedeći podaci u kojima je omjer nekonzistentnosti bio zadovoljavajuć. Prva ponovljena usporedba alternativa u parovima je prema kriteriju sigurnosti.



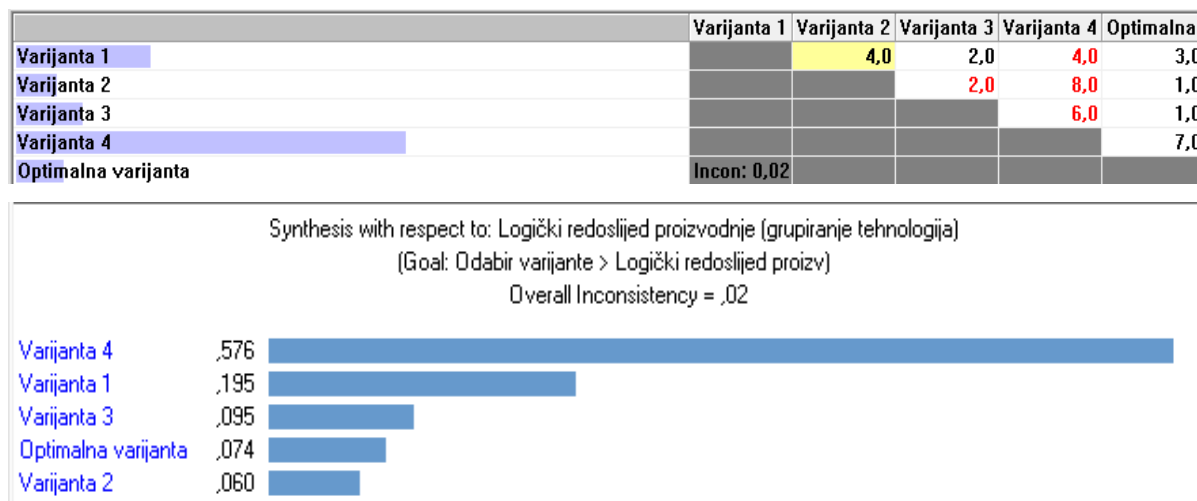
**Slika 32. Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij sigurnosti**

Iz slike je vidljivo kako su varijante 3 i 4 uvjerljivo najpovoljnije prema kriteriju sigurnosti. Znamenka crne boje u tablici označava da alternativa u retku ima prednost nad alternativom u stupcu, a znamenka crvene boje znači obratno. Ponovljeno ocjenjivanje varijanti se nastavlja dalje prema kriteriju utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta. Usporedba i dobiveni rangovi varijanti su vidljivi na sljedećoj slici.



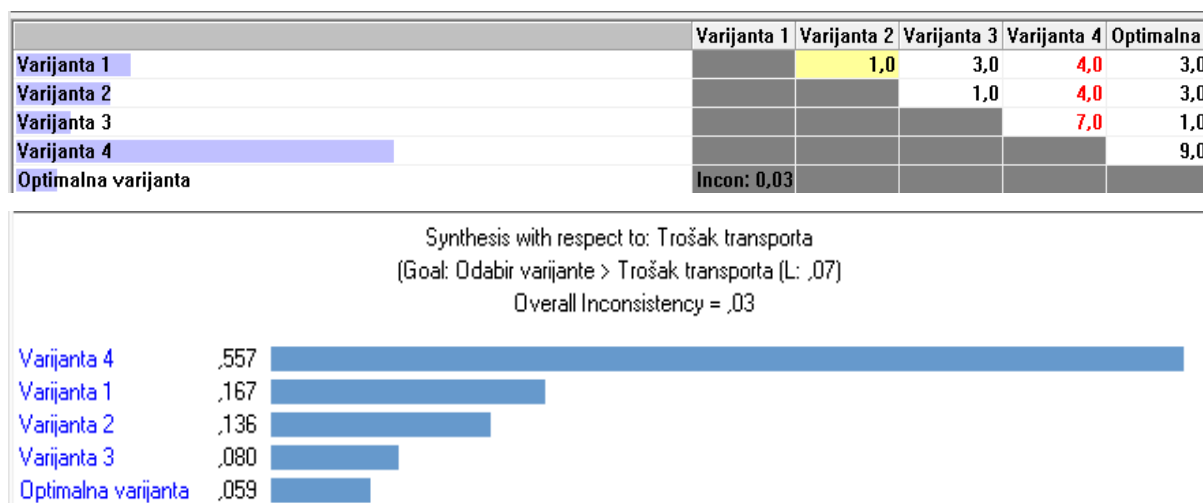
**Slika 33. Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta**

Iz slike 33. je vidljivo da su varijante 2 i 3 najpovoljnije pri kriteriju utjecaja buke, vibracija i okolišnih pitanja. Sljedeći kriterij za koji je ponovljeno ocjenjivanje je logički raspored proizvodnje, i usporedba alternativa prema tom kriteriju je prikazana na sljedećoj slici.



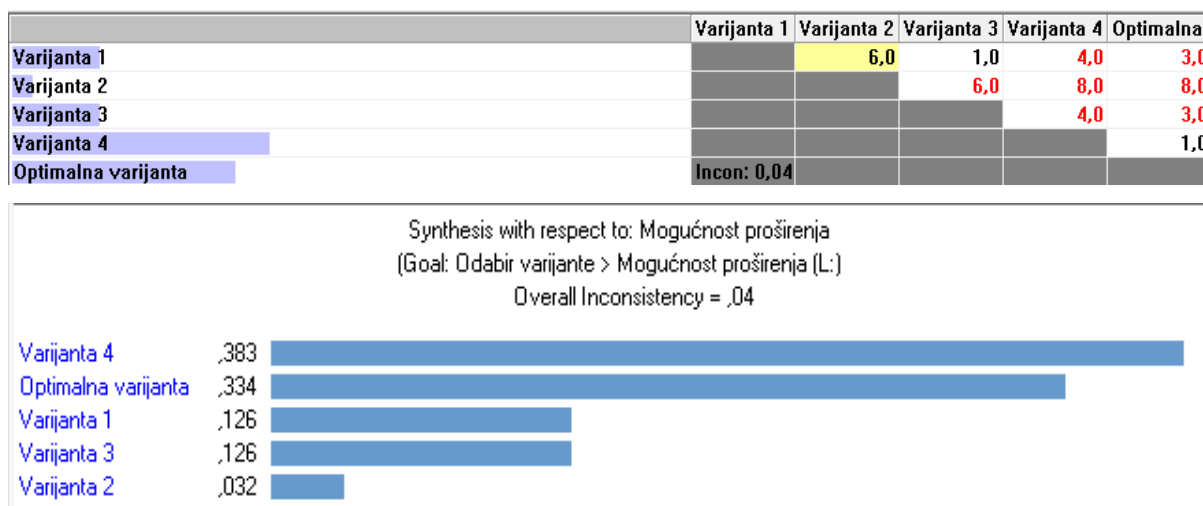
**Slika 34. Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij logičkog rasporeda proizvodnje**

Prema kriteriju logičkog redoslijeda proizvodnje, varijanta 4 je najpovoljniji prostorni raspored. Sljedeći kriterij prema kojem će se ocjenjivati alternative je trošak transporta.



**Slika 35.** Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij troška transporta

Iz slike 35. je vidljivo da je prema kriteriju troška transporta najpogodnija varijanta 4. Još jedan kriterij prema kojem je ponovljeno ocjenjivanje alternativa je mogućnost proširenja i dobiveni rezultati su prikazani na sljedećoj slici.

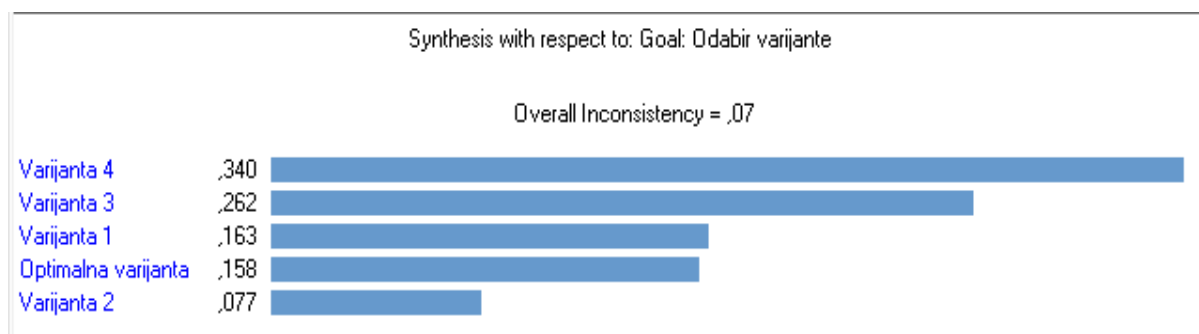


**Slika 36.** Ponovljena usporedba alternativa u parovima s obzirom na kriterij mogućnosti proširenja

Prema kriteriju mogućnosti proširenja najpogodnija je varijanta 4, a slijedi ju teorijska/optimalna varijanta, dok je najlošija varijanta 2.

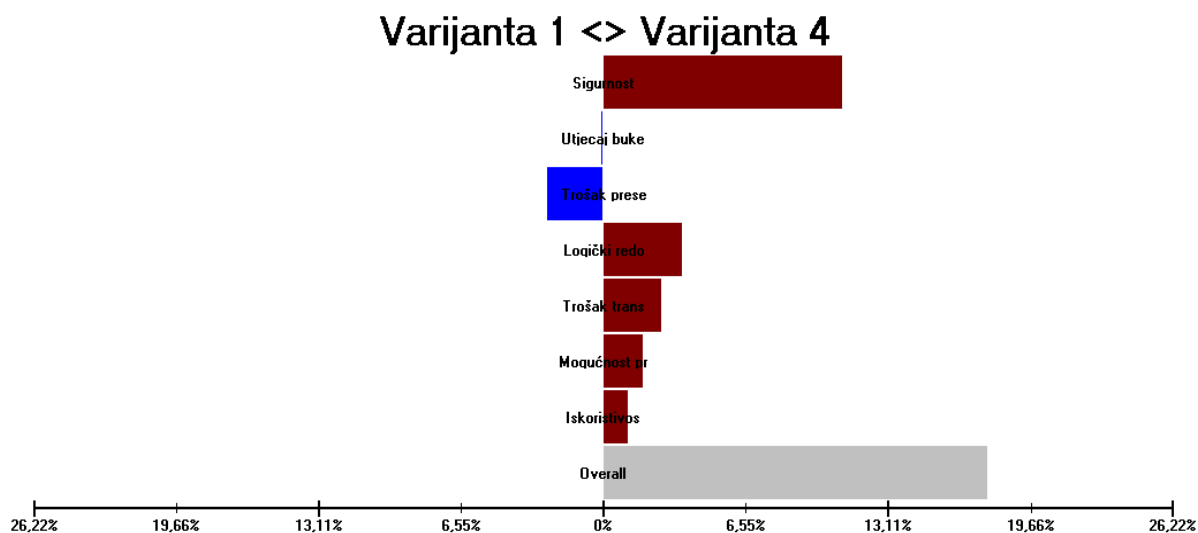


Konačni rezultat izbora prostornog rasporeda proizvodnog sustava prikazan je na slici 37. Kao najbolja varijanta dobivena je varijanta 4. To se moglo i očekivati s obzirom na to da je prema većini kriterija varijanta 4 bila najpogodnija.

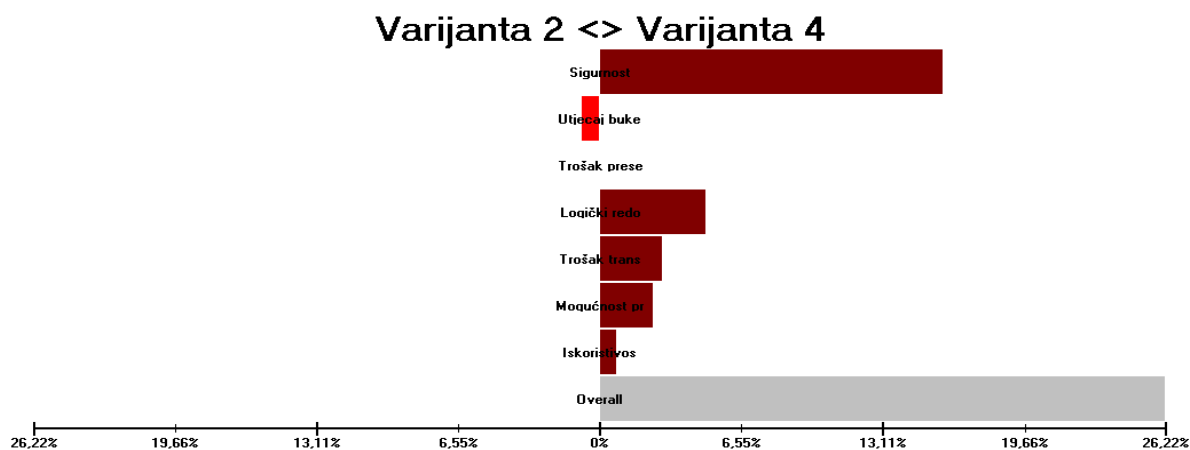


Slika 37. Ukupni prioriteti varijanti – verzija 7 kriterija

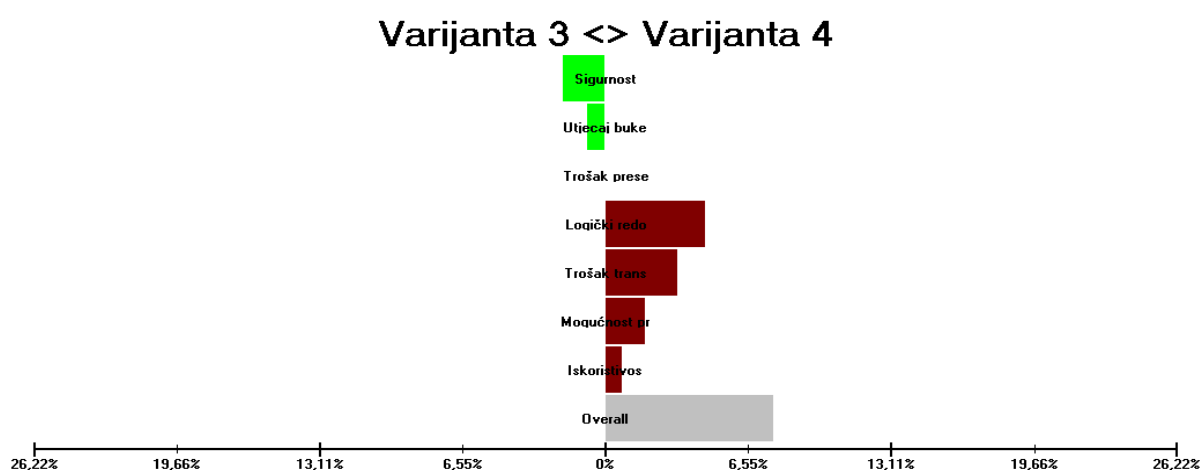
Na sljedećim slikama mogu se vidjeti grafovi usporedbe najbolje alternative odnosno varijante 4, sa svim ostalim alternativama pojedinačno. Može se vidjeti kako je varijanta 4 bolja alternativa od svih ostalih alternativa po kriterijima: trošak transporta, logički redosljed proizvodnje, mogućnost proširenja i iskoristivost radne snage.



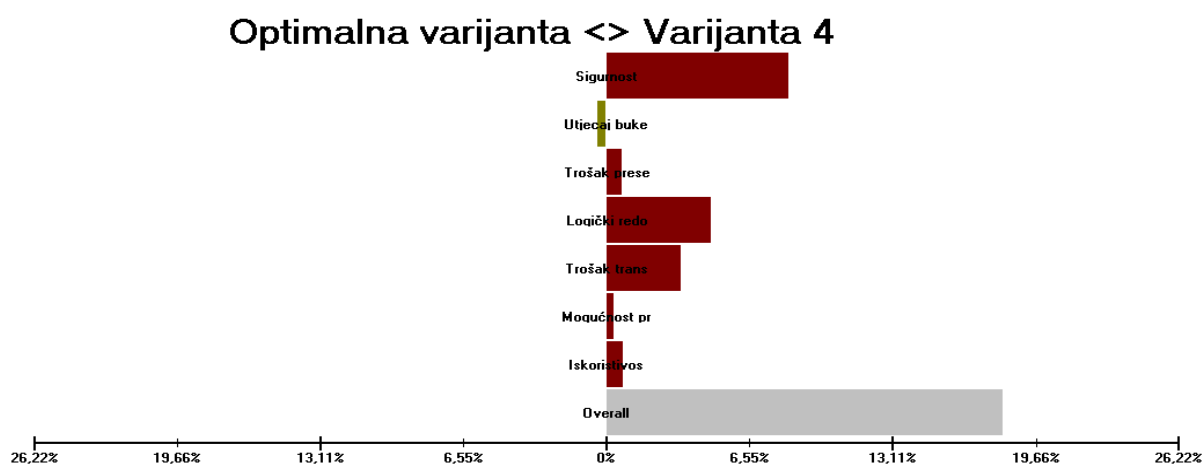
Slika 38. Graf usporedbe varijante 4 i varijante 1



Slika 39. Graf usporedbe varijante 4 i varijante 2



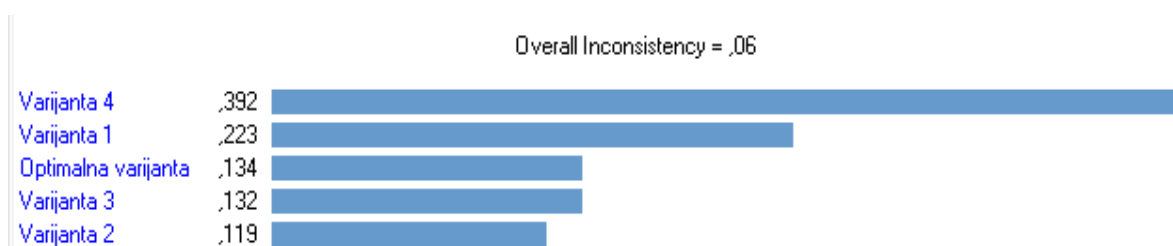
Slika 40. Graf usporedbe varijante 4 i varijante 3



Slika 41. Graf usporedbe varijante 4 i teorijske/optimalne varijante

### 6.3.2.2. Verzija s 5 kriterija

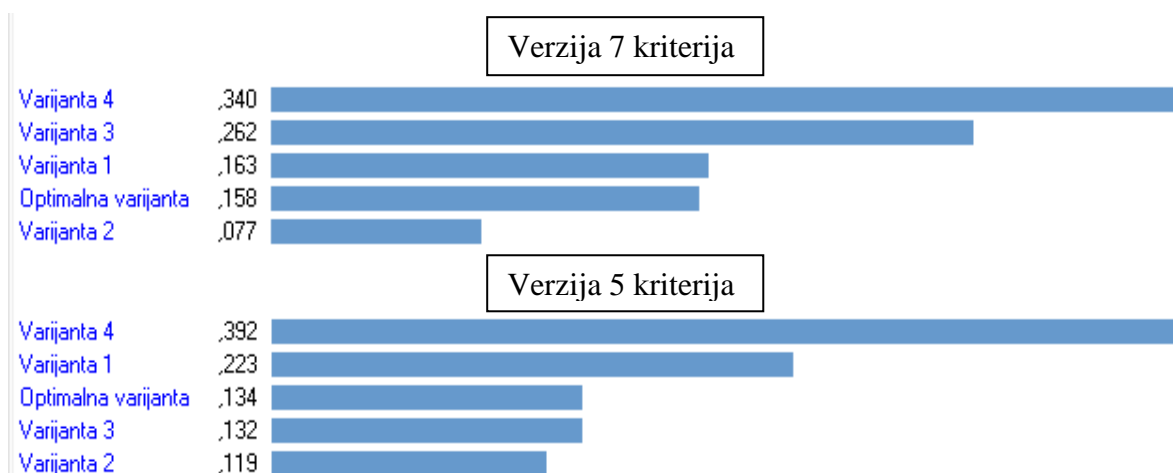
Isti postupak kao za prethodnu verziju sa 7 kriterija je ponovljen i za ovu verziju. Dakako da su ocjene u usporedbama bile jednake kao i u prethodnoj verziji, zato jer su se ocjenjivale iste varijante prostornog rasporeda, samo je izbačeno ocjenjivanje prema kriterijima sigurnosti i utjecaja buke, vibracija i okolišnih pitanja, stoga je te rezultate moguće vidjeti na slikama 27., 31., 34., 35., i 36. Konačni rezultat izbora prostornog rasporeda proizvodnog sustava za verziju sa 5 kriterija prikazan je na slici 42. Kao najbolja varijanta dobivena je varijanta 4. To se moglo i očekivati s obzirom na to da je za kriterije logičkog redoslijeda proizvodnje, troška transporta, mogućnosti proširenja i iskoristivosti radne snage, varijanta 4 bila najpogodnija.



Slika 42. Ukupni prioriteti varijanti – verzija 5 kriterija

### 6.3.2.3. Usporedba verzije sa 7 kriterija i verzije s 5 kriterija

Nakon dobivenih rezultata analize pomoću AHP metode, odnosno rangiranja najpovoljnijih varijanti po jednoj i drugoj verziji ocjenjivanja, napravljena je usporedba dobivenih rezultata i rangiranja prostornih rasporeda proizvodnog sustava. Na sljedećoj slici moguće je vidjeti konačne rezultate jedne i druge verzije.



Slika 43. Usporedba dobivenih rezultata dvaju verzija provedbe AHP metode

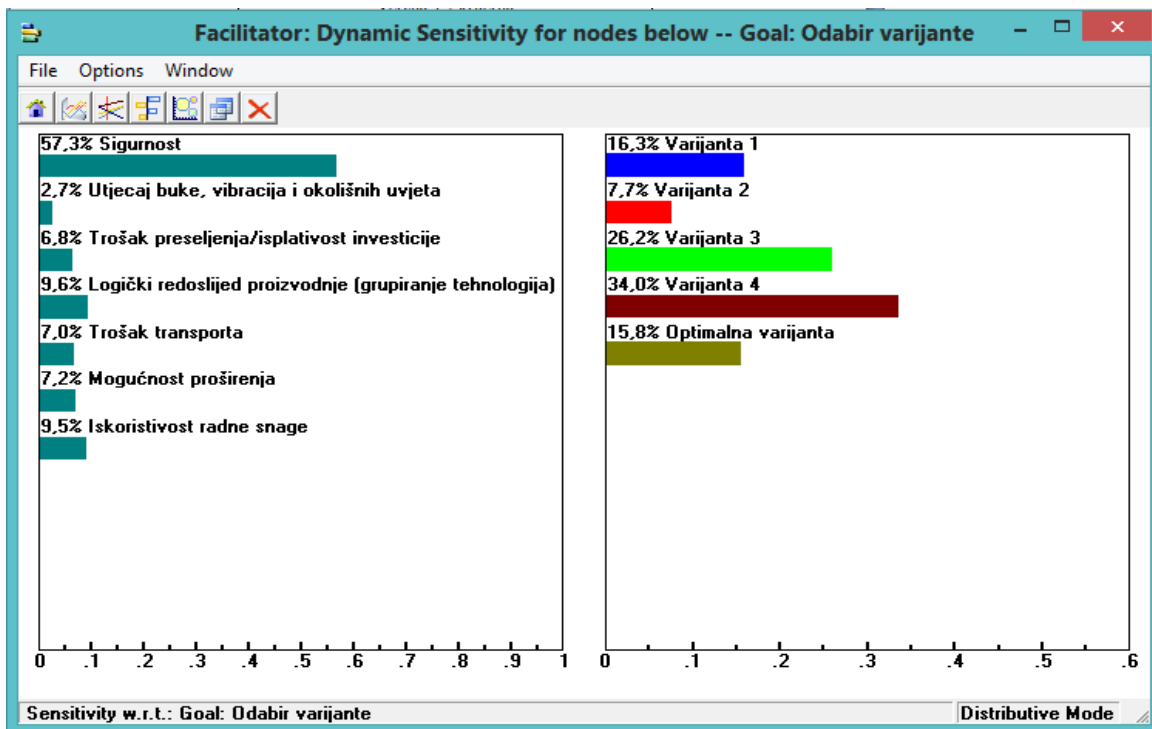
Iz usporedbe dobivenih rezultata, prikazanoj na slici 43., moguće je vidjeti da je i u jednoj i u drugoj verziji najpogodnija varijanta 4, što nam potvrđuje da ona uistinu jest najbolja. Međutim ovisno o broju kriterija rangiranje ostalih varijanti se mijenja, pa je tako varijanta 3 pri verziji sa 7 kriterija druga najbolja varijanta, dok je kod verzije sa 5 kriterija tek četvrta. Vidljivo je i da je varijanta 2 najlošija i u jednoj i u drugoj verziji.

Da bi vidjeli koliko težine kriterija utječu na konačno rangiranje varijanti, te što bi se dogodilo uslijed malih promjena tih težina, koristi se analiza osjetljivosti rezultata, koja će biti provedena.

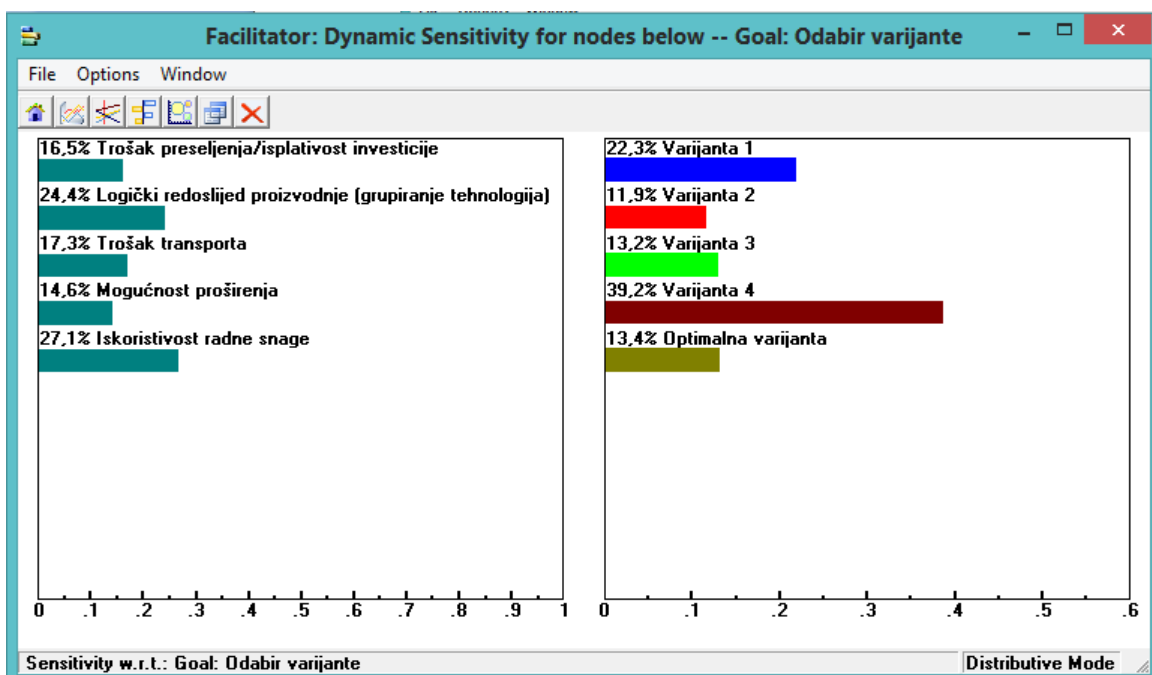
### 6.3.3. Analiza osjetljivosti rezultata

S obzirom na to da su dobiveni rezultati različiti za dvije verzije provedbe AHP metode, postavlja se pitanje koliko zapravo relativne važnosti, odnosno težine kriterija utječu na ukupne prioritete alternativa. Unutar softverskog alata *Expert Choice* nalazi se opcija koja omogućava uvid u ovaj problem. Navedena opcija zove se analiza osjetljivosti rezultata, a moguće ju je koristiti uz pomoć tri različita grafa, a to su graf performansi (*Performance*), graf dinamičnosti (*Dynamic*) i graf gradijenta (*Gradient*). Uobičajeno se smatra da ukoliko se promjenom ulaznih podataka za 5% u svim mogućim kombinacijama ne promijeni rang alternativa, onda je postignuta stabilnost rezultata.[21] Iako su korištene dvije verzije provedbe AHP metode sa 7 kriterija i s 5 kriterija, u analizi osjetljivosti rezultata koristit ćemo podatke dobivene korištenjem metode sa 7 kriterija, budući da se unutar nje nalazi svi kriteriji koji su korišteni u metodi s 5 kriterija, te da su ocjene jednake.

Analiza osjetljivosti rezultata putem grafa dinamičnosti prikazana je na slikama 39., 40., i 41. Težine kriterija se jednostavno mijenjaju kako bi se vidio njihov utjecaj na konačne prioritete alternativa, a mijenjanjem težine jednog kriterija, ostale se mijenjaju proporcionalno. Pomoću korištenja dviju verzija provedbe AHP metode dokazali smo da i bez kriterija sigurnosti i utjecaja buke, vibracija i okolišnih pitanja, i dalje je varijanta 4 najpogodniji prostorni raspored proizvodnog sustava. Ta dva primjera moguće je vidjeti na sljedećim slikama.

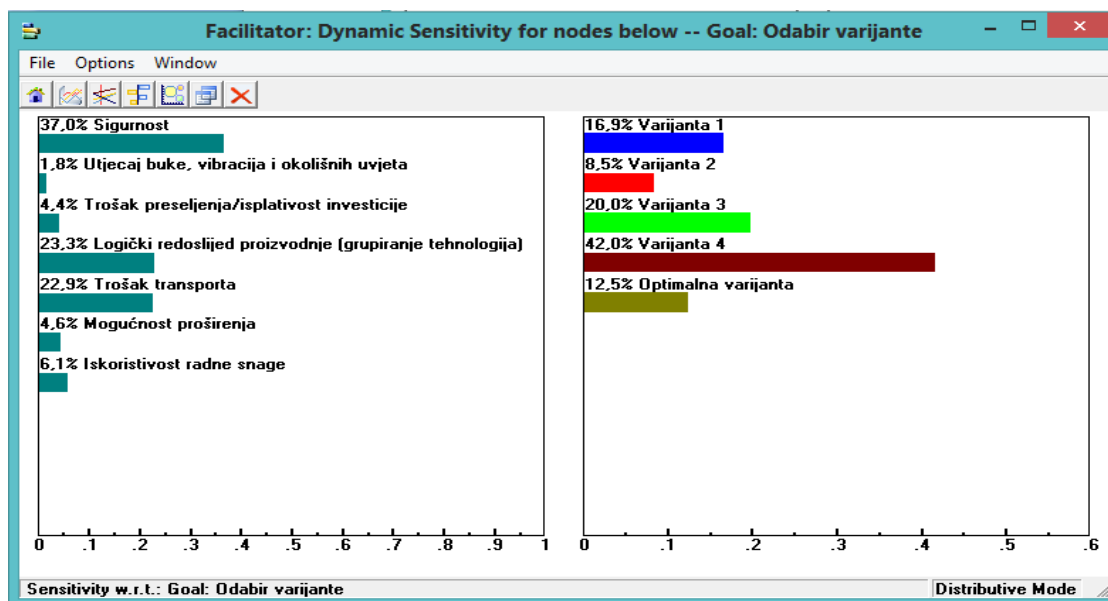


Slika 44. Graf dinamičnosti – verzija 7 kriterija



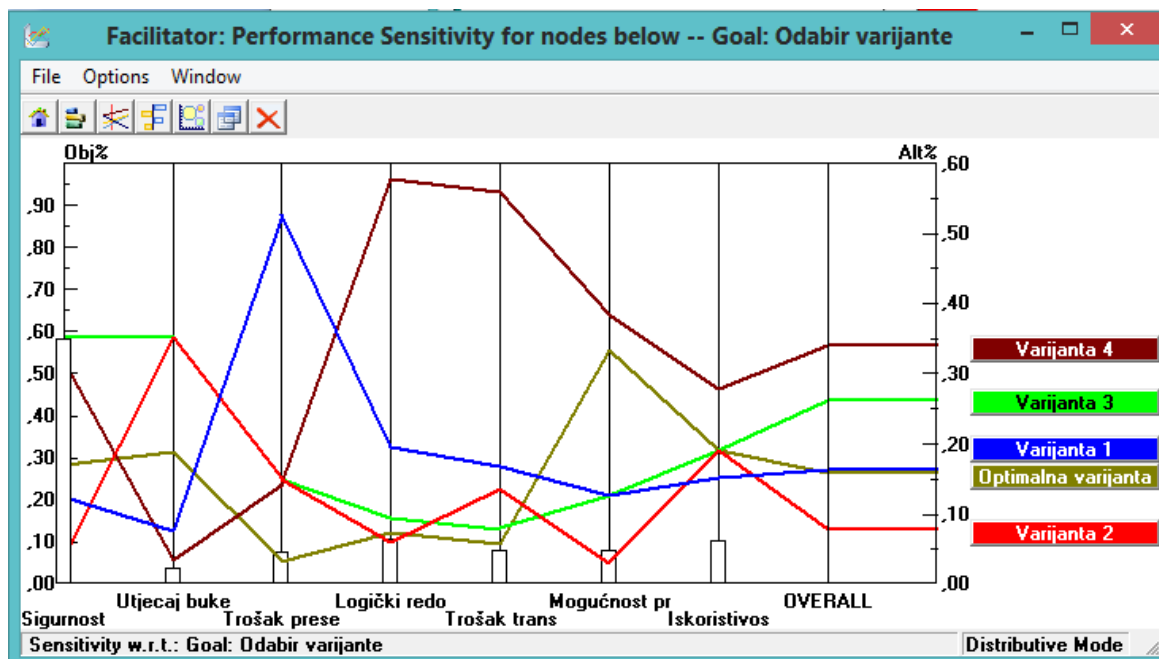
Slika 45. Graf dinamičnosti – verzija 5 kriterija

Na slici 46. je za primjer prikazano što bi se dogodilo ukoliko bi se povećale težine kriterija troška transporta i logičkog redoslijeda proizvodnje, a snizile težine svih ostalih kriterija.



Slika 46. Graf dinamičnosti – primjer promjena težina kriterija

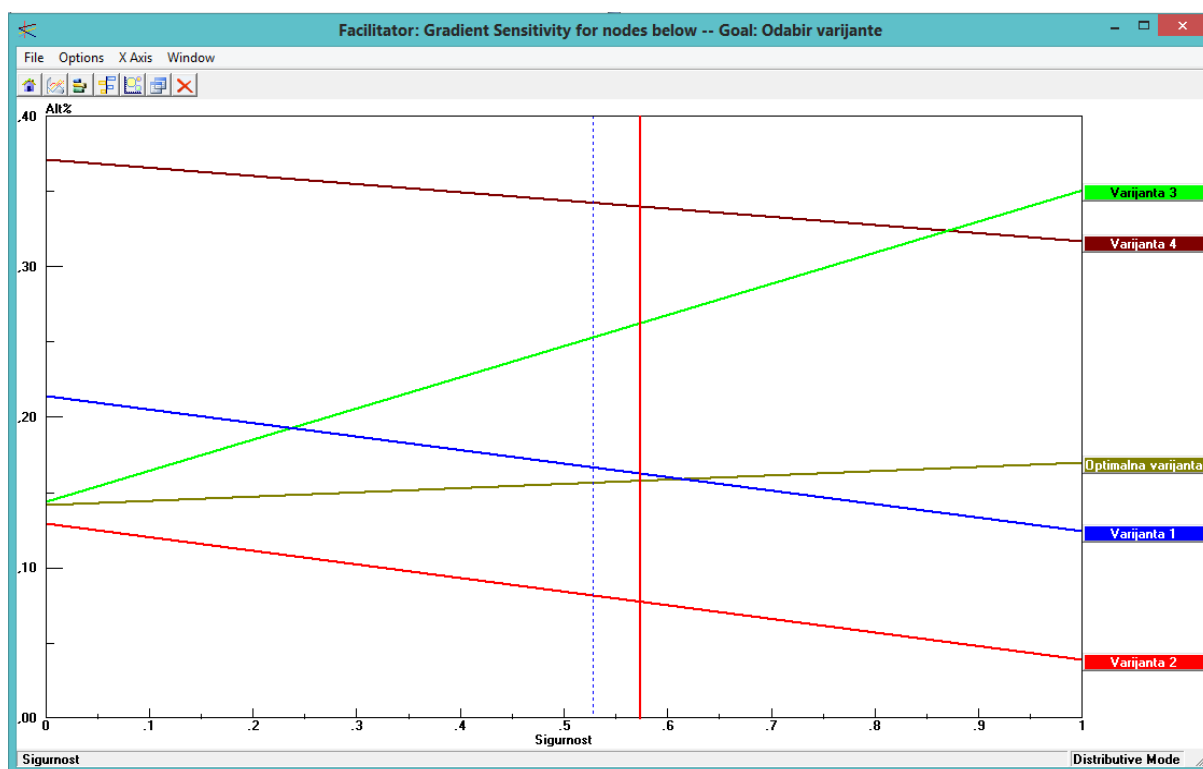
Na sljedećoj slici prikazan je graf performansi koji se može koristiti u analizi osjetljivosti rezultata. Ovaj graf prikazuje slične podatke kao i graf dinamičnosti. Težine kriterija se jednostavno mijenjaju i vidi se njihov utjecaj na konačne prioritete alternativa. Na desnoj strani se prikazuju trenutni prioriteti alternativa dok položaj linija ostaje nepromijenjen jer one daju uvid u redosljed konačnih prioriteta alternativa s obzirom na težinu pojedinog kriterija.



Slika 47. Graf performansi

Iz slike je vidljivo da nam linije daju jednostavan uvid u odnos varijanti prema pojedinom kriteriju, te onda jednostavnim mijenjanjem težina kriterija provjerava se da li dolazi do promjena u prioritetima alternativa.

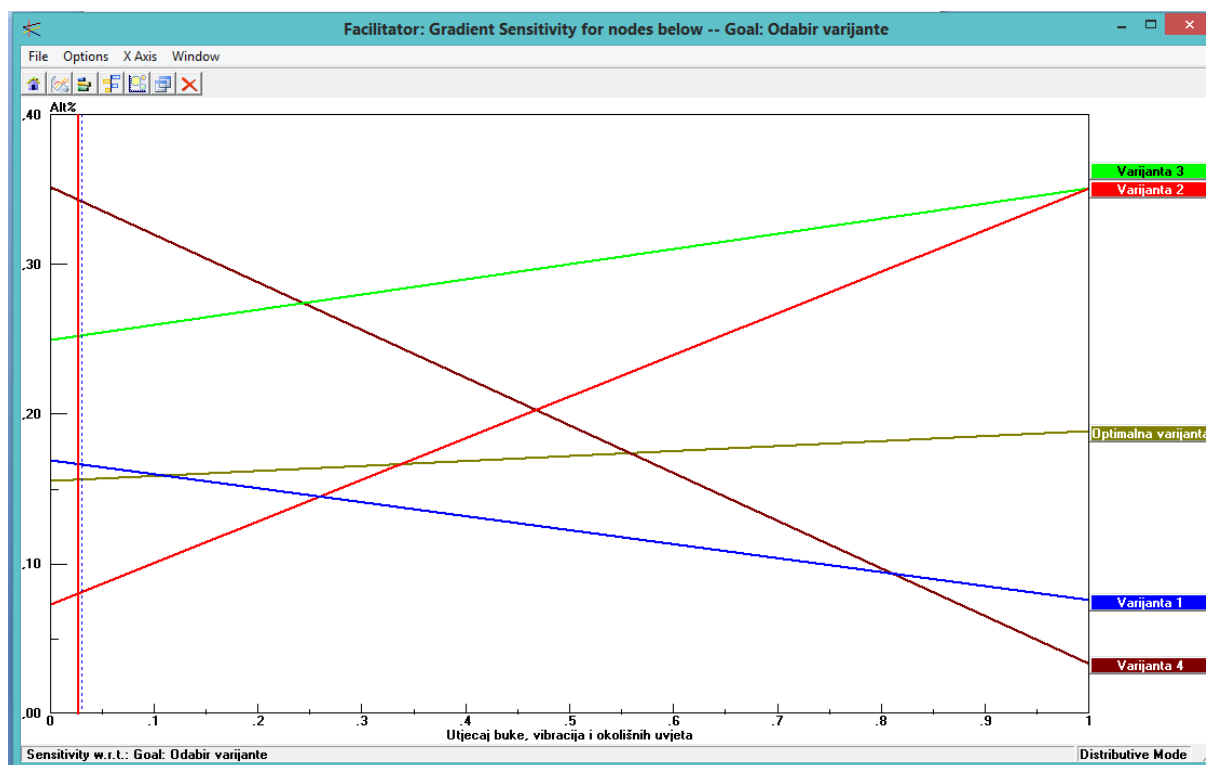
Zadnja vrsta prikaza koji se može koristiti za analizu osjetljivosti je graf gradijenta. On za razliku od prethodnih grafova omogućuje uvid u to koliko su prioriteti alternativa osjetljivi na promjene težina pojedinih kriterija. Vertikalna crvena linija prikazuje težinu kriterija dobivenu nakon usporedbe prema Saatyjevoj skali, odnosno nakon ocjenjivanja od strane ekspertne skupine, dok isprekidana plava linija prikazuje trenutno odabranu težinu kriterija. S desne strane prikazani su ukupni prioriteti alternativa za trenutno odabranu težinu kriterija. Na sljedećim slikama biti će prikazani grafovi gradijenta za svaki kriterij.



**Slika 48. Graf gradijenta s obzirom na kriterij sigurnosti**

Iz grafa je vidljivo da će se smanjivanjem težine kriterija sigurnosti povećavati prioriteti varijanti 1, 2 i 4, a smanjivat će se prioriteti varijante 3 i teorijske/optimalne. Uzevši u obzir da se kod analize osjetljivosti rezultata provodi promjena ulaznih podataka do 5 %, iz grafa je vidljivo da tada neće doći do nikakvih promjena.

Sljedeći graf gradijenta koji je prikazan na slici 49. je graf gradijenta s obzirom na kriterij utjecaja buke, vibracija i okolišnih pitanja.

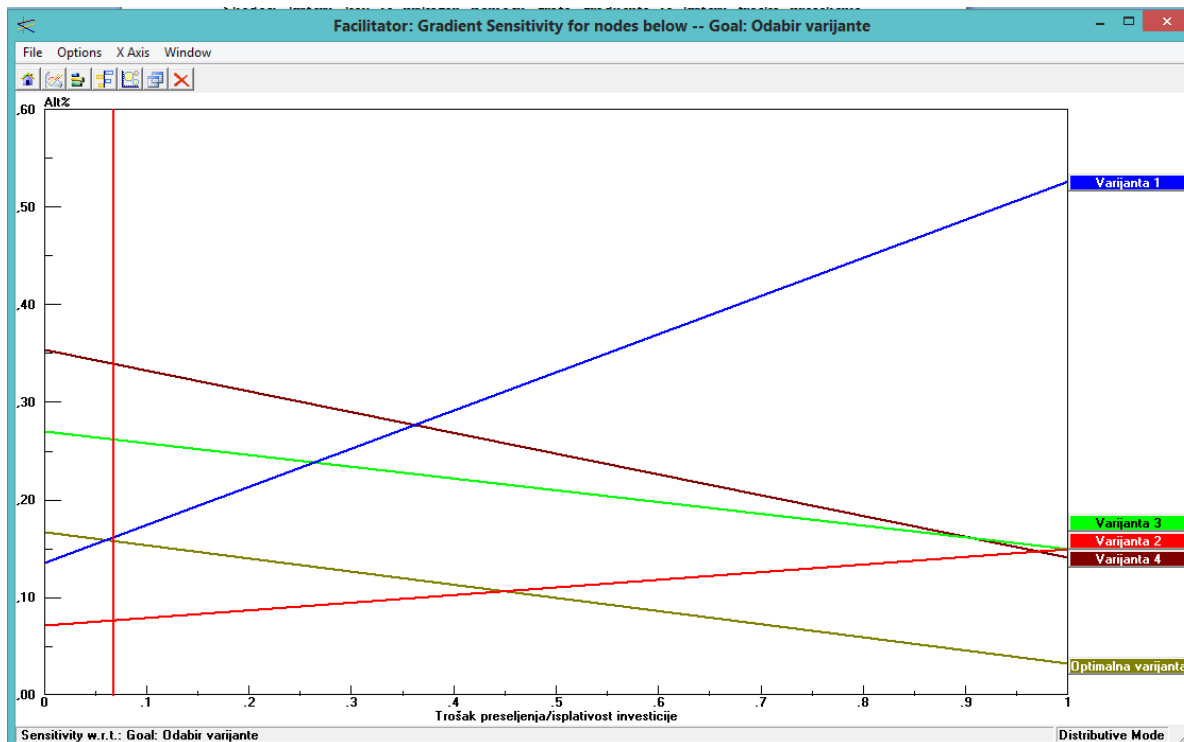


**Slika 49. Graf gradijenta s obzirom na kriterij utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta**

Iz ovoga grafa je vidljivo da je za trenutnu težinu najpogodnija varijanta 4, ali bi pri velikom povećanju težine kriterija utjecaja buke, vibracija i okolišnih uvjeta, došlo do velikog povećanja prioriteta varijanti 3 i 2, koje bi tada postale najpogodnije, dok bi došlo do velikog smanjenja prioriteta varijanti 1 i 4, gdje bi varijanta 4 pala na zadnje mjesto. Međutim uzevši u obzir trenutnu težinu kriterija koja je vrlo mala, može se smatrati da ovaj kriterij gotovo da ne igra nikakvu ulogu u procesu odlučivanja, stoga se mogu razmatrati samo njegove male promjene, kod kojih je vidljivo iz grafa da će doći samo do promjene mjesta između varijante 1 i teorijske/optimalne varijante.



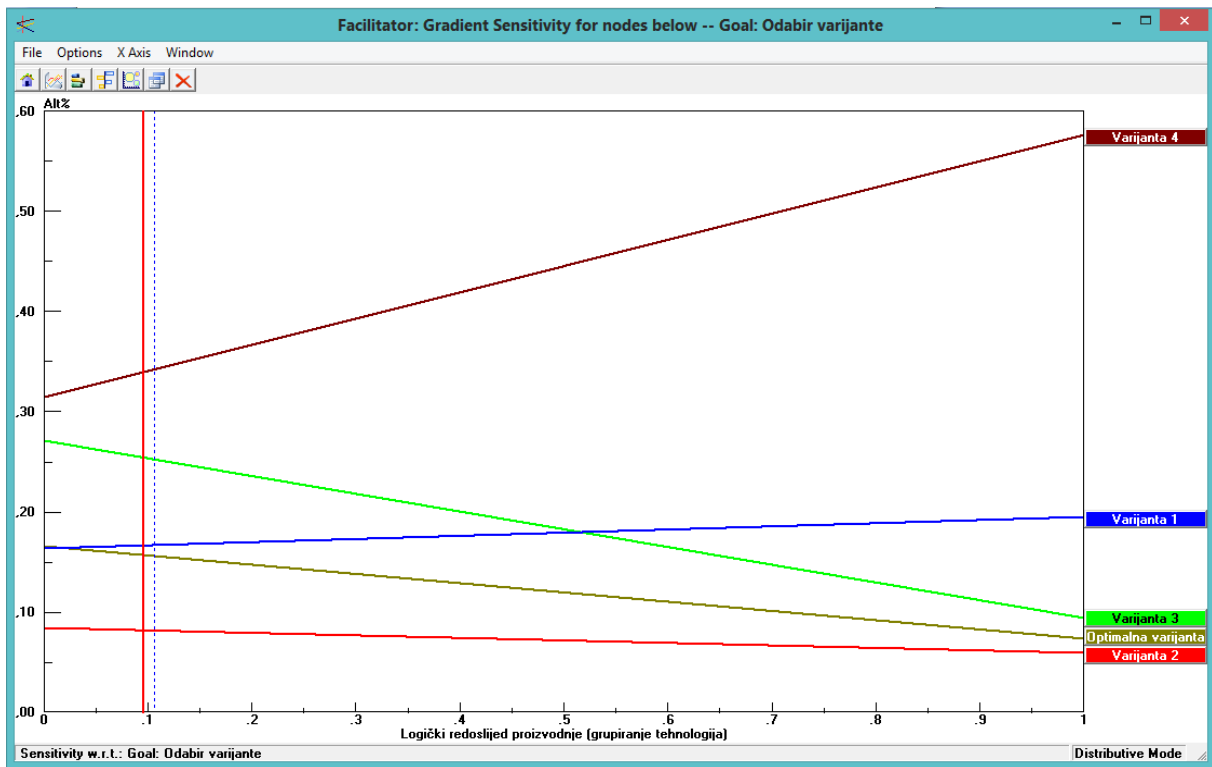
Sljedeći kriterij koji je prikazan pomoću grafa gradijenta je kriterij troška preseljenja, odnosno isplativosti investicija i nalazi se na sljedećoj slici.



Slika 50. Graf gradijenta s obzirom na kriterij isplativosti investicije

Iz grafa je vidljivo da bi porastom težine ovoga kriterija došlo do velikog porasta prioriteta varijante 1, dok bi se smanjili prioriteti varijanti 3 i 4, i teorijske/optimalne varijante. Razmatrajući malo povećanje kriterija, vidljivo je da bi rangiranje varijanti ostalo isto, dok bi daljnjim porastom težine kriterija, varijanta 1 se izdvojila kao najbolja, slijedili bi ju varijanta 4, 3 i 2 koji bi težili izjednačavanju, a kao najlošija bi se izdvojila teorijska/optimalna varijanta.

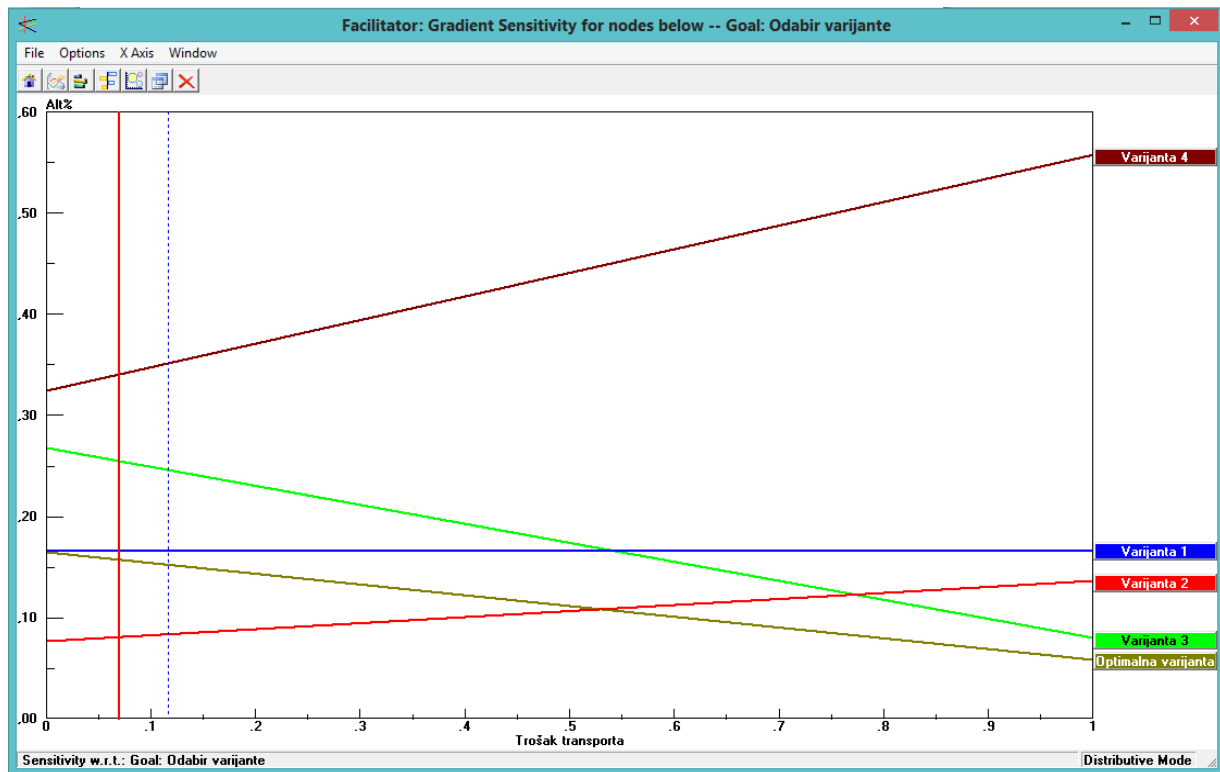
Na sljedećoj slici je prikazan graf s obzirom na kriterij logičkog redoslijeda proizvodnje.



**Slika 51.** Graf gradijenta s obzirom na kriterij logičkog redoslijeda proizvodnje

Iz grafa je vidljivo da povećanjem težine kriterija dolazi do velikog povećanja prioriteta varijante 4 i nešto manjeg povećanja prioriteta varijante 1, dok kod varijanti 2 i 3, i teorijske/optimalne varijante dolazi do smanjenja prioriteta. Ipak uzimajući u obzir razmjerno malo povećanje težine kriterija logičkog redoslijeda proizvodnje iz grafa je vidljivo da ne bi došlo do velikih promjena, gdje bi varijante 3 i 2 ostale najbolje, a varijanta 1 bi samo pretekla teorijsku/optimalnu varijantu.

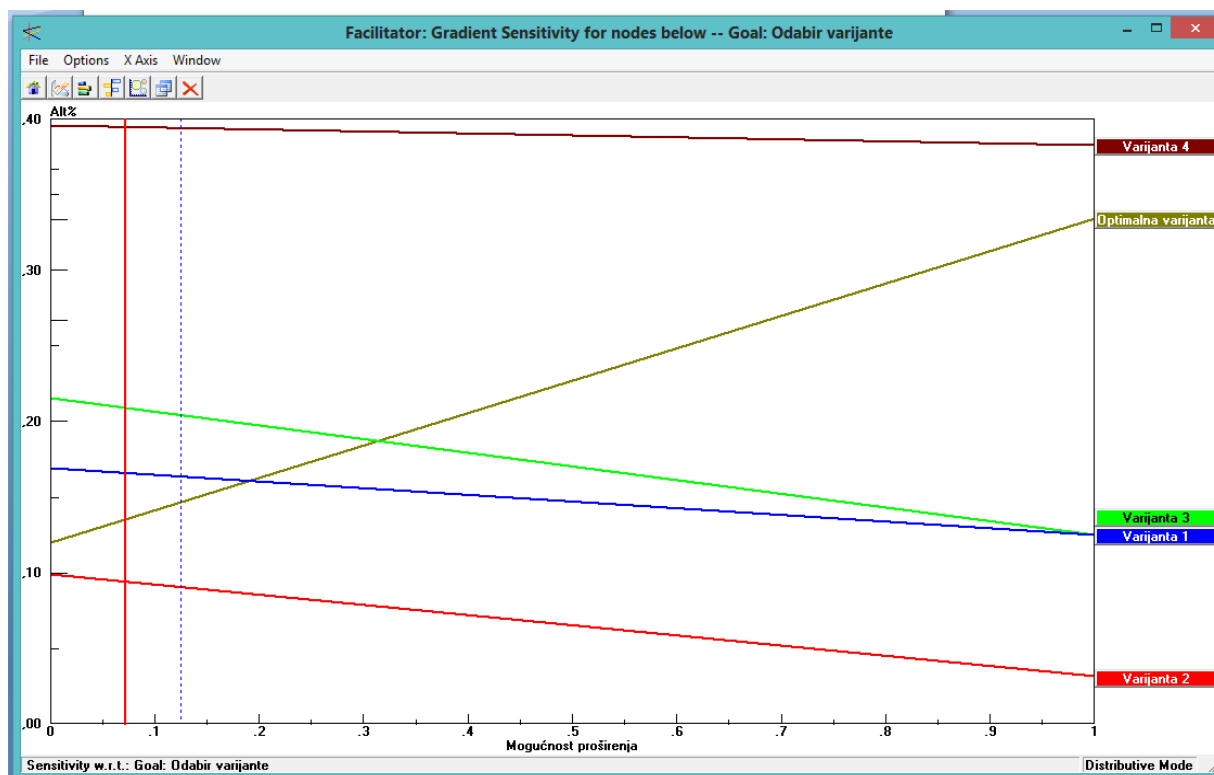
Graf s obzirom na kriterij troška transporta je vidljiv na sljedećoj slici.



**Slika 52. Graf gradijenta s obzirom na kriterij troška transporta**

Iz grafa je vidljivo da povećanjem težine kriterija troška transporta, dolazi do velikog povećanja prioriteta varijante 4, te nešto umjerenijeg povećanja prioriteta varijante 1 i 2, dok kod varijante 3 i teorijske/optimalne varijante dolazi do smanjenja prioriteta. Uzimajući u obzir razmjerno malo povećanje težine kriterija troška transporta, vidljivo je kako se ne bi dogodile nikakve promjene, ali daljnjim povećanjem kriterija došlo bi do velikih promjena u rangiranju alternativa, gdje bi sve varijante zamijenile svoja mjesta osim varijante 4 koja bi i dalje bila najbolja.

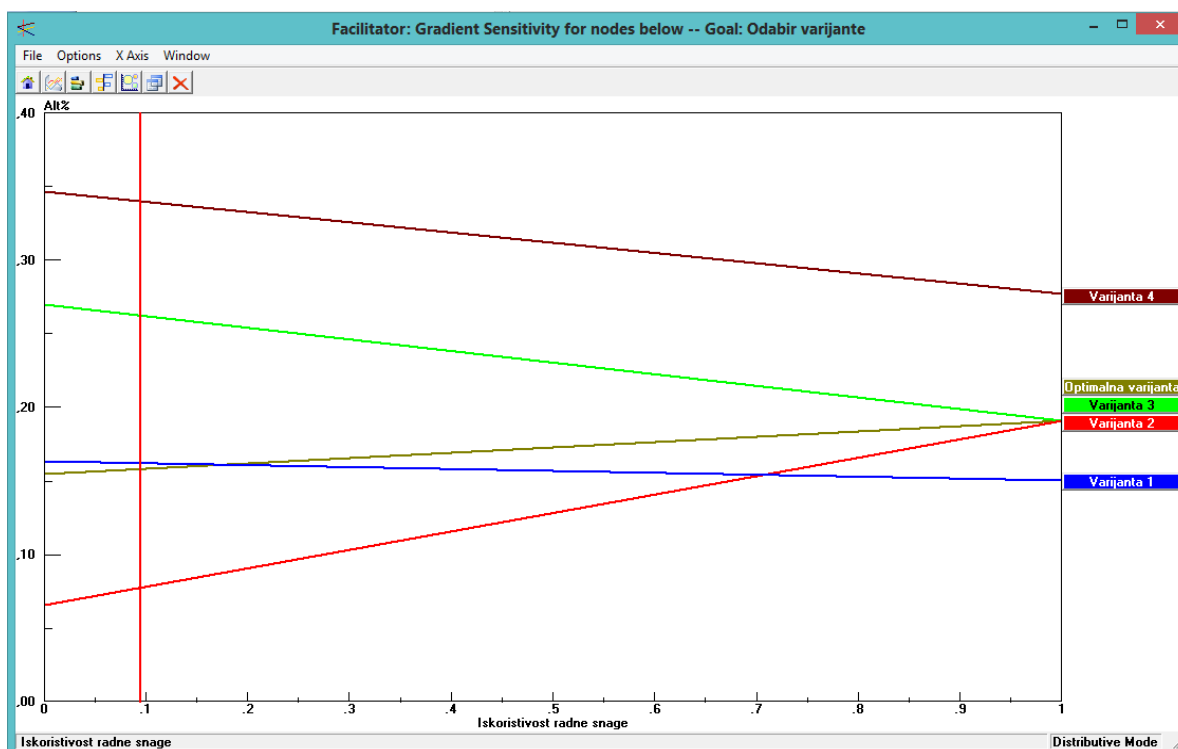
Na sljedećoj slici prikazan je graf s obzirom na kriterij mogućnosti preseljenja.



**Slika 53. Graf gradijenta s obzirom na kriterij mogućnosti proširenja**

Iz grafa je vidljivo da pri povećanju težine kriterija mogućnosti proširenja dolazi do povećanja prioriteta varijante optimalne/teorijske varijante, dok kod varijanti 1, 2, 3 i 4 dolazi do smanjenja prioriteta. Gledajući razmjerno malo povećanje težine kriterija vidljivo je da ne bi došlo do nikakvih promjena, dok bi daljnjim povećanjem težine kriterija varijanta 4 i dalje ostala kao najbolja, slijedila bi je teorijska/optimalna varijanta, a nakon njih bi slijedile varijante 3, 1 i 2.

Zadnji graf koji će biti prikazan se temelji na zadnjem kriteriju koji je korišten u ovoj metodi, a to je iskoristivost radne snage. Taj graf je prikazan na sljedećoj slici.



**Slika 54. Graf gradijenta s obzirom na kriterij iskoristivosti radne snage**

Iz grafa je vidljivo da s povećanjem težine kriterija iskoristivosti radne snage dolazi do povećanja prioriteta varijante 2 i teorijske/optimalne varijante, dok kod varijanti 1, 3 i 4 dolazi do smanjenja prioriteta. Razmjerno malo smanjenje ili povećanje težine kriterija iskoristivosti radne snage ne dovodi se do nikakvih promjena u redoslijedu alternativa, no daljnjim porastom težine kriterija dolazi do zamjene mjesta među alternativami, dok varijanta 4 ostaje najbolja.

Nakon provedene analize osjetljivosti rezultata je potvrđeno da je i pri malim izmjenama težina kriterija, varijanta 4 najbolji prostorni raspored proizvodnog sustava. Jedini način na koji bi se to moglo promijeniti je veliko povećanje težine kriterija utjecaja buke, vibracija i okolišnih pitanja, zatim isplativosti investicije i sigurnosti. Također zaključeno je kako pri malim promjenama težina kriterija dolazi do promjena u redoslijedu ostalih varijantu, stoga nije dobivena stabilnost rezultata.

## 7. ZAKLJUČAK

Odabir najpovoljnijeg prostornog rasporeda je jedan od najbitnijih postupaka prilikom projektiranja proizvodnog sustava. Uz njega se veže različita problematika poput pitanja sigurnosti, ekonomske isplativosti, tehnoloških zahtjeva i minimiziranja troškova. Ti problemi se formuliraju kroz kriterije koji se postavljaju pred različite alternative prostornog rasporeda. Kriteriji se mogu podijeliti u nekoliko grupa, i to su ekonomsko-tehnički, sigurnosni i kriteriji vezani uz utjecaj na okoliš. Nemoguće je promatrati proces odabira prostornog rasporeda proizvodnog sustava kao općeniti slučaj, već se kriteriji mijenjaju od slučaja do slučaja, ovisno o tome kakve želje ima menadžment, i što je u opisu posla poduzeća.

Budući da postoji mnogo kriterija za odabir prostornog rasporeda proizvodnog sustava, rješavanje toga problema se vrši jednom od metoda višekriterijalnog odlučivanja. One se koriste kada postoji više kriterija za odabir neke alternative, koji su većinom suprotstavljeni. Najčešće korištene metode višekriterijalnog odlučivanja su AHP, TOPSIS, PROMETHEE i ELECTRE. Metoda koja je korištena u ovome radu je AHP metoda koja je provedena uz pomoć programskog alata *Expert Choice*.

Cilj ovoga rada je bio primjenom jedne od metoda višekriterijalnog odlučivanja odrediti koja je od ponuđenih alternativa najpovoljnija za proizvodni sustav. Da bi se izradile alternative, krenulo se od samoga početka, odnosno tlocrta proizvodnog pogona poduzeća i popisa operacija potrebnih za izradu proizvoda. Kako bi se snimilo trenutno stanje poduzeća, koje će kasnije poslužiti za usporedbu sa novo izrađenim varijantama, napravljene su matrice toka materijala, transportnog intenziteta i ukupnog transportnog učina. Nakon toga, prema uputama ekspertnog tima poduzeća koji se oformio radi ovog projekta, napravljeno je pet različitih varijanti, iz kojih će se putem AHP metode višekriterijalnog ispitivanja izvući najpovoljnija.

AHP metoda se provodila uz pomoć ekspertnog tima poduzeća, kojemu su bile predane na ocjenjivanje podloge za ocjenjivanje težina kriterija i za usporedbu parova alternativa prema određenim kriterijima. Nakon što su oni obavili taj dio posla, pristupilo se rješavanju

problema uz pomoć programskog alata *Expert Choice*, pomoću kojeg se između ostalog ispitala i konzistentnost ocjenjivanja. Nakon unosa svih podataka u program on daje rangiranu listu prioriteta alternativa te određuje onu najpovoljniju. Da bi se bilo sigurno u dobivene rezultate te da bi se bolje shvatilo značenje tih rezultata, pristupa se analizi osjetljivosti rezultata, tijekom koje se ispituje što bi se dogodilo sa prioritetima alternativa uslijed promjena težina kriterija, a sve s ciljem utvrđivanja stabilnosti rezultata.

Iz primjene ove metode se može zaključiti kako je ona vrlo povoljna za ovaj proces odabira prostornog rasporeda proizvodnog sustava. Ona omogućuje pregledan pogled na strukturu problema od cilja, preko kriterija do alternativa. Također poboljšava komunikaciju unutar ekspertnog tima i osigurava objektivnost, budući da se ocjene kriterija i alternativa ne temelje na samo jednom čovjeku. Olakšana je i provjera nekonzistentnosti, odnosno provjera pogrešaka uslijed ocjenjivanja različitih kriterija ili alternativa. Velika prednost je i povećavanje znanja o problemu koji se rješava, a sve kroz analizu osjetljivosti pomoću koje se dobivaju informacije o tome prema kojem kriteriju je određena alternativa najbolja. Također moguće je i kroz različito kombiniranje ulaznih podataka, odnosno težina alternativa, vidjeti promjene na izlaznim podacima, odnosno rangiranju varijanti. Najveća prednost ove metode je postojanje programskih alata poput *Expert Choice-a* ili *SuperDecisiona* koji su vrlo jednostavni za primjenu, a vrlo kvalitetno predstavljaju rješenje problema višekriterijalnog odlučivanja u procesu odabira prostornog rasporeda proizvodnog sustava.

## 8. LITERATURA

- [1] Kunica, Z.: Projektiranje proizvodnih sustava, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [2] Diplomski rad: Majača Sanela, Izbor strategije održavanja primjenom metoda višekriterijalnog odlučivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [3] Tompkins J., White J., Bozer Y., Frazelle E., Tanchoco J., Trevino J., Facilities Planning, 2. izdanje, 1996.
- [4] Završni rad: Marina Marković, Metode rješavanja transportnog problema, Fakultet organizacije i informatike Varaždin, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [5] Vježbe iz kolegija „Projektiranje proizvodnih sustava“, Modificirana metoda trokuta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu
- [6] Yang L., Deuse J., Multiple-attribute Decision Making for an Energy Efficient Facility Layout Design, SciVerse ScienceDirect, 2012.
- [7] Hadi-Vencheh A., Mohamadghasemi A., An integrated AHP-NLP methodology for facility layout design, Jorunal of Manufacturing Systems, 2012.
- [8] Partovi F., Burton J., An Analytical Hierarchy Approach to Facility Layout, 1992.
- [9] Cambron K., Evans G., Layout Design Using the Analytical Hierarchy Process, 1991.
- [10] Multi-criteria analysis: a manual, Department for Communities and Local Government London, 2009.
- [11] Lisjak D., Primjena AHP-metode kao alata za optimalni izbor opreme, Hrvatsko društvo održavatelja, 2011.
- [12] Diplomski rad: Dinko Dujmić, Primjena višekriterijalnog odlučivanja u odabiru lokacije skladišta, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [13] Assari A., Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method, Indian Journal of Science and Technology, 2012.
- [14] Završni rad: Hrvoje Herceg, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2011.
- [15] Gokmenoglu K., Alaghemand S., A multi-criteria decision-making model for evaluating priorities for foreign direct investment, Eastern Mediterranean University, 2015.



- 
- [16] Multiple Criteria Decision Analysis for Health Care Decision Making, *Value in Health* 19, 2016.
- [17] Sokač D., Primjena višekriterijskog odlučivanja u odabiru najpovoljnije ponude, Hrvatski ogranak međunarodne elektrodistribucijske konferencije, 2010.
- [18] Kosijer M., Ivić M., Marković M., Belošević I., Višekriterijsko odlučivanje u planiranju i projektiranju trase željezničke pruge, *Građevinar*, 2012.
- [19] Doktorski rad: Nina Begičević, Višekriterijski modeli odlučivanja u strateškom planiranju uvođenja e-učenja, Fakultet organizacije i informatike Varaždin, Sveučilište u Zagrebu, 2008.
- [20] Saaty T., Decision making with the analytic hierarchy process, *Int. J. Services Science*, 2008.
- [21] Bayazit, O., Use of AHP in decision-making for flexible manufacturing systems, *Journal of Manufacturing Technology Management*, Vol. 16, No. 7, 2005.

## **PRILOZI**

- I. CD-R disc