

# Usporedba metoda za analizu ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda

---

Zuanović, Karla

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:235:225537>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-23**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Karla Zuanović**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Mario Štorga  
Dr. sc. Tomislav Martinec

Student:

Karla Zuanović

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentorima prof.dr.sc. Mariju Štorgi i dr.sc. Tomislavu Martinecu na pruženoj neizmjerne pomoći i svakom razgovoru i savjetu prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Veliko hvala svima koji su bili uz mene na putu do ovog postignuća.

Karla Zuanović



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

|  |         |
|--|---------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:   | Prilog: |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1                                 |         |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 21 -                                   |         |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karla Zuanović** Mat. br.: 0035204228

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba metoda za analizu ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Comparative study of eco-evaluation methods in conceptual phase of product development**

Opis zadatka:

Za podršku procesu konstruiranja koriste se brojne metode i alati za analizu ekološke prihvatljivosti. S obzirom na različite modele koje pojedine metode koriste (kvalitativne i kvantitativne), razlikuju se i dobiveni rezultati. Samo neke od postojećih metoda prikladne su za upotrebu u konceptualnoj fazi razvojnog procesa, gdje se taj kriterij odlučivanja rijetko koristi u odabiru koncepata. U okviru ovog diplomskog rada, potrebno je provesti usporedbu najčešće korištenih pristupa za analizu ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja na primjeru razvoja uređaja za aditivnu proizvodnju (3D printer).

U radu je potrebno:

- Pregledati stručnu i znanstvenu literaturu vezanu uz metode i alate za analizu ekološke prihvatljivosti proizvoda.
- Detaljno opisati postupak provođenja analize korištenjem odabranih metoda.
- Provesti analize ekološke prihvatljivosti primjenom odabranih metoda na konceptima uređaja za aditivnu proizvodnju.
- Usporediti dobivene rezultate te navesti prednosti i nedostatke korištenih metoda.
- Usporediti sa sličnim studijama pronađenim u literaturi i praksi te iznijeti zaključke.

Opseg rada bit će dogovoren s mentorima tijekom same izrade.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.


Zadatak zadan:  
21. siječnja 2021.


Datum predaje rada:  
25. ožujka 2021.

Predviđeni datum obrane:  
29. ožujka – 2. travnja 2021.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Mario Štorga  
Dr. sc. Tomislav Martinec

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

# SADRŽAJ

|   |      |
|---|------|
| SADRŽAJ .....   | I    |
| POPIS SLIKA .....   | V    |
| POPIS TABLICA.....  | VIII |
| POPIS OZNAKA .....  | X    |
| SAŽETAK.....  | XII  |
| SUMMARY .....   | XIII |
| 1 UVODNA RAZMATRANJA .....  | 1    |
| 2 PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA .....                                     | 4    |
| 2.1 Metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti.....           | 4    |
| 2.2 Ekološka prihvatljivost i aditivna proizvodnja.....                   | 9    |
| 3 PREGLED KORIŠTENIH METODE VREDNOVANJA EKOLOŠKE<br>PRIHVATLJIVOSTI ..... | 12   |
| 3.1 <i>Eco Design Value</i> metoda [14].....                              | 12   |
| 3.1.1 <i>LOW</i> – Što manji štetan utjecaj okoliš .....                  | 13   |
| 3.1.2 <i>LESS</i> – Što manja potrošnja resursa .....                     | 14   |
| 3.1.3 <i>LONG</i> – Što dulji životni vijek proizvoda .....               | 15   |
| 3.1.4 <i>LAST</i> – Što češće korištenje proizvoda .....                  | 16   |
| 3.1.5 Rangiranje koncepata .....  | 17   |
| 3.2 <i>Ekotransformabilnost</i> metoda [4].....                           | 18   |
| 3.2.1 Efektivnost pretvorbi energije i signala .....                      | 19   |
| 3.2.2 Broj pretvorbi energije i signala.....                              | 19   |
| 3.2.3 Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata.....                    | 19   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.4 | Broj sekundarnih efekata na okoliš .....   | 21 |
| 3.2.5 | Broj promjena agregatnog stanja materijala.....  | 21 |
| 3.2.6 | Konačno rangiranje koncepata .....   | 21 |
| 3.3   | <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> metoda [5][11].....  | 21 |
| 3.4   | <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> metoda [16][17].....   | 23 |
| 3.4.1 | A1: Odrediti kriterije vrednovanja i njihove težinske faktore.....   | 24 |
| 3.4.2 | A2: Definiranje inženjerskih karakteristika koncepata .....  | 26 |
| 3.4.3 | A3: Ostvariti veze između kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika .  | 26 |
| 3.4.4 | A4: Generiranje MCDM matrice .....   | 26 |
| 3.4.5 | A5: Prikaz rezultata.....  | 31 |
| 4     | KONCEPTI UREĐAJA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU .....   | 32 |
| 4.1   | Uređaj temeljen na FDM tehnologiji (engl. Fused Deposition Modelling) [28].....  | 34 |
| 4.1.1 | O tehnologiji.....   | 34 |
| 4.1.2 | Konstruktivski zahtjevi i definicija cilja.....  | 34 |
| 4.1.3 | Funkcijska struktura .....   | 35 |
| 4.1.4 | Razrađeni koncept.....   | 36 |
| 4.2   | Uređaj temeljen na tehnologiji selektivnog laserskog sinteriranja (engl. <i>Selective Laser Sintering – SLS</i> ) [29] ..... | 38 |
| 4.2.1 | O tehnologiji.....   | 38 |
| 4.2.2 | Konstruktivski zahtjevi i definicija cilja.....  | 39 |
| 4.2.3 | Funkcijska struktura .....   | 40 |
| 4.2.4 | Razrađeni koncept.....   | 42 |
| 4.3   | Uređaj temeljen na tehnologiji stereolitografije (engl. <i>Stereolithography - SLA</i> ) [30]                                | 43 |
| 4.3.1 | O tehnologiji.....   | 43 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 4.3.2 | Konstruktivski zahtjevi i definicija cilja.....   | 44 |
| 4.3.3 | Funkcijska struktura .....  | 44 |
| 4.3.4 | Razrađeni koncept.....  | 45 |
| 4.4   | Dodatno definirane specifikacije uređaja .....  | 46 |
| 4.5   | Objašnjenja odabranih tehničkih specifikacija .....   | 49 |
| 5     | ANALIZA EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI KONCEPATA<br>KORIŠTENJEM ODABRANIH METODA .....                                      | 54 |
| 5.1   | <i>Eco Design Value</i> metoda.....   | 54 |
| 5.1.1 | <i>LOW</i> – Što manji štetan utjecaj na prirodu i okoliš.....  | 54 |
| 5.1.2 | <i>LESS</i> – Što manja potrošnja resursa .....   | 57 |
| 5.1.3 | <i>LONG</i> – Što dulji životni vijek proizvoda .....   | 60 |
| 5.1.4 | <i>LAST</i> – Što češće korištenje proizvoda .....  | 63 |
| 5.1.5 | Rangiranje koncepata .....  | 67 |
| 5.2   | <i>Ekotransformabilnost</i> metoda.....   | 72 |
| 5.2.1 | Uređaj temeljen na FDM tehnologiji (engl. Fused Deposition Modelling) .....   | 73 |
| 5.2.2 | Uređaj temeljen na tehnologiji stereolitografije (engl. <i>Stereolithography</i> - SLA)<br>78                         |    |
| 5.2.3 | Uređaj temeljen na tehnologiji selektivnog laserskog sinteriranja (engl. <i>Selective Laser Sintering</i> – SLS)..... | 81 |
| 5.2.4 | Rangiranje koncepata .....  | 86 |
| 5.3   | <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> metoda.....   | 87 |
| 5.3.1 | Uređaj temeljen na FDM tehnologiji (engl. Fused Deposition Modelling) .....   | 88 |
| 5.3.2 | Uređaj temeljen na tehnologiji stereolitografije (engl. <i>Stereolithography</i> - SLA)<br>91                         |    |
| 5.3.3 | Uređaj temeljen na tehnologiji selektivnog laserskog sinteriranja (engl. <i>Selective Laser Sintering</i> – SLS)..... | 93 |



---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 5.3.4 | Eco-QFD (Kuća kvalitete) .....  | 95  |
| 5.3.5 | Rangiranje koncepata .....  | 98  |
| 5.4   | <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> metoda .....              | 99  |
| 5.4.1 | A1: Odrediti kriterije vrednovanja i njihove težinske faktore.....            | 99  |
| 5.4.2 | A2: Definiranje inženjerskih karakteristika koncepata .....                   | 100 |
| 5.4.3 | A3: Ostvariti veze između kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika | 100 |
| 5.4.4 | A4: Generiranje MCDM matrice .....  | 103 |
| 5.4.5 | A5: Prikaz rezultata.....   | 106 |
| 6     | USPOREDBA REZULTATA I RASPRAVA .....  | 109 |
| 6.1   | Usporedba rezultata .....   | 109 |
| 6.2   | Osvrt na metode – prednosti i nedostaci.....                                  | 110 |
| 6.3   | Ograničenja istraživanja .....  | 113 |
| 7     | ZAKLJUČAK .....   | 115 |
|       | LITERATURA.....   | 117 |
|       | PRILOG.....   | 122 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 Faze LCA analize [10] .....   | 5  |
| Slika 2 Vremenska crta teme održivosti u aditivnoj proizvodnji u znanstvenom svijetu [22].....            | 10 |
| Slika 3 Struktura vrijednosti Eco Design Value metode [14] .....  | 13 |
| Slika 4 Primjer lanaca efekata za perilicu rublja [4] .....   | 18 |
| Slika 5 Postupak <i>Eco-QFD</i> + <i>FIM</i> metode [5] .....   | 22 |
| Slika 6 Kuća kvalitete na primjeru klamerice [5] .....  | 23 |
| Slika 7 Koraci <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> metode [16].....                       | 24 |
| Slika 8 Primjer matrice binarnih težinskih faktora [17].....  | 25 |
| Slika 9 Primjer CODA matrice [17].....  | 27 |
| Slika 10 Moguće vrste veza između kriterija vrijednosti i inženjerskih karakteristika u CODA matrici..... | 28 |
| Slika 11 Princip rada FDM uređaja [28] .....  | 34 |
| Slika 12 Funkcijska struktura FDM uređaja [28].....   | 36 |
| Slika 13 Koncept FDM uređaja [28] .....   | 37 |
| Slika 14 Princip rada SLS uređaja [32] .....  | 39 |
| Slika 15 Funkcijska struktura SLS uređaja [29].....   | 41 |
| Slika 16 Laserski sustav kod SLS uređaja [29].....  | 42 |
| Slika 17 SLS uređaj [29] .....  | 43 |
| Slika 18 Princip rada SLA uređaja [33] .....  | 44 |
| Slika 19 Funkcijska struktura SLA uređaja [30].....   | 45 |
| Slika 20 SLA uređaj [30] .....  | 46 |
| Slika 21 Legenda za lance fizikalnih efekata .....  | 73 |
| Slika 22 FDM - Lanac fizikalnih efekata L1.....   | 73 |
| Slika 23 FDM - Lanac fizikalnih efekata L2.....   | 73 |

|  |     |
|--|-----|
| Slika 24 FDM - Lanac fizikalnih efekata L3.....  | 74  |
| Slika 25 FDM - Lanac fizikalnih efekata L4a.....   | 74  |
| Slika 26 FDM - Lanac fizikalnih efekata L4b.....   | 74  |
| Slika 27 FDM - Lanac fizikalnih efekata L5.....  | 74  |
| Slika 28 FDM - Lanac fizikalnih efekata L6.....  | 75  |
| Slika 29 FDM - Lanac fizikalnih efekata L7.....  | 75  |
| Slika 30 SLA- Lanac fizikalnih efekata L1.....   | 78  |
| Slika 31 SLA- Lanac fizikalnih efekata L2.....   | 78  |
| Slika 32 SLA- Lanac fizikalnih efekata L3a.....  | 78  |
| Slika 33 SLA- Lanac fizikalnih efekata L3b.....  | 79  |
| Slika 34 SLA - Lanac fizikalnih efekata L4.....  | 79  |
| Slika 35 SLA - Lanac fizikalnih efekata L5a.....   | 79  |
| Slika 36 SLA - Lanac fizikalnih efekata L5b.....   | 79  |
| Slika 37 SLA - Lanac fizikalnih efekata L5c.....   | 80  |
| Slika 38 SLS - Lanac fizikalnih efekata L1.....  | 81  |
| Slika 39 SLS - Lanac fizikalnih efekata L2.....  | 82  |
| Slika 40 SLS - Lanac fizikalnih efekata L3.....  | 82  |
| Slika 41 SLS - Lanac fizikalnih efekata L4.....  | 82  |
| Slika 42 SLS - Lanac fizikalnih efekata L5.....  | 83  |
| Slika 43 SLS - Lanac fizikalnih efekata L6.....  | 83  |
| Slika 44 SLS - Lanac fizikalnih efekata L7a.....   | 83  |
| Slika 45 SLS - Lanac fizikalnih efekata L7b.....   | 84  |
| Slika 46 IBIS zapis za određivanje jačine veze između maksimalne temperature u procesu i<br>potrošnje energije u radu..... | 101 |

|   |     |
|---|-----|
| Slika 47 IBIS zapis za određivanje optimalne vrijednosti maksimalne temperature u procesu u vezi s potrošnjom energije u radu ..... | 102 |
| Slika 48 IBIS zapis za određivanje vrste funkcije između maksimalne temperature u procesu i potrošnji energije u radu.....          | 103 |
| Slika 49 Grafički prikaz rezultata po kriterijima vrijednosti.....  | 108 |
| Slika 50 Rangiranje koncepata prema sve četiri metode.....  | 110 |

## POPIS TABLICA

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 1 Karakteristike metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti .....                  | 8   |
| Tablica 2 Skala za potrebe rangiranje koncepata u <i>Eco Design Value</i> metodi [14] .....    | 17  |
| Tablica 3 Skala za rangiranje sekundarnih efekata na okoliš.....                               | 20  |
| Tablica 4 Skala za izračunavanje KM vrijednosti [27] .....                                     | 30  |
| Tablica 5 Raspodjela konstrukcijskih timova prema vrsti tehnologije aditivne proizvodnje ..... | 32  |
| Tablica 6 Dodatne informacije o konceptima .....   | 47  |
| Tablica 7 Rangiranje prema kriterijima .....   | 67  |
| Tablica 8 Ukupan rezultat <i>Eco Design Value</i> metode.....                                  | 72  |
| Tablica 9 Primjer određivanja dobrote lanaca fizikalnih efekata.....                           | 76  |
| Tablica 10 Tablica za vrednovanje FDM koncepta prema <i>Ekotransformabilnost</i> metodi.....   | 76  |
| Tablica 11 Tablica za vrednovanje SLA koncepta prema <i>Ekotransformabilnost</i> metodi.....   | 80  |
| Tablica 12 Tablica za vrednovanje SLS koncepta prema <i>Ekotransformabilnost</i> metodi .....  | 84  |
| Tablica 13 Ukupan rezultat <i>Ekotransformabilnost</i> metode.....                             | 86  |
| Tablica 14 Pomoćna tablica za FIM - FDM.....   | 88  |
| Tablica 15 FIM za FDM.....   | 90  |
| Tablica 16 Pomoćna tablica za FIM - SLA.....   | 91  |
| Tablica 17 FIM za SLA.....   | 92  |
| Tablica 18 Pomoćna tablica za FIM - SLS .....  | 93  |
| Tablica 19 FIM - SLS.....  | 94  |
| Tablica 20 Ukupan rezultat <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> metoda .....                | 99  |
| Tablica 21 Težinski faktori kriterija vrijednosti.....   | 100 |
| Tablica 22 Primjer dodjeljivanja KM ocjena .....   | 103 |
| Tablica 23 Legenda za računanje KM rezultata.....  | 105 |

|  |     |
|--|-----|
| Tablica 24 Ukupan rezultat MCDM metode.....                                  | 106 |
| Tablica 25 Rezultat MCDM metode prema pojedinim korisničkim zahtjevima ..... | 107 |
| Tablica 26 Usporedba rezultata sve četiri metode .....                       | 109 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka          | Jedinica | Opis  |
|-----------------|----------|---|
| $A_i$           | -        | koncept proizvoda iz skupa koncepata proizvoda $A_i$ ( $i=1,\dots,n$ )  |
| $E_{i,j}$       | -        | Ukupan utjecaj $i$ -tog proizvoda na okoliš u kategoriji $j$  |
| $M_{i,j,k}$     | -        | Utjecaj na okoliš $i$ -tog proizvoda u kategoriji $j$ povezano s komponentom $k$ uslijed materijala           |
| $N_i$           | -        | Normalizirani težinski faktor   |
| $P_{i,j,k,m}$   | -        | Utjecaj na okoliš $i$ -tog proizvoda u kategoriji $j$ povezano s komponentom $k$ uslijed proizvodnje          |
| $SCF_i$         | -        | suma svih korelacijskih faktora za svaki kriterij vrijednosti.  |
| $U_{i,j}$       | -        | Utjecaj na okoliš $i$ -tog proizvoda u kategoriji $j$ povezano s komponentom $k$ uslijed korištenja proizvoda |
| $X_i$           | -        | ukupan broj jedinica za svaki red kriterija vrednovanja   |
| $Y_i$           | -        | ukupan broj nula za svaki stupac kriterija vrednovanja  |
| $f_{TRi}$       | $seJ/J$  | faktor (solarne) transformabilnosti ulaznog oblika energije   |
| $f_{TRo}$       | $seJ/J$  | faktor (solarne) transformabilnosti izlaznog oblika energije  |
| $f_{Max}(\rho)$ | -        | Maksimizirajuća funkcija u ovisnosti o vrijednosti inženjerske karakteristike                                 |
| $f_{Min}(\rho)$ | -        | Minimizirajuća funkcija u ovisnosti o vrijednosti inženjerske karakteristike                                  |
| $f_{Opt}(\rho)$ | -        | Optimizirajuća funkcija u ovisnosti o vrijednosti inženjerske karakteristike                                  |
| $\alpha_{k,n}$  | -        | postotak kojim komponenta $k$ doprinosi u izvođenju funkcije $n$  |
| $\beta_{i,j,n}$ | -        | utjecaj na okoliš kategorije $j$ uslijed funkcije $n$ za proizvod $i$   |
| $\gamma_n$      | -        | postotak kojim funkcija $n$ doprinosi u ukupnoj funkcionalnosti proizvoda                                     |
| $\epsilon_{TR}$ | -        | teorijska ekoeftektivnost pretvorbe (transformacije) oblika energije  |
| $CS_i$          | -        | individualna zadovoljstva korisnika za svaki kriterij vrednovanja   |
| $E_A$           | $seJ/J$  | faktor transformabilnosti energije anorganskog materijala   |
| $E_{Ch}$        | $seJ/J$  | faktor transformabilnosti kemijske energije   |
| $E_E$           | $seJ/J$  | faktor transformabilnosti električne energije   |
| $E_{EM}$        | $seJ/J$  | faktor transformabilnosti elektromagnetske energije   |
| $E_H$           | $seJ/J$  | faktor transformabilnosti kinetičke energije  |
| $E_{Hu}$        | $seJ/J$  | faktor transformabilnosti ljudske snage   |

---

|           |         |   |
|-----------|---------|---|
| $E_K$     | $seJ/J$ | faktor transformabilnosti kinetičke energije                        |
| $E_{LCh}$ | $seJ/J$ | faktor transformabilnosti latentne kemijske i svjetlosne energije   |
| $E_{LH}$  | $seJ/J$ | faktor transformabilnosti latentne toplinske energije               |
| $E_{Me}$  | $seJ/J$ | faktor transformabilnosti mehaničke energije                        |
| $E_W$     | $seJ/J$ | faktor transformabilnosti energije vjetra                           |
| $E_{WT}$  | $seJ/J$ | faktor transformabilnosti energije valova, plime i oseke            |
| $N_{Agr}$ | -       | broj promjena agregatnog stanja u procesu                           |
| $N_{eEF}$ | -       | ukupan broj sekundarnih efekata na okoliš                           |
| $N_{eTR}$ | -       | ukupan broj pretvorbi energije i signala                            |
| $ODM$     | -       | Ukupna ocjena koncepta  |
| $S_{eEF}$ | -       | ukupan zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš |
| $\rho$    | -       | ostvarena vrijednost promatrane inženjerske karakteristike          |
| $\tau$    | -       | tolerancija vrijednosti promatrane inženjerske karakteristike       |
| $\eta$    | -       | neutralna vrijednost promatrane inženjerske karakteristike          |



## **SAŽETAK**

U konceptualnoj fazi razvoja proizvoda potrebno je evaluirati više različitih konceptijskih rješenja, na temelju različitih kriterija, kako bi se odredilo ono najbolje. Vrlo rijetko se kao kriterij pri odabiru koristi ekološka prihvatljivost koja zadnjih godina postaje ne samo trend, već i uvjet izlaska proizvoda na tržište kroz zadovoljavanje brojnih standarda i regulativa. U okviru ovog rada pregledana je znanstvena literatura iz područja vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Mali broj metoda primjenjiv je u konceptualnoj fazi zbog nedostupnosti podataka o cijelom životnom ciklusu proizvoda. Iako je broj primjenjivih metoda vrlo ograničen, odabrane su četiri metode koje se mogu primijeniti u konceptualnoj fazi, dan je njihov detaljan opis te su provedene na konceptima uređaja za aditivnu proizvodnju (3D printerima). Uspoređeni su dobiveni rezultati te je dan osvrt na prednosti i nedostatke svake metode.

Ključne riječi: ekološka prihvatljivost, ekodizajn, utjecaj na okoliš, održivost, konceptualna faza, razvoj proizvoda, vrednovanje koncepata

## **SUMMARY**

In the conceptual phase of product development, it is necessary to evaluate several different conceptual solutions, taking into account various criteria, in order to decide on the best one. Ecological impact, which is rarely used as a selection criterion, has become not only a trend in the recent years, but a requirement to enter the market through meeting numerous standards and regulations. A literature review of eco-evaluation methods is conducted in this paper. Very few methods are applicable in the conceptual phase due to the unavailability of data on the entire product life cycle. Although the number of applicable methods is very limited, four methods are selected that can be applied in the conceptual phase, described in detail and carried out on concepts of additive manufacturing devices (3D printers). The obtained results are compared and a review of the advantages and disadvantages of each method is given.

Key words: eco-evaluation, ecodesign, ecological impact, design for environment, sustainability, conceptual phase, product design, concept ranking

# 1 UVODNA RAZMATRANJA

U okviru ovog rada istraženo je područje tzv. konstruiranja za okoliš (engl. *Design for Environment - DfE*) koje se često u literaturi naziva ekodizajn (engl. *ecodesign*). Zadnjih godina to područje prošireno je i obuhvaćeno pojmom održivosti (engl. *sustainability*), a često se može naći i izraz cirkularna ekonomija (engl. *circular economy*). Fokus literature i istraživača koji se bave konstruiranjem za okoliš počeo je obuhvaćati dodatne aspekte koji utječu na percepciju proizvoda kao ekološki prihvatljivog. U prijašnjim istraživanjima uglavnom se govorilo o alatima za ekološku prihvatljivost što se u zadnje vrijeme počelo nazivati alatima za održivost te se uz prije obrađivanu ekološku dimenziju više pažnje posvećuje dodatnim dvjema dimenzijama, socijalnoj i ekonomskoj.

Ti alati koriste se u procesima održive proizvodnje i održivog razvoja. Održivu proizvodnju moglo bi se definirati kao stvaranje proizvoda koje uključuje procese koji minimiziraju negativan utjecaj na okoliš, štede energiju i prirodne resurse, sigurni su za zaposlenike i korisnike te su ekonomski zadovoljavajući [1]. Održivi razvoj proizvoda naglašava važnost razmatranja cijelog životnog ciklusa uključujući ekstrakciju sirovog materijala, fazu koncipiranja, fazu konstrukcijske razrade, proizvodnju, transport, korištenje, održavanje i odlaganje.

Održivost i održivi razvoj postali su bitno i relevantno područje istraživanja [2]. Počeo se pojavljivati značajan pritisak na postizanje ciljeva održivosti te sukladno tome održivi razvoj proizvoda dobiva sve veći značaj u istraživačkom svijetu. Sve više institucija suočeno je s povećanjem pažnje, i naroda i znanstvenog svijeta, na svjetske ekološke probleme. Globalno zatopljenje, iscrpljivanje prirodnih resursa, zagađenja svih vrsta, klimatske i tehnološke katastrofe, te ekonomske i zdravstvene posljedice istih, polako su počele buditi svijest nevladinih organizacija, udruga, političkih aktera i šire javnosti. Na primjer, održivost proizvodnje jedan je od ciljeva održivog razvoja koje postavlja UN u okviru mjera za održivi razvoj kroz minimiziranje utjecaja na okoliš [3].

Pokazano je da 80% utjecaja na okoliš nekog proizvoda proizlazi iz odluka koje se donose već u ranim fazama razvoja [4]. Najbitniji ishod konceptualne faze je upravo odabir koncepta koji će ući u proces konstrukcijske razrade te na kraju postati gotov proizvod. Koncepti se uobičajeno prikazuju skicama, okvirno se opisuje način rada proizvoda, funkcije te glavne komponente.

Koncept se gradi na temelju funkcionalnih zahtjeva, zahtjeva korisnika i ostalih zahtjeva te na temelju njih pristupa se izradi principijelnih rješenja kombiniranjem različitih tehničkih rješenja funkcija. Može se reći da je većina velikih odluka donesena upravo u ovoj fazi razvoja. Upravo zbog toga, pogrešno donesena odluka u konceptualnoj fazi, vrlo se teško može ispraviti u fazi konstruiranja [5]. Najčešći kriteriji vrednovanja prilikom odabira koncepata su troškovi, kompleksnost tehničke izvedbe, proizvodni procesi i slično. Rijetkost je da se ekološka prihvatljivost uzima za bitan kriterij. Kada se govori o ekološkoj prihvatljivosti, neke od značajki proizvoda koje se najčešće razmatraju su potrošnja energije, reciklabilnost, rastavljivost i način odlaganja. Ukupna ekološka prihvatljivost proizvoda najčešće se računa kao zbroj parcijalnih ekoloških prihvatljivosti uzrokovanih pojedinim utjecajima na okoliš.

Postoji niz različitih metoda i alata koje su razvijene s ciljem podrške konstruiranja iz aspekta održivosti. Najviše korištena metoda za procjenu utjecaja na okoliš je analiza životnog ciklusa (engl. LCA - *Life Cycle Assessment*) koja je ujedno i jedina ISO standardizirana metoda. LCA metoda zahtjeva vrlo opsežne podatke u proizvodu koji nisu dostupni u ranoj fazi razvoja. Naime, u ranim fazama konstruiranja još nisu definirane neke važne informacije o proizvodu: geometrijskim značajkama, strukturi proizvoda i njegovu budućemu životnom ciklusu [4]. Veliki broj dostupnih metoda za procjenu ekološke prihvatljivosti nije primjenjiv u konceptualnoj fazi jer se baziraju upravo na LCA analizi. Kako je ranije navedeno, odluke donesene u ranim fazama su ključne, stoga je veliki propust zanemariti ili netočno evaluirati koncept nekog proizvoda prema kriteriju ekološke prihvatljivosti

Iz tog razloga, u okviru ovog rada pregledana je znanstvena literatura na temu vrednovanja ekološke prihvatljivosti te se pokušalo utvrditi koje metode bi mogle biti primijenjene u konceptualnoj fazi razvoja.

U svrhu istraživanja navedenih metoda, za primjer proizvoda na kojem će se provoditi vrednovanje, uzeti su koncepti uređaji za aditivnu proizvodnju, tj. 3D printeri. Tehnologije aditivne proizvodnje raznolike su te su upravo zbog toga zanimljive za proučavanje ekološke prihvatljivosti. *ASTM F42 Technical Committee* koji je odgovoran za nadgledanje razvoja standarda aditivne proizvodnje definira tehnologiju kao proces spajanja materijala kako bi se proizveli fizički predmeti iz 3D modela podataka, obično sloj po sloj, suprotno od tradicionalnih proizvodnih tehnologija. [6]

U ovom radu uspoređena su tri koncepta uređaja koja koriste tri različite tehnologije aditivne proizvodnje: taložno srašćivanje (FDM - *Fused Deposition Modelling*), selektivno lasersko srašćivanje (SLS - *Selective Laser Sintering*) i stereolitografija (SLA - *Stereolithography*). Valja napomenuti kako se upravo zbog izbora tri različite tehnologije, u ovom slučaju odstupa od uobičajenog načina izbora konceptata koji se inače razvijaju dobro definiranim razvojnim projektima i to najčešće na temelju jedinstvene funkcijske strukture proizvoda i jedne temeljne tehnologije. U okviru ovog rada cilj je u fazi planiranja i ranog koncipiranja odrediti smjer razvoja (odabrati tehnologiju) uzimajući u obzir kriterije ekološke prihvatljivosti.

Aditivna proizvodnja generalno se smatra ekološki prihvatljivom, ali vrlo malo ljudi razumije njen pravi utjecaj na okoliš. Neki od aspekata ekološke prihvatljivosti aditivne proizvodnje su utjecaj na transport, nastali otpad, potrošnja energije te utjecaj proizvodnje sirovog materijala. [7]

Najutjecajniji faktor je potrošnja električne energije u radu. Veliki izazov u razumijevanju potrošnje energije u procesima aditivne proizvodnje je činjenica da uređaji jako variraju u tome koliko energije troše i što ta potrošnja ovisi o velikom broju varijabli, počevši od korištenog materijala, geometrije izratka, pa do načina kako se i koliko uređaj koristi [8].

Nakon pregleda metoda i njihove primjene na konceptima uređaja za aditivnu proizvodnju potrebno je utvrditi prednosti i mane njihove primjene, usporediti dobivene rezultate te na temelju toga utvrditi jesu li metode povoljne za evaluaciju u konceptualnoj fazi.

## 2 PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

Ovim pregledom područja istraživanja obuhvaćene su teme vezane uz metode i alate za vrednovanje ekološke prihvatljivosti te održivosti u aditivnoj proizvodnji s ciljem pronalaska adekvatnih metoda za vrednovanje koncepata na primjeru uređaja za aditivnu proizvodnju.

### 2.1 Metode i alati za vrednovanje ekološke prihvatljivosti

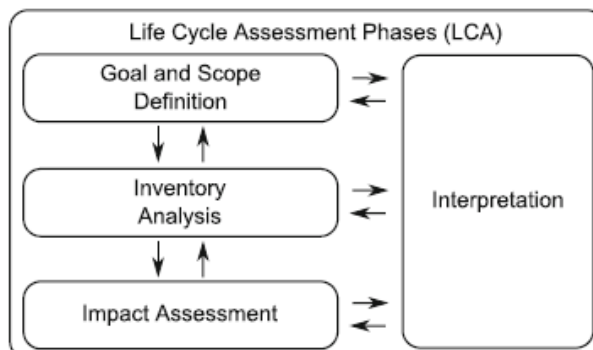
Raznolikost alata kreće se od vrlo jednostavnih i generičkih do vrlo složenih, kvantitativnih alata čija primjena zahtijeva puno vremena. Nekima od alata može se provesti vrlo detaljna analiza i doći do kvantificiranja utjecaja na okoliš te posljedično dobiti specifično i detaljno rješenje kako ostvariti održivost promatranog proizvoda. S druge strane, mnogi alati daju kao rezultat preliminarnu kvalitativnu analizu kojom se daju generalne preporuke u kojem smjeru razvijati proizvod kako bi bio ekološki prihvatljiviji.

Najpopularnija i najviše korištena metoda vrednovanja ekološke prihvatljivosti (održivosti) je analiza životnog ciklusa proizvoda – LCA (*Life Cycle Assessment*). LCA generira kvantitativne podatke o utjecaju promatranog proizvoda na okoliš tijekom cijelog životnog ciklusa. Provodi se u jednom od softvera dostupnih na tržištu poput *SimaPro*, *GaBi*, *SolidWorks Sustainability* i drugi [9]. Postoje pojednostavljene LCA metode kojima se na manje složen način i u znatno manje vremena provodi analiza s manje podataka, ali je problem što su rezultati onda znatno više nepouzdana. Sve u svemu, jako puno podataka je potrebno kako bi se provela adekvatna LCA analiza. Uzimajući to u obzir, vrlo je teško koristiti LCA metodu u ranijim fazama razvoja, odnosno sve dok finalni proizvod nije dostupan, a i kasnije, jer kako je napomenuto, potrebna je velika količina podataka o svim fazama pa tako i o fazi korištenja (npr. potrošnja energije), što je u ranim fazama nemoguće znati.

ISO 14044 standard propisuje smjernice za provođenje LCA analize ju opisuje kroz četiri ključna koraka koji se mogu vidjeti sa slike 1 [10]:

1. Definirati ciljeve i opseg analize,
2. Prikupiti što detaljnije podatke o ulaznim i izlaznim parametrima promatranog tehničkog sustava,
3. Procijeniti utjecaj na okoliš pomoću neke od LCA metoda (npr. *Eco-Indicator 99*),

4. Interpretirati dobivene rezultate i provjeriti jesu li rezultati i postavljena ograničenja točni.



**Slika 1 Faze LCA analize [10]**

U okviru ovog rada provedena je pretraga relevantne literature kako bi se pronašli znanstveni članci, knjige, diplomski radovi, doktorske disertacije, standardi i izvještaji na temu metoda za analizu ekološke prihvatljivosti. Inicijalno je pretražen znanstveni časopis *Journal of Cleaner Production*, a zatim tzv. *snowballing* metodom proširen broj korištenih izvora. Pretraga se vršila po ključnim riječima: „*sustainable product design*“, „*sustainable manufacturing*“, „*eco-design*“, „*design for environment*“, „*tools for sustainable product design*“, „*eco-design tools*“, „*sustainability assessment*“. Prema prikupljenim podacima napravljena je analiza i sinteza.

Metoda bi trebala biti jednostavna i laka za korištenje, prilagodljiva različitim slučajevima, u mogućnosti jasno prikazati rezultate koji iz nje trebaju proizaći, dati viziju kako poboljšat proizvod u smislu održivosti te nezahtjevna u smislu potrebnih podataka i vremena. Puno alata i metoda koji su pronađeni nije nikako moguće upotrijebiti u ranim fazama razvoja kao što je konceptualna faza. To je iz razloga jer su u ranim fazama upute za konstruiranje puno fleksibilnije. Puno metoda pokazalo se i korisnijima u kasnijim fazama razvoja proizvoda jer zahtijevaju kompleksne integracije više alata i perspektivi, a takve informacije nisu tipično dostupne u ranoj fazi.

Neke od smjernica o kojima se vodilo računa pri odabiru metoda su:

- Može se primijeniti u ranoj fazi razvoja (nije nužno imati podatke koje zahtijeva LCA analiza),
- Bazira se na kalitativnim podacima više nego na kvantitativnim
- Ne zahtijeva puno vremena,

- Ima sustav vrednovanja,
- Detaljno je objašnjen postupak provođenja metode.

U nastavku teksta slijedi popis metoda koje su uglavnom zadovoljile postavljene kriterije. Glavni problem je bio što mnoge metode zahtijevaju podatke dobivene LCA analizom. Zato je najveća prednost dana metodama koje mogu biti provedene bez takvih podataka ili je moguće uzeti drugačije podatke kao alternativno rješenje bez narušavanja smisla metode.

**Eco-QFD + Function Impact Matrix** metoda [5][11] koja predlaže izradu kuće kvalitete, a za pomoć u razumijevanju procesa razvoja i odabira koncepta koristi funkcijsku dekompoziciju proizvoda. FIM matrica služi boljem razumijevanju funkcija proizvoda, a na temelju podataka dobivenih iz nje izrađuje se kuća kvalitete. Metoda nema jasno definiran proces odlučivanja o najboljem konceptu.

**NASDOP (Normative Decision Analysis Method for the Sustainability-Based Design of Products)** metoda [12] temelji se na podacima dobivenim LCA analizom koje sistematizira HEIM (*Hypothetical equivalent and inequivalents method*) metodom. Također omogućuje uključivanje faktora nepouzdanosti ulaznih podataka.

**PSD (Preference Set-Based Design)** [13] metoda obuhvaća širok spektar alternativnih koncepata koja prostor konstrukcijskih rješenja dijele na relativno jednake volumene. Na taj način za svaki konstrukcijski parametar ponuđen je raspon umjesto egzaktnog rješenja, a glavni cilj je uvrstiti kriterije ekološke prihvatljivosti u standardne kriterije prema kojima se obično biraju najbolja rješenja.

**Eco Design Value metoda** [14] temelji se na smjernicama za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda. Formirana je u obliku izjavnih rečenica podijeljenih u četiri kategorije koje predstavljaju četiri vrijednosti pod akronimom 4L (*low, less, long and last*). Nije definirano kakvi podaci se mogu koristiti kao odgovori na smjernice pa se može reći da je metoda kvalitativna. Metoda nije namijenjena vrednovanju.

**RLCA (Rapid Life Cycle Assessment)** [15] ima ideju smanjiti potrebnu količinu podataka i općenito ubrzati proces provođenja originalne LCA analize. Predložen je *Green Feature* koncept koji služi definiranju kriterija održivosti. Problem nepouzdanost podataka uzima rješava se pomoću neizrazite logike (engl. *fuzzy logic*) i Monte Carlo metode.



**MCDM for Sustainability and Value Assessment** metoda [16] [17] koja kao višekriterijsku metodu odlučivanja koristi CODA (*COncept Design Analysis*) matricu i *Knowledge Maturity* koncept za procjenu pouzdanosti podataka. Konačan rezultat metode je numerička vrijednost *ODM (Overall Design Merit)* prema kojoj se koncepti mogu uspoređivati.

**Evaluation of Design Alternatives' Environmental Performance Using AHP and ER Approaches** [18] metoda je za evaluaciju koncepata koristeći analitički hijerarhijski proces (AHP) i *evidential reasoning* (ER) što zahtjeva složen proračun. Metoda se temelji na grubim LCA podacima. Kriteriji za AHP proces uzimaju se iz cijelog životnog ciklusa proizvoda.

**IEDM (Integrated Eco Design Decision Making)** [19] provodi se kroz tri koraka: LCA analiza, *Eco-design* proces i izradu kuće kvalitete. *Eco-design* proces sastoji se od tri modula koji se odnose na: fazu proizvodnje, fazu korištenja i fazu odlaganja. Moduli omogućavaju prikupljanje i integraciju podataka od svih potrebnih stručnjaka na jednostavan i organiziran način što na kraju rezultira stvaranje relevantne baze podataka o proizvodu koja se može koristiti u budućnosti. Prilikom izrade kuće kvalitete održivost je glavni kriterij koji proizvod treba zadovoljiti.

**A comprehensive decision support model for the evaluation of eco-designs** [20] metoda ima dinamičan pristup problemu ekološke prihvatljivosti koji integrira LCA analizu, neizrazitu logiku (engl. *fuzzy logic*) i ANP (*Analytical Network Process*). Određuju se kriteriji ekološke prihvatljivosti i ANP procesom im se pridodaje važnost. Metoda se temelji na LCA podacima.

**Ekotransformabilnost metoda** [4] se temelji na vrednovanju transformacija pretvorbi energije i signala prema hijerarhiji solarne transformabilnosti oblika energije koji se vrednuju kroz lance efekata pretvorbi energije. Definira pet kriterija ekološke prihvatljivosti kroz koje se obuhvaćaju pretvorbe energije, sekundarni efekti na okoliš i promjene agregatnih stanja u promatranom konceptu.

Bitan podatak iz Tablica 1 je podjela metoda na kvantitativne i kvalitativne ovisno o vrsti ulaznih podataka [4]:

- kvalitativne metode zahtijevaju kvalitativne ulazne parametre i propisani kriteriji ekološke prihvatljivosti na kvalitativan način opisuju ideju, koncept, proizvod.

- kvalitativno-kvantitativne metode imaju ulazne podatke koji mogu biti kvalitativni i kvantitativni ovisno o tome je li riječ o kvalitativnoj ili kvantitativnoj vrijednosnoj ljestvici, tj. kriterijima ekološke prihvatljivosti.
- kvantitativne metode kao npr. analiza životnog ciklusa proizvoda LCA kojom se utjecaji na okoliš kvantificiraju u obliku jedinica utjecaja na okoliš, a u svrhu analize životnog ciklusa, usporedbe s referentnim proizvodom ili rekonstrukcije proizvoda.

**Tablica 1 Karakteristike metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti**

| Metoda  | Primjenjiva u fazi koncipiranja | Kvalitativna/kvantitativna | Sustav vrednovanja | Detaljan opis |
|---|---------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|
| <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> [5], [11]   | +/-                             | kvalitativno/kvantitativna | +/-                | +             |
| <i>NASDOP</i> [12]  | -                               | kvantitativna              | +                  | +             |
| <i>PSD (Preference Set-Based Design)</i> [13]   | -                               | kvantitativna              | +/-                | +             |
| <i>Eco Design Value</i> [14]  | +                               | kvalitativna               | -                  | +/-           |
| <i>RLCA (Rapid Life Cycle Assessment)</i> [15]  | -                               | kvantitativna              | -                  | -             |
| <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> [16][17]  | +/-                             | kvalitativno/kvantitativna | +                  | +             |
| <i>Evaluation of Design Alternatives Environmental Performance Using AHP and ER Approaches</i> [18] | -                               | kvantitativna              | +                  | +/-           |
| <i>IEDM (Integrated Eco Design Decision Making)</i> [19]  | -                               | kvalitativno/kvantitativna | -                  | +             |

|  |   |                            |   |   |
|--|---|----------------------------|---|---|
| <i>A comprehensive decision support model for the evaluation of eco-designs</i> [20] | - | kvantitativna              | + | + |
| <i>Ekotransformabilnost</i> [4]  | + | kvalitativno/kvantitativna | + | + |

Na temelju prethodne tablice odabrane su četiri metode za detaljnu analizu u ovom radu. Glavni kriterij prilikom odabira bio je da je metoda primjenjiva u fazi koncipiranja što su u potpunosti ili djelomično zadovoljile samo četiri metode. Te četiri metode su: *Eco-QFD + Function Impact Matrix* [5], [11], *Eco Design Value* [14], *MCDM for Sustainability and Value Assessment* [16][17] i *Ekotransformabilnost* [4]. Metode će biti detaljnije opisane u trećem poglavlju.

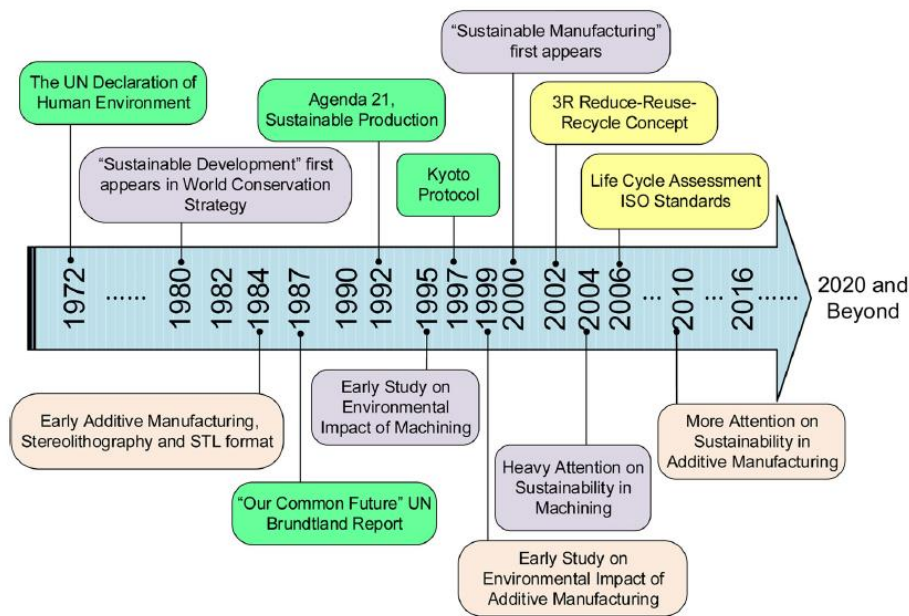
## 2.2 Ekološka prihvatljivost i aditivna proizvodnja

Procesi aditivne proizvodnje još uvijek moraju demonstrirati svoj potencijal ekološke prihvatljivosti uzimajući u obzir principe održivosti: efikasno korištenje materijala i energije, dobro gospodarenje otpadom, niske troškove proizvodnje, izbjegavanje toksičnih emisija i materijala, zdravstvene i sigurnosne probleme, nizak negativan utjecaj na okoliš, ekonomsku povoljnost, mogućnost popravka, mogućnost ponovnog korištenja, mogućnost recikliranja i odlaganje na pravilan način [21].

Budući da istraživanja vezana uz održivost zahtijevaju interdisciplinarni pristup, primjerice znanje o materijalima, mehanici, fizici, kemiji, informacijskim tehnologijama, proizvodnji i energetici je potrebno kako bi se točno procijenila održivost nekog procesa. Iz tog razloga, razumijevanje energetske i ekološke utjecaja aditivne proizvodnje iz perspektive cijelog životnog ciklusa jako je zahtjevno.

Aditivna proizvodnja, usprkos potencijalu da bude zelena tehnologija, ne može se još uvijek okarakterizirati kao takva zbog visoke potrošnje električne energije kako bi se postigle visoke temperature u procesima [21]. Potrošnja električne energije dominira kao najveći negativni utjecaj na okoliš zbog vremenske zahtjevnosti procesa. Printanje jednog dijela može trajati satima.

Prema slici 2 preuzetoj iz [22] može se vidjeti kako je održivost postala temom znanstvenih istraživanja tek 90 -ih godina, a održivosti u aditivnoj proizvodnji pridalo se više pozornosti tek od 2010. godine. To je uvelike razlog nedostupnosti adekvatnih podataka o ekološkoj prihvatljivosti 3D printera i pogotovo studijama u okviru kojih su provedene LCA analize.



**Slika 2 Vremenska crta teme održivosti u aditivnoj proizvodnji u znanstvenom svijetu [22]**

Svaki podatak je bitan za pouzdanu procjenu i evaluaciju potrošnje energije i ekološkog utjecaja, pogotovo u *LCA* analizi. Tako kompleksan sustav podataka može se efikasno riješiti samo sa kvalitetnim i koordiniranim istraživačkim radom. Podaci i znanje trebali bi se sakupiti i obraditi na sistematičan način. Stručnjaci iz svih područja potrebni su kako bi se stvorila održiva budućnost za aditivnu proizvodnju [22].

U okviru ovog rada promatrani su stolni 3D printeri za osobne korisnike. Cjenovno pristupačni stolni 3D printeri, odnosno osobni 3D printeri, su oni koji spadaju u cjenovni rang do 5000 \$ (cca. 32 000 HRK). Iako je njihova povijest mnogo kraća u usporedbi s industrijskim 3D printerima, ovaj segment tržišta doživio je veliki porast zadnjih godina s godišnjim postotkom rasta od oko 170 % od 2008. godine do danas. Ukupan broj prodanih osobnih printera za nekoliko je redova veličina nadmašio broj industrijskih [23]. Usprkos tome, još uvijek ne postoji dostatan broj istraživanja ekološke prihvatljivosti takvih jeftinijih osobnih 3D printera. Većina dostupnih podataka odnosi se na industrijske uređaje.

Utjecaji aditivne proizvodnje i implikacije na održivost bili bi puno veći kada bi se tehnologija koristila za veće volumene proizvodnje, odnosno u masovnoj proizvodnji [24].

I pozitivni i negativni aspekti aditivne proizvodnje uvelike ovise o parametrima procesa u usporedbi s tradicionalnim procesima proizvodnje, što dodatno otežava generaliziranje podataka [25].

### 3 PREGLED KORIŠTENIH METODE VREDNOVANJA EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI

U ovom poglavlju bit će opisan postupak provođenja svake odabrane metode vrednovanja ekološke prihvatljivosti. Detaljan opis postupka provođenja metode nužan je ne samo za njeno pravilno razumijevanje, već i za prikupljanje i organiziranje resursa i podataka koji će biti potrebni u tijeku analize.

Za analizu ekološke prihvatljivosti koncepata u ovom radu odabrane su četiri metode koje su najbolje odgovarale kriterijima postavljenim u prethodnom poglavlju. Korištene metode su (nabrojane redom kojim su opisane i korištene u nastavku teksta):

- *Eco Design Value* metoda [14] koja se temelji na smjernicama za konstruiranje ekološki prihvatljivih proizvoda,
- *Ekotransformabilnost* metoda [4] koja se temelji na vrednovanju transformacija pretvorbi energije i signala prema hijerarhiji solarne transformabilnosti oblika energije,
- *Eco-QFD + Function Impact Matrix* metoda [5] [11] koja predlaže izradu kuće kvalitete, a za pomoć u razumijevanju procesa razvoja i odabira koncepta koristi funkcijsku dekompoziciju proizvoda,
- *MCDM for Sustainability and Value Assessment* metoda [16] [17] koja kao višekriterijsku metodu odlučivanja koristi CODA (*CO*ncept *D*esign *A*nalysis) matricu i *Knowledge Maturity* koncept za procjenu pouzdanosti podataka.

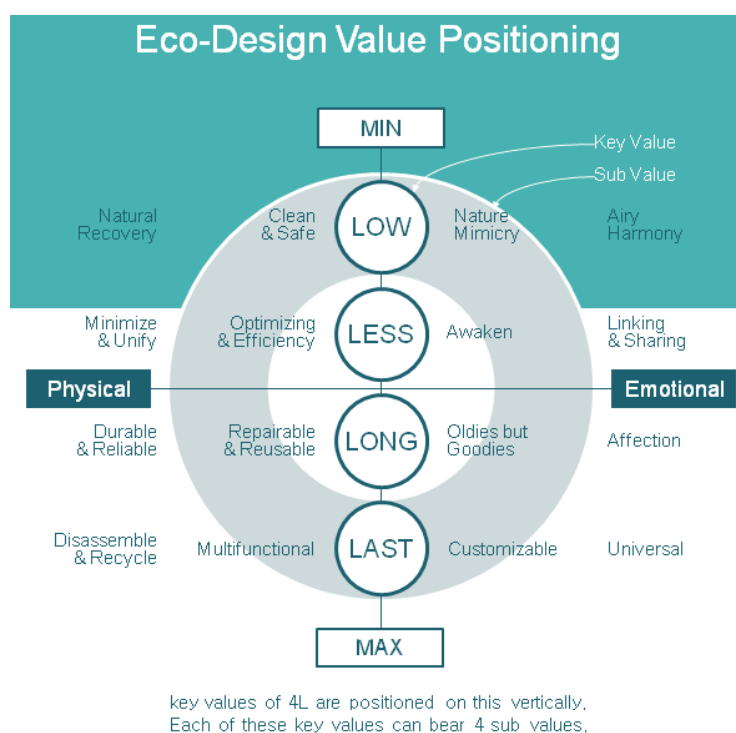
U nastavku poglavlja nalazi se detaljan opis sve četiri metode prema odgovarajućoj literaturi iz koje su preuzete.

#### 3.1 *Eco Design Value* metoda [14]

*Eco Design Value* metoda za cilj ima nadograditi standardni 3R (*reduce, reuse and recycle*) koncept koji, kako mu i samo ime kaže, promovira ekološku osviještenost kroz tri vrijednosti: smanjenje (štetnih utjecaja na okoliš), ponovno korištenje i recikliranje. Autori uvode nove četiri vrijednosti pod akronimom 4L (*low, less, long and last*) koji predstavlja četiri reprezentativna atributa za usmjeravanje prema ekološkoj prihvatljivosti proizvoda:

- LOW - nizak (štetan utjecaj na okoliš)
- LESS - manja (potrošnja resursa)
- LONG - duži (životni vijek proizvoda)
- LAST – trajno (korištenje proizvoda)

Metoda strukturira ključne vrijednosti i njihove podvrijednosti prema modelu ilustriranom na slici 3. Četiri ključne vrijednosti su smještene na vertikalnoj osi ovisno o tome treba li ih minimizirati ili maksimizirati. Horizontalna os dijeli ih na podvrijednosti koje se kategoriziraju prema tome jesu li materijalne ili nematerijalne.



**Slika 3 Struktura vrijednosti Eco Design Value metode [14]**

U poglavljima 3.1.1, 3.1.2, 3.1.3, 3.1.4. nalaze se smjernice razvrstane prema ključnim vrijednostima.

### 3.1.1 LOW – Što manji štetan utjecaj okoliš

Ovaj aspekt podrazumijeva da je proizvod u suštini čist i s minimalnim negativnim utjecajem na prirodu i ljude te se njime postižu ravnoteža i mir i u materijalnom i u nematerijalnom pogledu. Pod njega pripadaju sljedeće smjernice:

1. Koncept je čist i siguran:
  - a. Koncept omogućuje korisniku čist i zdrav okoliš, tj. okruženje u kojem boravi.
  - b. Koncept neznatno zagađuje okoliš tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda (proizvodnja, upotreba, odlaganje).
  - c. U konceptu se koristi sirovi materijal koji je ekološki prihvatljiv.
  - d. U konceptu su smanjene dodatne završne obrade te se one izvode na čist i netoksičan način.
2. Konceptom se podržava obnavljanje prirodnih resursa nakon upotrebe i eksploatacije:
  - a. Koncept koristi energiju koja je dobivena iz prirodnih cikličkih procesa.
  - b. Koncept sam po sebi djeluje pozitivno na okoliš (slično kao princip biodegradacije).
  - c. U konceptu se koriste biorazgradivi materijali i maksimiziraju njihove pozitivne osobine.
3. Koncept se koristi s lakoćom:
  - a. Koncept je važan u svakodnevnom životu te se i svakodnevno koristi.
  - b. Koncept je jednostavan za korištenje.
  - c. Forma i ideja koncepta su „prirodne“.
4. Koncept oponaša rješenja iz prirode:
  - a. Koncept utjelovljuje princip cirkulirajućeg eko sustava.
  - b. Koncept ostvaruje formu s minimalnim brojem umjetnih elemenata i nepotrebnih ukrasa.
  - c. Koncept unosi „duh prirode“ u svakodnevni život.

### **3.1.2 LESS – Što manja potrošnja resursa**

Glavna vrijednost ovog aspekta je smanjenje potrošnje prirodnih resursa u svim fazama životnog ciklusa razmatranog koncepta. Cilj je natjerati proizvođača, a kasnije korisnike da u fazi korištenja prakticiraju ekološki prihvatljive radnje kojima će se to postići.

1. Konceptom se podržava smanjivanje ili ujednačavanje potrošnje resursa:
  - a. Koncept ima što manje dijelova, tj. jedan dio obavlja više funkcija.



- b. Konceptom se vodi računa o uštedi energije i resursa tijekom proizvodnje, korištenja i odlaganja.
  - c. U konceptu je minimizirana količina potrebnog materijala u samom proizvodu i u njegovom pakiranju.
2. Konceptom se podržava efikasnost i optimizacija potrošnje resursa:
    - a. Efikasnost je poboljšana kroz ekološke metode i tehnologije.
    - b. Povećava se efikasnost proizvoda kroz nove dodatne dijelove i funkcije.
    - c. Optimizirane su glavne fizičke karakteristike (masa i volumen).
  3. Konceptom se podiže svijest o ekološkim aspektima upotrebe proizvoda:
    - a. Koncept ukazuje na informacije o ekološki prihvatljivom ponašanju i negativnom utjecaju na okoliš.
    - b. Koncept ima vizualne elemente i informacije koje bude ekološku svijest u korisniku.
  4. Konceptom se podržava zajedničko korištenje proizvodom od strane više korisnika:
    - a. Koncept sadrži kanal za komunikaciju korisnika i prikuplja njihove povratne informacije kako bi ga se moglo poboljšati.
    - b. Koncept ima takvu formu da omogućuje više korisnika da dijele proizvod.

### 3.1.3 LONG – Što dulji životni vijek proizvoda

Ovaj aspekt govori da je bitno omogućiti da se proizvod koristi dulje vrijeme te se tako smanji količina otpada u fazi proizvodnje samog proizvoda (manje će ih se proizvoditi) te na kraju životnog ciklusa kada se proizvod odlaže.

1. Koncept je osmišljen tako da ima dulji životni vijek i veću pouzdanost pri radu:
  - a. Koncept je izrađen tako da se može dugo koristiti korištenjem čvrstih i pouzdanih materijala i tehnologija.
  - b. Koncept je izrađen od kvalitetnih materijala, a struktura i izdržljivost su mu takve da se minimiziraju trošenje i deformacije.
  - c. Koncept odaje dojam korisniku da je izdržljiv i pouzdan.
2. Koncept ima mogućnost popravka i veću obnovljivost proizvoda za dulji životni vijek:
  - a. Moguća je laka izmjena dijelova i nadogradnja kada proizvod zastari ili bude neupotrebljiv.

- b. Omogućeno je jednostavno i pristupačno čišćenje.
  - c. Koncept je jednostavan za sastavljanje i rastavljanje te laku nadogradnju i popravak.
3. Koncept podržava ideju privrženosti korisnika proizvodu:
    - a. Koncept ima zanimljive funkcije koje će zainteresirati korisnika i ugodan je za korištenje.
    - b. Koncept omogućava korisniku izražavanje vlastitog ukusa, stvaranje iskustava i privrženosti te personaliziranje uređaja.
    - c. Koncept budi u korisniku afekciju te želju za zaštitom uređaja.
  4. Konceptom se implementiraju poznata (tradicionalna) rješenja koja su još uvijek dobra:
    - a. Koncept koristi već poznata konstrukcijska rješenja koja su dobra sama po sebi.
    - b. Koncept sazrijeva s vremenom te zadržava vrijednost bez obzira na mijenjajuće trendove.

### **3.1.4 LAST – Što češće korištenje proizvoda**

Ova vrijednost nalaže da se treba koristiti proizvod što više i češće, odnosno izvući njegov maksimalni predviđeni potencijal u svim fazama životnog vijeka.

1. Koncept podržava rastavljljivost i reciklabilnost:
  - a. Komponente se mogu reciklirati ili ponovno koristiti u drugim proizvodima.
  - b. U konceptu se koriste reciklirani materijali ili već korištene komponente ako to ne narušava kvalitetu.
  - c. Koncept je lako rastavljljiv do razine recikliranja.
  - d. U konceptu je lagano prepoznati materijale komponenti u svrhu pravilnog odlaganja i recikliranja.
2. Koncept podržava multifunkcionalnost:
  - a. Koncept se može koristiti na druge načine nakon što završi svoj životni vijek sa primarnom funkcijom.
  - b. Određene komponente omogućuju multifunkcionalnost.
  - c. Koncept ima funkcije koje se mogu koristiti u više svrha.
3. Korisnik može prilagoditi proizvod svojim potrebama tijekom faze korištenja:

- a. Korisnik može prilagoditi proizvod zbog različitih zahtjeva tijekom životnog vijeka.
  - b. Moguće je nadograditi struktura proizvoda.
4. Konceptom se podržava ideja univerzalnosti implementiranih rješenja:
- a. Koncept ima vrijednost za cijelu zajednicu u kojoj se koristi.
  - b. Koncept je fleksibilan u upotrebi kako bi zadovoljio korisnikove raznovrsne zahtjeve.
  - c. Koncept je takav da ga svi mogu jednostavno razumjeti i koristiti.

### 3.1.5 Rangiranje koncepata

Ocjenjivanje koncepata provodi se prema skali prikazanoj u Tablica 2. U članku [14] iz kojeg je preuzeta ova metoda, nije predviđeno da metoda služi rangiranju koncepata, već samo kao smjernice u razvoju proizvoda stoga je skala definirana proizvoljno. Osmišljena je tako da bude jednostavna (analogno i samoj metodi), ali i da što vjernije prikazuje sve aspekte rezultata.

**Tablica 2** Skala za potrebe rangiranje koncepata u *Eco Design Value* metodi [14]

| Ocjena | Objašnjenje   |
|--------|---|
| 2      | Jako pozitivna korelacija.<br>Smjernica je u potpunosti istinita za promatrani koncept.   |
| 1      | Pozitivna korelacija.<br>Smjernica je uglavnom istinita za promatrani koncept.  |
| 0      | Neutralna korelacija.<br>Smjernica nije istinita niti neistinita za promatrani koncept.<br>Nema dovoljno podataka na temelju kojih bi se donijela odluka. |
| -1     | Negativna korelacija.<br>Smjernica je uglavnom neistinita za promatrani koncept.  |
| -2     | Jako negativna korelacija.<br>Smjernica je u potpunosti neistinita za promatrani koncept.   |

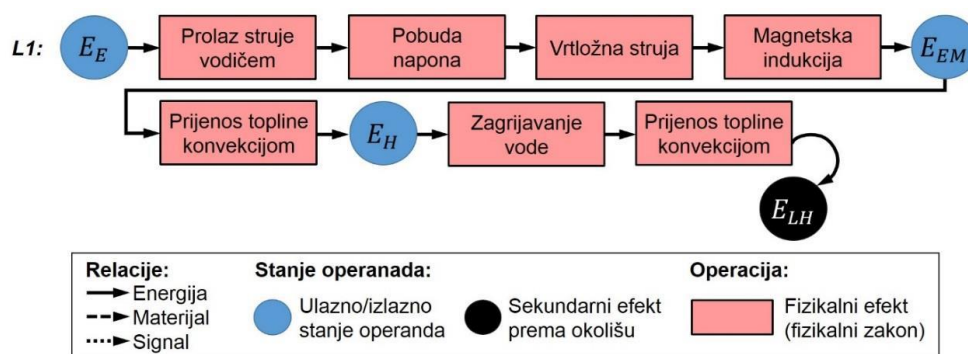
Za svaku smjernicu valja odlučiti kako ju promatrani koncept zadovoljava ili ne zadovoljava te na temelju toga dodijeliti ocjenu. Konačan rezultat ekološke prihvatljivosti nekog koncepta je suma svih ocjena koje su mu dodijeljene po smjernicama.

### 3.2 Ekotransformabilnost metoda [4]

Ekotransformabilnost je metoda temeljena na transformacijama energije, signala i materijala unutar promatranog tehničkog sustava. Metoda se provodi kroz šest koraka:

1. Zapisati transformacije energije, signala i materijala u obliku lanca efekata za svaki koncept pomoću funkcijske strukture, modeliranja toka funkcija ili sličnih metoda.

Primjer lanca fizikalnih efekata je na slici 4.



Slika 4 Primjer lanaca efekata za perilicu rublja [4]

2. Izraditi matricu kriterija i koncepata. Definirano je ukupno pet kriterija ekološke prihvatljivosti.
3. Izračunati dobrotu svakog koncepta prema definiranim kriterijima.
4. Rangirati koncepte prema pravilu sume rangova. Ukupni rang dobrote koncepta jest zbroj njegovih pojedinačnih rangova.
5. Analizirati rezultate vrednovanja i provjeriti konzistentnost provođenja prethodnih koraka.
6. Donijeti odluku o najboljem konceptu na temelju rezultata rangiranja.

U okviru ove metode predloženi su sljedeći kriteriji ekološke prihvatljivosti:

- Efektivnost pretvorbi energije i signala u promatranom sustavu,
- Broj pretvorbi energije i signala u promatranom sustavu,
- Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš,
- Broj sekundarnih efekata na okoliš,

- Broj promjena agregatnog stanja materijala u promatranom sustavu.

U narednim poglavljima svaki kriterij detaljnije je objašnjen.

### 3.2.1 Efektivnost pretvorbi energije i signala

Metoda se temelji na procjeni eksergije i energije sustava koje opisuju energiju koju sustav razmjenjuje s okolišem na način da je moguće kvalitativno opisati taj odnos. Za potrebe definiranja kriterija ekološke prihvatljivosti koji bi se odnosio na vrednovanje ekološke prihvatljivosti pretvorbi energije iz jednog oblika u drugi, primijenjeni su faktori pretvorbe oblika energije u jedinice solarne energije. Faktor pretvorbe oblika energije jest količina solarne energije potrebne da zamijeni 1 džul korisne energije drugog oblika energije. Prema Odumovoj hijerarhiji oblika energije [26], pretvorbe oblika energije koje su niže kvalitete u oblike energije više kvalitete, ekološki su prihvatljivije pretvorbe. Na temelju faktora solarne transformabilnosti ulaznog i izlaznog oblika energije ( $f_{TR_O}$  i  $f_{TR_I}$ ), izračunava se ekoeftivnost pretvorbe ( $\epsilon_{TR}$ ):

$$\epsilon_{TR} = \frac{f_{TR_O}}{f_{TR_I}} \quad (1)$$

Tablice 4.5. i 4.6. u [4] sadržavaju podatke o kombinacijama ulazno-izlaznih koeficijenata oblika energije koje su preuzete u ovom radu.

Parcijalne solarne ekoeftivnosti sumiraju se i dobiva se ukupan zbroj:

$$S_{\epsilon_{TR_k}}(A_i) = \sum_{j=0}^{j=k} \epsilon_{TR_k}(A_i) \quad (2)$$

gdje  $k$  ukupan broj pretvorbi oblika energije koncepata  $A_i$ .

### 3.2.2 Broj pretvorbi energije i signala

Kriterij broja pretvorbi energije i signala odabran je kao kriterij vrednovanja ekološke prihvatljivosti jer upućuje na razinu kompleksnosti koncepta. Što je veći broj komponenti nekog proizvoda, to je i za pretpostaviti da će isti imati više pretvorbi, a time i veći utjecaj na okoliš.

### 3.2.3 Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata

Kriterij ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata temeljen je na strategiji gospodarenja otpadom. Sekundarni efekti na okoliš mogu se identificirati kod svake transformacije energije,

materijala ili signala te je za njihovo vrednovanje ekološke prihvatljivosti potrebno voditi se prvim zakonom termodinamike. Sekundarni efekti na okoliš jesu gubitci u okolišu koji nastaju zbog transformacija energije, materijala i signala. Sekundarni efekti određuju se iz lanaca efekata te vrednuju prema tablici 3.

**Tablica 3 Skala za rangiranje sekundarnih efekata na okoliš**

| Ocjene | Objašnjenje  |
|--------|--|
| +10    | Nema otpada/emisija  |
| +9     | Značajno malo otpada/ emisija (mali utjecaj na okoliš)                                     |
| +8     | Biorazgradiv i biokompatibilan obnovljivi resurs   |
| +7     | Ponovna uporaba otpada/emisija (ili ostvarivo uz manje izmjene)                            |
| +6     | Reciklabilan   |
| +5     | -  |
| +4     | Recikliranje (energije ili materijala) ostvarivo uz manje izmjene                          |
| +3     | Srednja biokompatibilnost i mogućnost kompostiranja otpada/emisija                         |
| +2     | Moguće rabiti kao biogorivo  |
| +1     | Oporaba (energije ili materijala) ostvariva uz manje izmjene                               |
| 0      | -  |
| -1     | Oporaba bez povrata energije   |
| -2     | Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti                  |
| -3     | Direktno odlaganje/ispuštanje otpada/emisija niske toksičnosti                             |
| -4     | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (znatan doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš) |
| -5     | -  |
| -6     | Indirektno odlaganje/ispuštanje inertnog otpada/emisija srednje toksičnosti                |
| -7     | Direktno odlaganje/ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti                           |
| -8     | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija (znatan doprinos više kategoriji utjecaja na okoliš)   |
| -9     | Odlaganje/ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti                                     |
| -10    | Direktno odlaganje/ispuštanje opasnog (visokotoksičnog/radioaktivnog) otpada/emisija       |

### 3.2.4 Broj sekundarnih efekata na okoliš

Kriterij broja sekundarnih efekata na okoliš uključen je kako bi se uzelo u obzir da koncept prema skali iz tablice 3 može biti visoko rangiran, ali ako je riječ o velikom broju tih efekata, ekološki je manje prihvatljiv.

### 3.2.5 Broj promjena agregatnog stanja materijala

Kriterij broja promjena agregatnog stanja opisuje utjecaje na okoliš zbog komponenti koje ostvaruju funkciju promjenu agregatnog stanja nekog ulaznog materijala. Takve komponente i funkcija koje one obavljaju zahtijevaju više energije, materijala i resursa za oblikovanje i rad.

### 3.2.6 Konačno rangiranje koncepata

Nakon što su određene dobrote koncepata prema svakom od pet predložnih kriterija ekološke prihvatljivosti, treba ih zapisati u matricu odlučivanja. Metodom sume rangova konceptima se dodjeljuje rang, prvo prema svakom kriteriju zasebno, a onda sumom rangova ukupni rang.

## 3.3 *Eco-QFD* + *Function Impact Matrix* metoda [5][11]

Cilj ove metode je promicanje korištenja vizualnih alata, poput *Function Impact Matrix* i kuće kvalitete, u ranim fazama razvoja uzimajući u obzir ekološku prihvatljivost.

Važno je odrediti povezanost između funkcija proizvoda i njegovih utjecaja na okoliš, a metoda predlaže provođenje analize životnog ciklusa LCA (*Life Cycle Assessment*) na sličnim proizvodima na tržištu.

Za  $i$ -ti proizvod, njegov utjecaj na okoliš u kategoriji  $j$  može se opisati sljedećom jednačinom:

$$E_{i,j} = \sum_k \left( M_{i,j,k} + \sum_m P_{i,j,k,m} \right) + U_{i,j} \quad (3)$$

Gdje je  $M_{i,j,k}$  ekološki utjecaj kategorije  $j$  povezan s komponentom  $k$  uslijed materijala,  $P_{i,j,k,m}$  ekološki utjecaj kategorije  $j$  povezan s komponentom  $k$  uslijed  $m$ -tog koraka u procesu proizvodnje, a  $U_{i,j}$  ekološki utjecaj kategorije  $j$  povezan s komponentom  $k$  u procesu korištenja proizvoda.

Podjela proizvoda na komponente i povezivanje komponenti sa funkcijama koje obavljaju glavni je korak prema dobivanju *Function Impact Matrix*. Uglavnom je slučaj da jedna komponenta sudjeluje u obavljanju više funkcija pa se to iskazuje postotkom:

$$FC = [\alpha_{k,n}] \tag{4}$$

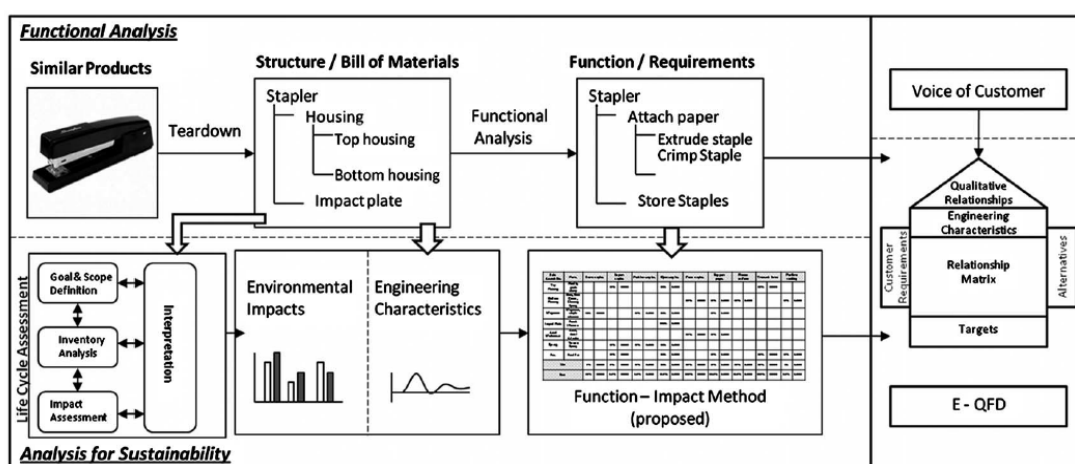
Gdje je  $\alpha_{k,n}$  postotak kojim komponenta  $k$  doprinosi u izvođenju funkcije  $n$ . Na taj način moguće je rangirati funkcije prema njihovom utjecaju na okoliš i utvrditi kritične komponente koje bi trebalo poboljšati iz aspekta ekološke prihvatljivosti.

*Function Impact Matrix (FIM)* koristi podatke iz funkcijske strukture proizvoda da bi se utjecaji na okoliš distribuirali po funkcijama. Glavni cilj *FIM* matrice je identificirati važnost svake funkcije i odrediti na kojim funkcijama bi se trebalo poraditi. Koristeći jednačbe (3) i (4) dobiva se glavna jednačba matrice:

$$FI = [\beta_{i,j,n}] = \left[ \left\{ \sum_k \left( M_{i,j,k} + \sum_m P_{i,j,k,m} \right) \cdot \alpha_{k,n} \right\} + U_{i,j} \cdot \gamma_n \right] \tag{5}$$

Gdje je  $\beta_{i,j,n}$  utjecaj na okoliš kategorije  $j$  uslijed funkcije  $n$  za proizvod  $i$ , a  $\gamma_n$  postotak kojim funkcija  $n$  doprinosi u ukupnoj funkcionalnosti proizvoda.

Kao što se vidi iz slike 5, iz *LCA* podataka i funkcijske analize cilj je napraviti *FIM* matricu, a zatim kuću kvalitete. Ukoliko nije moguće doći do *LCA* podataka o proizvodu, moguće je iskoristiti alternativne podatke za provedbu metode.

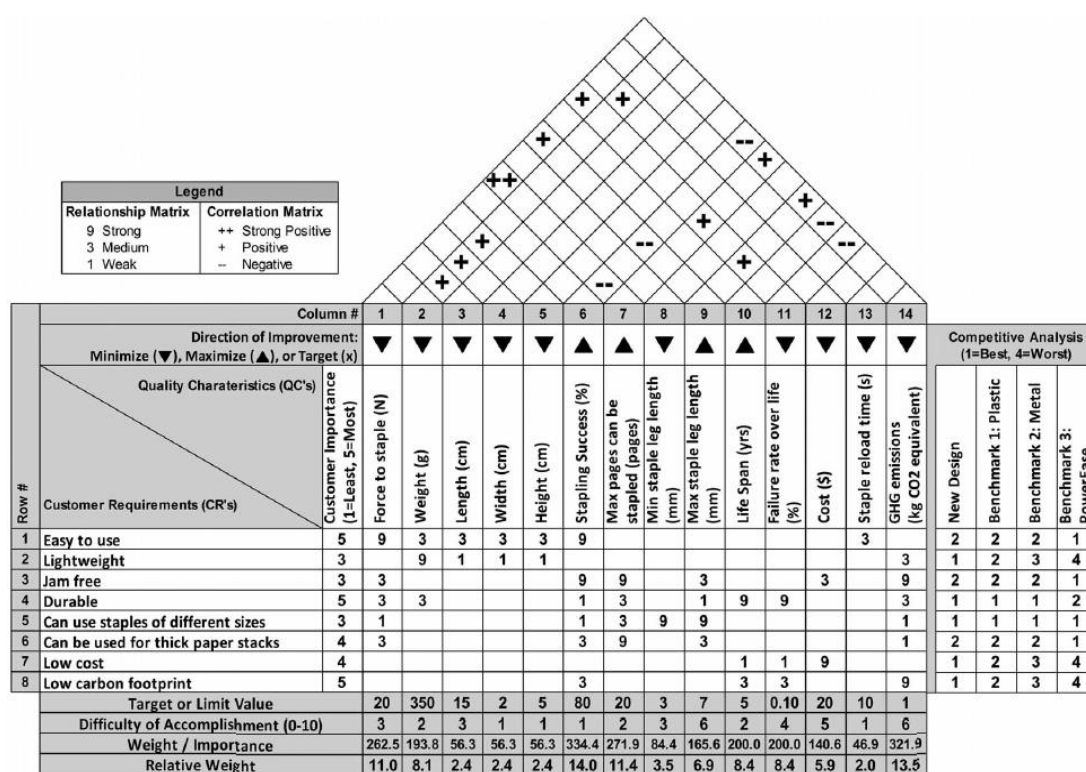


Slika 5 Postupak *Eco-QFD + FIM* metode [5]



U radu je prikazan postupak provođenja metode na primjeru klamerice koja je rastavljena na komponente i funkcije, a za kriterij ekološke prihvatljivosti uzet je ugljični otisak (engl. *Carbon footprint*) koji je onda distribuiran po funkcijama u postotku.

Uzimajući sva ta saznanja u obzir, valja izraditi kuću kvalitete koja će osim korisničkih zahtjeva (engl. *Voice of customer*) imati i zahtjeve okoliša (engl. *Voice of environment*). Na slici 6 je prikazana kuća kvalitete iz ovog rada kao primjer. Može se vidjeti korisnički zahtjev za smanjenjem ugljičnog otiska (engl. *Low carbon footprint*) koji je proizašao iz *FIM* matrice te mu je dodijeljena najviša moguća važnost.



Slika 6 Kuća kvalitete na primjeru klamerice [5]

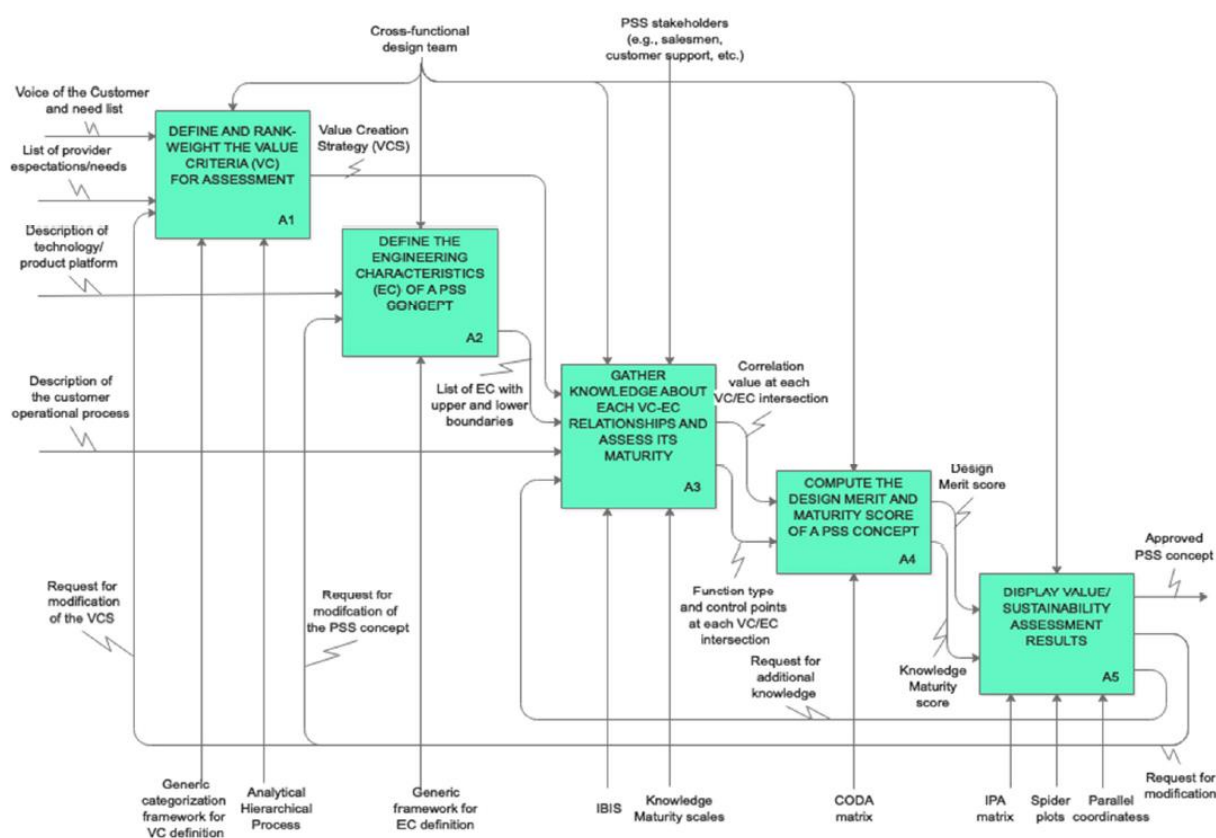
### 3.4 MCDM for Sustainability and Value Assessment metoda [16][17]

Metoda je namijenjena *product/service* sustavima (*PSS*) te opisuje kako uvrstiti kriterij održivosti među ostale kriterije koji se inače razmatraju u metodama za evaluaciju koncepata (kvaliteta, vrijeme, cijena, performanse). Pošto je razvijena u svrhu razvoja *PSS*-a, sadrži kriterije poput servisiranja, fleksibilnosti, mogućnosti nadogradnje, reciklabilnosti, itd.

Sastoji se od pet iterativnih koraka od kojih je najvažniji upravo primjena odabrane MDM (Multi-Criteria Decision Making) metode. Inače popularne MDM metode su: AHP (*Analytical Hierarchical Process*), ANP (*Analytical Network Process*), QFD (*Quality Function Deployment*), TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*).

Tri "aspekta vrijednosti" koja pokreću evaluaciju u ranim fazama razvoja su: potrošačka (želje i potrebe kupca), proizvođačka (strateški ciljevi proizvođača), vrijednosti ostalih nositelja interesa (dionici, dobavljači, vladine organizacije).

Postupak metode prikazan je na slici 7.



Slika 7 Koraci MCDM for Sustainability and Value Assessment metode [16]

### 3.4.1 A1: Odrediti kriterije vrednovanja i njihove težinske faktore

Na početku treba prikupiti kriterije vrednovanja i interna očekivanja od proizvoda koji se razvija (engl. *value criteria (VC)*). Predloženo je da se kriteriji grupiraju po sličnosti. Metoda dodjeljivanje težinskih faktora dana je timu na izbor. Moguće je koristiti *analytical-hierarchical process (AHP)* ili binarnu metodu [17].

U ovom radu koristi se binarna metoda težinskih faktora. Ako postoji  $M$  različitih kriterija vrednovanja, matrica binarnih težinskih faktora  $\mathbf{W}$ , veličine  $M \times M$ , koristi se za modeliranje odnosa svakog kriterija vrednovanja u odnosu na ostale. Matrica binarnih težinskih faktora  $\mathbf{W}$  je po definiciji gornje trokutasta kvadratna matrica i prikazuje da ako je neki kriterij vrednovanja u jednom redu važniji od kriterija vrednovanja u odgovarajućem stupcu, dodjeljuje mu se numerička vrijednost 1. Slično, kada je kriterij vrednovanja u redu manje važan od kriterija vrednovanja u odgovarajućem stupcu, dodjeljuje mu se numerička vrijednost 0. Takav pristup omogućava uspoređivanje kriterija vrednovanja u parovima. Potrebno je  $M \times (M-1)/2$  odluka koje se moraju donijeti. Na slici 8 je primjer matrice binarnih težinskih faktora iz zrakoplovne industrije.

|                                 | Easy to extend operational life | Green aircraft | Easy to operate | Cheap to maintain and repair | Lowest consumption per PAX-km | No A/C on ground | Unlimited use of Internet | Extremely comfortable | Sufficient range | X Scores | Y Scores | Total score | Biased score | Normalised score |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------|-----------------------|------------------|----------|----------|-------------|--------------|------------------|
| Easy to extend operational life |                                 | 0              | 1               | 1                            | 0                             | 1                | 1                         | 1                     | 0                | 5        | 0        | 5           | 6            | 13%              |
| Green aircraft                  |                                 |                | 0               | 1                            | 1                             | 1                | 1                         | 1                     | 0                | 5        | 1        | 6           | 7            | 16%              |
| Easy to operate                 |                                 |                |                 | 1                            | 1                             | 0                | 1                         | 1                     | 0                | 4        | 1        | 5           | 6            | 13%              |
| Cheap to maintain and repair    |                                 |                |                 |                              | 1                             | 0                | 0                         | 0                     | 0                | 1        | 0        | 1           | 2            | 4%               |
| Lowest consumption per PAX-km   |                                 |                |                 |                              |                               | 1                | 1                         | 1                     | 1                | 4        | 1        | 5           | 6            | 13%              |
| No A/C on ground                |                                 |                |                 |                              |                               |                  | 1                         | 0                     | 0                | 1        | 2        | 3           | 4            | 9%               |
| Unlimited use of Internet       |                                 |                |                 |                              |                               |                  |                           | 1                     | 0                | 1        | 1        | 2           | 3            | 7%               |
| Extremely comfortable           |                                 |                |                 |                              |                               |                  |                           |                       | 1                | 1        | 2        | 3           | 4            | 9%               |
| Sufficient range                |                                 |                |                 |                              |                               |                  |                           |                       |                  | 0        | 6        | 6           | 7            | 16%              |
|                                 | 0                               | 1              | 1               | 0                            | 1                             | 2                | 1                         | 2                     | 6                |          |          |             | 45           | 100%             |

Slika 8 Primjer matrice binarnih težinskih faktora [17]

Kada se provedu sve usporedbe i dodijele vrijednosti 0 i 1, računaju se ukupni normalizirani težinski faktori prema sljedećoj jednadžbi:

$$N_i = \frac{X_i + Y_i + 1}{\sum_{i=1}^M (X_i + Y_i + 1)} \tag{6}$$

gdje  $X_i$  predstavlja ukupan broj jedinica za svaki red kriterija vrednovanja i računa se prema:

$$X_i = \sum_{j=i+1}^M W_{ij} \text{ za } i = 1..(M - 1) \text{ i } X_M \equiv 0 \tag{7}$$

A slično kao i  $X_i$ , vrijednost  $Y_i$  koja predstavlja ukupan broj nula za svaki stupac kriterija vrednovanja računa se prema jednadžbi:

$$Y_i = \sum_{j=1}^{i-1} (1 - W_{ij}) \text{ za } i = 2 \dots M \text{ i } Y_1 \equiv 0 \quad (8)$$

*Biased score* računa se kao  $X_i + Y_i + 1$  i onda se normalizira kako bi se dobio normalizirani težinski faktor. Tako izračunati težinski faktori koriste se kasnije u CODA matrici.

### 3.4.2 A2: Definiranje inženjerskih karakteristika koncepata

Inženjerske karakteristike (engl. *Engineering characteristics (EC)*) bi trebale biti atributi koji opisuju proizvod na mjerljiv način i direktno utječu na korisnikovu percepciju proizvoda. Moraju biti iskazane pomoću numeričke vrijednosti i mjerne jedinice. U inženjerske karakteristike pripadaju podaci o geometriji, materijalu, procesima u proizvodnji, itd.

Ovaj i prethodni korak analogni su koracima u *Eco-QFD + Function Impact Matrix* metodi [5] [11] u procesu izrade kuće kvalitete. Kriteriji vrednovanja tamo su podijeljeni na zahtjeve korisnika (engl. *Voice of customer*) i zahtjeve okoliša (engl. *Voice of environment*), a inženjerske karakteristike tamo se nazivaju karakteristike kvalitete *quality characteristics (QC)* što se može vidjeti iz slike 6.

### 3.4.3 A3: Ostvariti veze između kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika

Metoda predlaže da se u svrhu što boljeg razumijevanja veza između kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika, koriste IBIS (*Issue-Based Information System*) zapisi. IBIS zapisi prikazuju probleme u obliku pitanja na koja su onda dani alternativni odgovori i za svaki od tih odgovora dodani argumenti za i protiv. Svako sjecište u MDM matrici odgovara jednom IBIS zapisu.

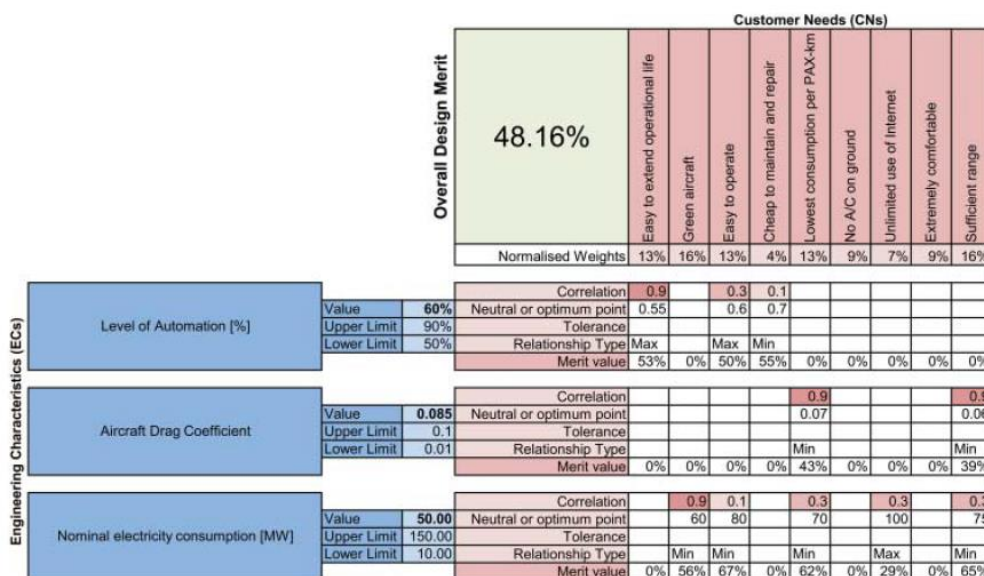
### 3.4.4 A4: Generiranje MCDM matrice

Predložena MDM metoda ovdje je CODA (*COncpet Design Analysis*) [45] koja se temelji na QFD matrici, ali sadrži nelinearne funkcije za razliku od linearnih numeričkih veza u QFD-u. Primjer CODA matrice prikazan je na slici 9.

CODA matrica u stupcima ima kriterije vrednovanja iz A1 koraka a u recima inženjerske karakteristike iz A2 koraka. Uz svaki kriterij vrednovanja (na slici *Customer Needs*) treba biti

pridružen normalizirani težinski faktor izračunat u koraku A1. Inženjerske karakteristike moraju imati vrijednost koja ima gornju i donju granicu te mjernu jedinicu (s iznimkom fizikalnih veličina bez mjernih jedinica i vrijednosti izraženih postotkom).

Veze (*Correlations*) se definiraju tako da im se dodijeli faktor 0.9 (snažna korelacija), 0.3 (srednja korelacija), 0.1 (slaba korelacija) ili nikakva korelacija. Svaka odluka naravno proizlazi iz odgovarajućeg IBIS zapisa. Ako postoji inženjerska karakteristika za koju se utvrdi da nema utjecaj na nijedan kriterij vrednovanja, može se isključiti iz razmatranja.



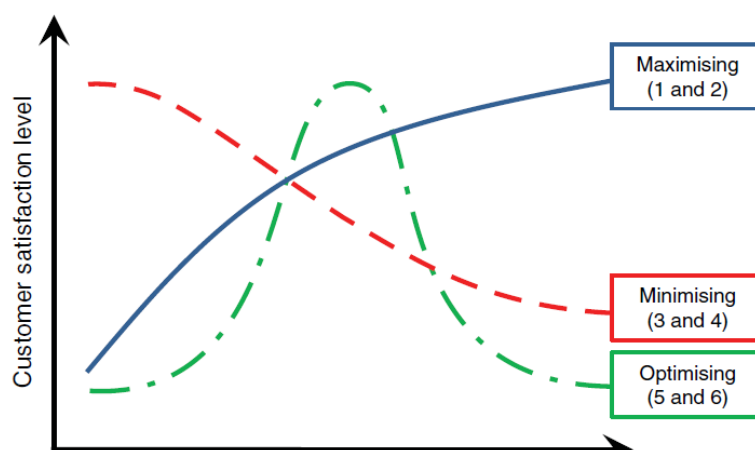
Slika 9 Primjer CODA matrice [17]

Zatim treba odrediti neutralnu vrijednost (*Neutral or optimum point*) za koju se pretpostavlja da kada je jednaka stvarnoj vrijednosti inženjerske karakteristike, zadovoljstvo korisnika iznosi 50%.

Također valja odabrati vrstu veze. CODA matrica koristi 3 različite funkcije za opisivanje veze između kriterija vrijednosti i inženjerskih karakteristika koje su prikazane na slici 10:

- Maksimizirajuća funkcija
- Minimizirajuća funkcija
- Optimizirajuća funkcija

Sa slike 10 može se vidjeti kako se zadovoljstvo korisnika mijenja ovisno o vrijednosti inženjerske karakteristike za svaki od tri tipa veze.



**Slika 10** Moguće vrste veza između kriterija vrijednosti i inženjerskih karakteristika u CODA matrici [17]

Maksimizirajuća funkcija opisuje prirodu povećanja zadovoljstva korisnika kada se vrijednost promatrane inženjerske karakteristike povećava te opisuje sljedećom jednadžbom:

$$f_{\text{Max}}(\rho) = 1 - \frac{1}{2^{\rho/\eta}} \quad (9)$$

gdje je  $\rho$  ostvarena vrijednost promatrane inženjerske karakteristike, a  $\eta$  njena neutralna vrijednost. Prema tome, kada je ostvarena vrijednost jednaka neutralnoj, funkcija ima vrijednost 0,5; odnosno zadovoljstvo korisnika je 50%. Čim stvarna vrijednost premaši neutralnu, zadovoljstvo korisnika se povećava.

Na sličan način minimizirajuća funkcija opisuje prirodu smanjenja zadovoljstva korisnika sljedećom jednadžbom:

$$f_{\text{Min}}(\rho) = 1 - \frac{1}{2^{\rho/\eta}} \quad (10)$$

Tako vrijedi kada je ostvarena vrijednost jednaka optimalnoj, funkcija ima vrijednost 0,5; odnosno zadovoljstvo korisnika je 50%. Suprotno maksimizirajućoj funkciji, kada stvarna vrijednost premaši neutralnu, zadovoljstvo korisnika se smanjuje.

Naposlijetku, optimizirajuća funkcija opisuje slučajeve kada je prikladno koristiti egzaktnu vrijednost iz raspona neke inženjerske karakteristike i opisana je jednadžbom:

$$f_{\text{Opt}}(\rho) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\rho - \eta}{\tau}\right)^2} \quad (11)$$

gdje  $\tau$  označava toleranciju vrijednosti. Kada je stvarna vrijednost jednaka neutralnoj ( $\rho = \eta$ ), funkcija postiže vrijednost 1:

$$f_{\text{opt}}(\rho) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\eta - \eta}{\tau}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{0}{\tau}\right)^2} = 1 \quad (12)$$

Kada je stvarna vrijednost promatrane tehničke specifikacije jednaka vrijednosti s tolerancijom ( $\rho = \eta \pm \tau$ ), prema jednadžbi (12) zadovoljstvo korisnika je 0,5:

$$f_{\text{opt}}(\rho) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\eta \pm \tau - \eta}{\tau}\right)^2} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\pm \tau}{\tau}\right)^2} = 0,5 \quad (13)$$

Ako postoji  $N$  inženjerskih karakteristika (EC) i  $M$  kriterija vrednovanja (CN), individualna zadovoljstva korisnika za svaki kriterij vrednovanja ( $CS_i$ ) računaju se prema formuli:

$$CS_i = \frac{N_i}{SCF_i} \sum_{j=1}^N MV_{ij} \cdot CF_{ij} \quad (14)$$

Gdje je  $MV_{ij} = F_{ij}(\rho)$  funkcija vrijednosti svake tehničke specifikacije,  $CF_{ij}$  je matrica korelacija između kriterija vrijednosti i inženjerskih karakteristika (numeričke vrijednosti 0,1, 0,3 i 0,9 koriste se za opisivanje slabe, srednje i jake veze), a  $SCF_i$  je suma svih korelacijskih faktora za svaki kriterij vrijednosti.

Ukupna ocjena koncepta ( $ODM$ ) je suma svih individualnih zadovoljstava korisnika za svaki kriterij vrednovanja ( $CS_i$ ):

$$ODM = \sum_{i=1}^M CS_i \quad (15)$$

Kada je CODA matrica gotova, veze između inženjerskih karakteristika i kriterija vrednovanja definirane, model postaje skalarna funkcija  $N$  inženjerskih karakteristika i  $ODM$  vrijednosti. Taj  $N$ -dimenzionalan podatak jednostavno se može koristiti kao skalarna mjera u procjeni zadovoljstva promatranim konceptom.  $ODM$  se kao takav može koristiti u proučavanju optimizacije konstrukcije i u analizama osjetljivosti.

Studije su pokazale kako bi rezultati MCDM matrice trebali biti nadopunjeni vrijednostima koje bi ukazivale na to koliko inženjeri mogu imati pouzdanja u podatke koji ulaze u proces odabira najboljeg koncepta. U ovom radu u tu svrhu koristi se koncept *Knowledge Maturity*-a u formi prema [27]. *KM (Knowledge Maturity)* vrijednost dobiva se koristeći skalu narativne naravi (kvalitativne) preko tri dimenzije: ulazni podaci (*input*), metoda/alat i iskustvo/stručnost na skali od 1 do 5.

Takvo vrednovanje provodi se za svaki za i protiv argument u IBIS zapisu. Argumenti mogu  
*Fakultet strojarstva i brodogradnje*

sadržavati matematičke formule ili eksperimentalne podatke (visok KM) ili mogu biti rezultat pretpostavke na temelju iskustva, tzv. *educated guess* (nizak KM). Izračunavajući KM rezultate, konstrukcijski tim možese usmjeriti na prikupljanje više podataka o specifičnim aspektima koncepata za koje utvrde da nisu dovoljno pouzdani, a znatno utječu na krajnji rezultat. Podaci koji su nepouzđani, a ne utječu znatno na krajnji rezultat, ne moraju se dodatno istraživati ako za to ne postoje osigurani resursi.

Skala za ocjenjivanje kvalitete podataka, metoda i iskustva prikazana je u tablici 4. Za ocjene 2 i 4 (nepouzđano i dobro) nisu navedena objašnjenja jer se smatra da se ocjenjivač za njih odlučuje kada ne mođ pripisati niđu ni višu ocjenu, već smatra da je rezultat negdje između njih, a ne mođe ga točno opisati.

**Tablica 4 Skala za izračunavanje KM vrijednosti [27]**

| Ocjena |              | Ulazni podaci                                  | Metode/alati  | Iskustvo/stručnost   |
|--------|--------------|--|---|--|
| 5      | Odlično      | Podaci su detaljni i provjereni.               | Korištene su testirane, standardizirane i provjerene metode koje se kontinuirano razvijaju u znanosti i industriji. | Osoba/tim koja daje podatak ima dugogodišnje cijenjeno iskustvo i stručnost u traženom području. |
| 4      | Dobro        |  |   |  |
| 3      | Prihvatljivo | Podaci su detaljni, ali ne nužno i provjereni. | Korištene su testirane i standardizirane metode.  | Osoba/tim koja daje podatak ima iskustva i stručnosti u traženom području.                       |
| 2      | Nepouzđano   |  |   |  |
| 1      | Loše         | Postoji rizik da su podaci netočni.            | Korištene su metode koje se nikada prije nisu koristile (ad hoc).   | Osoba/tim koja daje podatak je neiskusna (prvi put).   |

Ukupne zaokružene srednje vrijednosti za svaki IBIS zapis, unose se u CODA u pripadajuće sjecište kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika. Konačni KM rezultat za koncept dobiva se iz težinskih faktora kriterija vrijednosti i pojedinačnih KM rezultata svakog polja matrice.



### **3.4.5 A5: Prikaz rezultata**

Cilj metode je odabrati najbolji koncept prema ODM vrijednosti te uvidjeti u kojim kriterijima vrednovanja i inženjerskim karakteristikama postoji prostora za poboljšanje i u pogledu poboljšanja samog koncepta s inženjerske strane, i u pogledu KM vrijednosti kroz pouzdanost informacija kojima se koristilo u provođenju metode.

Metoda je iterativna te je poželjno da se vraća korake unazad i mijenja težinske faktore različitih kriterija i promatra njihov utjecaj na krajnji rezultat. Metoda prisiljava korisnika na razmišljanje i refleksiju ne samo o jakosti veza između kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika već i o načinu kako ih unaprijediti.

## 4 KONCEPTI UREĐAJA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU

Kako bi se provela primjena metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi opisane u prethodnom poglavlju, u ovom radu bit će iskorišteni primjeri koncepata uređaja za aditivnu proizvodnju (3D printera). Koncepti su potpuno preuzeti iz studentskih izvještaja s kolegija *Teorija konstruiranja* iz akademske godine 2019./2020.

U svrhu razumijevanja opsega dobivenih informacija i pravca razvoja (uputa o rješavanju problema, korake koji moraju biti obuhvaćeni u izvještaju, ograničenja) prenesene su upute zadatka dane od strane profesora. U tekstu zadatka navode se općenite informacije o aditivnoj proizvodnji upućujući studente kako na temelju geometrije modela i parametara proizvodnje, uređaj za aditivnu proizvodnju upravlja aktuatorima, grijačima i popratnim mehanizmima te dodavanjem materijala (obično sloj po sloj) izrađuje zadani proizvod. Studentima je također sugerirano da potraže više informacija o samom procesu. Sami zadatak bio je koncipirati uređaj za aditivnu proizvodnju vodeći računa o jednostavnoj pripremi za proizvodnju i prihvaćanju gotovih proizvoda i omogućivanju čišćenja površina, a funkcijsku razradu napraviti temeljem zadane tehnologije aditivne proizvodnje. Četiri tima dobila su četiri različite tehnologije aditivne proizvodnje: FDM tehnologija (engl. *Fused Deposition Modeling*), selektivno lasersko sinteriranje (engl. *Selective Laser Sintering – SLS*), stereolitografija (engl. *Stereolithography – SLA*) i Polyjet tehnologije (engl. *Material Jetting*). Pregled se može vidjeti u tablici 5.

U okviru ovog rada posljednja tehnologija (Polyjet) bit će izostavljena radi nemogućnosti usporedbe s ostalim trima tehnologijama zbog vrlo različitih tehničkih specifikacija konstruiranog uređaja (npr. Polyjet uređaj bio je oko 10 puta većeg volumena od ostalih uređaja).

**Tablica 5 Raspodjela konstrukcijskih timova prema vrsti tehnologije aditivne proizvodnje**

| Grupa | Broj članova | Tehnologija  | Izvještaj |
|-------|--------------|--|-----------|
| Tim 1 | 4            | FDM tehnologija (engl. <i>Fused Deposition Modelling</i> - FDM)                  | [28][28]  |
| Tim 2 | 4            | Selektivno lasersko sinteriranje (engl. <i>Selective Laser Sintering – SLS</i> ) | [29]      |
| Tim 3 | 3            | Stereolitografija (engl. <i>Stereolithography</i> - SLA)                         | [30]      |
| Tim 4 | 3            | Polyjet tehnologija (engl. <i>Material Jetting</i> )                             | [31]      |

Za uspješno rješavanje zadatka trebalo je obuhvatiti sljedeće korake:

- Istražiti zadanu tehnologiju, patente i postojeće uređaje na tržištu
- Formulirati konstrukcijski problem
- Odrediti funkcije pomoću funkcijske strukture i modela relacija
- Izraditi morfološku matricu mogućih rješenja i kombiniranje koncepcijskih varijanti
- Evaluirati, odabrati i doraditi jedan koncept za konstrukcijsku razradu
- Početno oblikovati komponente
- Parametarsko konstruirati komponente radi zadovoljavanja identificiranih ograničenja i maksimiziranja zadovoljstva korisnika

Iz navedenog pregleda da se zaključiti da sam zadatak ne postavlja skoro nikakva ograničenja na konstrukciju osim zadane tehnologije te nikako nije napomenuto da prilikom konstruiranja treba voditi računa o ekološkoj prihvatljivosti. Iako stoji da treba generirati više koncepata te odabrati jedan za daljnju konstrukcijsku razradu, odlučeno je da će se ovdje u obzir uzeti samo tri krajnja razrađena koncepta. Treba napomenuti da su ovo studentski radovi za koje je bilo predviđeno relativno kratko vrijeme za izradu te se pretpostavlja da studenti nemaju ili imaju jako malo iskustva i znanja o uređajima za aditivnu proizvodnju te ograničena iskustva o konstruiranju proizvoda općenito. Iz tog razloga su neke pronađene nelogičnosti i netočnosti ispravljene, ali sa neznatnim utjecajem na krajnji proizvod dobiven iz sva tri izvještaja. Također valja ukazati na neravnomjernu raspodjelu studenata u timovima te na moguću bolju razrađenost uređaja za aditivnu proizvodnju FDM i SLS tehnologijom zbog jednog člana tima više.

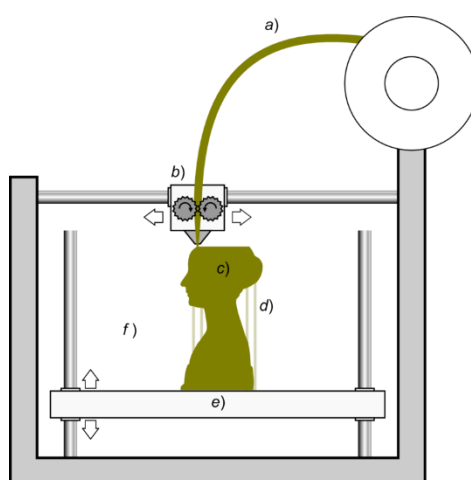
Potencijalni problem je što nije navedeno ograničenje za namjenu proizvoda te time njegovu veličinu i ostale specifikacije koje bi onda bile više ujednačene. Na sreću, tri od četiri tima odlučila su se za manju desktop (stolnu) verziju uređaja sličnih i usporedivih dimenzija i performansi.

U sljedećim poglavljima detaljno su opisani studentski izvještaji. Pregled proizvoda na tržištu, pregled patenata te morfološke matrice neće biti preneseni u ovom radu te je općenito stavljen veći fokus na informacije koje su potrebne za određivanje ekološke prihvatljivosti. Informacije koje su nedostajale za pravilno provođenje metoda, preuzete su od sličnih komercijalnih uređaja te iz znanstvenih članaka te će biti navedene nakon opisa uređaja iz izvještaja.

## 4.1 Uređaj temeljen na FDM tehnologiji (engl. Fused Deposition Modelling) [28]

### 4.1.1 O tehnologiji

FDM tehnologija najčešći je postupak aditivne proizvodnje i iako je izumljena nakon dvije druge najpoznatije tehnologije (SLA i SLS), obično je najjeftinija što je upravo omogućilo njenu popularnost. Tehnologija je patentirana 1989. godine od strane američkog proizvođača Stratasys te je istekao 2009. godine kada je tržište preplavio veliki broj komercijalnih printera.



Slika 11 Princip rada FDM uređaja [28]

Prema slici 11 materijal u obliku polimerne žice (a) se dodaje s namotanog koluta u ekstruder (b) gdje se zagrijava i istiskuje te nanosi sloj po sloj stvarajući željeni predmet (c). Ekstruder (b) omogućuje pomake u horizontalnoj ravnini, a kada nanese cijeli jedan sloj, radna platforma (e) omogućuju pomak u vertikalnoj ravnini za nanos novog sloja materijala.

Neke od prednosti FDM tehnologije su niska cijena, relativno male dimenzije potrebne opreme i veliki raspon materijala za printanje. Od nedostataka valja izdvojiti vidljive prijelaze slojeva, lošu čvrstoću izradaka, visoku hrapavost površine izradaka te potrebu za uklanjanjem potpore strukture.

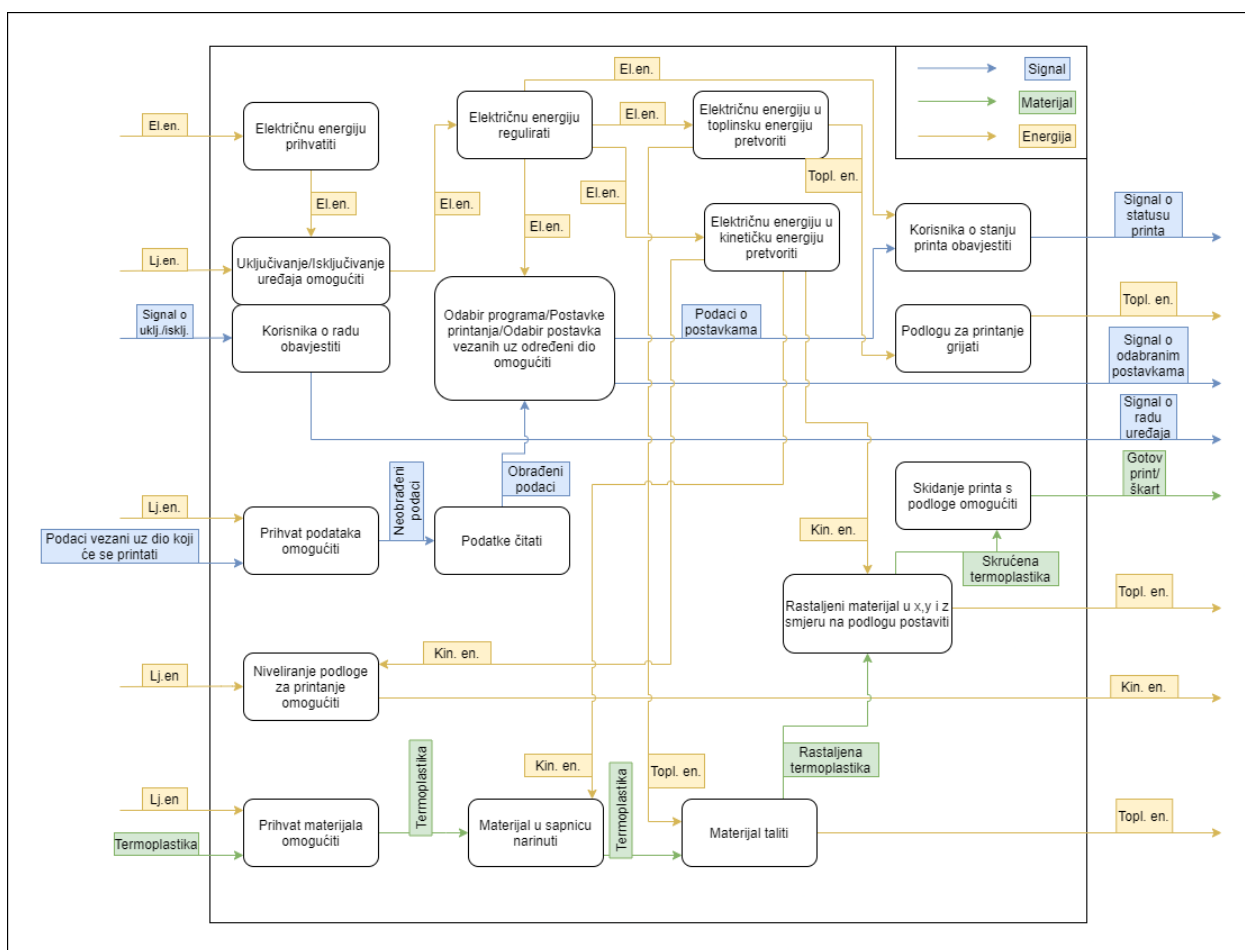
### 4.1.2 Konstrukcijski zahtjevi i definicija cilja

Kao implicitna očekivanja i želje korisnika, tim 1 je naveo vrijeme izrade jednog modela, kvalitetu printanja koja može varirati od brze i neprecizne do sporije, ali vrlo precizne, pristupačnu cijenu

te složenost strukture koja se izrađuje. Odlučili su se za korištenje jednostavnih, pouzdanih rješenja i standardnih dijelova bez inovacija. Kao limite su postavili volumen i masu proizvoda te da izvor električne energije mora biti utičnica. Prema izvještaju proizvod sigurno mora biti: ekonomičan, točan, pouzdan, kompaktan, produktivan, siguran i jednostavan za rukovanje, a sigurno ne smije trošiti puno energije ni biti opasan za korištenje. Za ciljano tržište odredili su hobi korisnike, fakultete i škole. Navedeno je da će razvoj ići u smjeru smanjenja potrošnje energije, privlačnog izgleda te smanjenja „ekološkog footprint-a“.

### **4.1.3 Funkcijska struktura**

Na slici 12 nalazi se funkcijska struktura uređaja za aditivnu proizvodnju FDM tehnologijom. Tim 1 navodi kako su za njihov uređaj ključne električna i toplinska energija pomoću koje se radni materijal zagrijava i tali. Funkcijska struktura nužna je za provođenje čak dvije metode. Žutom bojom prikazan je tok energije, plavom bojom tok signala, a zelenom bojom tok materijala. Na temelju funkcijske strukture, napravljen je i model relacija iz kojeg se ističe problem prevelike potrošnje energije za koji je rješenje bolja regulacija. Problem greški u sloju i zaštopavanja mlaznice riješio bi se regulacijom dovoda materijala.



Slika 12 Funkcijska struktura FDM uređaja [28]

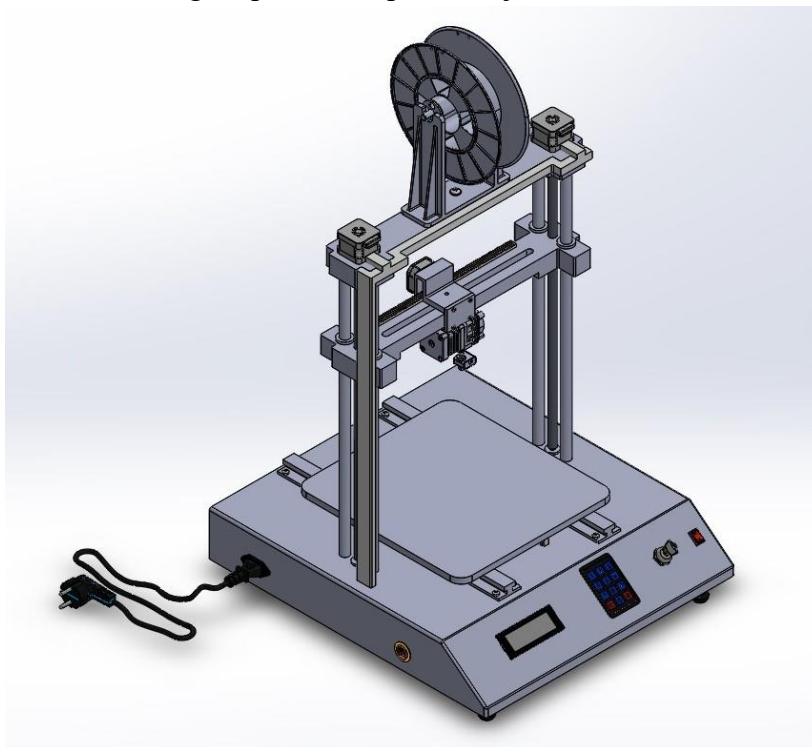
#### 4.1.4 Razrađeni koncept

Tim 1 se i dalje vodio ranije postavljenim ograničenjem na veličinu samog uređaja. Upozoravaju kako su razmišljali da kupac bude što zadovoljniji izgledom, mjerama baze i okvira. Uređaj preko USB priključka dobiva sve potrebne informacije od računala te na temelju njih upravljački sklop generira električne signale potrebne za upravljanje elektromotorima za pozicioniranje. Sam odabir podataka vrši se pomoću ekrana s tipkovnicom koja omogućuje unos parametara za postavljanje programa printanja. Napomenuto je da je donesena odluka protiv touch screen tipkovnice radi smanjenja troškova pošto se time ne gubi na kvaliteti printanja. Pomak po z osi vrši se pomoću dva vretena i dvije matice spojena izravno na električne stepper motore. Matice su pozicionirane na vodilici x osi, pa tako kako se vretena rotiraju, matice, tj. glava ekstrudera diže ili spušta po potrebi u vertikalnom smjeru. Pomak po y osi ostvaren je zupčanikom koji je izravno spojen na

električni stepper motor i zupčastom letvom koja pomiče podlogu u  $y$  smjeru. Pomak po  $x$  osi ostvaren je istim mehanizmom.

Niveliranje podloge odlučili su napraviti u proizvodnji odabirom vodilica visoke preciznosti na kojima sama podloga leži. U radu se podloga ne može pomicati u  $z$  smjeru pa time ostaje nivelirana i nema potrebe za dodatnim radnjama. Glavu za printanje (ekstruder) se pozicionira samo pri prvom sloju na određenu visinu od podloge (ovisno o širini mlaznice) pomoću senzora udaljenosti.

Kolut na koji je namotan materijal odabrali su montirati na vrh kućišta kako ne bi smetao pomaku ekstrudera te isto tako oslobađa radni okoliš oko samog uređaja. Napomenuto je da korisnik, ako želi, može premjestiti cijeli kolut na neku drugu površinu pošto je jednostavno pričvršćen vijcima. Konačan izgled proizvoda prikazan je na slici 13.



**Slika 13 Koncept FDM uređaja [28]**

Na kraju izvještaja, tim 1 je kao najvažnije karakteristike uređaja temeljem kojih određuje zadovoljstvo korisnika odabrao volumen uređaja, najveći mogući volumen proizvoda koji se može isprintati, masu uređaja, ostvarive tolerancije, brzinu izrade i brzinu sastavljanja proizvoda. Uočene kontraindikacije su da povećanje brzine izrade negativno utječe na odstupanje od nazivnih

mjera te da povećanje najvećeg mogućeg volumena proizvoda koji se može isprintati povećava volumen i masu cjelokupnog uređaja.

Grafovima zadovoljstva dobili su sljedeće podatke za idealne parametre uređaja. Optimalna masa uređaja trebala bi biti do 15 kg, najveći mogući volumen proizvoda koji se može isprintati veći od 25, volumen uređaja treba biti manji od 150 dm<sup>3</sup>, moraju se moći postići tolerancije od +/- 0,2 mm, brzina izrade poželjna je veća od 50 mm/h, i na posljetku vrijeme sastavljanja ne duže od 3 sata. Iz toga su dobiveni sljedeći podaci za uređaj:

- brzina – 30 mm/h (brzina kojom se kreće mlaznica)
- odstupanja (tolerancije) – +/- 0,25 mm
- volumen koji uređaj zauzima – 172 dm<sup>3</sup> (gabaritnih dimenzija 450 x 500 x 765 mm)
- masa uređaja – 19 kg

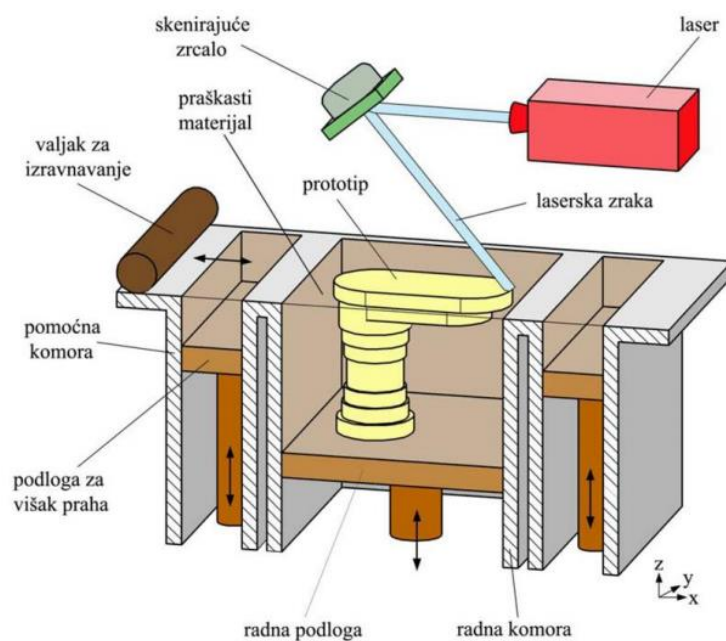
## **4.2 Uređaj temeljen na tehnologiji selektivnog laserskog sinteriranja (engl. *Selective Laser Sintering* – SLS) [29]**

### **4.2.1 O tehnologiji**

Selektivno lasersko sinteriranje (engl. *Selective Laser Sintering* – SLS) postupak je kod kojeg se koristi laser za taljenje praha procesom sinteriranja u trodimenzionalni objekt, patentiran 1986. godine. Sami proces odvija se tako da laser selektivno tali prah pri skeniranju presjeka generiranih iz 3D modela. Nakon svakog skeniranog presjeka radna podloga se spušta za jednu debljinu sloja te se nanosi novi sloj praha na vrh. Takav se proces ponavlja sve dok model nije završen. Ovim se postupkom mogu proizvesti dijelovi vrlo složenih oblika, jer čvrsti modeli nastaju samo na određenim mjestima, a ostatak netaknutog praha ponaša se kao potporna struktura za izradu novih slojeva i upravo to je i jedna od najvećih prednosti SLS tehnologije.

U prednosti SLS tehnologije ubraja se moguća ponovna primjena neiskorištenog praha, dobra čvrstoća dijelova i veliki izbor materijala. Neki od nedostataka su relativno visoka cijena, složenija konstrukcija uređaja te visoka potrošnja energije u radu.





Slika 14 Princip rada SLS uređaja [32]

#### 4.2.2 Konstrukcijski zahtjevi i definicija cilja

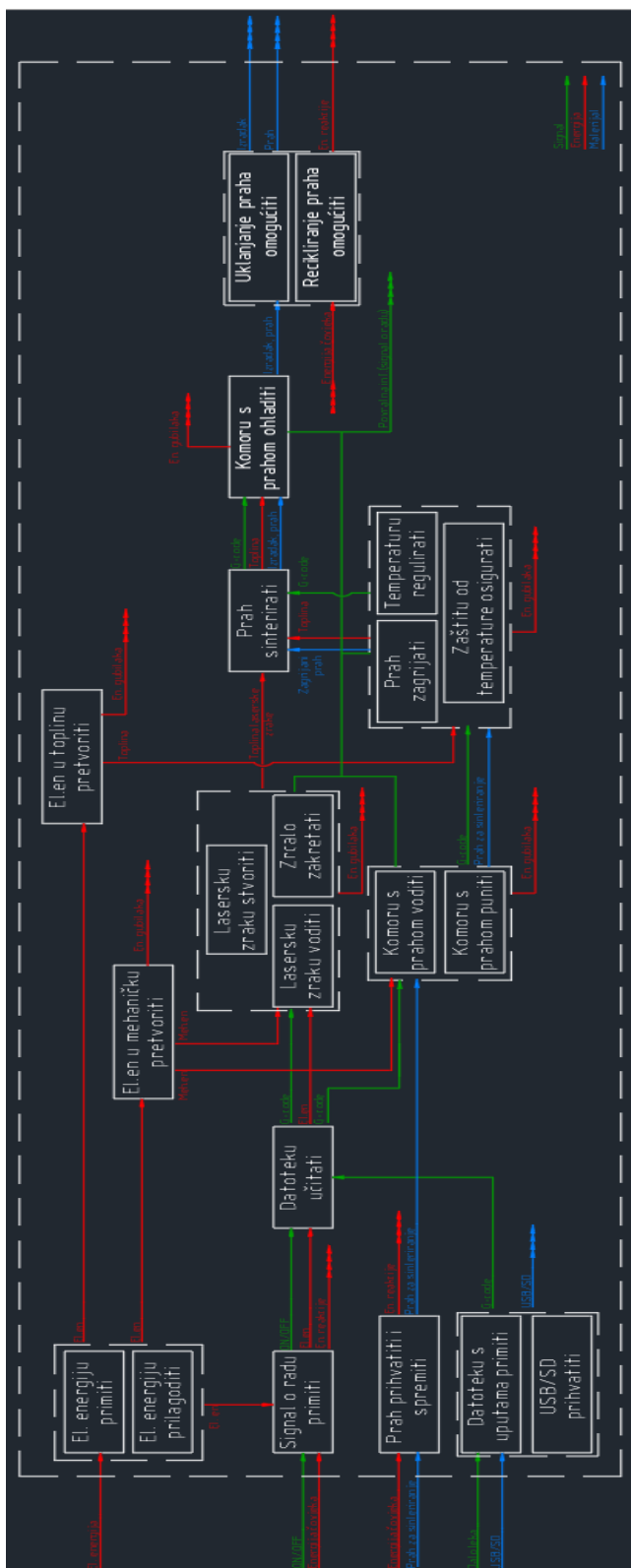
Tim 2 je naveo nekoliko konstrukcijskih zahtjeva kojima će se voditi pri konstruiranju. Uređaj mora imati jednostavno punjenje i zamjenu praha bez rasipanja. Spremnik praha mora biti dovoljnog kapaciteta. Doziranje praha i dostavljanje praha na radnu podlogu treba biti optimalno te posebno treba paziti da novi zasipi praha ne uzrokuju vertikalna opterećenja koja bi narušavala gotove slojeve. Uređajem se mora moći upravljati pomoću dodirnog sučelja (touch screen) ili aplikacijom. Ciljani korisnici su manja poduzeća i samostalni profesionalni korisnici i sukladno tome radni prostor i najveći mogući volumen proizvoda koji se može isprintati treba biti određen. Prah i cijeli radni prostor moraju biti zagrijavani zadovoljavajućom preciznosti regulacije temperature. Cilja se na 5-10 °C ispod temperature sinterizacije kako bi bilo moguće koristiti laser manje snage. Sustav vođenja laserske zrake mora biti iznimno precizan kako bi kvaliteta isprintanog proizvoda bila zadovoljavajuća. Tim 2 također navodi da treba korisniku omogućiti vizualno praćenje procesa preko prozirne pregrade ili kamere i indicirati trajanje procesa. Predstavlja se ideja vađenja cijele radne podloge iz kućišta zajedno s gotovim izratkom i ostatkom praha bez rasipanja. Predlaže se stanica za odstranjivanje praha koja može biti integrirana ili samostalna. I bitno je naglasiti da je tim 2 razmišljao o potencijalnom recikliranju već korištenog praha bez znatnog gubitka na svojstvima.

### 4.2.3 Funkcijska struktura

Tim 2 izradio je nešto manje detaljnu funkcijsku strukturu u usporedbi s timom 1. Prikazana je na slici 15. Iz tog razloga će ju trebati malo nadopuniti pazeći na konzistentnost s cjelokupnim izvještajem. U ovom slučaju osim pretvorbi električne energije u mehaničku i toplinsku, koje su navedene kod tima 1, postoji i svjetlosna energija zbog lasera.

Usprkos šturoj funkcijskoj strukturi, tim 2 je naveo detaljnije relacijske strukture za više funkcija. Razmišljali su o smanjenju potrebne snage lasera što se može ostvariti zagrijavanjem radnog prostora i praha. Kako se ne bi narušila preciznost uređaja, treba izolirati komponente koje nisu u izravnom doticaju s prahom te predgrijavati prah koji dolazi na radnu plohu. Navode ideju vađenja (zamjene) komore s prahom da bi se hlađenje odvijalo paralelno s početkom sljedećeg ciklusa što bi pomoglo smanjiti trajanje jednog ciklusa te tako povećalo produktivnost. Sustav za zagrijavanje trebao bi omogućiti homogenu temperaturu u cijelom radnom prostoru kako bi se izbjegao problem neujednačenog zagrijavanja.

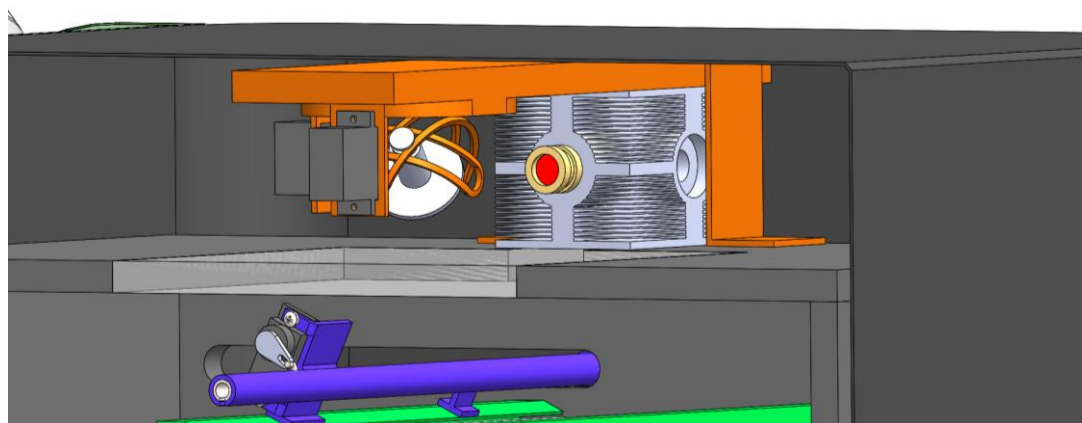
Treba uzeti u obzir da sustav vođenja laserske zrake treba biti efikasan i precizan jer će se time smanjiti vrijeme printanja (povećanje produktivnosti), a i kvaliteta izratka. Naglašeno je kako to uzrokuje potrebu za visoko preciznim mehaničkim komponentama koje znatno poskupljuju cijenu uređaja. Da bi se omogućio optimalan odnos i iskorištenje takvih komponenti treba voditi računa o postavljanju adekvatnih oslonaca, uklanjanje vibracija i interferencija.



Slika 15 Funkcijska struktura SLS uređaja [29]

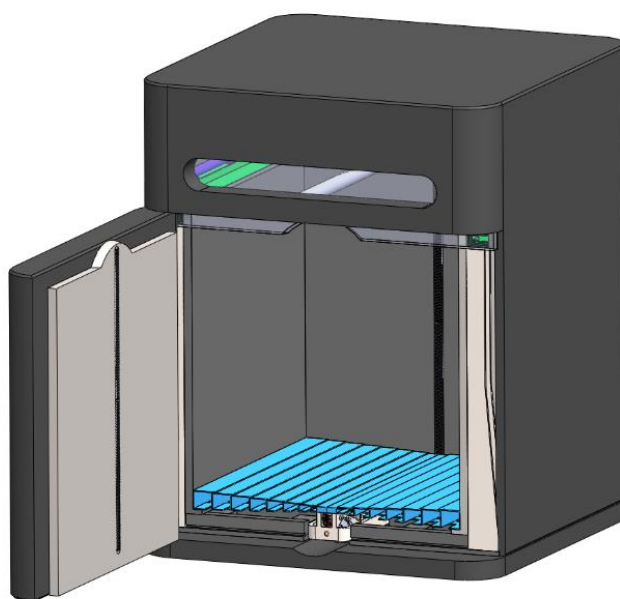
#### 4.2.4 Razradeni koncept

Prihvat i skladištenje praha napravljen je tako da odgovara standardnim ambalažama praha. Moguće je postaviti onoliko spremnika praha koliko je potrebno za trenutni ciklus. Takvo rješenje omogućuje najveći omjer volumena radnog prostora i površine baze uređaja. Isto tako smanjuje mogućnost rasipanja praha štedeći materijal i smanjuje vrijeme pripreme za ciklus jednostavnim ukapčanjem standardne ambalaže. Prah se dozira kroz mali spremnik koji je dovoljan za jedan sloj. Spremnik se prazni gravitacijski. Ravnanje i odstranjivanje viška praha s radne površine ostvaruje se pomoću rotirajućeg valjka pogonjenog elektromotorom i zupčanim prijenosom. Sve površine u doticaju s prahom zagrijavaju se indukcijski do radne temperature. Sensorima se regulira održavanje temperature. Ugrađeni su dodatni grijači najnovijeg sloja praha. Komponente za koje nije poželjno da budu izložene višim temperaturama, treba izolirati ili izraditi od materijala koji te temperature podnose. Laserska zraka do radne plohe vodi se sustavom statičnih zrcala sa sfernim zrcalom pomičnim oko dvije osi i prikazan je na slici 16.



Slika 16 Laserski sustav kod SLS uređaja [29]

Stanica za čišćenje izratka odvojena je od konstrukcije uređaja. Radna ploha je podesiva kako bi se koristilo manje praha za sitnije dijelove. Cijeli uređaj prikazan je na slici 17.



Slika 17 SLS uređaj [29]

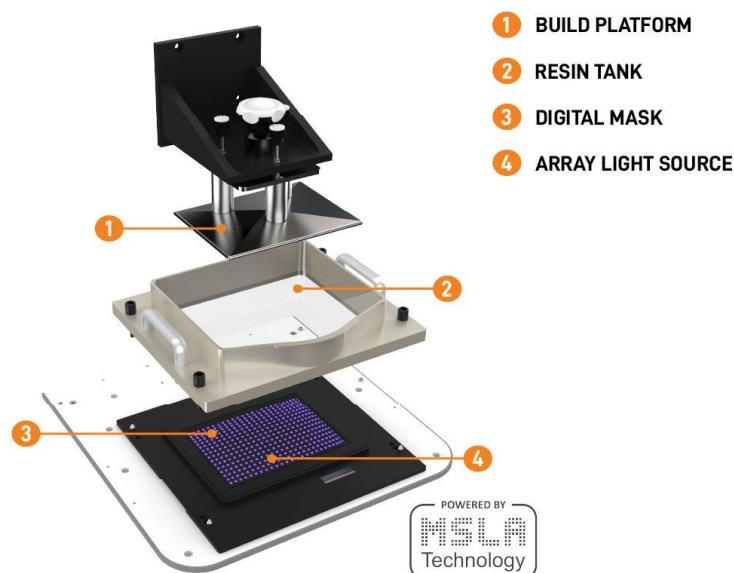
### 4.3 Uređaj temeljen na tehnologiji stereolitografije (engl. *Stereolithography - SLA*) [30]

#### 4.3.1 O tehnologiji

Stereolitografija je jedna od najpreciznijih tehnologija aditivne proizvodnje koju je patentirao Charles Hull 1984. godine. Temelji se na procesu fotopolimerizacije koji se odvija tako što laser emitirajući UV zrake osvjetljava sloj tekućeg fotopolimera po točno određenoj putanji koji se na taj način skrućuje. Kad se završi jedan sloj, platforma na kojoj nastaje proizvod se pomiče, a laser ponovo osvjetljava polimer po zadanoj putanji. Ovisno o izvedbi uređaja, proizvod treba očistiti, ukloniti potpornu strukturu te staviti ponovno pod UV svjetlo kako bi dodatno očvrstnuo.

U ovom radu, uređaj radi na novijoj inačici stereolitografskog procesa koji umjesto lasera koristi LED osvjetljenje za proces fotopolimerizacije. Na slici 18 prikazani su glavni dijelovi: LED svijetla (4), LCD ekran koji selektivno propušta osvjetljenje ovisno o unaprijed određenom obliku koji se printa (3), posuda u koju se ulijeva fotopolimer (2) i radna platforma (1) koja ostvaruje pomak po vertikalnoj osi.

Prednosti stereolitografije su visoka preciznosti i kvaliteta izratka, niska hrapavost površine te brzina procesa. Među nedostatke spadaju loša mehanička svojstva isprintanog dijela, opasno rukovanje fotopolimerom te zahtjevan proces završne obrade nakon printanja.



Slika 18 Princip rada SLA uređaja [33]

### 4.3.2 Konstrukcijski zahtjevi i definicija cilja

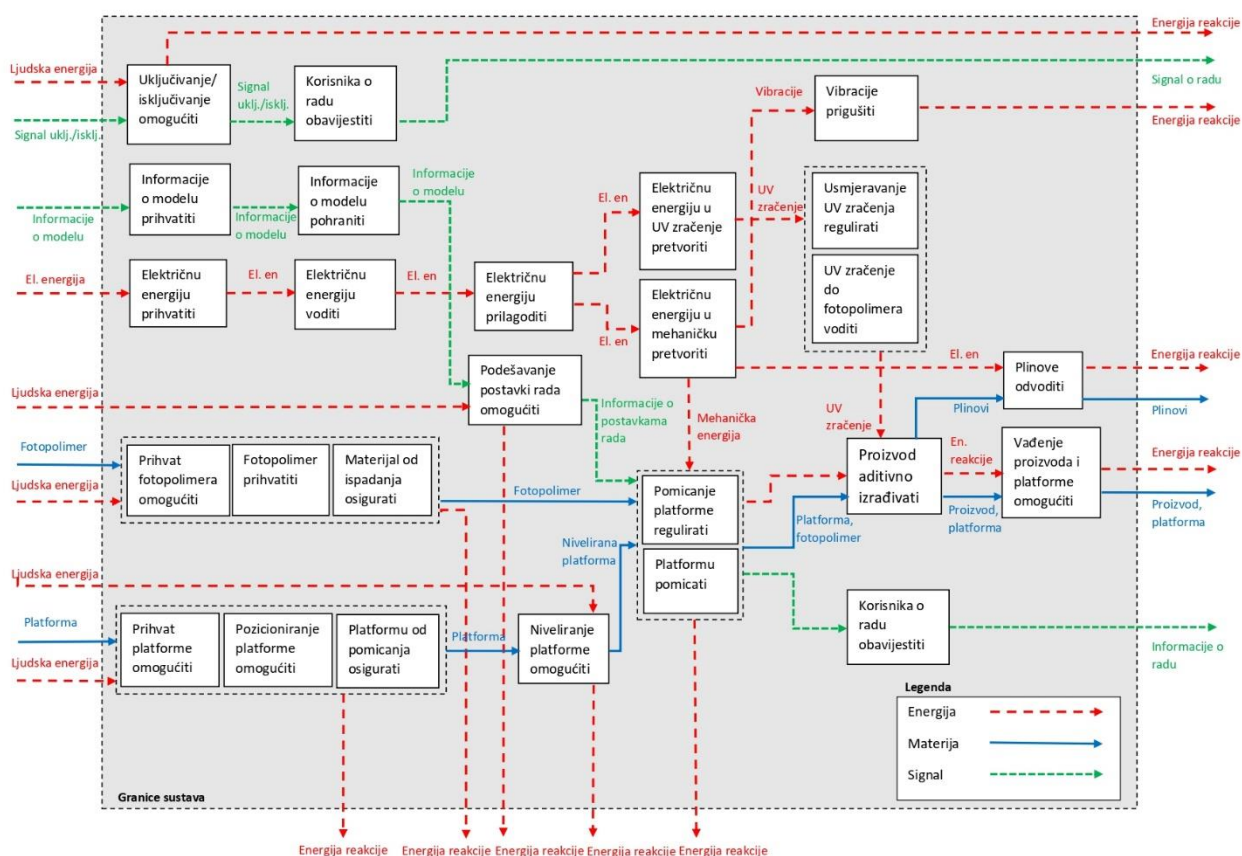
Tim 3 definirao je korisnike kao napredne „uradi sam“ (engl. *do it yourself*) korisnike.

Od konstrukcijskih zahtjeva izdvojili su: jednostavnost sastavljanja i rastavljanja, jednostavnost niveliranja platforme, dovoljno velik spremnik za tekući polimer, dobro brtvljenje, visoku preciznost i nisku cijenu.

### 4.3.3 Funkcijska struktura

Pretvorbe energije, signala i materijala ovdje su vrlo slične kao u prethodnom primjeru od tima 2. Funkcijska struktura prikazana je na slici 19. Pretvaranje električne energije u mehaničku, toplinsku i svjetlosnu ističe se kao ključno.

Iz modela relacija valja istaknuti da je tim razmišljao o nastanku otpada (ukloniti ga), nedovoljnoj količini UV zračenja (postavljanje UV regulatora), lošoj kvaliteti i netočnosti isprintanog modela (bolje pozicioniranje pomoću softvera).

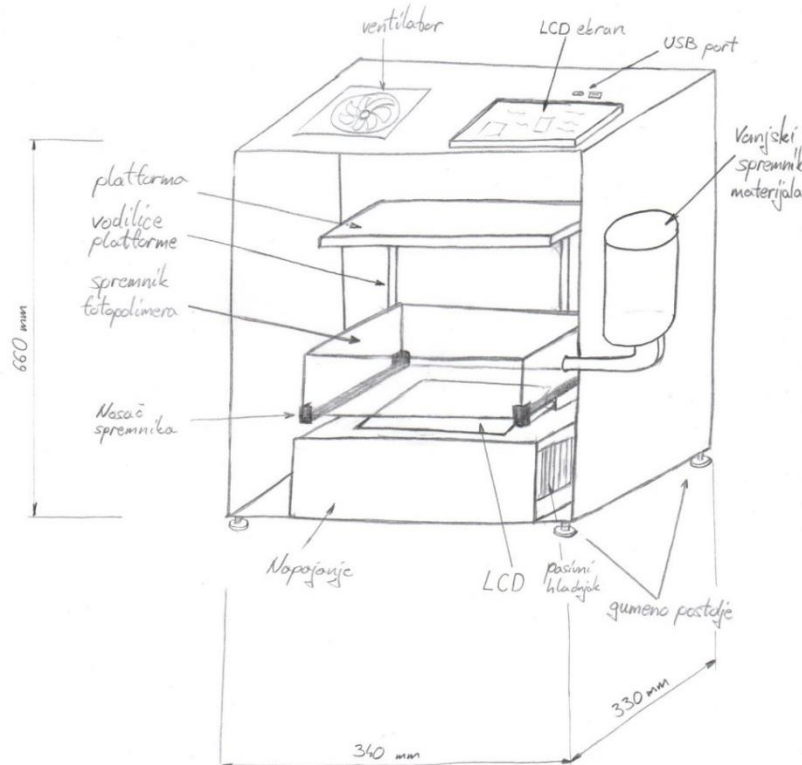


Slika 19 Funkcijska struktura SLA uređaja [30]

### 4.3.4 Razrađeni koncept

Uređaj radi na principu stereolitografije gdje je izvor UV zračenja LCD ekran (tehnologija tekućih kristala) kod kojeg se periodički fotopolimer izlaže zrakama. Tim predlaže kako poboljšati intenzitet osvjetljenja LED-a, ali ga pritom sačuvati od pregrijavanja i bespotrebnog trošenja energije. Odlučili su se za princip korištenja periodičkih radnji za osvjetljavanje fotopolimera. Fotopolimer se dodaje u staklenu posudu iz vanjskih spremnika te se automatski određuje njegova količina pomoću LCD ekrana na kojem su prikazani parametri rada. Model se učitava preko USB ulaza. Platforma se pomiče gore dolje pomoću dva linearna motora, a niveliranje uređaja se vrši ručno preko matica na nožicama uređaja. Toplina koju generira uređaj se koristi za grijanje posude, a preostala toplina i plinovi generirani tijekom procesa odvede se pomoću ventilatora na vrhu kućišta dok se kućište LCD-a pasivno hladi pomoću rebara. Višak topline koju stvara uređaj pri radu iskorišten je za zagrijavanje posude s fotopolimerom koja mora biti blago grijana, a pritom se nije moralo povećavati uređaj. Postolje, kojim se prigušuju vibracije, izrađeno je od gume.

Uređaj ima prozirnu stijenku koja omogućuje korisniku praćenje procesa. Odvajanje proizvoda od platforme vrši se ručno. Na slici 20 prikazan je koncept uređaja.



Slika 20 SLA uređaj [30]

#### 4.4 Dodatno definirane specifikacije uređaja

Kako bi se mogle provesti sve metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti opisane u prethodnom poglavlju, bilo je nužno nadopuniti podatke iz izvještaja. Dodatni podaci i specifikacije preuzete se od komercijalnih uređaja na tržištu koji su slični konceptima razvijenim u izvještajima. U tablici 6 navedene su tehničke specifikacije sva tri uređaja koje će se dalje koristiti u radu. Za svaku specifikaciju istaknuto je otkud je preuzeta.

Za sva tri koncepta uređaja pronađen je po jedan najbliži komercijalni uređaj.



Tablica 6 Dodatne informacije o konceptima

| Tehnička specifikacija                         | FDM                     | Izvor               | SLA                    | Izvor               | SLS                    | Izvor               |
|--|-------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| Materijal za printanje                         | ABS                     | Odabrano prema [34] | Fotopolimer            | Odabrano prema [34] | Najlon (PA)            | Odabrano prema [34] |
| Masa uređaja [kg]                              | 19 kg                   | [28]                | 20 kg                  | [30]                | 41 kg                  | [35]                |
| Volumen koji uređaj zauzima [dm <sup>3</sup> ] | 172,125 dm <sup>3</sup> | [28]                | 74,052 dm <sup>3</sup> | [30]                | 164,68 dm <sup>3</sup> | [35]                |
| Volumen radnog prostora [dm <sup>3</sup> ]     | 11,025 dm <sup>3</sup>  | [28]                | 1,224 dm <sup>3</sup>  | [36]                | 4,5 dm <sup>3</sup>    | [35]                |
| Maksimalna temperatura u procesu [°C]          | 255 °C                  | [37]                | 60 °C                  | [30]                | 190 °C                 | [35]                |
| Vrijeme postavljanja za rad [min]              | 10 min                  | [38]                | 13 min                 | [38]                | 17 min                 | [38]                |
| Vrijeme sastavljanja uređaja [h]               | 3 h                     | [28]                | 10 h                   | [36]                | > 24 h                 | [35]                |
| Cijena uređaja [\$]                            | 900 \$                  | [37]                | 1500 \$                | [30]                | 9700 \$                | [35]                |
| Raspon debljine sloja [mm]                     | 0,05 – 0,4 = 0,35 mm    | [37]                | 0,025–0,1 = 0,075 mm   | [36]                | 0,075-0,175 = 0,1 mm   | [35]                |

|  |                      |      |                      |      |                      |      |
|--|----------------------|------|----------------------|------|----------------------|------|
| Broj nužnih koraka u završnoj obradi [-]                               | 1                    | [39] | 3                    | [39] | 0                    | [34] |
| Specifična potrošnja energije SEC [J/cm <sup>3</sup> ]                 | $4,327 \cdot 10^5$   | [34] | $0,5596 \cdot 10^5$  | [34] | $1,556 \cdot 10^6$   | [34] |
| GWP (doprinos globalnom zatopljenju) – materijal [kg CO <sub>2</sub> ] | $3,7 \cdot 10^{-3}$  | [34] | $13,4 \cdot 10^{-3}$ | [34] | $22,4 \cdot 10^{-3}$ | [34] |
| GWP (doprinos globalnom zatopljenju) - energija [kg CO <sub>2</sub> ]  | 0,3                  | [34] | 0,123                | [34] | 1,09                 | [34] |
| Broj potencijalnih opasnosti za ljudsko zdravlje [-]                   | 2                    | [40] | 3                    | [40] | 3                    | [38] |
| Postignuta površinska hrapavost modela Ra [μm]                         | 3,74                 | [38] | 2,28                 | [38] | 2,9                  | [38] |
| Postotak povećanja vremena za izradu objekata odjednom [%]             | 100                  | [41] | 10                   | [41] | 40                   | [41] |
| Brzina printanja [cm <sup>3</sup> /s]                                  | $2,22 \cdot 10^{-3}$ | [34] | $1,44 \cdot 10^{-3}$ | [34] | $26,4 \cdot 10^{-3}$ | [34] |

## 4.5 Objašnjenja odabranih tehničkih specifikacija

U ovom poglavlju objašnjeno je odabir i detalji o tehničkim specifikacijama iz tablice 6.

**Masa uređaja [kg]** – Masa uređaja izabrana je jer indirektno pokazuje na količinu utrošenog materijala u proizvodnji uređaja, a time i utjecaja na okoliš u svim pogledima i fazama životnog ciklusa. Pretpostavlja se da uređaj veće mase ima i veći broj komponenti, troši više energije u radu te je utrošeno više resursa u njegovu proizvodnju. Korisnički zahtjev također je bio da uređaj bude prenosiv kako bi se maksimalno koristio (dijeljenje uređaja, lako seljenje a ne bacanje nakon nekog vremena, manji troškovi transporta kod premještanja uređaja).

**Volumen cijelog uređaja [dm<sup>3</sup>]** – Za ukupni volumen proizvoda vrijede slične pretpostavke kao i za prethodno opisanu masu. Poželjno bi bilo da uređaj zauzima što manje prostora kako bi se mogao postaviti praktički bilo gdje. Također prilikom isporuke i transporta, bitno je znati veličinu pakiranja u koju bi on mogao stati.

**Volumen radnog prostora [dm<sup>3</sup>]** – Volumen radnog prostora predstavlja jednu od najbitnijih specifikacija. Njime je direktno određeno koliki objekt se na printeru može isprintati te je maksimalna veličina određena upravo tim ograničenjem. Korisnički zahtjev o multifunktionalnosti proizvoda znači i da na njemu može isprintati stvari različitih veličina. Printer s većim volumenom radnog prostora naravno pruž i mogućnost printanja više objekata odjednom što povećava produktivnosti ali i štedi energiju prema [naći referencu].

**Maksimalna temperatura u procesu [°C]** – Pošto se u 2 od 3 tehnologije (SLA je iznimka), kao glavni fizikalni efekt na kojem se temelji cijeli proces koristi prijenos topline te su najveći potrošači energije u uređaju upravo komponente koje sudjeluju u procesu generiranja topline, maksimalna temperatura nameće se kao neizostavna specifikacija u promatranju procesa. Cilj je temperaturu sniziti što je više moguće da bi printer funkcionirao. Ipak, bitno je primijetiti da je rangiranje printera prema ovom faktoru nezgodno jer je maksimalna temperatura tehničko ograničenje printera. FDM uređaj kojem je potrebna temperatura od preko 250 °C za taljenje materijala, teško je usporediti sa SLA uređajem koji za stvrdnjavanje fotopolimera radi na 60 °C potpuno drugačijom tehnologijom. Usprkos tome, temperatura je jasan pokazatelj potrošnje energije jer indukcijski grijač koji radi na 250 °C definitivno troši više električne energije od LCD ekrana za stvrdnjavanje fotopolimera.

**Vrijeme postavljanja uređaja za rad [min]** – Vrijeme potrebno za postavljanje uređaja kako bi mogao početi s printom, jasan je pokazatelj koji opisuje korisnički zahtjevom za jednostavnosti korištenja. Jednostavnost korištenja privući će puno širu i raznolikiju publiku korisnika što je i cilj. Također, neće biti potrebe za ekstenzivnim edukacijama osoba koje rade na printeru, nasuprot printer će moći koristiti skoro pa bilo tko. Valja spomenuti i kako kraći set up time znači i veću produktivnost.

**Vrijeme sastavljanja uređaja [h]** – Vrijeme sastavljanja uređaja pokazatelj je jednostavnosti procesa sastavljanja ili rastavljanja. Također indirektno ukazuje na broj komponenti i složenost uređaja. Što je to vrijeme manje, to se može zaključiti da će biti utrošeno manje resursa prilikom inicijalnog sklapanja u proizvodnji (vrijeme radnika, stručnost, potrebni alati, itd.), a i moguće je da se uređaj isporuči korisniku u dijelovima (kao FDM i SLA uređaji u ovom primjeru) te se potpuno uštedi na tom dijelu. Korisnik će u slučaju 3D printera vjerojatno biti i zadovoljniji takvim pristupom. Bitno je ovu specifikaciju gledati i iz perspektive popravka te čišćenja proizvoda. 3D printer zahtjeva jako često čišćenje obzirom na narav procesa i korišteni materijal. Npr. SLS uređaj potrebno je često čistiti od zaostalog praha. Na kraju, kada dođe vrijeme odlaganja, brza rastavljivost uređaja definitivno će potaknuti i odvajanje otpada za recikliranje.

**Raspon debljina sloja [mm]** – Raspon u kojem se kreće moguća debljina sloja ukazuje na raznolikost proizvoda koji se mogu printati te njihovu kvalitetu. Korisnički zahtjev za printanjem u različitim kvalitetama to je bolje zadovoljen što je veći mogući raspon debljine slojeva. Mogao bi se postaviti uvjet najmanje moguće debljine sloja, što bi rangiralo uređaje po tome koji može postići najveću preciznost i kvalitetu printa ali taj zahtjev ovdje će biti opisan tehničkom specifikacijom kvalitete površine završnog printa (Ra) koji je pisan malo niže.

**Broj nužnih koraka u završnoj obradi [-]** – Ova specifikacija bez mjerne jedinice izabrana je jer se pokazala potreba da se proces završne obrade nekako kvantificira i tako bude prikladan za zadnje dvije metode. Pošto nije bilo moguće uzeti potrebno vrijeme za završnu obradu istog isprintanog objekta na sva tri printera, odabran je broj koraka. FDM ima jedan korak (mehaničko ručno uklanjanje potpornog materijala), SLA tri koraka (ispiranje alkoholom, mehaničko ručno uklanjanje potpornog materijala, dodatno stvrdnjavanje pod LED svjetlima), SLS nema nijedan korak. Broj koraka iako se čini previše jednostavna i nedovoljna mjera može vrlo dobro pokazati utrošak energije i resursa. Za svaki korak bi se moglo reći da troši jednako resursa te se zato mogu na ovaj način kvantificirati. SLS uređaju je dodijeljeno nula koraka, iako bi trebalo iščerkati višak

praha, zato što ne bi bilo razmjerno dodijeliti istu vrijednost FDM uređaju i SLS uređaju jer FDM uređaj troši znatno više resursa i energije.

**SEC [J/cm<sup>3</sup>]** [34] – SEC je kratica za *specific energy consumption* odnosno specifičnu potrošnju energije i predstavlja potrošnju energije po jedinici volumena printanog predmeta. Računa se prema:

$$SEC = \frac{PT}{V} \quad (16)$$

Gdje  $P$  označava ulaznu snagu [W],  $T$  vrijeme procesa [s], a  $V$  volumen isprintanog predmeta [cm<sup>3</sup>]. Podaci su mjereni na različitim printerima na kojima je printan isti predmet. Direktno je mjerena potrošnja struje te iz tog podatka i voltaže dobivena vrijednost utrošene snage. Očito je da je za ovaj podatak dosta teško reći koliko odstupa od vrijednosti koje bi se dobile kada bi isti eksperiment proveli na tri printera koja se razmatraju u ovom radu. Usprkos tome, podatak je zasigurno pokazatelj reda veličine i još bitnije, usporedbe ta tri procesa prema tome koji troši najviše a koji najmanje energije. Specifikacija je odabrana kako bi odgovorila na korisnički zahtjev za smanjenjem potrošnje energije u radu.

**GWP (doprinos globalnom zatopljenju) - materijal [kg CO<sub>2</sub> ekvivalent]** [34] – GWP je kratica za *global warming potential* odnosno pokazatelj utjecaja na globalno zatopljenje te se izražava u kg CO<sub>2</sub>. GWP objedinjuje pod istom mjernom jedinicom kumulativni efekt stakleničkih plinova i računa se prema:

$$GWP = \sum_{j=1}^m EFGWP_j \cdot g_j \quad (17)$$

Gdje je  $EFGWP_j$  karakteristični faktor substance  $g_j$ , a  $g_j$  su emisije u okoliš – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O i ostalih stakleničkih plinova. U [34] ovi podaci dobiveni su pomoću GaBi softvera. Ovdje su uzeti procesi vezani uz materijal koji se koristi za printanje - ekstrakciju sirovog materijala, dopremanje do pogona za obradu, obradu te proizvodnju finalnog oblika koji se može koristiti za printanje.

**GWP (doprinos globalnom zatopljenju) - energija [kg CO<sub>2</sub> ekvivalent]** [34] – Ova specifikacija analogna je onoj opisanoj u prethodnom odlomku, samo se odnosi na energiju koja se troši prilikom rada uređaja.

**Broj potencijalnih opasnosti za ljudsko zdravlje [-] [40]** – Korisnički zahtjev za što manjim utjecajem na ljudsko zdravlje je isto izazovno za kvantificirati u tehničku specifikaciju. Svaki od tri uređaja ima drugačije opasnosti koje je nemoguće usporediti. Iz tog je razloga prema [38] i tablici 1 u navedenom radu, naveden broj potencijalnih opasnosti. Također kao i za broj koraka u završnoj obradi, specifikacija je prihvaćena kao dobra jer je svaka pojedinačna opasnost približno jednakovrijedna. Za FDM je kao opasnost navedena emisija hlapljivih organskih čestica (engl. *volatile organic compounds - VOC*) čestica na bazi stirola i od aditiva koji se dodaju materijalima za printanje. Još jedna opasnost je sigurnost vezana uz površine koje se zagrijavaju te opasnosti od opekline u samom procesu printanja. Opasnosti SLS-a leže u prahu za koji je utvrđeno da ga je opasno ga inhalirati ili dovesti u kontakt s kožom, ali to naravno ovisi o prahu koji se koristi. Opasnost je pogotovo značajna u procesu završne obrade kada se sav višak praha uklanja četkanjem te ga puno završava lebdeći okolo u zraku. Obavezno je nošenje maske za lice. Isto kao i za FDM, vrijedi rizik od opekline zbog visokih temperatura koje se koriste u procesu. Glavna opasnost SLA procesa leži u fotopolimeru koja se koristi kao materijal za printanje te u svom tekućem obliku nikako ne smije doći u kontakt s kožom te se ne smije udisati VOCs koje se emitiraju. Ta opasnost prisutna je u svim dijelovima procesa – ulijevanju fotopolimera u posudu, samom procesu printanja, završnoj obradi u kojoj treba skinuti ostatke nestvrdućeg fotopolimera alkoholom, čišćenju svih površina uređaja koje su došle u kontakt s nestvrdućim fotopolimerom. Također je potencijalno opasno izlaganje UV svjetlosti.

**Postignuta prosječna površinska hrapavost Ra [ $\mu\text{m}$ ] [38]** – Površinska hrapavost gotovih isprintanih predmeta pokazatelj je kvalitete isprintanog predmeta te indirektno može ukazivati na postotak škarta i nezadovoljstvo proizvodom te potrebom za dodatnom završnom obradom koje također generira još otpada, vremena, resursa i energije. Također ukazuje na mogućnost korisnika da printa u različitim kvalitetama, što vrlo često znači upravo u onoj najboljoj.

**Postotak povećanja vremena za izradu više objekata odjednom [%] [41]** – Ova specifikacija uvedena je kao mjerilo printanja više proizvoda odjednom. Prema [41] pokazano je da printanje više predmeta odjednom neznatno povećava potrošnju energije dok bi se kada bi se ta dva ista predmeta printala jedan iza drugog, trošila dvostruka količina energije. Kod FDM uređaja je dva ista predmeta moguće printati jedan pored drugog, ali ekstruder mora obaviti isti posao na drugom kao i na prvom što znači da je potrebno 100% više vremena te uštede nema, jedino se printer ne

treba 2 puta postavljati za rad i predgrijavati. Kod SLA i SLS uređaja troši se neznatno više energije.

**Brzina printanja [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ] [34]** – Brzina printanja ključan je pokazatelj produktivnosti procesa. Treba pronaći vrijednost brzine printanja pri kojoj je potrošnja energije u radu optimalna.

**Cijena uređaja [€]** – Cijena proizvoda bitna je u svakom vrednovanju koncepata, bilo to u svrhu ekološke prihvatljivosti ili neku drugu. Kako bi uređaj uopće došao do korisnika i bio zastupljen na tržištu mora imati cijenu koja može konkurirati drugim sličnim proizvodima.

Prethodno navedene tehničke specifikacije koristiti će se kao izvor podataka za sve četiri provedene metode kako bi se osigurala konzistentnost. Ovakav oblik podataka nužan je za provođenje posljednje dvije metode opisane u poglavljima 3.3 i 3.4.

## 5 ANALIZA EKOLOŠKE PRIHVATLJIVOSTI KONCEPATA KORIŠTENJEM ODABRANIH METODA

U ovom poglavlju detaljno je opisana provedba sve četiri metode na primjeru uređaja za aditivnu proizvodnju (3D printera) koji su opisani u prethodnom poglavlju.

### 5.1 *Eco Design Value* metoda

#### 5.1.1 *LOW* – Što manji štetan utjecaj na prirodu i okoliš

1. Koncept je čist i siguran:

**a. Koncept omogućuje korisniku čist i zdrav okoliš, tj. okruženje u kojem boravi.**

U užem smislu ove smjernice, mogao bi se gledati prostor u koji je uređaj smješten te kako djeluje u njemu. Prema tome, kao što je i navedeno u specifikaciji broja štetnih zdravstvenih utjecaja preuzetih iz [40], sva tri koncepta emitiraju štetne čestice ili pare koje se zadržavaju u prostoriji ako nije dobro ventilirana. Iz tog razloga, vrlo je važno zračiti i dobro ventilirati prostoriju u kojoj se uređaj nalazi te nositi odgovarajuću zaštitnu opremu kada je nužna.

Gledajući širu sliku, utjecaj na okoliš opisan je tehničkom specifikacijom potencijala za globalno zatopljenje, i u pogledu materijala, i u pogledu energije [34]. Što se tiče proizvodnje materijala za printanje, FDM koncept uređaj ima najmanji utjecaj na globalno zatopljenje, slijedi SLA uređaj pa tek onda SLS uređaj. Iz perspektive energije koja se troši u radu uređaja, najmanji utjecaj na globalno zatopljenje ima SLA uređaj, slijedi FDM i na kraju SLS.

Ocjene: FDM -1, SLA -1, SLS -2

**b. Koncept smanjuje zagađenost tijekom cijelog životnog ciklusa proizvoda (proizvodnja, upotreba, odlaganje).**

Ova smjernica može se interpretirati vrlo slično prošloj, ali bi se u okviru nje moglo promatrati i odlaganje otpada (samog uređaja na kraju životnog vijeka, isprintanih predmeta na kraju životnog vijeka te otpada u obliku potpornih struktura). Što se tiče odlaganja samog uređaja, najjednostavnije se rastavljaju FDM i SLA uređaj te



su puno konstrukcijski jednostavniji od SLS uređaja pa će se i jednostavnije pravilno rastaviti, sortirati, odlagati ili ponovno koristiti. Predmeti izrađeni sa sva tri uređaja (ABS, najlon, fotopolimer) mogu se reciklirati, ovisno o vrsti, nekim mehaničkim ili kemijskim postupkom [42]. Potporni materijal kod FDM i SLA uređaja reciklira se na isti način kao i predmet, a kod SLS uređaja potpornog materijala nema. Bitno je napomenuti da se nestvrdnuti fotopolimer u SLA postupku mora propisno odlagati jer je opasan.

Ocjene: FDM -1, SLA -2, SLS -1

**c. U konceptu se koristi sirovi materijal koji je ekološki prihvatljiv.**

Ekološku prihvatljivost u ovoj smjernici prikazat će se kao potencijal za globalno zatopljenje iz perspektive materijala. Iz tablice 6 tehničkih specifikacija vidi se da znatno najmanji potencijal ima FDM uređaj, odnosno printanje ABS polimerom. Sljedeći je SLA uređaj, odnosno printanje fotopolimerom sa 3,5 puta većom vrijednosti te na kraju SLS sa 5 puta većom vrijednosti.

Ocjene: FDM 1, SLA -1, SLS -2

**d. U konceptu su smanjene dodatne završne obrade te se one izvode na čist i netoksičan način.**

Ovaj kriterij može se odnositi na svaku pojedinačnu komponentu i način na koji je ona prošla završnu obradu (brušenje, poliranje, premazivanje itd.). O tome nema dostupnih adekvatnih podataka za korištenje u ovom radu. Umjesto na taj način, ovdje će se ovaj kriterij promatrati u smisli završnih obrada kao zadnjem koraku ciklusa printanja. Prema tome, iz tehničkih specifikacija vidi se da SLA uređaj zahtijeva najviše završne obrade koja je uz to što je vremenski zahtjevna i opasna, generira dodatan otpad te troši energiju. SLS uređaj jedini zadovoljava kriterij pošto je jedina završna obrada koja se mora provesti čišćenje predmeta od viška praha, a sav višak praha ponovno se može i iskoristiti u idućim procesima. FDM proces isto prati završna obrada koja oduzima vrijeme i stvara otpad.

Ocjene: FDM -1, SLA -2, SLS 1

**2. Konceptom se podržava korištenje obnavljanje prirodnih resursa nakon upotrebe i eksploatacije:**

**a. Koncept koristi energiju koja je dobivena iz prirodnih cikličkih procesa.**

Sva tri uređaja kao izvor energije koriste električnu energiju iz mreže pa time ovaj kriterij ovisi o načinu proizvodnje te energije, a o tome nema adekvatnih podataka.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0

**b. Koncept sam po sebi djeluje pozitivno na okoliš (slično kao princip biodegradacije).**

Ne može se reći takvo nešto za nijedan od ovih koncepata.

Ocjene: FDM -2, SLA -2, SLS -2.

**c. U konceptu se koriste biorazgradivi materijali i maksimiziraju njihove pozitivne osobine.**

Nijedan koncept ne koristi biorazgradive materijale. Iako je uzeto da FDM uređaj u ovom radu koristi ABS polimer kao materijal za printanje, inače može koristiti i PLA polimer na bazi kukuruznog škroba koji je potpuno biorazgradiv [43].

Ocjene: FDM -1, SLA -2, SLS -2

3. Koncept se koristi s lakoćom:

**a. Koncept je važan u svakodnevnom životu te se i svakodnevno koristi.**

Ako se ovaj kriterij shvaća tako da bi nužni svakodnevni uređaji bili oni poput automobila, štednjaka i slično, 3D printer svakako ne bi pripadao toj skupini.

Ocjene: FDM -2, SLA -2, SLS -2

**b. Koncept je jednostavan za korištenje.**

Sva tri uređaja vrlo su jednostavna za korištenje, svaki ciklus započinje jednako, pripremom modela u digitalnom obliku te dodavanjem materijala za printanje. Sudeći prema tehničkoj specifikaciji vremena potrebnog za postavljanje uređaja, sva vremena su relativno kratka. SLS zbog svoje kompliciranije konstrukcije i procesa ima nešto duže vrijeme postavljanja.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 1

**c. Forma i ideja koncepta je „prirodna“.**

Autori u članku kao primjer navode sudoper koji otpadnom vodom navodnjava zasađene biljke u prostoru predviđenom za to. Povuci sličnu paralelu s 3D printerom nije baš izvedivo. Ali ključna ideja 3D printanja, što proizlazi i iz njegove same definicije, je stvaranje oblika sloj po sloj, što je i u prirodi princip svih glavnih gradivnih funkcija (poput taloženja materijala te stvaranja reljefa sloj po sloj) [6].

Ocjene: FDM 1, SLA 1, SLS 1

#### 4. Koncept oponaša rješenja iz prirode:

##### a. Koncept utjelovljuje princip cirkulirajućeg eko sustava.

Cirkulirajući eko sustav ovdje bi predstavljao da se izlazi iz sustava mogu ponovno pretvoriti u ulaze. Gledajući to iz šire slike, trebalo bi za svaku komponentu znati je li proizvedena i koristi li se po tom obliku, ali do tih podataka vrlo je teško doći. Zato se pod ovaj kriterij uzima kao glavni izlaz iz sustava isprintani predmet te nastali otpad. Prema [42] moguće je reciklirati predmete isprintane pomoću sva tri printera. Što se tiče otpada, otpad FDM uređaja jednak je i njegovom isprintanom predmetu tako da se reciklira na isti način, SLA otpad je nestvrđnuti polimer koji se kao takav može profilirati i ponovno koristiti te stvrđnuti potporni materijal koji se može reciklirati. SLS uređaj odmah može koristiti sav prah koji ostane nakon jednog ciklusa, a isprintane komponente mogu se reciklirati. Uzimajući u obzir da sami izrađeni predmeti prolaze proces recikliranja što nije izravna pretvorba izlaza u ponovne ulaze sustava, nijedan koncept u potpunosti ne zadovoljava ovaj kriterij. Ističe se SLS koji za potporne strukture ne zahtijeva proces recikliranja.

Ocjene: FDM -1, SLA -1, SLS 1

##### b. Koncept ostvaruje formu s minimalnim brojem umjetnih elemenata i nepotrebnih ukrasa.

Sva tri uređaja zadovoljavaju kriterij i tako su i cjenovno rangirani u odnosu na slične printere na tržištu. Ipak FDM se ističe kao najbolji zbog najmanjeg broja dijelova i jednostavnosti konstrukcije.

Ocjene: FDM 2, SLA 1, SLS 1

##### c. Koncept donosi „duh prirode“ u svakodnevni život.

Nijedan razmatrani koncept na nijedan način ne ukazuje da brine o okolišu ili odaje takav dojam.

Ocjene: FDM -2, SLA -2, SLS -2

### 5.1.2 LESS – Što manja potrošnja resursa

#### 1. Konceptom se podržava smanjivanje ili ujednačavanje potrošnje resursa:

##### a. Koncept ima što manje dijelova, tj. jedan dio obavlja više funkcija.

Najmanje dijelova ima SLA uređaj i to uglavnom zbog toga što se gibanje vrši samo u smjeru z osi i za to se koriste dva elektromotora. Materijal za printanje se dodaje ručno, te glavna funkcija stvrđivanja fotopolimera ostvaruje se samo LED svjetlima i ekranom. FDM uređaj, iako na oko vrlo jednostavan, ima čak pet elektromotora. SLS uređaj ima najveći broj dijelova.

Ocjene: FDM -1, SLA 2, SLS -1

**b. Koncept vodi računa o uštedi energije i resursa tijekom proizvodnje, korištenja i odlaganja.**

Nedovoljno je podataka za procjenu potrošnje resursa u bilo kojoj fazi osim u fazi korištenja. SEC [34], odnosno specifična potrošnja energije najmanja je za SLA uređaj, zatim slijedi FDM i na posljetku SLS.

Ocjene: FDM 1, SLA 2, SLS 0

**c. U konceptu je minimizirana količina potrebnog materijala u samom proizvodu i u njegovom pakiranju.**

Iako SLA uređaj ima najmanje dijelova, to naravno nije nužno vezano i sa time da je u njega utrošeno najmanje materijala. Najveći volumen materijala utrošen je na izradu kućišta, a pošto je FDM uređaj otvorenog tipa i zapravo nema kućište, njemu se dodjeljuje najveća ocjena sudeći po tome. SLA i SLS uređaji imaju takvu prirodu procesa da moraju biti u kućištu ali kod oba je npr. spremnik materijala izvan uređaja što nije uvijek slučaj kod drugih printera na tržištu. Time se uvelike smanjuju dimenzije uređaja. Pakiranje proizvoda u izravnoj je vezi s njegovim volumenom, a najmanji ima SLA printer (ali on i ima najmanji volumen radnog prostora). Ovdje se također može reći da prednost ima FDM koncept uređaja jer je jednostavno sastavljiv/rastavljiv pa se može zapakirati u dijelovima. SLS printer mora biti sklopljen od strane proizvođača i tako poslan korisniku.

Ocjene: FDM 2, SLA 1, SLS 1

**2. Konceptom se podržava optimizacija i efikasnost potrošnje resursa:**

**a. Efikasnost je poboljšana kroz ekološke metode i tehnologije.**

Nijedan tim nije izravno koristio nikakvu ekološku metodu ili tehnologiju koja bi bile okarakterizirana kao ekološka.

Ocjene: FDM -2, SLA -2, SLS -2

**b. Povećava se efikasnost proizvoda kroz nove dodatne dijelove i funkcije.**

Tim koji je konstruirao SLS uređaj osvrtao se u izvještaju na to da su neke funkcije izvedene na određen način kako bi se smanjila potrošnja resursa. Na primjer, „pull out“ sistem smanjuje vrijeme potrebno zajedan ciklus, sustav lakog pražnjenja praha omogućava da se prah ne rasipa te može ponovno upotrijebiti itd. U izvještaju od FDM uređaja spominje se regulacija potrošnje električne energije, ali nisu dani nikakvi podaci o tome.

Ocjene: FDM -1, SLA -1, SLS 1

**c. Optimizirane su glavne fizičke karakteristike (masa i volumen).**

Što se tiče iskorištenja volumena, FDM uređaj može isprintati najveći predmet, a sam uređaj ima najmanju masu, pa se definitivno može reći da zadovoljava ovu tvrdnju. SLA uređaj ima najmanji volumen radnog prostora i skoro je jednake težine kao FDM uređaj, što znači da ne zadovoljava kriterij. SLS uređaj također ima mali volumen radnog prostora i duplo je teži od druga dva uređaja te se smatra da ne zadovoljava ovaj kriterij.

Ocjene: FDM 2, SLA -1, SLS -2

3. Konceptom se podiže svijest o ekološkim aspektima upotrebe proizvoda:

**a. Koncept ukazuje na informacije o ekološki prihvatljivom ponašanju i negativnom utjecaju na okoliš.**

U nijednom izvještaju nije navedeno da uređaj promovira ekološki prihvatljivo ponašanje. Moguće je da uređaj softverski ukazuje na stvari poput utroška energije, ali to nije nikako dokumentirano.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0

**b. Koncept ima vizualne elemente i informacije koje bude ekološku svijest u korisniku.**

Slično kao i za prvu točku, za nijedan uređaj u izvještaju nema takvih podataka.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0

4. Konceptom se podržava zajedničko korištenje proizvodom od strane više korisnika:

**a. Koncept sadrži kanal za komunikaciju korisnika i prikuplja njihove povratne informacije kako bi se mogao poboljšati.**

Nema adekvatnih podataka kojima bi se moglo odgovoriti na kriterij. Iako su neke tehničke specifikacije preuzete od komercijalnih uređaja kao smjernica za koncepte iz izvještaja, ne bi bilo korektno preuzimati ovakav podatak od specifičnih tvrtki.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0

**b. Koncept ima takvu formu da omogućuje više korisnika da dijele proizvod.**

3D printer generalno je takav da je jednostavan za korištenje, potrebni početni resursi su materijal za printanje i model u digitalnom obliku. Pošto je ovdje definirano da ga koriste kućanstva, tzv. maker space-ovi, škole i fakulteti jasno je da zadovoljava ovaj kriterij.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 2

### 5.1.3 LONG – Što dulji životni vijek proizvoda

1. Koncept je konstruiran tako da ima dulji životni vijek i veću pouzdanost pri radu

**a. Koncept je izrađen tako da se može dugo koristiti korištenjem čvrstih i pouzdanih materijala i tehnologija.**

Općenito je jako teško naći podatak o životnom ciklusu 3D printera jer većina tvrtki koje ih proizvode to drže tajnom. Ovaj kriterij naravno uvelike ovisi i o tome kako i koliko će se printer koristiti. Ako uzmemo da je ovo printer za osobne hobi korisnike, škole i fakultete, može se reći da uređaj neće biti u 100-postotnoj upotrebi. Iz navedenih razloga teško je dati dobru procjenu životnog vijeka pa je svim konceptima dodijeljena ocjena nula.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0.

**b. Koncept je izrađen od kvalitetnih materijala, a struktura i izdržljivost mu je takva da se minimiziraju trošenja i deformacije.**

Što se tiče materijala od kojih su izrađene komponente printera, svi su dosta slični – elektromotori, prijenosnici snage i gibanja (zupčani, vodilice) od čelika, kućišta od polimera. Očigledno je da su SLA i SLS uređaji strukturom otporniji na deformacije od FDM-a jer imaju robusnije i čvršće kućište. Kod FDM-a također treba pripaziti na mlaznicu koja se može često začepiti i prouzročiti kvar [44]. Kod SLA je LCD ekran potrošni dio te će se sigurno morati mijenjati nakon prosječno 500 sati rada [36].

Ocjene : FDM -1, SLA -1, SLS 1

**c. Koncept odaje dojam korisniku da je izdržljiv i pouzdan.**

Ovdje bi se definitivno moglo reći da se tvrdnja u potpunosti odnosi na SLS uređaj više od drugih. SLA uređaj također, ali u manjoj mjeri. Dok FDM uređaj ne ulijeva

povjerenje korisnika o izdržljivosti jednostavno zbog toga što „nema kućište“ te je sve što se odvija vidljivo korisniku, a to znači bučno i naglo što bi korisnika moglo potencijalno zabrinjavati i asocirati na nepravilan rad.

Ocjene: FDM -2, SLA 1, SLS 2

2. Koncept ima mogućnost popravka i veća obnovljivost proizvoda za dulji životni vijek:

**a. Moguća je laka izmjena dijelova i nadogradnja kada proizvod zastari ili bude neupotrebljiv.**

Gledajući konstrukciju i specifikacije uređaja, logično je zaključiti da FDM uređaj nosi najveću ocjenu prema ovom kriteriju. Ekstruder koji je nositelj glavne funkcije, vrlo se lagano može zamijeniti s u potpunosti novim unaprijeđenim. Kod FDM uređaja nije potrebno rastavljati nikakvo kućište kako bi se došlo do komponenti koje se trebaju mijenjati. SLA uređaj također ima prilično jednostavan način zamjene LCD ekrana. SLS uređaj je kompliciranije konstrukcije, pogotovo sustav vođenja laserske zrake koji mora biti vrlo precizno kalibriran pa nije preporučljivo nestručnim osobama da samostalno izvode bilo kakve izmjene.

Ocjene: FDM 2, SLA 1, SLS -2

**b. Omogućeno je lagano i pristupačno čišćenje.**

FDM je najpristupačniji što se tiče čišćenja, ali zahtjeva vrlo često čišćenje mlaznice kako bi se izbjeglo njeno začepeljivanje. SLA uređaj zahtjevan je za čišćenje zbog materijala koji se koristi – fotopolimera koji je u tekućem obliku. Treba biti vrlo oprezan prilikom čišćenja ostataka nestvrdućeg fotopolimera jer je opasna ako dođe u kontakt s kožom. SLS uređaj treba čistiti od ostataka praha nakon svakog korištenja.

Ocjene: FDM 1, SLA -1, SLS -1

**c. Koncept je jednostavan za sastavljanje i rastavljanje.**

Prema danoj tehničkoj specifikaciji o vremenu potrebnom za sastavljanje/rastavljanje proizvoda, FDM uređaj najbolje zadovoljava kriterij, SLA nešto lošije, a SLS nikako jer ga nije ni preporučljivo samostalno sastavljati/rastavljati zbog složenosti laserskog sustava.

Ocjene: FDM 2, SLA 1, SLS -2

3. Koncept podržava ideju privrženosti korisnika proizvodu:

**a. Koncept ima zanimljive funkcije koje će zainteresirati korisnika i ugodan je za korištenje.**

Svaki od ovih uređaja zasigurno se može okarakterizirati kao zanimljiv te se nijedan ne ističe nekom posebnom funkcijom. Proces je generalno jednak: učitavanje CAD podataka u softver koji priprema model za print (dijeljenje modela na slojeve, modeliranje potporne strukture), odabira željenih postavki (temperatura, debljina sloja itd.) te sami proces printanja. Što se tiče ugodnosti korištenja, sva tri uređaja mogu uzrokovati opasnosti za zdravlje. Tako je za FDM potrebno ventilirati prostoriju zbog emisija čestica, u radu s SLA uređajem potrebno je nositi zaštitnu opremu i također ventilirati prostoriju, rukovanje prahom u SLS procesu također zahtijeva nošenje zaštitne opreme te ventilaciju.

Ocjene: FDM 1, SLA -1, SLS -1

**b. Koncept omogućava korisniku izražavanje vlastitog ukusa, stvaranje iskustava i privrženosti te personaliziranje uređaja.**

Svaki od tri uređaja ispunjava ovaj kriterij jer je kreativnost u izradi predmeta gotovo neograničena.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 2

**c. Koncept budi u korisniku afekciju te želju za zaštitom uređaja.**

Također kriterij u potpunosti vrijedi za sva tri uređaja upravo iz razloga postavljenog prošlim kriterijem. Korisnik će uživati u predmetima koje je sam izradio i osmislio pomoću odabranog 3D printera i tako stvarati uspomene i afekciju prema uređaju.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 2

4. Konceptom se implementiraju poznata (tradicionalna) rješenja koja su još uvijek dobra

**a. Koncept koristi već poznata rješenja koja su dobra sama po sebi.**

FDM i SLA poprilično su već dvije komercijalizirane tehnologije za razliku od SLS koji je dosada bio primarno korišten u industrijske svrhe, a stolne (desktop) izvedbe počele su se vrlo nedavno pojavljivati na tržištu. Koncepti za FDM i SLA promatrani u ovom radu koriste već dobro istražena rješenja. Kod SLS uređaja uvedene su neke inovacije poput sustava doziranja praha za koje nema empirijskih podataka da je implementacija uspješna.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 0



**b. Koncept sazrijeva s vremenom te zadržava vrijednost bez obzira na mijenjajuće trendove.**

Teško je sa sigurnošću predvidjeti kako će se trendovi mijenjati, ali nedvojbeno se može reći da obzirom na dosadašnji rast i razvoj tehnologije 3D printanja, tempo unaprjeđivanja tehnologije veoma je brz te će iz godine u godinu tržište preplavljivati novije verzije uređaja, pogotovo za SLS tehnologiju koja je tek nedavno ušla na tržište komercijalnih 3D printera.

Ocjene: FDM -1, SLA -1, SLS -2

#### **5.1.4 LAST – Što češće korištenje proizvoda**

1. Koncept podržava rastavljljivost i reciklabilnost.

**a. Komponente se mogu reciklirati ili ponovno koristiti u drugim proizvodima.**

Za sva tri uređaja može se reći da su sastavljeni od malog broja komponenti te su one relativno jednostavne. Svi koriste više električnih stepper motora za koje se navodi da su oko 90% reciklabilni [45] na kraju životnog vijeka koji se kreće između 10000 i 20000 sati te se vrlo lako mogu prenamijeniti jer imaju široku primjenu pogotovo među hobi korisnicima. Prijenosnici gibanja (zubne letve, navojna vretena i vodilice) također su dužeg životnog vijeka te s potencijalom prenamjene. LCD ekran kao kritična komponenta u SLA printeru, jer se mora često mijenjati, još uvijek nema utvrđen točan postupak i infrastrukture potrebne za recikliranje [46]. U FDM printeru cijeli ekstruder se obično može vratiti proizvođaču na kraju životnog vijeka ili prenamijeniti za drugi printer. Kod SLS printera postoji problematičan sustav zrcala koja se ne mogu reciklirati jer zrcala inače imaju premaz koji njihovo recikliranje znatno otežava, ali možda ih je moguće koristiti u drugom proizvodu.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 1

**b. U konceptu se koriste reciklirani materijali ili već korištene komponente ako to ne narušava kvalitetu.**

O korištenju recikliranih materijala za proizvodnju komponenti ili korištenja starih ovdje nije bilo moguće doći do podataka, a pretpostavke na toj razini nema smisla dovoditi te je stoga svim konceptima dodijeljena ocjena nula.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0

**c. Koncept je lako rastavljiv do razine recikliranja.**

Kako se vidi iz tehničkih specifikacija, prema vremenu rastavljanja uređaja, FDM uređaj uvjerljivo prednjači u ovom kriteriju. Ima najmanje komponenti, praktički nema kućište te su sve komponente jednostavne i lako rastavljive. SLA je malo teže rastavljiv zbog robusnijeg kućišta te više dijelova (npr. samo LCD ekran se teško rastavlja do razine recikliranja). SLS printer najteže je rastaviti od sva tri uređaja.

Ocjene: FDM 2, SLA -1, SLS -2

**d. U konceptu je lagano prepoznati materijale komponenti u svrhu pravilnog odlaganja i recikliranja.**

Ova točka podrazumijevala bi da komponente imaju oznake od kojeg materijala su napravljene, npr. oznake za vrstu plastike, ali do ovog podatka se nije moglo doći te se dodjeljuje ocjena 0 sva tri koncepta.

Ocjene: FDM 0, SLA 0, SLS 0

**2. Koncept podržava multifunkcionalnost:**

**a. Koncept se može koristiti na druge načine nakon što završi svoj životni vijek sa primarnom funkcijom.**

Ovaj kriterij ne bi bilo uredu preslikati u doslovnom smislu na primjer 3D printera kojem je upravo najveća prednost da može proizvesti skoro pa bilo kakav proizvod koji korisnik zamisli. Ne samo to, već svaki od ta 3D printera, osim materijalima koji su navedeni u tehničkim specifikacijama, može printati i u drugim materijalima te postizati različita kemijska, mehanička i fizikalna svojstva. Drugo je promatrati vrlo specifičan uređaj kao što je npr. perilica posuđa kojoj je jedina svrha upravo pranje posuđa te bi njoj bila dodijeljena negativna ocjena prema ovom kriteriju. Iz navedenih razloga, sva tri koncepta trebala bi dobiti najvišu ocjenu.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 2

**b. Određene komponente omogućuju multifunkcionalnost.**

Komponente koje omogućuju multifunkcionalnost bi bile npr. kolut za namatanje materijala na FDM printeru koji svojom lakom izmjenjivosti potiče multifunkcionalnost u smislu raznovrsnosti materijala. Svi printeri imaju mogućnost printanja u različitim debljinama slojeva što je omogućeno i softverski i hardverski komponentama. SLS uređaj također ima lako zamjenjive komore sa prahom i podlogu koja je podesiva pa štedi prah ovisno o veličini printa.

Ocjene: FDM 1, SLS 2, SLA 0

**c. Koncept ima funkcije koje se mogu koristiti u više svrha.**

SLS navodi multifunkcionalnost svog „pull out“ sistema i podesive podloge kako bi se uštedio prah i povećala produktivnost. Kod SLA se spominje iskorištavanje latentne topline koja se generira u procesu stvrdnjavanja za zagrijavanje cijele komore kako ne bi bilo potrebe za dodatnom grijalicom.

Ocjene: FDM 0, SLA 1, SLS 2

3. Korisnik može prilagoditi proizvod svojim potrebama tijekom faze korištenja:

**a. Korisnik može prilagoditi proizvod zbog različitih zahtjeva tijekom životnog vijeka.**

Ovdje se može govoriti o izmjeni materijala za printanje koja sva tri zadovoljavaju, sva tri mogu printati različite preciznosti itd. Različit zahtjev tijekom životnog vijeka mogao bi biti povećanje produktivnosti gdje bi pobijedili SLA i SLS uređaji jer printaju više dijelova odjednom brže nego FDM.

Ocjene: FDM 1, SLA 2, SLS 2

**b. Moguće je nadograditi struktura proizvoda.**

FDM uređaj ovdje definitivno ima najviše prostora jer je sam po sebi modularan te se najvažniji komponenta (ekstruder) vrlo lako zamijeniti i unaprijediti na bolji. Kod SLA uređaja može se (i mora) promijeniti LCD ekran te instalirati jače snage i ubrzati proces. SLS uređaj trpi najmanje prilagodbi u životnom ciklusu zbog veće kompleksnosti konstrukcije. Sve uređaje je moguće opremiti dodatnim senzorima, ali bitno je staviti naglasak da se sve prilagodbe najlakše izvode na FDM uređaju.

Ocjene: FDM 2, SLA 1, SLS 0

4. Konceptom se podržava ideja univerzalnosti implementiranih rješenja.

**a. Koncept ima vrijednost za cijelu zajednicu u kojoj se koristi.**

3D printer sam po sebi veliki je doprinos za korisnika i zajednicu u kojoj se koristi. Sa sigurnošću se može reći da je vrlo aktualan i atraktivan uređaj u posljednjih par godina.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 2

**b. Koncept je fleksibilan u upotrebi kako bi zadovoljio korisnikove raznovrsne zahtjeve.**

Kao što je već prije navedeno, može se printati u različitim materijalima i rezolucijama. Globalno gledajući ovaj kriterij, 3D printer je fleksibilan uređaj koji printa što god korisnik zamisli.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 2

**c. Koncept je takav da ga svi mogu jednostavno razumjeti i koristiti.**

Za korištenje desktop 3D printera koji se u ovom radu obrađuju, nisu potrebna posebna znanja i vještine. Potrebno je znati modelirati u nekom CAD softveru a printerski softver određuje sav ostali posao. Samo korisničko sučelje printera je intuitivno i jednostavno na svakom od tri uređaja. Prednost bi se možda dala FDM i SLA uređaju naspram SLS uređaja pošto je sami proces malo kompleksniji.

Ocjene: FDM 2, SLA 2, SLS 1

### 5.1.5 Rangiranje koncepata

Dodjeljivanje ocjena prema svakom kriteriju provodilo se prema tablici 2, a rezultati su prikazani u tablici 7.

Na kraju je izračunat ukupni rezultat jednostavnim zbrajanjem ocjena za svaki pojedini uređaj.

**Tablica 7 Rangiranje prema kriterijima**

|   | Grupa kriterija   | Kriterij   | Ocjena |     |     |
|---|---|--|--------|-----|-----|
|   |   |  | FDM    | SLA | SLS |
| LOW – Što manji utjecaj na prirodu i okoliš | Koncept je čist i siguran   | Koncept omogućuje korisniku čist i zdrav okoliš  | -1     | -1  | -2  |
|   |   | Koncept smanjuje zagađenost tijekom cijelog životnog ciklusa                             | -1     | -2  | -1  |
|   |   | U konceptu se koristi sirovi materijal koji je ekološki prihvatljiv                      | 1      | -1  | -2  |
|   |   | U konceptu su smanjene dodatne završne obrade  | -1     | -2  | 1   |
|   | Konceptom se podržava obnavljanje prirodnih resursa nakon upotrebe i eksploatacije                      | Koncept koristi energiju koja je dobivena iz prirodnih cikličkih procesa                 | 0      | 0   | 0   |
|   |   | Koncept sam po sebi djeluje pozitivno na okoliš  | -2     | -2  | -2  |
|   |   | U konceptu se koriste biorazgradivi materijali i maksimiziraju njihove pozitivne osobine | -1     | -2  | -2  |
|   | Koncept se koristi s lakoćom – spaja okoliš, koncept i svakodnevne životne aktivnosti u skladnu cjelinu | Koncept je važan u svakodnevnom životu te se i svakodnevno koristi                       | -2     | -2  | -2  |
|   |   | Koncept je jednostavan za korištenje   | 2      | 2   | 1   |
|   |   | Forma i ideja koncepta je „prirodna“   | 1      | 1   | 1   |

|  | Grupa kriterija   | Kriterij  | Ocjena |     |     |
|--|---|---|--------|-----|-----|
|  |   |   | FDM    | SLA | SLS |
| LESS – Što manja potrošnja resursa                                   | Koncept oponaša rješenja iz prirode   | Koncept utjelovljuje princip cirkulirajućeg eko sustava   | -1     | -1  | 1   |
|  |   | Ostvaruje formu s minimalnim brojem umjetnih elemenata i nepotrebnih ukrasa                       | 2      | 1   | 1   |
|  |   | Koncept donosi „duh prirode“ u svakodnevni život  | -2     | -2  | -2  |
|  | Konceptom se podržava smanjivanje ili ujednačavanje potrošnje resursa                             | Koncept ima što manje dijelova, tj. jedan dio obavlja više funkcija                               | -1     | 2   | -1  |
|  |   | Koncept vodi računa o uštedi energije i resursa tijekom proizvodnje, korištenja i odlaganja       | 1      | 2   | 0   |
|  |   | U konceptu je minimizirana količina potrebnog materijala u samom proizvodu i u njegovom pakiranju | 2      | 1   | 1   |
|  | Konceptom se podržava optimizacija i efikasnost potrošnje resursa                                 | Efikasnost je poboljšana kroz ekološke metode i tehnologije                                       | -2     | -2  | -2  |
|  |   | Povećava se efikasnost proizvoda kroz nove dodatne dijelove i funkcije                            | -1     | -1  | 1   |
|  |   | Optimizirane su glavne fizičke karakteristike (masa i volumen)                                    | 2      | -1  | -2  |
| Konceptom se podiže svijest o ekološkim aspektima upotrebe proizvoda | Koncept ukazuje na informacije o ekološki prihvatljivom ponašanju i negativnom utjecaju na okoliš | 0   | 0      | 0   |     |
|  | Koncept ima vizualne elemente i informacije koje bude ekološku svijest u korisniku                | 0   | 0      | 0   |     |

|   | Grupa kriterija   | Kriterij  | Ocjena |     |     |
|---|---|---|--------|-----|-----|
|   |   |   | FDM    | SLA | SLS |
| LONG – Što dulji životni vijek i faza eksploatacije proizvoda | Konceptom se podržava zajedničko korištenje proizvodom od strane više korisnika   | Koncept sadrži kanal za komunikaciju korisnika i prikuplja njihove povratne informacije                                       | 0      | 0   | 0   |
|   |   | Koncept ima takvu formu da omogućuje više korisnika da dijele proizvod  | 2      | 2   | 2   |
|   | Koncept je konstruiran tako da ima dulji životni vijek i veću pouzdanost pri radu | Koncept je izrađen tako da se može dugo koristiti korištenjem čvrstih i pouzdanih materijala i tehnologija                    | 0      | 0   | 0   |
|   |   | Koncept je napravljen od kvalitetnih materijala. Struktura i izdržljivost mu je takva da se minimizira trošenje i deformacije | -1     | -1  | 1   |
|   |   | Koncept odaje dojam korisniku da je izdržljiv i pouzdan   | -2     | 1   | 2   |
|   | Mogućnost popravka i veća obnovljivost proizvoda za dulji životni vijek           | Moguća je laka izmjena dijelova i nadogradnja kada proizvod zastari ili bude neupotrebljiv                                    | 2      | 1   | -2  |
|   |   | Omogućeno je lagano i pristupačno čišćenje  | 1      | -1  | -1  |
|   |   | Jednostavan je za sastavljanje i rastavljanje te laku nadogradnju i popravak  | 2      | 1   | -2  |
|   | Koncept podržava ideju privrženosti korisnika proizvodu                           | Ima zanimljive funkcije koje će zainteresirati korisnika i ugodan je za korištenje  | 1      | -1  | -1  |

|   | Grupa kriterija   | Kriterij  | Ocjena   |     |     |   |
|---|---|---|--|-----|-----|---|
|   |   |   | FDM  | SLA | SLS |   |
|   |   | Omogućava korisniku izražavanje vlastitog ukusa, stvaranje iskustava i privrženosti te personaliziranje uređaja | 2  | 2   | 2   |   |
|   |   | Budi u korisniku afekciju te želju za zaštitom uređaja  | 2  | 2   | 2   |   |
|   |   | Konceptom se implementiraju poznata (tradicionalna) rješenja koja su još uvijek dobra                           | 2  | 2   | 0   |   |
|   |   | Sazrijeva s vremenom te zadržava vrijednost bez obzira na mijenjajuće trendove                                  | -1   | -1  | -2  |   |
|   | LAST – Dulji korisni životni vijek proizvoda i njegovih komponenata | Koncept podržava rastavlјivost i reciklabilnost   | Komponente se mogu reciklirati ili ponovno koristiti u drugim proizvodima                  | 2   | 2   | 1 |
|   |   |   | Koristiti reciklirane materijale ili već korištene komponente ako to ne narušava kvalitetu | 0   | 0   | 0 |
| Proizvod je lako rastavlјiv do razine recikliranja                                    |   |   | 2  | -1  | -2  |   |
| Lagano je prepoznati materijale komponenti u svrhu pravilnog odlaganja i recikliranja |   |   | 0  | 0   | 0   |   |
| Koncept podržava multifunkcionalnost proizvoda  |   | Koncept se može koristiti na druge načine nakon što završi svoj životni vijek sa primarnom funkcijom            | 2  | 2   | 2   |   |
|   |   | Određene komponente omogućuju multifunkcionalnost   | 1  | 2   | 0   |   |
|   |   | Ima funkcije koje se mogu koristiti u više svrha  | 0  | 1   | 2   |   |



|  | Grupa kriterija  | Kriterij   | Ocjena |     |     |
|--|--|--|--------|-----|-----|
|  |  |  | FDM    | SLA | SLS |
|  | Korisnik može prilagoditi proizvod svojim potrebama tijekom faze eksploatacije proizvoda | Korisnik prilagođava proizvod zbog različitih zahtjeva tijekom životnog vijeka                 | 1      | 2   | 2   |
|  |  | Moguća je nadogradnja strukture proizvoda i njene varijacije                                   | 2      | 1   | 0   |
|  | Konceptom se podržava ideja univerzalnosti implementiranih rješenja                      | Proizvod ima univerzalni i lokalni identitet   | 2      | 2   | 2   |
|  |  | Koncept je fleksibilan u upotrebi kako bi zadovoljio korisnikove raznovrsne potrebe i zahtjeve | 2      | 2   | 2   |
|  |  | Koncept je takav da ga svi mogu jednostavno razumjeti i koristiti                              | 2      | 2   | 1   |
| (2) - Jako pozitivna korelacija; (1) - Pozitivna korelacija; (0) - Neutralna korelacija; (-1) - Negativna korelacija; (-2) - Jako negativna korelacija |  |  |        |     |     |
| Ukupno   |  |  | 22     | 12  | 0   |

Iz tablice 7 može se iščitati da je FDM uređaj najviše ekološki prihvatljiv prema smjernicama i dodijeljenim ocjenama. Neke od smjernica koje u potpunosti zadovoljava puno bolje od drugih koncepta su minimiziranje količina potrebnog materijala u samom proizvodu i u njegovom pakiranju, mogućnost lake izmjene dijelova i nadogradnje kada proizvod zastari ili bude neupotrebljiv, jednostavnost sastavljanja i rastavljanja.

Slijedi SLA uređaj sa 12 bodova.

Najmanje ekološki prihvatljiv uređaj prema ovoj metodi ispada SLS uređaj. Takav rezultat dobiven je ponajviše jer je imao jake negativne korelacije u smjernicama poput korištenja sirovog materijala koji je ekološki prihvatljiv, optimiziranja glavnih fizičkih karakteristika (masa i volumen), mogućnost lake izmjene dijelova i nadogradnje kada proizvod zastari ili bude neupotrebljiv, jednostavnost sastavljanja i rastavljanja.

Tablica 8 Ukupan rezultat *Eco Design Value* metode

| Koncept | Broj jako pozitivnih korelacija '2' | Broj pozitivnih korelacija '1' | Broj neutralnih korelacija '0' | Broj negativnih korelacija '-1' | Broj jako negativnih korelacija '-2' | Ukupan zbroj ocjena |
|---------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| FDM     | 17                                  | 8                              | 8                              | 9                               | 5                                    | 22                  |
| SLA     | 14                                  | 8                              | 7                              | 10                              | 7                                    | 12                  |
| SLS     | 19                                  | 10                             | 11                             | 4                               | 12                                   | 0                   |

Iz tablice 8 bitno je istaknuti broj jako pozitivnih korelacija '2' i broj jako negativnih korelacija '-2'. Može se reći da svi koncepti imaju podjednako jako pozitivnih korelacija (SLS neznatno manje) te na temelju toga zaključiti da nisu bile presudan faktor. Nasuprot tome, SLS uređaj ima dvostruko više jako negativnih korelacija u usporedbi s FDM uređajem što uzrokuje razliku od čak 14 bodova u ukupnom rezultatu. Broj negativnih korelacija '-2' značajan je faktor koji presuđuje u tome.

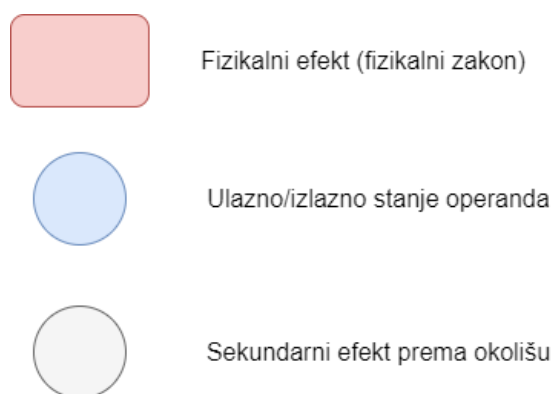
## 5.2 Ekotransformabilnost metoda

Prema opisu iz poglavlja 3.2 provedena je *Ekotransformabilnost* metoda prema već spomenutim kriterijima:

1. Ekoefektivnost pretvorbi energije i signala u tehničkom procesu
2. Broj pretvorbi energije i signala
3. Ekološka prihvatljivost sekundarnih efekata na okoliš
4. Broj sekundarnih efekata na okoliš
5. Broj promjena agregatnog stanja materijala u tehničkom procesu.

Ključni potrebni podaci za provođenje ove metode su funkcijske dekompozicije koje su preuzete iz studentskih izvještaja opisanih u poglavlju 4 na temelju kojih su se generirali lanci fizikalnih efekata te sekundarni efekti na okoliš. Lanci fizikalnih efekata koji su prikazani u sljedećim poglavljima su interpretacija koncepata preuzetih iz [28], [29], [30] i njihovih funkcijskih struktura.

Legenda za bolje razumijevanje lanaca fizikalnih efekata prikazana je na slici 21.

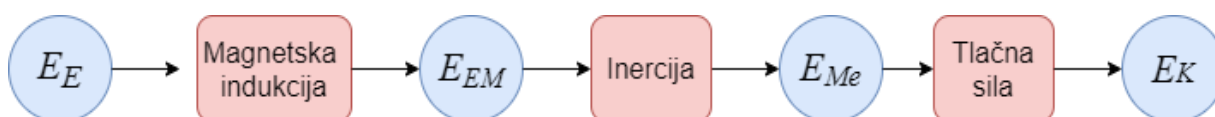


Slika 21 Legenda za lance fizikalnih efekata

### 5.2.1 Uređaj temeljen na FDM tehnologiji (engl. Fused Deposition Modelling)

Za FDM uređaj izrađeni su sljedeći lanci fizikalnih efekata.

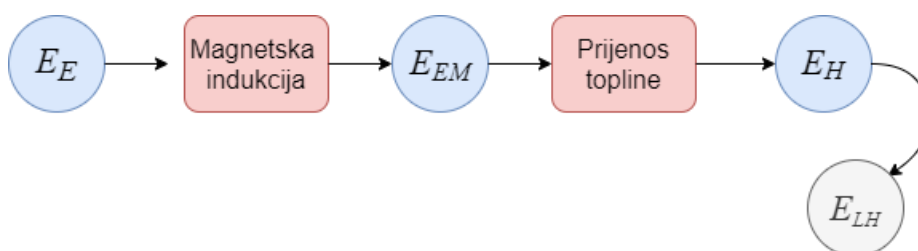
**Lanac fizikalnih efekata L1** (dostava materijala):



Slika 22 FDM - Lanac fizikalnih efekata L1

Unutar glave ekstrudera, elektromotor pokreće mehanizam koji istiskuje materijal. Sekundarni efekt na okoliš su vrlo sitne čestice materijala koje nastaju kroz cijeli proces printanja pa su obuhvaćene u okviru ovog lanca.

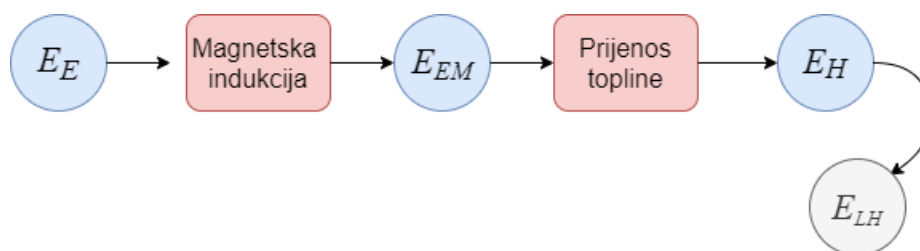
**Lanac fizikalnih efekata L2** (taljenje materijala):



Slika 23 FDM - Lanac fizikalnih efekata L2

Materijal se tali fizikalnim principom zagrijavanja indukcijom unutar glave ekstrudera.

**Lanac fizikalnih efekata L3** (zagrijavanje podloge za printanje):



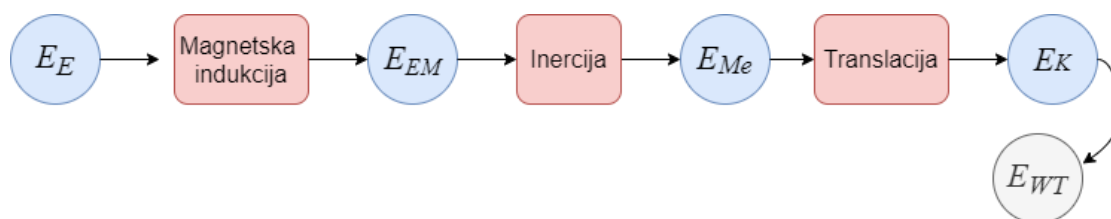
Slika 24 FDM - Lanac fizikalnih efekata L3

Zagrijavanje podloge za printanje ostvaruje se istim lancem fizikalnih efekata kao i taljenje materijala.

**Lanac fizikalnih efekata L4** (pomicanje po z osi):

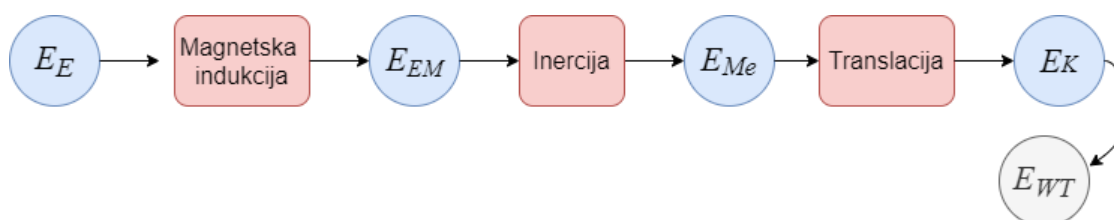
Pomak po z osi ostvaruje se pomoću dva električna stepper motora i dva navojna vretena.

a) Lanac fizikalnih efekata L4a za jedan električni stepper motor:



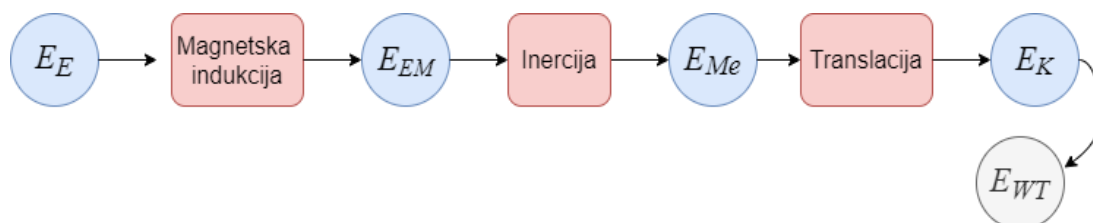
Slika 25 FDM - Lanac fizikalnih efekata L4a

b) Lanac fizikalnih efekata L4b za drugi električni stepper motor:



Slika 26 FDM - Lanac fizikalnih efekata L4b

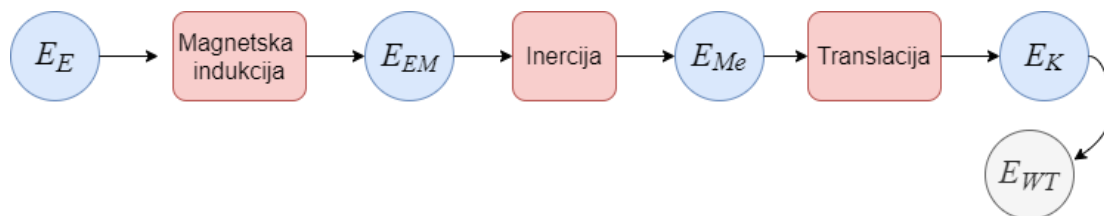
**Lanac fizikalnih efekata L5** (pomicanje po y osi):



Slika 27 FDM - Lanac fizikalnih efekata L5

Pomak po  $y$  osi ostvaruje se pomoću električnog stepper motora i zupčanog prijenosa.

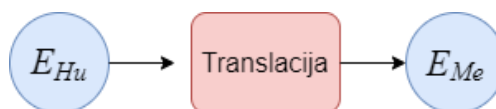
**Lanac fizikalnih efekata L6** (pomicanje po  $x$  osi):



**Slika 28 FDM - Lanac fizikalnih efekata L6**

Pomak po  $x$  osi ostvaruje se pomoću električnog stepper motora i zupčanog prijenosa.

**Lanac fizikalnih efekata L7** (završna obrada izratka):



**Slika 29 FDM - Lanac fizikalnih efekata L7**

Iako ova funkcija nije navedena u funkcijskoj dekompoziciji iz studentskog izvještaja, zaključeno je kako ju se mora uzeti u obzir jer je neizbježan dio procesa pri svakom korištenju. Potporni materijal uklanja se ručno.

Iz vrednovanja prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala zaključuje se da su kritični lanci fizikalnih efekata L2, L3 i L7, odnosno taljenje materijala, grijanje podloge za printanje i uklanjanje potpornog materijala. Zaključak je opravdan činjenicom da je opće poznato da je prijenos topline kao takav, energetski nepovoljan fizikalni proces. Bilo bi korisno kada bi se moglo razlikovati između L2 i L3 pošto je temperatura u procesu taljenja, na samoj mlaznici, više no duplo veća od temperature zagrijavanja podloge. Ali isto tako, latentna toplinska energija brže se oslobađa kroz višestruko veću površinu podloge u usporedbi s glavom ekstrudera.

Unatoč korištenju četiri električna stepper motora, pokazalo se da pozicioniranje nije kritična funkcija u energetskom pogledu.

Ekoefektivnost pretvorbi energije i signala određuje se prema [4] kako je opisano u poglavlju 3.2.1.

Za bolje razumijevanje, opisano je kako je dobivena ukupna dobrota za lanac fizikalnih efekata 1. Iz slike 22 vidi se da se unutar lanca odvijajtri promjene oblika energije. Električna energija

pretvara se u elektromagnetsku, zatim u mehaničku i na kraju u kinetičku. Prema [4] dodjeljuju se faktori ekoefektivnosti pretvorbe i prikazanu su u tablici 9.

**Tablica 9 Primjer određivanja dobrote lanaca fizikalnih efekata**

| Pretvorba energije                              | Oznaka                      | Faktor ekoefektivnosti pretvorbe [4] |
|---|-----------------------------|--------------------------------------|
| Električna energija u elektromagnetsku energiju | $E_E \rightarrow E_{EM}$    | -0,08                                |
| Elektromagnetska energija u mehaničku energiju  | $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ | -0,68                                |
| Mehanička energija u kinetičku energiju         | $E_{Me} \rightarrow E_K$    | 0,28                                 |
|   |                             | Zbroj: -0,48                         |

Jasno je da faktori s negativnim predznakom označavaju nepovoljnu pretvorbu (pretvorbu višeg oblika energije u niži), a faktori s pozitivnim predznakom povoljnu pretvorbu.

**Tablica 10 Tablica za vrednovanje FDM koncepta prema Ekotransformabilnost metodi**

| Oznaka  | Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoefektivnosti pretvorbi energije i signala                                      | Dobrota (zbroj) |
|---------|--|-----------------|
| L1      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$                                 | -0,48           |
| L2      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07); E_H \rightarrow E_{LH} = (-3)$                                      | -4,15           |
| L3      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07); E_H \rightarrow E_{LH} = (-3)$                                      | -4,15           |
| L4      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28); E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
|         | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28); E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
| L5      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28); E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
| L6      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08); E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68); E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28); E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
| L7      | $E_{Hu} \rightarrow E_{Me} = (-4,94)$  | -4,94           |
| Ukupno: | ~21 transformacija < 0; ~5 transformacija > 0  | -17,48          |

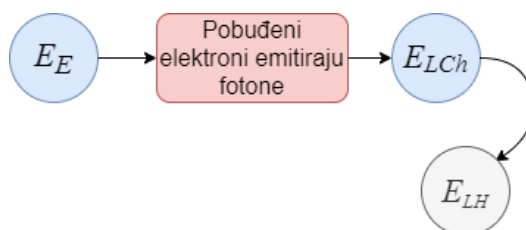
| Oznaka   | Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš  | Dobrota (zbroj) |
|--|---|-----------------|
| <i>S.Ef1</i><br>( <i>E<sub>A</sub></i> )                             | Ekstrudirani materijal + sitne toksične čestice → indirektno odlaganje / ispuštanje otpada/emisija srednje toksičnosti  | -6              |
| <i>S.Ef2</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> )                            | Latentna toplinska energija → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti   | -3              |
| <i>S.Ef3</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> )                            | Latentna toplinska energija → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti   | -3              |
| <i>S.Ef4</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> ) | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6              |
|  | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6              |
| <i>S.Ef5</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> ) | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6              |
|  | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6              |
| <i>S.Ef6</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> ) | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6              |
| <i>S.Ef7</i><br>( <i>E<sub>A</sub></i> )                             | Otpadni potporni materijal → reciklabilan   | +6              |
| Ukupno:  | ~12 sekundarnih efekata na okoliš (1 <i>S.Ef</i> > 0, 11 <i>S.Ef</i> < 0)   | -30             |

Vibracije i buka uzrokovane radom električnih stepper motora ne utječu samo na ljudski faktor, već se indirektno tome pripisuje i nepreciznost izrade modela što u pojedinim slučajevima uzrokuje škart, odnosno generiranje otpada. ABS je reciklabilan materijal te se sav otpad može reciklirati [47].

Opet je sekundarnim efektima teško definirati razliku između L2 i L3 jer sljedeći stupanj bi bio znatan doprinos jednoj kategoriji utjecaja na okoliš što je neistinito.

## 5.2.2 Uređaj temeljen na tehnologiji stereolitografije (engl. *Stereolithography - SLA*)

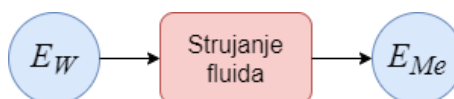
**Lanac fizikalnih efekata L1** (stvrđnjavanje fotopolimera):



**Slika 30 SLA- Lanac fizikalnih efekata L1**

U konceptu je kao način stvrđnjavanja polimera izabran sustav s UV LED svjetlima koje propušta LCD ekran kod kojeg se fotopolimer periodički izlaže zrakama. Ta energetska transformacija opisana je kao pretvorba električne energije u latentnu kemijsku energiju. Latentna kinetička i kemijska energija predstavljaju stvaranje toksičnih para od procesa fotopolimerizacije koje se oslobađaju, te će se svrstati u sekundarne efekte na okoliš.

**Lanac fizikalnih efekata L2** (ventiliranje):



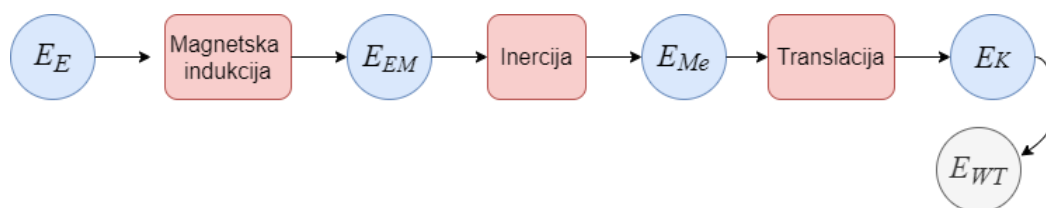
**Slika 31 SLA- Lanac fizikalnih efekata L2**

Ventiliranje uređaja u okoliš odvodi latentnu toplinsku energiju te toksične pare nastale zbog procesa fotopolimerizacije.

**Lanac fizikalnih efekata L3** (pomicanje po z osi):

Pomak po z osi ostvaruje se pomoću dva električna stepper motora i linearnih vodicica.

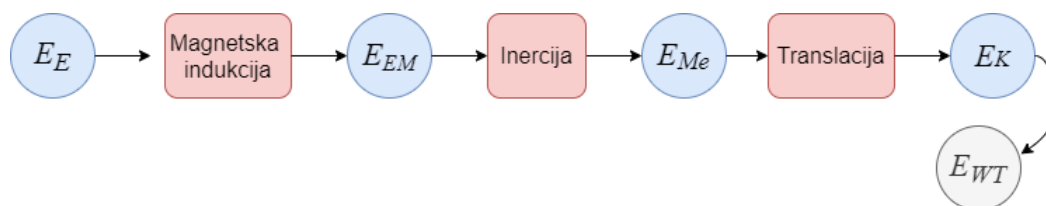
a) Lanac fizikalnih efekata L3a za jedan električni stepper motor



**Slika 32 SLA- Lanac fizikalnih efekata L3a**

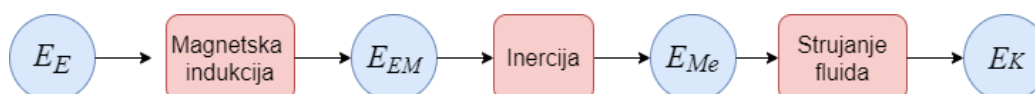


b) Lanac fizikalnih efekata L3b za jedan električni stepper motor



Slika 33 SLA- Lanac fizikalnih efekata L3b

Lanac fizikalnih efekata L4 (dostava materijala)

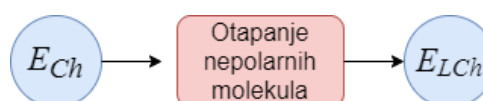


Slika 34 SLA - Lanac fizikalnih efekata L4

Dostava materijala iz spremnika (koji se nalazi izvan samog uređaja), vrši se pomoću elektromagnetnog ventila do posude za fotopolimer.

Lanac fizikalnih efekata L5 (skidanje potpornog materijala):

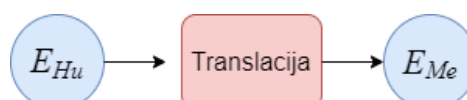
a) Lanac fizikalnih efekata L5a (skidanje viška smole alkoholnim otapalom)



Slika 35 SLA - Lanac fizikalnih efekata L5a

Svaki izradak mora se staviti u alkoholnu kupku (najčešće izopropilni alkohol) kako bi se otopio višak nestvrdnutog fotopolimera. Iako tipičan fotopolimer koji se koristi kod SLA uređaja nije topiv u vodi, danas se na tržištu pojavljuju drugi materijali koji su topljivi u vodi, ali u okviru ovog rada zadržat će se na standardnom fotopolimeru koji zahtjeva alkoholnu kupku.

b) Lanac fizikalnih efekata L5b (završna obrada izratka):



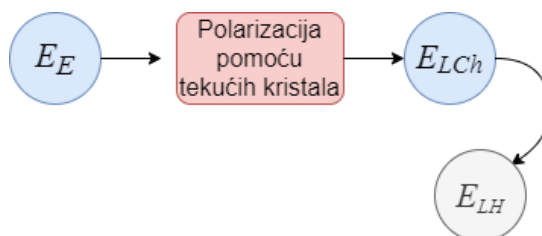
Slika 36 SLA - Lanac fizikalnih efekata L5b

Iako ova funkcija nije navedena u funkcijskoj dekompoziciji iz studentskog izvještaja, zaključeno je kako ju se mora uzeti u obzir jer je neizbježan dio procesa pri svakom

korištenju.

Potporni materijal uklanja se ručno.

c) Lanac fizikalnih efekata L5c (završno stvrđivanje izratka):



Slika 37 SLA - Lanac fizikalnih efekata L5c

Svaki izradak potrebno je još jednom izložiti UV zračenju da se dodatno stvrđne kako bi bio upotrebljiv.

Kritični lanci efekata su L1, L5a i L5b. Upitno je kako odrediti je li dobrota pretvorbe električne energije u latentnu kemijsku zavrijedila tako veliki negativan faktor. Lanac L5b isti je kao i kod FDM tehnologije.

Što se tiče sekundarnih efekata na okoliš, znatan utjecaj ima fotopolimer u svom nestvrđnutom obliku kada je opasan za rukovanje, a pare koje se generiraju u samom procesu također su opasne po zdravlje te ne bi trebalo boraviti u prostoriji s uređajem duži period vremena.

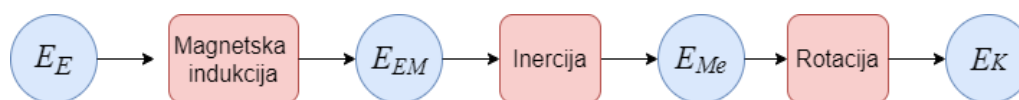
Tablica 11 Tablica za vrednovanje SLA koncepta prema *Ekotransformabilnost metodi*

| Oznaka  | Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala   | Dobrota (zbroj) |
|---------|---|-----------------|
| L1      | $E_E \rightarrow E_{LCh} = (-2,28)$ ; $E_{LCh} \rightarrow E_{LH} = (-1,88)$  | -4,16           |
| L2      | $E_W \rightarrow E_{Me} = (1,67)$ ;   | 1,67            |
| L3      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} = (-0,46)$ | -0,94           |
| L4      | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$                                      | -0,48           |
| L5      | $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh} = (-1,22)$  | -1,22           |
|         | $E_{Hu} \rightarrow E_{Me} = (-4,94)$   | -4,94           |
|         | $E_E \rightarrow E_{LCh} = (-2,28)$ ; $E_{LCh} \rightarrow E_{LH} = (-1,88)$  | -4,16           |
| Ukupno: | ~11 transformacija < 0; ~3 transformacija > 0   | -14,23          |
| Oznaka  | Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš                                    | Dobrota (zbroj) |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| <i>S.Ef1</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> )   | Latentna toplinska energija (koristi se za zagrijavanje cijelog uređaja) → oporaba (energije ili materijala) ostvariva uz manje izmjene (+1) | +1  |
|   | Nestvrdnuta smola iz procesa → odlaganje / ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti  | -9  |
| <i>S.Ef2</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> ,<br><i>E<sub>LCh</sub></i> ,<br><i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> ) | Latentna toplinska energija i toksične pare fotopolimera → odlaganje / ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti (-9)                     | -15 |
|   | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)   |     |
|   | Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)  |     |
| <i>S.Ef3</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> )  | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)   | -6  |
|   | Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)  |     |
| <i>S.Ef4</i>  | -  | 0   |
| <i>S.Ef5</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> ,<br><i>E<sub>LCh</sub></i> ,<br><i>E<sub>LH</sub></i> , <i>E<sub>A</sub></i> )     | Alkohol sa ostacima smole u toksičnom nestvrdnutom obliku → odlaganje / ispuštanje otpada/emisija visoke toksičnosti (-9)                    | -9  |
|   | Otpadni potporni materijal → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)                                  | -3  |
|   | Latentna toplinska energija → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)                                 | -3  |
| Ukupno:   | ~10 sekundarnih efekata na okoliš (1 <i>S.Ef</i> > 0, 9 <i>S.Ef</i> < 0)   | -44 |

### 5.2.3 Uređaj temeljen na tehnologiji selektivnog laserskog sinteriranja (engl. *Selective Laser Sintering – SLS*)

Lanac fizikalnih efekata L1 (dostava praha):

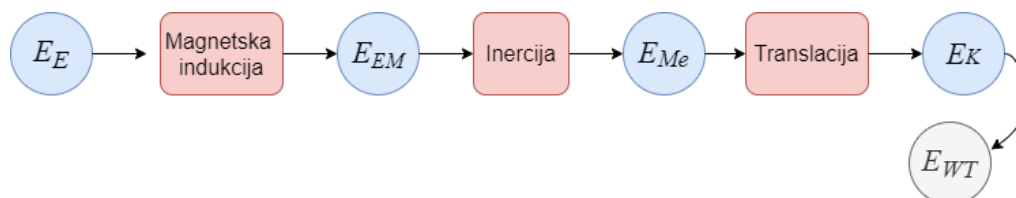


Slika 38 SLS - Lanac fizikalnih efekata L1

Prah se dostavlja gravitacijski do manjeg spremnika iz kojeg se nanosi u radni prostor. Električnim motorom ostvaruje se mehanizam otvaranja i zatvaranja otvora dostave te se prah tako nanosi sloj po sloj. U ovaj lanac fizikalnih efekata ubrojiti će se preostali prah iz radnog prostora nakon

završetka procesa printanja kao sekundaran efekt na okoliš. Prah se može u potpunosti koristiti u idućim procesima pomiješan sa svježim prahom u određenim omjerima.

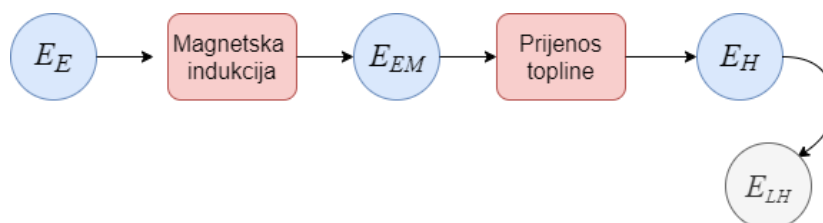
**Lanac fizikalnih efekata L2** (ravnanje praha):



**Slika 39 SLS - Lanac fizikalnih efekata L2**

Svaki novi sloj praha se ravna se pomoću električnog motora i zupčanog prijenosa.

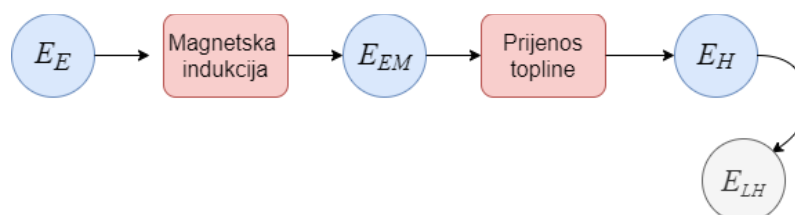
**Lanac fizikalnih efekata L3** (zagrijavanje ploha u dodiru s prahom):



**Slika 40 SLS - Lanac fizikalnih efekata L3**

Sve plohe u dodiru s prahom zagrijavaju se indukcijski.

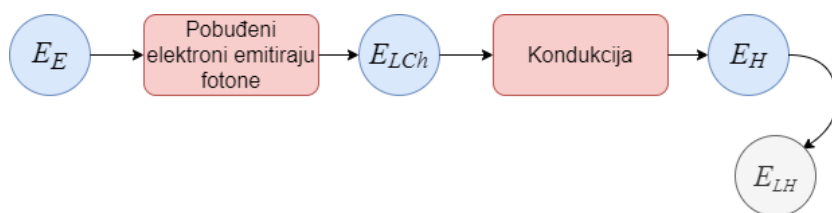
**Lanac fizikalnih efekata L4** (zagrijavanje najnovijeg sloja praha):



**Slika 41 SLS - Lanac fizikalnih efekata L4**

Najnoviji sloj praha dodatno se zagrijava grijalicom.

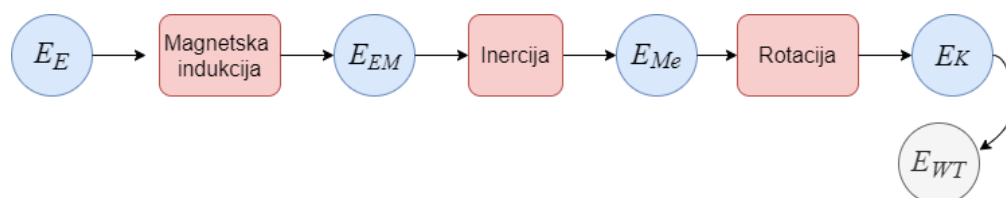
**Lanac fizikalnih efekata L5** (sinteriranje praha laserskom zrakom):



Slika 42 SLS - Lanac fizikalnih efekata L5

Temperatura potrebna za odvijanje procesa sinterizacije dobiva se laserom koji selektivno tali čestice praha svakog novog sloja koje se lokalno povezuju i tvore čvrstu strukturu predmeta koji se izrađuje.

**Lanac fizikalnih efekata L6** (vođenje laserske zrake):



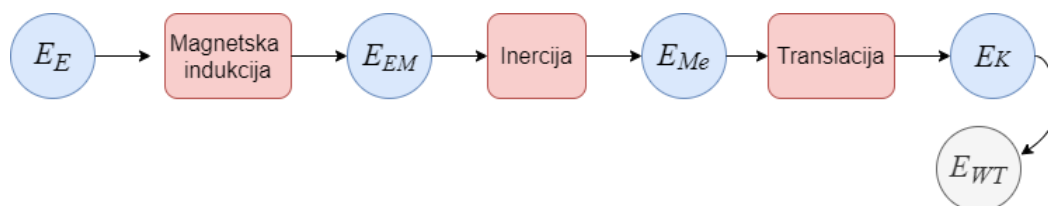
Slika 43 SLS - Lanac fizikalnih efekata L6

Vođenje laserske zrake ostvaruje se sustavom statičnih zrcala sa pomičnim sfernim zrcalom. Gibanje se ostvaruje pomoću malog elektromotora. Gibanja moraju biti vrlo precizna te pojava velikih vibracija može uzrokovati nepravilnosti u procesu.

**Lanac fizikalnih efekata L7** (pomicanje po z osi)

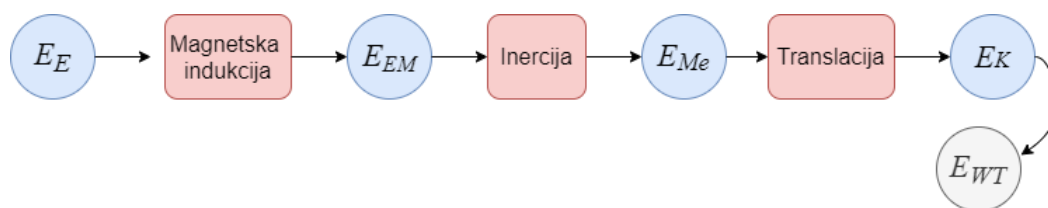
Pomak po z osi ostvaruje se pomoću dva električna stepper motora i zupčanog prijenosa.

a) Lanac fizikalnih efekata L3a za jedan električni stepper motor



Slika 44 SLS - Lanac fizikalnih efekata L7a

b) Lanac fizikalnih efekata L3b za jedan električni stepper motor



Slika 45 SLS - Lanac fizikalnih efekata L7b

SLS proces nema zadnji fizikalni lanac efekata koji se odnosi na uklanjanje potpornog materijala jer ovdje ulogu potpornog materijala ima prah. Iako je potrebna radnja micanja praha (npr. četkanjem), ne bi imalo smisla izjednačiti taj rad sa zadnjim lancem fizikalnih efekata kod FDM procesa gdje treba provesti znatno vrijeme kako bi se uklonio potporni materijal. Iz tog razloga za SLS proces uklanjanje potpornog materijala uopće se neće prikazati kao lanac fizikalnih efekata, a time i pretvorba energije.

Tablica 12 Tablica za vrednovanje SLS koncepta prema *Ekotransformabilnost metodi*

| Oznaka                 | Lanac fizikalnih efekata – vrednovanje prema kriteriju ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala   | Dobrota (zbroj) |
|------------------------|---|-----------------|
| L1                     | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$                                    | -0,48           |
| L2                     | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
| L3                     | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07)$ ; $E_H \rightarrow E_{LH} = (-3)$   | -4,15           |
| L4                     | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_H = (-1,07)$ ; $E_H \rightarrow E_{LH} = (-3)$   | -4,15           |
| L5                     | $E_E \rightarrow E_{LCh} = (-2,28)$ ; $E_{LCh} \rightarrow E_H = (-1,88)$ ; $E_H \rightarrow E_{LH} = (-3)$                                       | -7,16           |
| L6                     | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
| L7                     | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
|                        | $E_E \rightarrow E_{EM} = (-0,08)$ ; $E_{EM} \rightarrow E_{Me} = (-0,68)$ ; $E_{Me} \rightarrow E_K = (0,28)$ ; $E_K \rightarrow E_{WT} (-0,46)$ | -0,94           |
| Ukupno:                | ~24 transformacija < 0; ~4 transformacija > 0   | -19,7           |
| Oznaka                 | Sekundarni efekti na okoliš – vrednovanje prema kriteriju ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš                                  | Dobrota (zbroj) |
| <i>S.Efl</i> ( $E_A$ ) | Ostatak praha → ponovna uporaba otpada (ili ostvarivo uz manje izmjene)   | +7              |

|  |   |     |
|--|---|-----|
| <i>S.Ef2</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> ) | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6  |
| <i>S.Ef3</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> )                            | Latentna toplinska energija (zagrijavanje cijelog uređaja i prijenos topline u okolinu) → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti                 | -3  |
| <i>S.Ef4</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> )                            | Latentna toplinska energija (koristi se za zagrijavanje cijelog uređaja) → uporaba (energije ili materijala) ostvariva uz manje izmjene   | +1  |
| <i>S.Ef5</i><br>( <i>E<sub>LH</sub></i> )                            | Latentna toplinska energija → uporaba (energije ili materijala) ostvariva uz manje izmjene  | +1  |
| <i>S.Ef6</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> )                            | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti   | -3  |
| <i>S.Ef7</i><br>( <i>E<sub>Me</sub></i> ,<br><i>E<sub>WT</sub></i> ) | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6  |
|  | Vibracije → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3)<br>Buka → direktno odlaganje / ispuštanje inertnog otpada/emisija niske toksičnosti (-3) | -6  |
| Ukupno:  | ~11 sekundarnih efekata na okoliš (3 <i>S.Ef</i> > 0, 8 <i>S.Ef</i> < 0)  | -17 |

### Broj promjena agregatnog stanja u procesu

Zadnji korak ove metode je odrediti broj promjena agregatnog stanja u procesu. Ovisno o temperaturi moguća su tri fizička stanja polimera, staklasto, kristalno, viskoelastično (kaučukasto) i viskofluidno (kapljevito). Iako to nisu agregatna stanja u pravom smislu riječi ovdje će se tako koristiti jer istim procesom (promjenom strukture na molekularnoj razini utjecajem temperature i drugih fizikalnih veličina) poprimaju različite oblike. U FDM uređaju u procesu se odvijaju četiri promjene agregatnog stanja. Materijal za printanje inicijalno je u kristalnom stanju u obliku polimerne „žice“ te se takav dovodi u ekstruder gdje se zagrijava do temperature tališta i prelazi u viskofluidno stanje, a onda se ponovno skrućuje prolazeći kroz staklasto stanje do ponovno kristalnog stanja, tj. gotovog printa.

SLA uređaj koji koristi fotopolimerni materijal koji je amorfan, odnosno smolu koja je inicijalno u kapljevitom stanju te pod utjecajem UV svjetlosti prelazi kroz staklasto stanje do kristalnog stanja, isto kao i kod FDM procesa.

Kod SLS procesa, promjene su jednake kao i u FDM procesu, ali se proces odvija pri nešto nižim temperaturama.

## 5.2.4 Rangiranje koncepata

Rezultati vrednovanja koncepata mogu se vidjeti u tablici 13. Podaci o vrednovanju prema svakom kriteriju nalaze se u tablici 10, tablici 11 i tablici 12.

**Tablica 13 Ukupan rezultat Ekotransformabilnost metode**

| Koncepti | Kriteriji ekološke prihvatljivosti $C_j$ , rang $e_{ij}$ |          |                     |          |                      |          |                     |          |                     |          |           |
|----------|--|----------|---------------------|----------|----------------------|----------|---------------------|----------|---------------------|----------|-----------|
|          | $S_{eTR}$<br>(maks.)                                     | $e_{i1}$ | $N_{eTR}$<br>(min.) | $e_{i2}$ | $S_{eEF}$<br>(maks.) | $e_{i3}$ | $N_{eEF}$<br>(min.) | $e_{i4}$ | $N_{Agr}$<br>(min.) | $e_{i5}$ | $V_{eij}$ |
| FDM      | -17,48   | 2        | 26                  | 2        | -30                  | 2        | 12                  | 3        | 4                   | 2        | 11        |
| SLA      | -15,35   | 1        | 14                  | 1        | -44                  | 3        | 10                  | 1        | 3                   | 1        | 7         |
| SLS      | -19,7  | 3        | 28                  | 3        | -17                  | 1        | 11                  | 2        | 4                   | 2        | 11        |

gdje je:  $S_{eTR}$  – ukupna ekoefektivnost pretvorbi energije i signala;  $e_{i1}$  – rangiranje koncepata prema  $S_{eTR}$ ;  $N_{eTR}$  – ukupan broj pretvorbi energije i signala;  $e_{i2}$  – rangiranje koncepata prema  $N_{eTR}$ ;  $S_{eEF}$  – ukupan zbroj ekološke prihvatljivosti sekundarnih efekata na okoliš;  $e_{i3}$  – rangiranje koncepata prema  $S_{eEF}$ ;  $N_{eEF}$  – ukupan broj sekundarnih efekata na okoliš;  $e_{i4}$  – rangiranje koncepata prema  $N_{eEF}$ ;  $N_{Agr}$  – broj promjena agregatnog stanja u procesu;  $e_{i5}$  – rangiranje koncepata prema  $N_{Agr}$ ;  $V_{eij}$  – suma rangova.

Prema rezultatima iz tablice 13 vidi se da najmanji utjecaj na okoliš prema ovoj metodi ima SLA uređaj. Takav rezultat ostvaren je prvenstveno na temelju malog broja pretvorbi energije unutar procesa što je u potpunosti realno uzimajući u obzir da ima najjednostavniji princip ostvarivanja glavne funkcije za koju koristi UV svjetlost te niske temperature za razliku od druga dva procesa. SLA izašao je kao najprihvatljivija opcija i usprkos negativnim sekundarnim efektima na okoliš zbog procesa završne obrade.



FDM i SLS proces ostvarili su jednak krajnji rezultat pa prema tome su jednako ekološki prihvatljivi.

Valja istaknuti kako SLS uređaj ima najlošiju ukupnu ekofektivnost pretvorbi energije i signala i najveći broj tih pretvorbi, što prema ovoj metodi ukazuje da troši najviše energije od svih promatranih uređaja. Nasuprot tome, ima najmanje štetnih sekundarnih efekata na okoliš jer proizvodi najmanje otpada, odnosno proizvedeni otpad može se ponovno koristiti bez ikakve prerade.

### 5.3 *Eco-QFD + Function Impact Matrix* metoda

Prema članku, za kreiranje FIM matrice potrebno je sustav rastaviti na komponente grupirajući ih prema funkcijama. U primjeru iz [5], klamerica je podijeljena na komponente te je svakoj komponenti pridružen postotak koji opisuje u kolikom udjelu ona sudjeluje u obavljanju neke funkcije. Kao karakteristika prema kojoj se provodi FIM, tamo je uzet ugljični otisak (engl. *carbon footprint*) koji je bio poznat za svaki dio klamerice u fazi proizvodnje te ukupni ugljični otisak u fazi korištenja. Na temelju tih podataka, doneseni su zaključci koje funkcije i komponente najviše doprinose ugljičnom otisku te se na temelju toga zna gdje ima najvećeg mjesta za poboljšanje. Ugljični otisak je zatim iskorišten kao tehnička specifikacija u kući kvalitete.

U ovom radu, u kojem se prije svega koriste koncepti uređaja, nije moguće doći do podatka koji bi se jasno mogao specificirati za svaku komponentu pojedinog uređaja. Metoda je iz tog razloga prilagođena kako bi se mogla koristiti. Uvjet mogućnosti prilagodbe naravno je bio da se zadrži glavni smisao metode, a to je pronalazak funkcija i komponenti koji prema odabranom kriteriju imaju najlošiju izvedbu.

Umjesto ugljičnog otiska koji je korišten u primjeru, ovdje su uzete vrijednosti ekofektivnosti pretvorbi energije iz [4] koje su korištene i u prethodnoj metodi. Za svaki uređaj izrađena je tablica u kojoj su komponente rastavljene prema funkcijama koje uređaj obavlja (analogne lancima fizikalnih efekata iz prethodne metode). Uzete su sve pretvorbe energije i njihove vrijednosti ekofektivnosti. Npr. pretvorba energije  $E_E \rightarrow E_{EM}$ , u FDM uređaju događa se 7 puta. Tih 7 pretvorbi pridruženo je komponentama koje ih obavljaju, ali u različitim postotcima. Na taj način pokušalo se utvrditi koje komponente su energetske najzahtjevnije jer se u prethodnoj metodi vrijednost ekotransformabilnosti dodjeljivala pretvorbi ne uzimajući u obzir koje i koliko komponenti ju

obavlja niti je li svih 7 komponenti obavlja to ne jednak način. Pod time se misli na to da npr. nisu svi elektromotori u tom uređaju iste snage te im ne bi bilo pravedno onda dodjeljivati jednake faktore. Takav postupak proveden je za sva tri uređaja i opisan u daljnjem tekstu i tablicama.

Postotak utjecaja pojedinog sredstva ostvarivanja neke funkcije na određenu energetska pretvorbu definiranu prema [4] određuje se na temelju iskustva osobe koja provodi metodu. Zbroj utjecaja u svakom stupcu treba doći do 100 %, a faktor pretvorbe ( $x$ ) (preuzet iz [4]) raspodjeljuje se temeljem upravo tih postotaka. Zbroj faktora za svaku pretvorbu predstavlja vrijednost pretvorbe pomnožen s brojem koliko se puta ta pretvorba događa u promatranom sustavu i u tablicu je upisan kao korigirani faktor.

Za izradu kuće kvalitete iz prethodno navedenih razloga, nije bilo moguće uzeti jedan podatak kao korisnički zahtjev kako je učinjeno u [11][5]. Zato tablice izrađene u idućim poglavljima služe isključivo boljem razumijevanju utjecaja pojedinih funkcija, odnosno komponenti uređaja na okoliš.

### 5.3.1 Uređaj temeljen na FDM tehnologiji (engl. Fused Deposition Modelling)

Tablica 14 Pomoćna tablica za FIM - FDM

| Pretvorba                            | $E_E \rightarrow E_{EM}$ | $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ | $E_{Me} \rightarrow E_K$ | $E_K \rightarrow E_{WT}$ | $E_{EM} \rightarrow E_H$ | $E_H \rightarrow E_{LH}$ | $E_{Htu} \rightarrow E_{Me}$ |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------|
| Broj pretvorbi u promatranom sustavu | 7                        | 5                           | 5                        | 4                        | 2                        | 2                        | 1                            |
| Faktor                               | -0,08                    | -0,68                       | 0,28                     | -0,46                    | -1,07                    | -3                       | -4,94                        |
| Korigirani faktor                    | -0,56                    | -3,4                        | 1,4                      | -1,84                    | -2,14                    | -6                       | -4,94                        |

Iz gornje tablice vidi se da najveći utjecaj na sustav imaju pretvorbe topline te ljudski faktor u završnoj obradi.

Između elektromotora nije rađena razlika nego su postotci ravnomjerno raspodijeljeni jer nema značajno većeg opterećenja na nekom dijelu da bi bio potreban jači elektromotor. Najveće opterećenje je na pomaku po z osi, a tamo su ionako 2 elektromotora.

Između zupčanog prijenosa, vodilica i navojnih vretena teško je bilo izabrati. Izabrano je koji sustavi daju najviše kinetičke energije i to su zupčanički sustavi za pomak u smjeru  $x$  i  $y$  osi jer najviše rade i najviše se gibaju. Tu spadaju i vodilice ali u manjem postotku. Zatim slijedi zupčanički sustav u ekstruderu koji ne proizvodi toliko kinetičke energije kao ova tri i na posljetku vretena kao pomak u  $z$  smjeru.

Najveći potrošač što se tiče pretvorbe u toplinsku energiju je grijač uloška za mlaznicu koja mora postići temperaturu otapanja materijala koja je oko 3 puta veća od temperature na koju mora biti zagrijano postolje pa su postotci zato tako raspodijeljeni.

Iz tablice se vidi da su najveći potrošači energije funkcija dostave i taljenja materijala i uklanjanje potpornog materijala. Može se zaključiti da je ključno smanjiti neiskoristivost latentne topline koja nastaje zagrijavanjem boljom izolacijom komponenti ili zatvaranjem cijelog printera u kućište kako se toplina ne bi gubila u okoliš. Što se tiče uklanjanja potpornog materijala, u ovom slučaju u kojem se uzima da se i potpora i predmet printaju iz istog materijala, teško je naći smjer poboljšanja koji bi bio isplativiji od ručnog uklanjanja.

Tablica 15 FIM za FDM

| Funkcije                                  | Sredstva koja ih ostvaruju          | $E_E \rightarrow E_{EM}$ |       | $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ |       | $E_{Me} \rightarrow E_K$ |       | $E_K \rightarrow E_{HT}$ |         | $E_{EM} \rightarrow E_H$ |         | $E_H \rightarrow E_{LH}$ |       | $E_{Hu} \rightarrow E_{Me}$ |       |
|---|-------------------------------------|--------------------------|-------|-----------------------------|-------|--------------------------|-------|--------------------------|---------|--------------------------|---------|--------------------------|-------|-----------------------------|-------|
|   |                                     | [%]                      | x     | [%]                         | x     | [%]                      | x     | [%]                      | x       | [%]                      | x       | [%]                      | x     | [%]                         | x     |
| Dostava i taljenje materijala (ekstruder) | Elektromotor                        | 14,29                    | -0,08 | 20                          | -0,68 |                          |       | 10                       | 0,028   | 4                        | -0,0184 |                          |       |                             |       |
|   | Zupčani prijenos                    |                          |       |                             |       | 5                        | 0,014 | 20                       | -0,092  |                          |         |                          |       |                             |       |
|   | Opružni sustav za ostvarivanje sile |                          |       |                             |       | 5                        | 0,014 |                          |         |                          |         |                          |       |                             |       |
|   | Mlaznica                            |                          |       |                             |       |                          |       |                          |         |                          |         | 15                       | -0,45 |                             |       |
|   | Uložak za mlaznicu                  |                          |       |                             |       |                          |       |                          |         |                          | 15      | -0,1605                  | 30    | -0,9                        |       |
|   | Grijač uloška za mlaznicu           | 14,29                    | -0,08 |                             |       |                          |       | 60                       | -0,642  |                          |         |                          |       |                             |       |
| Zagrijavanje podloge za pritanje          | Kućiče ekstrudera                   |                          |       |                             |       |                          |       |                          |         |                          |         | 25                       | -0,75 |                             |       |
|   | Zagrijavajući element               | 14,29                    | -0,08 |                             |       |                          |       |                          |         |                          | 20      | -0,214                   |       |                             |       |
|   | Tijelo kojim se prenosi toplina     |                          |       |                             |       |                          |       |                          |         |                          | 5       | -0,0535                  | 30    | -0,9                        |       |
|   | Lijevi elektromotor                 | 14,29                    | -0,08 | 20                          | -0,68 |                          |       | 4                        | -0,0184 |                          |         |                          |       |                             |       |
| Pomak ekstrudera po z osi                 | Desni elektromotor                  | 14,29                    | -0,08 | 20                          | -0,68 |                          |       |                          |         | 4                        | -0,0184 |                          |       |                             |       |
|   | Lijevo navojno vreteno              |                          |       |                             |       | 7,5                      | 0,021 | 10                       | -0,046  |                          |         |                          |       |                             |       |
|   | Desno navojno vreteno               |                          |       |                             |       | 7,5                      | 0,021 | 10                       | -0,046  |                          |         |                          |       |                             |       |
|   | Elektromotor                        | 14,29                    | -0,08 | 20                          | -0,68 |                          |       | 4                        | -0,0184 |                          |         |                          |       |                             |       |
| Pomak ekstrudera po y osi                 | Zupčani prijenos                    |                          |       |                             |       | 25                       | 0,07  | 20                       | -0,092  |                          |         |                          |       |                             |       |
|   | Vodilice                            |                          |       |                             |       | 15                       | 0,042 |                          |         |                          |         |                          |       |                             |       |
| Pomak ekstrudera po x osi                 | Elektromotor                        | 14,29                    | -0,08 | 20                          | -0,68 |                          |       |                          |         | 4                        | -0,0184 |                          |       |                             |       |
|   | Zupčani prijenos                    |                          |       |                             |       | 25                       | 0,07  | 20                       | -0,092  |                          |         |                          |       |                             |       |
| Uklanjanje potpornog materijala           | Ljudska snaga                       |                          |       |                             |       |                          |       |                          |         |                          |         |                          |       | 100                         | -4,94 |
| Zbroj:                                    |                                     | 100%                     | -0,56 | 100%                        | -3,4  | 100%                     | 1,4   | 100%                     | -1,84   | 100%                     | -2,14   | 100%                     | -6    | 100%                        | -4,94 |

### 5.3.2 Uređaj temeljen na tehnologiji stereolitografije (engl. *Stereolithography - SLA*)

Tablica 16 Pomoćna tablica za FIM - SLA

| Pretvorba                            | $E_E \rightarrow E_{EM}$ | $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ | $E_{Me} \rightarrow E_K$ | $E_K \rightarrow E_{WT}$ | $E_E \rightarrow E_{LCh}$ | $E_{LCh} \rightarrow E_{LH}$ | $E_W \rightarrow E_{Me}$ | $E_{Ch} \rightarrow E_{LCh}$ | $E_{Hu} \rightarrow E_{Me}$ |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Broj pretvorbi u promatranom sustavu | 2                        | 2                           | 2                        | 1                        | 2                         | 2                            | 1                        | 1                            | 1                           |
| Faktor                               | -0,08                    | -0,68                       | 0,28                     | -0,46                    | -2,28                     | -1,88                        | 1,67                     | -1,22                        | -4,94                       |
| Korigirani faktor                    | -0,16                    | -1,36                       | 0,56                     | -0,46                    | -4,56                     | -3,76                        | 1,67                     | -1,22                        | -4,94                       |

Veći postotak dodijeljen je elektromotorima koji ostvaruju pomak platforme po z osi, a manji postotak elektromagnetskom ventilu za dostavu materijala iz spremnika koji je izvan uređaja do posude.

Pretvorba u svjetlosnu energiju, veći postotak dodijeljen je samim LED lampama u uređaju nego UV lampi za završnu obradu jer LED lampe u uređaju moraju biti veće snage.

Energetski najzahtjevnije funkcije su stvrdnjavanje fotopolimera i uklanjanje potpornog materijala što je analogno slučaju FDM uređaja. Na te funkcije treba obratiti pažnju prilikom kreiranja kuće kvalitete. LED lampe su same po sebi vrlo efikasne te takvo poboljšanje u tom smjeru nema smisla previše razmatrati. Opet je faktor s najvećom negativnom vrijednosti, ljudska energija u uklanjanju potpore.

Tablica 17 FIM za SLA

| Funkcije                        | Sredstva koja ih ostvaruju | $E_E \rightarrow E_{EM}$ |        | $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ |        | $E_{Me} \rightarrow E_K$ |       | $E_K \rightarrow E_{WT}$ |        | $E_E \rightarrow E_{LCh}$ |        |
|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|--------|-----------------------------|--------|--------------------------|-------|--------------------------|--------|---------------------------|--------|
|                                 |                            | [%]                      | X      | [%]                         | X      | [%]                      | X     | [%]                      | X      | [%]                       | X      |
| Stvrdnjavanje fotopolimera      | LED svjetla                |                          |        |                             |        |                          |       |                          |        | 50                        | -2,28  |
|                                 | LCD ekran                  |                          |        |                             |        |                          |       |                          |        | 30                        | -1,368 |
| Ventiliranje                    | Pasivni hladnjak           |                          |        |                             |        |                          |       |                          |        |                           |        |
|                                 | Ventilator                 |                          |        |                             |        |                          |       | 60                       | -0,276 |                           |        |
| Dostava materijala              | Elektromagnetski ventil    | 20                       | -0,032 | 20                          | -0,272 | 20                       | 0,112 |                          |        |                           |        |
|                                 | Lijevelektromotor          | 40                       | -0,064 | 40                          | -0,554 |                          |       | 10                       | -0,046 |                           |        |
| Pomak platforme po z osi        | Desnelektromotor           | 40                       | -0,064 | 40                          | -0,554 |                          |       | 10                       | -0,046 |                           |        |
|                                 | Lijevo navojno vreteno     |                          |        |                             |        | 40                       | 0,224 | 10                       | -0,046 |                           |        |
| Uklanjanje potpornog materijala | Desno navojno vreteno      |                          |        |                             |        | 40                       | 0,224 | 10                       | -0,046 |                           |        |
|                                 | Ljudska snaga              |                          |        |                             |        |                          |       |                          |        |                           |        |
| Uklanjanje potpornog materijala | Alkoholno otapalo          |                          |        |                             |        |                          |       |                          |        |                           |        |
|                                 | UV lampa                   |                          |        |                             |        |                          |       |                          |        | 20                        | -0,912 |
| Zbroj:                          |                            | 100%                     | -0,16  | 100%                        | -1,36  | 100%                     | 0,56  | 100%                     | -0,46  | 100%                      | -4,56  |

### 5.3.3 Uređaj temeljen na tehnologiji selektivnog laserskog sinteriranja (engl. *Selective Laser Sintering – SLS*)

Tablica 18 Pomoćna tablica za FIM - SLS

| Pretvorba                            | $E_E \rightarrow E_{EM}$ | $E_{EM} \rightarrow E_{Me}$ | $E_{Me} \rightarrow E_K$ | $E_E \rightarrow E_{LCh}$ | $E_{LCh} \rightarrow E_{LH}$ | $E_K \rightarrow E_{WT}$ | $E_{EM} \rightarrow E_H$ | $E_H \rightarrow E_{LH}$ |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Broj pretvorbi u promatranom sustavu | 7                        | 5                           | 5                        | 1                         | 1                            | 4                        | 2                        | 3                        |
| Faktor                               | -0,08                    | -0,68                       | 0,28                     | -2,28                     | -1,88                        | -0,46                    | -1,07                    | -3                       |
| Korigirani faktor                    | -0,56                    | -3,4                        | 1,4                      | -2,28                     | -1,88                        | -1,84                    | -2,14                    | -9                       |

Uzimajući u obzir da se u procesu prah sinterira energijom lasera za što je potrebna temperatura od čak 190 °C, cijeli radni prostor ima grijače koji održavaju potrebnu temperaturu atmosfere te dodatno postoje grijači koji zagrijavaju svaki novi nanoseni sloj praha, jasno je da će se trošiti velike količine energije.

Kod SLS uređaja ponovno se može uočiti da su najveći potrošači energije komponente koje sudjeluju u procesima zagrijavanja. Znatnu količinu energije u ovom sustavu koristi i laser kojim se lokalno moraju postići temperature do 200 °C.

Tablica 19 FIM - SLS

| Funkcije                             | Sredstva koja ih ostvaruju            | $E_E \rightarrow E_{EM}$ |        | $E_{EM} \rightarrow E_{1,6}$ |       | $E_{1,6} \rightarrow E_K$ |      | $E_E \rightarrow E_{LCh}$ |      | $E_{LCh} \rightarrow E_{LH}$ |        | $E_K \rightarrow E_{HT}$ |        | $E_{EM} \rightarrow E_H$ |        | $E_H \rightarrow E_{LH}$ |      |
|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|--------|------------------------------|-------|---------------------------|------|---------------------------|------|------------------------------|--------|--------------------------|--------|--------------------------|--------|--------------------------|------|
|                                      |                                       | [%]                      | x      | [%]                          | x     | [%]                       | x    | [%]                       | x    | [%]                          | x      | [%]                      | x      | [%]                      | x      | [%]                      | x    |
| Sintiranje praha                     | CO <sub>2</sub> laser                 |                          |        |                              |       |                           |      |                           | 100  | -2,28                        |        |                          |        |                          |        |                          |      |
|                                      | Pasivni hladnjak                      |                          |        |                              |       |                           |      |                           |      | 60                           | -1,128 |                          |        |                          |        |                          |      |
| Vođenje laserske zrake               | Elektromotor                          | 10                       | -0,056 | 20                           | -0,68 |                           |      |                           |      | 40                           | -0,752 |                          |        |                          |        | 30                       | -2,7 |
|                                      | Sustav gibanja zrcala                 |                          |        |                              |       | 15                        | 0,21 |                           |      |                              |        | 5                        | -0,092 |                          |        |                          |      |
| Ravnanje praha                       | Elektromotor                          | 10                       | -0,056 | 20                           | -0,68 |                           |      |                           |      |                              |        | 5                        | -0,092 |                          |        |                          |      |
|                                      | Zupčani prijenos                      |                          |        |                              |       | 15                        | 0,21 |                           |      |                              |        | 10                       | -0,184 |                          |        |                          |      |
| Dostava materijala                   | Rotirajući valjak                     |                          |        |                              |       | 15                        | 0,21 |                           |      |                              |        | 15                       | -0,276 |                          |        |                          |      |
|                                      | Elektromotor                          | 10                       | -0,056 | 20                           | -0,68 |                           |      |                           |      |                              |        | 5                        | -0,092 |                          |        |                          |      |
| Zagrijavanje ploha u dodiru s prahom | Mehanizam otvaranja otvora za dostavu |                          |        |                              |       | 15                        | 0,21 |                           |      |                              |        | 10                       | -0,184 |                          |        |                          |      |
|                                      | Indukcijski grijač                    | 30                       | -0,168 |                              |       |                           |      |                           |      |                              |        |                          |        | 60                       | -1,284 | 40                       | -3,6 |
| Zagrijavanje najnovijeg sloja praha  | Infračveni grijač                     | 20                       | -0,112 |                              |       |                           |      |                           |      |                              |        |                          |        | 40                       | -0,856 | 30                       | -2,7 |
|                                      | Lijevo elektromotor                   | 10                       | -0,056 | 20                           | -0,68 |                           |      |                           |      |                              |        | 5                        | -0,092 |                          |        |                          |      |
| Pomak platforme po z osi             | Desno elektromotor                    | 10                       | -0,056 | 20                           | -0,68 |                           |      |                           |      |                              |        | 5                        | -0,092 |                          |        |                          |      |
|                                      | Lijevo zupčani prijenos               |                          |        |                              |       | 20                        | 0,28 |                           |      |                              |        | 15                       | -0,276 |                          |        |                          |      |
|                                      | Desno zupčani prijenos                |                          |        |                              |       | 20                        | 0,28 |                           |      |                              |        | 15                       | -0,276 |                          |        |                          |      |
|                                      | Zbroj:                                | 100%                     | -0,56  | 100%                         | -3,4  | 100%                      | 1,4  | 100%                      | 100% | -2,28                        | 100%   | -1,88                    | 100%   | 100%                     | -2,14  | 100%                     | -9   |



### 5.3.4 Eco-QFD (Kuća kvalitete)

Za izradu kuće kvalitete autor definira da se uz korisničke zahtjeve (engl. *Voice of Customer*) dodaju i „zahtjevi okoliša“ (engl. *Voice of Environment*), odnosno korisnik će u ovom slučaju biti ekološki osviješten. Navedeno je 16 korisničkih zahtjeva na temelju istraživanja tržišta te su im an temelju analize određene važnosti.

Svakom korisničkom zahtjevu dodana je važnost u rasponu od 1 do 10, vodeći računa da je skala uzlazna te važnost 1 označava najmanju važnost zahtjeva, a važnost 10 najveću važnost zahtjeva. Najveća važnost (10) dodijeljena je korisničkim zahtjevima na potrošnju električne energije, utjecaj na globalno zatopljenje i štetnosti ljudskom zdravlju. Važnost 9 pridodana je zahtjevu da uređaj ne koristi visoke temperature u procesu jer se funkcijskim matricama prikazanim ranije u poglavlju pokazalo da su pretvorbe električne energije u toplinsku i latentnu toplinsku energetski najzahtjevnije. Također je bitno spomenuti zahtjev za najmanje završne obrade kojem je dodijeljena važnost 8 također na temelju prethodnih matrica. Najmanju važnost ima prenosivost, jednostavnost korištenja te prihvatljiva cijena jer nisu ključni faktori za ekološki osviještenog korisnika.

Idući korak je definirati tehničke specifikacije kojima se postavljeni korisnički zahtjevi i zahtjevi okoliša mogu oblikovati u podatak koji je relevantan inženjerskom timu koji radi na razvoju promatranog uređaja. Svaka tehnička specifikacija mora imati svoju mjernu jedinicu. Cilj je svakom korisničkom zahtjevu pridružiti jednu tehničku specifikaciju koja ga najbolje opisuje. Tehničke specifikacije jednake su onima iz poglavlja 4.4 gdje je detaljno objašnjeno otkud su preuzete. Uz to, svakoj tehničkoj specifikaciji treba odrediti smjer poboljšanja, odnosno je li cilj maksimizirati vrijednost, minimizirati ili postići točno određenu. U krovu kuće kvalitete nalazi se matrica korelacija. Korelacija može biti negativna, pozitivna ili ne postojati.

Određivanje veza između korisničkih zahtjeva i tehničkih specifikacija potpuno je subjektivno i ovisi o podacima kojima osoba raspolaže te o njejoj stručnosti i iskustvu u tom području.

**Lagana prenosivost** je zahtjev postavljen jer uređaj na taj način neće morati biti vezan uz prostor u kojem se nalazi. Proizvod će zasigurno biti više i bolje iskorišten jer će moći lagano mijenjati lokacije te biti posuđivan na korištenje ili proslijeđen novom korisniku. Uređaj će se također moći vrlo lako premještati s ciljem prezentiranja njegovog rada u edukativne ili komercijalne svrhe. Isto

tako, treba spomenuti da lagana prenosivost uređaja i za proizvođača znači manje troškove na pakiranje i transport uređaja do korisnika.

**Jednostavnost korištenja** osigurava uređaju široku publiku korisnika jer u današnje vrijeme veliki broj korisnika spreman je odustati od korištenja uređaja ako im to oduzima previše vremena i zahtjeva opširnu dodatnu edukaciju, a time i još vremena. Bitno je moći uređaj postaviti u stanje spremno za rad u što kraćem vremenu.

**Minimalan broj dijelova** ukazuje na to da uređaj ostvaruje svoju funkciju bez nepotrebnih dijelova koje nemaju funkcionalnost nego su estetske prirode. Također može značiti da jedna komponenta vjerojatno obavlja više funkcija koje bi u drugom sličnom uređaju možda obavljao niz komponenti koje naravno treba proizvesti i sklopiti trošeći materijal, energiju i vrijeme.

**Jednostavnost sastavljanja/rastavljanja** vodi računa o tome da se i FDM i SLA uređaj mogu kupiti kao „kit“ koji korisnik sastavlja sam prema uputama, bitno ja do to bude dovoljno jednostavno te ne zahtijeva specijalne vještine i alate. Samim time i proces rastavljanja je jednostavan što znači i da je uređaj lakše održavati, čistiti, potencijalno nadograđivati te na kraju životnog vijeka odlagati.

**Mogućnost printanja u različitim kvalitetama** postavljen je kao zahtjev jer je korisniku bitno moći izabrati kvalitetu printa koja ide u rasponu od brzog i nepreciznog printa do sporijeg ali kvalitetnijeg. Ta mogućnost daje korisniku opciju upravljanja procesom po njegovoj želji za svaki pojedinačan print. Također se smanjuje postotak škart dijelova jer korisnik unaprijed zna kakvu kvalitetu printa može očekivati te će rjeđe odlučivati da će print baciti u otpad jer ga smatra neuspješnim. Naravno veća kvaliteta dobiva se odabirom što manje debljine sloja, ali to znači i više vremena potrebnog za jedan print te samim time i više potrošene energije. Korisnik će kada nema potrebu za visokom kvalitetom, već „isprobava“ novu ideju, želi ispitati postavke i slično izabrati deblji sloj i brži print te tako uštediti vrijeme i energiju.

**Što manja potrošnja električne energije** glavni je postavljeni zahtjev. Svaki ekološko osviješten korisnik kao najvažniji zahtjev navesti će da uređaj treba trošiti što manje električne energije u radu obzirom da je taj faktor i najveći problem ekološke prihvatljivosti 3D printanja.

**Što manji utjecaj na globalno zatopljenje** bitan je zahtjev postavljen od strane ekološko osviještenog korisnika. Globalno zatopljenje je postupno zagrijavanje Zemljine površine i najnižih

slojeva atmosfere uzrokovano učinkom staklenika te je u zadnje vrijeme vrlo aktualna tema u cijelom svijetu.

**Ne šteti ljudskom zdravlju** bitno je pošto se uređaj može koristiti u kućanstvima, školama i fakultetima korisniku je vrlo bitno da ne uzrokuje nikakve štetne posljedice za zdravlje. U takvim okruženjima u pravilu se ne vodi računa o zaštiti na radu i pravilnom rukovanju i opremanju prostora te se zbog toga rizik od opasnosti još više povećava. Dodatno, šteta se može prenijeti i na druge osobe koje ne rukuju proizvodom poput članova obitelji, učenika cijelog razreda, studenata na fakultetu.

**Što kraće vrijeme za jedan proces** ključno je jer korisnik želi da vrijeme procesa bude što kraće kako bi bio što produktivniji te da ima mogućnost nadziranja procesa ako nešto pođe po krivu. Ukoliko proces traje 6, 7 ili više sati korisnik će ga sigurno ostaviti i neće nadgledati. Brže odvijanje procesa naravno znači i mogućnost printanja više stvari u određenom vremenskom periodu čime se povećava opće korisnikovo zadovoljstvo te održava zainteresiranost za uređajem putem dinamičnosti u korištenju koju omogućava upravo brzina. Vrijeme treba biti optimalno tako da se ne troši veća količina energije za prebrzo printanje, ali i ne presporo jer to smanjuje produktivnost i zainteresiranost korisnika.

**Prihvatljiva cijena** kriterij je i ekološki osviještenog kupca jer je to dio lanca održivosti i ima jaku vezu s cijenom uređaja. Cijena je zahtjev koji svaki korisnik postavlja, bio on ekološki osviješten ili ne. Kako bi proizvod uopće došao do korisnika, cijena mu mora konkurirati na tržištu.

**Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka** ima jaku vezu s brojem koraka završne obrade jer je tu većina otpada koji nastaje (skidanje potporne strukture, alkohol) i slabu vezu s debljinom sloja i površinskom hrapavosti jer je veća šansa da će biti manje škart izradaka što je printer precizniji. Pokušati iz referenci doći.

**Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji** bitan je zahtjev jer ciljanim korisnicima koji najčešće postavljaju ovakav uređaj u kućanstva i učionice vrlo je bitno da on zauzima što manje prostora. Taj zahtjev iz perspektive ekološke prihvatljivosti znači uštedu prostora koji može biti onda bolje iskorišten.

**Mogućnost izrade predmeta željenih veličina** je u jakoj vezi s volumen radnog prostora. Povezano s printanjima u različitim kvalitetama jednako je bitno i omogućiti da se printaju

predmeti različitih veličina. O volumenu radnog prostora ovisi i hoće li se moći printati više predmeta odjednom, što je prema [16] ušteda energije.

**Zadovoljavajuća produktivnost** je u vezi s volumenom radnog prostora, brojem koraka u završnoj obradi, vremenom postavljanja uređaja za rad, postotkom povećanja vremena i brzinom printanja. Produktivnost je pojam koji obuhvaća puno različitih stvari. Korisnik želi proizvod koji će biti što produktivniji kako ne bi uzalud trošio resurse.

**Najmanje završne obrade** bitno je jer taj proces uzrokuje veliki problem u procesu 3D printanja, a to je otpad koji nastaje uklanjanjem potpornog materijala te potrebno vrijeme koje se treba uložiti u taj proces. Kod SLA uređaja taj proces čak zahtjeva i dodatne alate poput alkoholnog otapala i UV lampe. Taj dio procesa zahtjeva uglavnom manualni rad korisnika koji ne predstavlja zabavu već je samo naporan što uvelike smanjuje njegovo zadovoljstvo.

**Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu** je zahtjev postavljen jer korisnik ne želi koristiti visoke temperature u procesu zbog sigurnosnih razloga, pogotovo kada je riječ o radu s djecom, zbog potencijalne opasnosti od opekline. Također štetne emisije, upravo se događaju zbog visokih temperature te njihovim povećanjem postaju i intenzivnije. Dakako, ekološki osviješten korisnik dobro zna da korištenje visokih temperatura znači i veću potrošnju energije u radu.

Iz svih prethodno navedenih podataka izrađena je kuća kvalitete koja se nalazi u prilogu.

### 5.3.5 Rangiranje koncepata

Pošto nije propisano kako rangirati koncepte, odlučeno je da će svaki koncept biti rangiran prema tome koliko dobro zadovoljava pojedinu tehničku specifikaciju. Tako npr. za masu uređaja, koja treba biti što manja prema definiranom smjeru poboljšanja, konceptu FDM uređaja dodijeljen je rang 1, konceptu SLA uređaja rang 2 i konceptu SLS uređaja rang 3. Ukupan rezultat računa se množenjem svakog ranga s pripadajućom relativnom važnosti specifikacije. Koncept s najmanjom konačnom ocjenom, najviše je ekološki prihvatljiv.

Prema rezultatima prikazanim u tablici 20, najviše ekološki prihvatljiv je koncept SLA uređaja, zatim uz malu razliku ga slijedi FDM uređaj, a na zadnjem mjestu je koncept SLS uređaja.

**Tablica 20 Ukupan rezultat *Eco-QFD* + *Function Impact Matrix* metoda**

| Koncept uređaja za aditivnu proizvodnju | Ukupan rezultat |
|---|-----------------|
| FDM                                     | 1,84            |
| SLA                                     | 1,72            |
| SLS                                     | 2,36            |

Iz kuće kvalitete može se uočiti da su najvažniji argumenti za odabir ekološki prihvatljivog koncepta maksimalna temperatura koja se postiže u procesu, broj koraka u završnoj obradi, specifična potrošnje energije u radu te brzina printanja. FDM koncept uređaja iako dostiže najvišu temperaturu u procesu, dobar ukupan rezultat ostvaruje malim utjecajem na globalno zatopljenje i najmanjim štetnim utjecajem na zdravlje. SLA uređaj ovom s metodom pokazao kao najbolji izbor ponajviše zbog najmanje specifične potrošnje energije. SLS, kao i u prethodnim metodama pokazao se kao najlošiji izbor iz istih razloga.

## **5.4 *MCDM for Sustainability and Value Assessment* metoda**

### **5.4.1 A1: Odrediti kriterije vrednovanja i njihove težinske faktore**

Kriteriji vrednovanja u potpunosti su preuzeti iz prethodne metode. Težinski faktori određivanu su prema postupku opisanom u poglavlju 3.4.1 i prikazani su u tablici 21. Ponovno su najvažniji zahtjevi da uređaj ne koristi visoke temperature u procesu, najmanje je završne obrade, uređaj troši što manje energije u radu, da ne šteti ljudskom zdravlju i ima što manji utjecaj na globalno zatopljenje. Odmah se može uočiti da nema prevelikih odstupanja od težinskih faktora izračunatih u prethodnoj metodi.

Tablica 21 Težinski faktori kriterija vrijednosti

|   | Lagana prenosivost | Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji | Volumen prostora dovoljan i za veće ispise | Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu | Minimalan broj dijelova | Jednostavno korištenje | Prihvatljiva cijena | Jednostavno sklapanje uređaja | Najmanje završne obrade | Što manja potrošnja električne energije u radu | Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka | Ne šteti ljudskom zdravlju | Mogućnost printanja u različitim kvalitetama | Što manji utjecaj na globalno zatopljenje | Optimalno vrijeme potrebno za jedan proces | Veća produktivnost | X | Y  | Ukupno | Biaed | Normalizirano |
|---|--------------------|---|--|--|-------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------|--|---|----------------------------|--|---|--|--------------------|---|----|--------|-------|---------------|
| Lagana prenosivost                                      | 0                  | 0   | 0  | 0  | 0                       | 0                      | 0                   | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 0  | 0   | 0  | 0                  | 0 | 0  | 0      | 1     | 0,741         |
| Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji           |                    | 0   | 0  | 0  | 0                       | 0                      | 0                   | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 0  | 0   | 0  | 0                  | 0 | 1  | 1      | 2     | 1,481         |
| Volumen prostora dovoljan i za veće ispise              |                    |   | 0  | 1  | 0                       | 0                      | 1                   | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 1  | 0   | 1  | 1                  | 5 | 2  | 7      | 8     | 5,926         |
| Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu          |                    |   |  | 1  | 1                       | 1                      | 1                   | 1                             | 0                       | 1  | 0   | 0                          | 1  | 0   | 1  | 1                  | 9 | 3  | 12     | 13    | 9,63          |
| Minimalan broj dijelova                                 |                    |   |  |  | 0                       | 0                      | 1                   | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 1  | 0   | 1  | 1                  | 4 | 2  | 6      | 7     | 5,185         |
| Jednostavno korištenje                                  |                    |   |  |  |                         | 0                      | 1                   | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 1  | 0   | 0  | 0                  | 2 | 3  | 5      | 6     | 4,444         |
| Prihvatljiva cijena                                     |                    |   |  |  |                         |                        | 1                   | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 1  | 0   | 0  | 0                  | 2 | 5  | 7      | 8     | 5,926         |
| Jednostavno sklapanje uređaja                           |                    |   |  |  |                         |                        |                     | 0                             | 0                       | 0  | 0   | 0                          | 0  | 0   | 0  | 0                  | 0 | 2  | 2      | 3     | 2,222         |
| Najmanje završne obrade                                 |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               | 0                       | 1  | 0   | 0                          | 1  | 0   | 1  | 1                  | 4 | 7  | 11     | 12    | 8,889         |
| Što manja potrošnja električne energije u radu          |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         | 1  | 1   | 1                          | 0  | 1   | 1  | 5                  | 9 | 14 | 15     | 11,11 |               |
| Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         |  | 1   | 0                          | 0  | 0   | 0  | 1                  | 7 | 8  | 9      | 6,667 |               |
| Ne šteti ljudskom zdravlju                              |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         |  |   |                            | 1  | 1   | 1  | 4                  | 9 | 13 | 14     | 10,37 |               |
| Mogućnost printanja u različitim kvalitetama            |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         |  |   |                            |  | 0   | 0  | 0                  | 0 | 4  | 4      | 5     | 3,704         |
| Što manji utjecaj na globalno zatopljenje               |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         |  |   |                            |  |   | 1  | 1                  | 2 | 12 | 14     | 15    | 11,11         |
| Optimalno vrijeme potrebno za jedan proces              |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         |  |   |                            |  |   |  | 1                  | 1 | 7  | 8      | 9     | 6,667         |
| Veća produktivnost                                      |                    |   |  |  |                         |                        |                     |                               |                         |  |   |                            |  |   |  |                    | 0 | 7  | 7      | 8     | 5,926         |
|   | 0                  | 1   | 2  | 3  | 2                       | 3                      | 5                   | 2                             | 7                       | 9  | 7   | 9                          | 4  | 12  | 7  | 7                  |   |    |        | 135   | 100           |

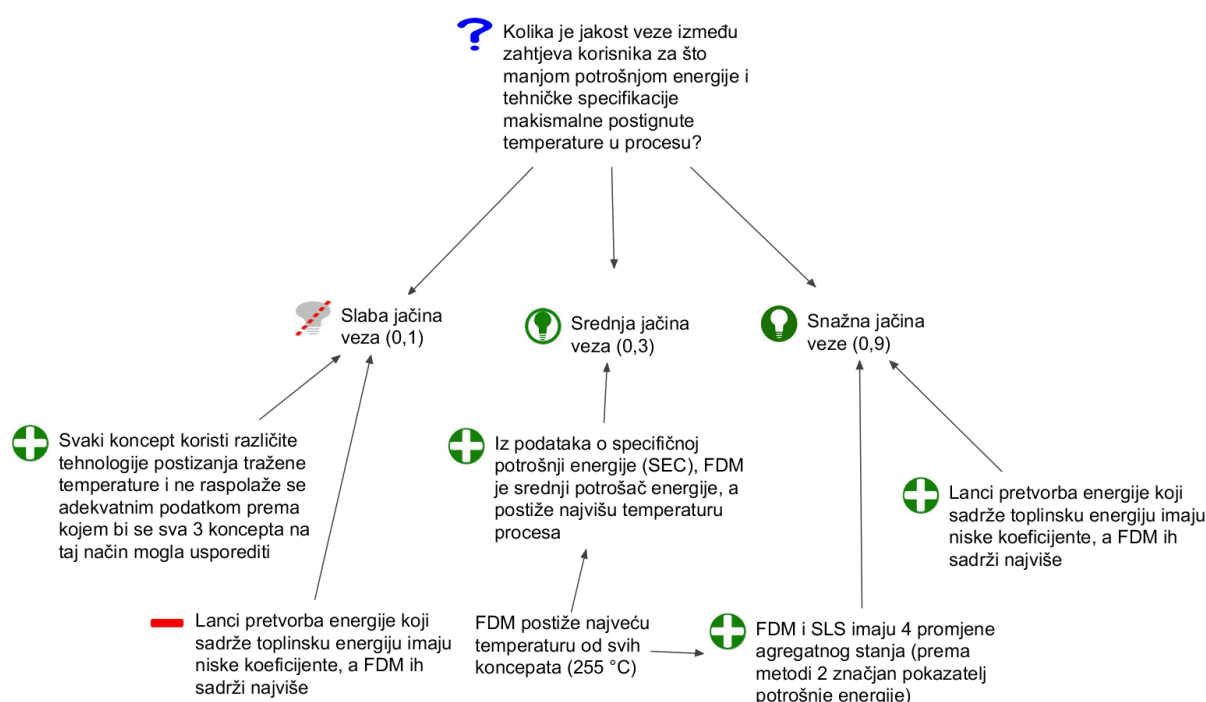
### 5.4.2 A2: Definiranje inženjerskih karakteristika koncepata

Inženjerske karakteristike, jednako kao i za *Eco-QFD + Function Impact Matrix* metodu, preuzete su u potpunosti iz poglavlja 4.4 kako bi se zadržala konzistentnost podataka.

### 5.4.3 A3: Ostvariti veze između kriterija vrednovanja i inženjerskih karakteristika

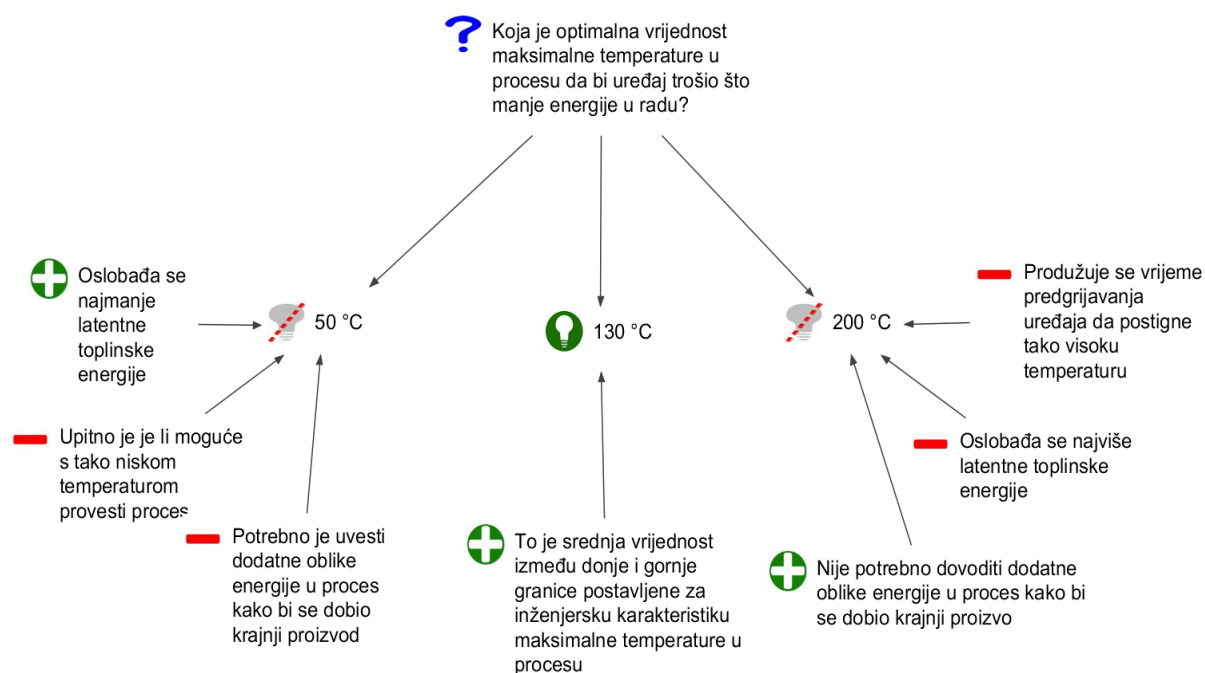
Za svako sjecište MCDM matrice izrađen je IBIS zapis kako bi se donijela što bolja odluka. Radi primjera u nastavku teksta prikazan je postupak za jedno sjecište. Za povezanost zahtjeva za što

manjom potrošnjom energije u radu i inženjerskom karakteristikom maksimalne temperature koja se postiže u procesu, trebalo je odrediti jačinu veze, vrstu funkcije te optimalnu vrijednost. Na slici 46 prikazan je IBIS zapis za određivanje jakosti veze. Za svaku jakost veze (0,1; 0,3 ili 0,9) dani su argumenti za i protiv te podaci iz kojih su oni zaključeni. Odlučeno je da bi jačina veze trebalo biti 0,9. Polazna logika je da FDM i SLS uređaji prema podacima o potrošnji energije u radu troše više od SLA uređaja, a njihova radna temperatura je 255 °C za FDM uređaj i 190 °C za SLS uređaj.



**Slika 46 IBIS zapis za određivanje jačine veze između maksimalne temperature u procesu i potrošnje energije u radu**

Sljedeća odluka koju je trebalo donijeti je kolika je optimalna vrijednost temperature (kada je stvarna vrijednost temperature jednaka optimalnoj, zadovoljstvo korisnika je 50%). Na slici 47 prikazan je IBIS zapis koji je izrađen u tu svrhu.

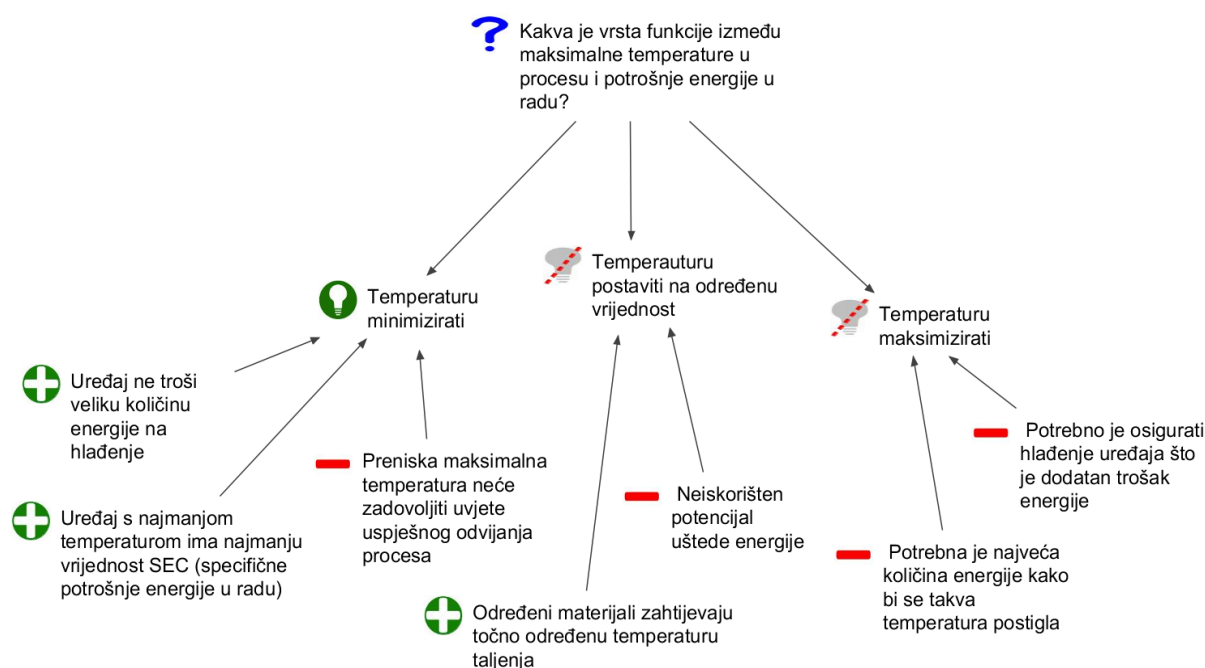


**Slika 47 IBIS zapis za određivanje optimalne vrijednosti maksimalne temperature u procesu u vezi s potrošnjom energije u radu**

Zadnja odluka koja se mora donijeti za svako sjecište je vrsta funkcije između kriterija vrijednosti i odgovarajuće inženjerske karakteristike. Na slici 48 prikazan je IBIS zapis iz kojeg se može

vidjeti kako je izabrano da maksimalnu temperaturu u procesu treba minimizirati ukoliko se želi smanjiti potrošnja energije u radu.





Slika 48 IBIS zapis za određivanje vrste funkcije između maksimalne temperature u procesu i potrošnji energije u radu

### 5.4.4 A4: Generiranje MCDM matrice

Kada su određene sve potrebne korelacije, mogu se izraditi MCDM, odnosno CODA matrice za sva tri koncepta.

Dodatno, svakoj odluci pripisuje se KM vrijednost na način opisan u daljnjem tekstu. Detaljan postupak dodjeljivanja KM (Knowledge Maturity) ocjena ovdje će samo radi primjera biti prikazan za jedan IBIS zapis. Za primjer je uzet dijagram prikazan na slici 46 koji treba odgovoriti na pitanje: Kolika je jakost veze između zahtjeva korisnika za što manjom potrošnjom energije i tehničke specifikacije maksimalne postignute temperature u procesu.

Tablica 22 Primjer dodjeljivanja KM ocjena

| Odgovor           | Argument  | Ocjena ulaznih podataka        | Ocjena metoda/alata          | Ocjena iskustva/stručnosti | Srednja vrijednost |
|-------------------|---|--------------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Slaba jačina veze | Svaki koncept koristi različite tehnologije postizanja tražene temperature i ne raspolaže | 4 (opće znanje o 3D printanju) | 4 (pretraživanje literature) | 4 (stručnost osoba koje su | 4                  |


|                                      |   |  |                                |   |      |
|--------------------------------------|---|--|--------------------------------|---|------|
|                                      | se adekvatnim podatkom prema kojem bi se sva tri koncepta na taj način mogla usporediti                                 |  |                                | pisale literaturu)                            |      |
|                                      | FDM uređaj ima kraće vrijeme trajanja procesa pa time možda troši manje energije iako postiže visoke temperature        | 3 (brzina preuzeta od proizvođača iz [37])                           | 2 (nedovoljno podataka)        | 5 (osobe koje proizvode 3d printere)          | 3,33 |
|                                      | Lanci pretvorba energije koji sadrže toplinsku energiju imaju niske koeficijente, a FDM takvih lanaca sadrži najviše    | 4 (podaci prema [4])   | 4 (preuzeto iz literature [4]) | 3 (osoba koja je provodila metodu)            | 3,67 |
| Srednja jačina veze                  | Iz podataka o specifičnoj potrošnji energije (SEC), FDM uređaj je srednji potrošač energije                             | 4 (podaci prema [34], ali se možda ne mogu prenijeti na ovaj uređaj) | 5 (standardizirana metoda)     | 5 (stručne osobe koje su pisale literaturu)   | 4,67 |
| Snažna jačina veze                   | FDM i SLS uređaji imaju veći broj promjena agregatnog stanja u procesu što je dobar indikator visoke potrošnje energije | 4 (opće znanje o 3D printanju)                                       | 4 (pretraživanje literature)   | 4 (stručnost osoba koje su pisale literaturu) | 4    |
|                                      | Lanci pretvorba energije koji sadrže toplinsku energiju imaju niske koeficijente, a FDM takvih lanaca sadrži najviše    | 4 (podaci prema [4])   | 4 (preuzeto iz literature [4]) | 3 (osoba koja je provodila metodu)            | 3,67 |
| Ukupna srednja vrijednost            |   |  |                                |   | 3,89 |
| Ukupna zaokružena srednja vrijednost |   |  |                                |   | 4    |

Po uzoru na tablicu 22 trebalo bi izraditi tablicu za svaku odluku donesenu IBIS dijagramom, što znači za svako sjecište kriterija vrijednosti i inženjerske karakteristike CODA matrice. Za svako sjecište treba donijeti tri odluke: jačinu veze (0,9 ; 0,3 ili 0,1), neutralnu ili optimalnu vrijednost

inženjerske karakteristike i vrstu veze opisanu jednom od funkcija (Min, Max, Opt). Dodatno, ako je odabrana optimalna funkcija kao vrsta veze, i vrijednosti tolerancije se mora pripisati KM vrijednost.

Ukupne zaokružene srednje vrijednosti (u primjeru iz tablice 22 ta vrijednost je 4), unose se u CODA matricu za svaku od gore spomenutih odluka. Ovdje se radi preglednosti podataka, odlučilo ćelije obojati određenom bojom koje predstavljaju ocjene prema legendi prikazanoj u tablici 23. Ponovno se računa srednja vrijednost za te tri (ili četiri) ocjene te se na temelju toga dobiva ukupna KM vrijednost svakog stupca. Krajnji KM rezultat za cijeli koncept, srednja je vrijednost svih KM rezultata po stupcima.

**Tablica 23** Legenda za računanje KM rezultata

| Ocjena | Boja  |
|--------|---|
| 1      |    |
| 2      |   |
| 3      |  |
| 4      |  |
| 5      |  |

U okviru ovog rada KM rezultat za svaki koncept je isti jer su i tri odluke koje se moraju donijeti iste za sva 3 koncepta, jedino što se mijenjalo za svaki koncept je stvarna vrijednost inženjerskih karakteristika. Cilj KM rezultata je iz tog razloga u ovome radu, pronaći aspekte koncepata za koje je KM rezultat nizak, a pokazano je da jako utječu na krajnji rezultat CODA matrice. Kada se takvi aspekti pronađu, treba ih bolje istražiti, provesti dodatne izračune ili eksperimente te im tako nastojati poboljšati KM rezultat kako bi konačna odluka bila što pouzdanija i temeljena na adekvatnim podacima.

Ukupan KM rezultat ovdje je 3,69 što bi se prema tablici 4 nazvalo prihvatljivim/dobrim rezultatom. Podaci su detaljni, ali nisu svi nužno provjereni, za dobivanje tih podataka korištene su standardne metode te osoba/tim od koje su ti podaci dobiveni, stručna je i ima iskustva u području 3D printanja.

Valja naglasiti aspekte koncepta gdje bi se trebala provesti dodatna istraživanja i eksperimenti kako bi valjanost podataka bila na višoj razini od trenutne. To se konkretno odnosi na podatke i korelacije vezane uz sljedeće kriterije vrednovanja, odnosno time na inženjerske karakteristike uz koje se vežu:

- minimalan broj dijelova
- Mogućnost printanja u različitim kvalitetama
- Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka
- Vrijeme potrebno za jedan proces je optimalno
- Zadovoljavajuća produktivnost procesa

U prilogu su prikazane CODA matrice za koncepte FDM, SLA i SLS uređaja za aditivnu proizvodnju.

#### 5.4.5 A5: Prikaz rezultata

Rezultati su prikazani ukupnom ODM vrijednosti u tablici 24.

**Tablica 24 Ukupan rezultat MCDM metode**

| Koncept | Ukupna vrijednost dobrote koncepta |
|---------|------------------------------------|
| FDM     | 44%                                |
| SLA     | 43,19%                             |
| SLS     | 31,97%                             |

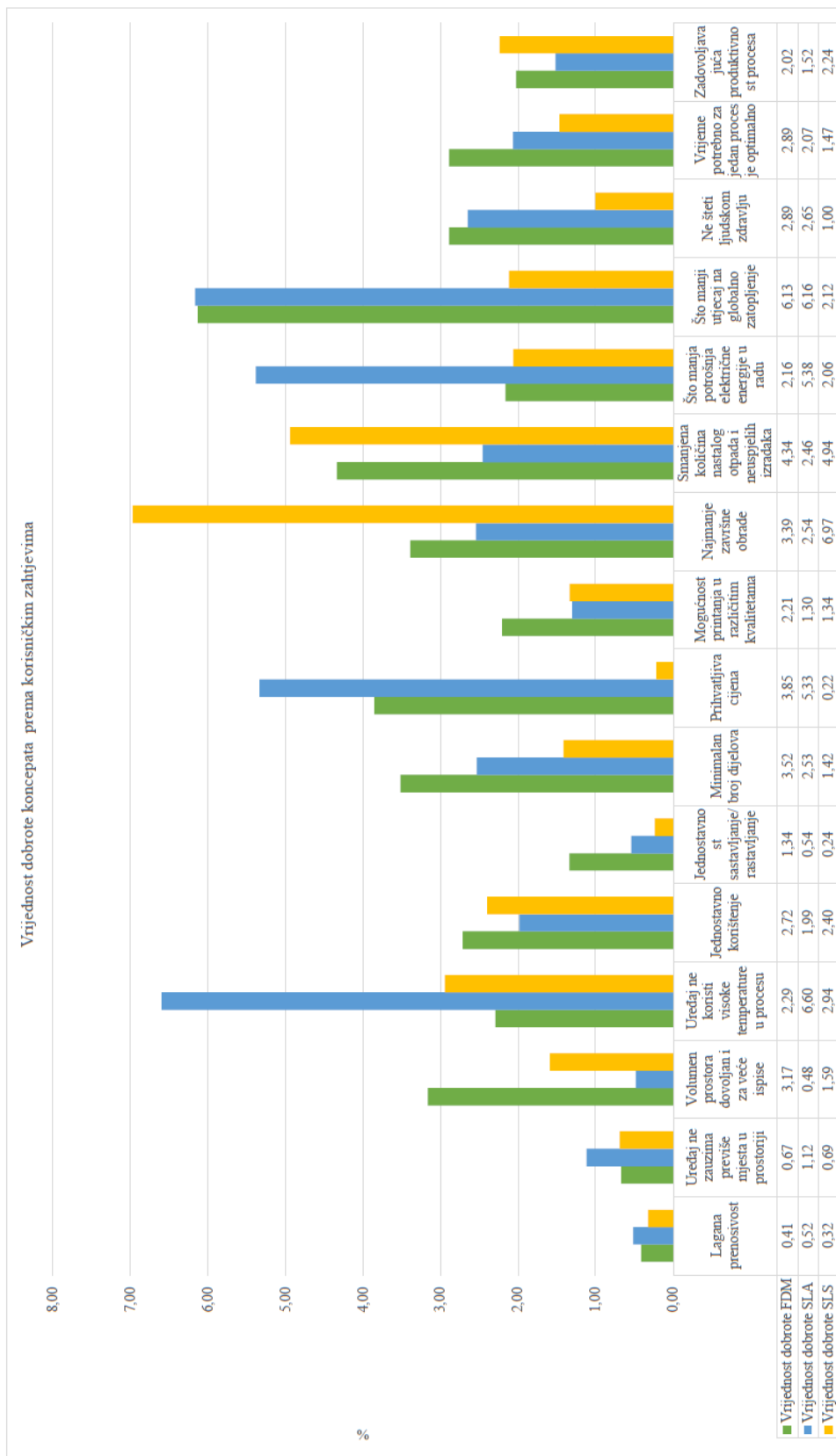
Prema rezultatima najviše ekološki prihvatljiv koncept je FDM uređaj s vrijednosti ODM 44%, ali za njime slijedi koncept SLA uređaja sa skoro pa neznatno manjim rezultatom od 43,19 %. Četvrtom metodom je ponovno SLS uređaju pripalo posljednje mjesto po ekološkoj prihvatljivosti.

U tablici 25 prikazan je rezultat prema svakom kriteriju vrednovanja.

**Tablica 25 Rezultat MCDM metode prema pojedinim korisničkim zahtjevima**

| Korisnički zahtjev  | Vrijednost dobrote |       |      | Koncept s najvećom vrijednosti dobrote |
|---|--------------------|-------|------|--|
|   | FDM                | SLA   | SLS  |  |
| Lagana prenosivost  | 0,41               | 0,51  | 0,32 | SLA                                    |
| Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji                     | 0,67               | 1,11  | 0,69 | SLA                                    |
| Volumen prostora dovoljan i za veće ispise (> 3 dm <sup>3</sup> ) | 3,16               | 0,48  | 1,5  | FDM                                    |
| Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu                    | 2,29               | 6,59  | 2,94 | SLA                                    |
| Jednostavno korištenje  | 2,71               | 1,98  | 2,40 | FDM                                    |
| Jednostavnost sastavljanje/rastavljanje                           | 1,34               | 0,53  | 0,24 | FDM                                    |
| Minimalan broj dijelova   | 3,51               | 2,533 | 1,41 | FDM                                    |
| Prihvatljiva cijena   | 3,85               | 5,33  | 0,22 | SLA                                    |
| Mogućnost printanja u različitim kvalitetama                      | 2,20               | 1,30  | 1,33 | FDM                                    |
| Najmanje završne obrade   | 3,38               | 2,54  | 6,97 | SLS                                    |
| Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka           | 4,33               | 2,45  | 4,94 | SLS                                    |
| Što manja potrošnja električne energije u radu                    | 2,16               | 5,38  | 2,06 | SLA                                    |
| Što manji utjecaj na globalno zatopljenje                         | 6,13               | 6,16  | 2,11 | SLA                                    |
| Ne šteti ljudskom zdravlju  | 2,89               | 2,65  | 1,00 | FDM                                    |
| Što kraće vrijeme potrebno za jedan proces                        | 2,89               | 2,06  | 1,46 | FDM                                    |
| Zadovoljavajuća produktivnost procesa                             | 2,02               | 1,51  | 2,23 | SLS                                    |

Iz tablice 25 vidi se da u većini korisničkih zahtjeva prednjače FDM i SLA uređaj podjednako. SLS uređaj bolji je jedino u tri zahtjeva: najmanje završne obrade, smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka te zadovoljavajuća produktivnost procesa. Najveći rezultata u ta tri kriterija slaže se i sa ostalim rezultatima u prethodno provedenim metodama i temelji se na više puta ranije spomenutoj karakteristici SLS uređaja da ne zahtjeva potporni materijal, a prema tome ni završnu obradu nakon procesa printanja što oboje utječe i na to da se produktivnost rada povećava zbog manje vremena provedenog na završnoj obradi izratka. Grafički prikaz vrijednosti dobrota prikazan je na slici 49.



Slika 49 Grafički prikaz rezultata po kriterijima vrijednosti

## 6 USPOREDBA REZULTATA I RASPRAVA

### 6.1 Usporedba rezultata

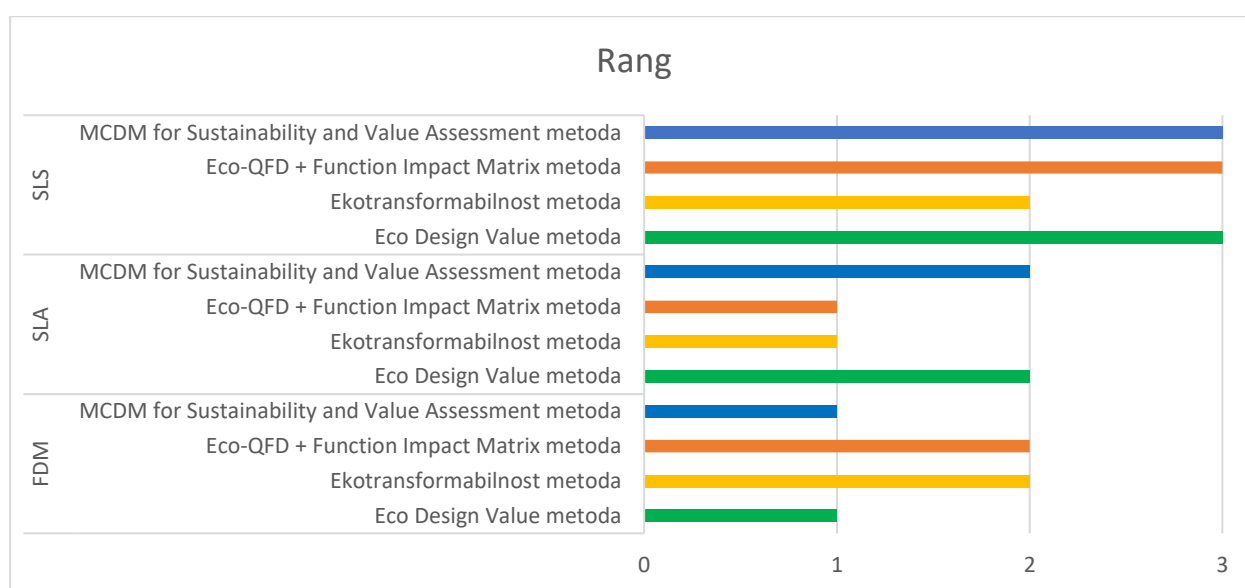
Rezultati sve četiri provedene metode objedinjeni su u tablici 26. Treba naglasiti da kod metoda *Ekotransformabilnost* [4] i *Eco-QFD + Function Impact Matrix* [11][5], onaj koncept koji ima najmanji ukupan rezultat je zapravo najviše ekološki prihvatljiv, a kod metoda *Eco Design Value* [14] i *MCDM for Sustainability and Value Assessment* [17][16] vrijedi obrnuto, onaj koncept koji ima najmanji ukupan rezultat je najmanje ekološki prihvatljiv. Pošto svaka metoda ima vlastiti sustav vrednovanja, dodan je stupac *Rang* gdje je upisano kako je svaki koncept uređaja rangiran unutar metode (1, 2 ili 3).

Tablica 26 Usporedba rezultata sve četiri metode

| Koncept | Metoda  | Ukupan rezultat | Rang |
|---------|---|-----------------|------|
| FDM     | <i>Eco Design Value</i> metoda [14]                                 | 22              | 1    |
|         | <i>Ekotransformabilnost</i> metoda [4]                              | 11              | 2    |
|         | <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> metoda [11][5]              | 1,844           | 2    |
|         | <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> metoda [17][16] | 44 %            | 1    |
| SLA     | <i>Eco Design Value</i> metoda [14]                                 | 12              | 2    |
|         | <i>Ekotransformabilnost</i> metoda [4]                              | 7               | 1    |
|         | <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> metoda [11][5]              | 1,721           | 1    |
|         | <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> metoda [17][16] | 43,19 %         | 2    |
| SLS     | <i>Eco Design Value</i> metoda [14]                                 | 0               | 3    |
|         | <i>Ekotransformabilnost</i> metoda [4]                              | 11              | 2    |
|         | <i>Eco-QFD + Function Impact Matrix</i> metoda [11][5]              | 2,363           | 3    |
|         | <i>MCDM for Sustainability and Value Assessment</i> metoda [17][16] | 31,97 %         | 3    |

Može se zaključiti da su FDM i SLA koncepti uređaja jednako puta bili prvo i drugo rangirani s time da su u *MCDM for Sustainability and Value Assessment* [17][16] metodi bili vrlo slično rangirani pa bi se moglo reći da je SLA koncept uređaja najbliži ekološkoj prihvatljivosti uzimajući

sve četiri metode u obzir. Kako je već i prije obrazloženo, SLA koncept uređaja ima najnižu maksimalnu temperaturu koju postiže u radu, specifična potrošnja energije tijekom rada mu je najniža, a time i utjecaj na globalno zatopljenje što se tiče energije. FDM koncept uređaj ima najveći volumen radnog prostora, jednostavne je konstrukcije pa se lako sastavlja/rastavlja i koristi. SLS koncept uređaja prema sve četiri metode posljednje je rangiran (u *Ekotransformabilnost* [4] metodi FDM i SLS imaju jednak rang - 2). Jedina kategorija u kojoj odnosi veliku prednost je činjenica da ne zahtjeva završnu obradu, odnosno nema potrebe za potpornom strukturom. Na slici 50 je grafički prikaz rangiranja koncepata prema svakoj korištenoj metodi.



Slika 50 Rangiranje koncepata prema sve četiri metode

## 6.2 Osvrt na metode – prednosti i nedostaci

U okviru ovog rada istražene su i primijenjene četiri metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti proizvoda u konceptualnoj fazi. Kao glavni kriteriji prilikom odabira metoda u poglavlju 2.1 bili su da metoda bude primjenjiva u konceptualnoj fazi, da je njena provedba detaljno objašnjena te da je jednostavna i ne zahtjeva previše vremena, tu dodati još ako ću imati...

**Eco Design Value metoda** [14] se temelji na skupu smjernica te originalno nije predviđena za vrednovanje već kao niz uputa za razvoj ekološki prihvatljivog proizvoda. Sustav rangiranja iz tog je razloga proizvoljno odabran te je njegova valjanost upitna. Npr. dodjeljivanjem korelacije vrijednosti '0' za nedostatak podataka o određenom kriteriju i istovremeno dodjeljivanje korelacije



'-2' nekom drugom konceptu zbog lošeg zadovoljavanja tog kriterija nije prikladno i neće dati pouzdan rezultat. Smjernice, u obliku šturih izjavnih rečenica, daju veliku slobodu opsegu i sadržaju odgovora. Ovisno o osobi/timu koja provodi metodu, razmišljanje je o jednoj smjernici može biti vrlo opširno, detaljno te uključivati velik broj podataka, a može biti i vrlo subjektivno s minimalno provjerenih kvantitativnih podataka. To ne mora nužno biti mana te metode, već bi se na samom početku trebao dogovoriti opseg razmatranja konstrukcijskog problema te se onda kroz cijelu metodu držati tog okvira. Metoda eksplicitno ne zahtjeva nikakve kvantitativne podatke što znači da svaki odgovor može biti kvalitativan, a samim time i potencijalno subjektivan. Provođenjem metode se također uočilo da su neke smjernice vrlo slične i vrlo je teško među njima napraviti razliku. Trebalo bi istražiti može li se ta uočena mana pripisati lošoj interpretaciji metode. Također, u metodi nije specificirano ima li svaka smjernica istu važnost. Nerealno je za očekivati da su sve smjernice jednako važne i na temelju toga donositi konačan rezultat.

S druge strane, metoda je pogodna za rane faze razvoja jer nema potrebe za nikakvim kvantitativnim podacima. To ipak treba uzeti sa zadržkom jer ovisi o dogovorenom opsegu razmatranja. Glavna prednost ove metode je što je vrlo jednostavna za korištenje te zahtjeva minimalno vremena. Konstrukcijski tim koji je posve upoznat sa svim aspektima proizvoda, mogao bi metodu provesti u vrlo kratkom periodu jer nisu potrebni detaljni podaci i dodatni resursi za njeno provođenje.

**Ekotransformabilnost metoda** [4] zahtjeva kreiranje lanaca pretvorbi energije na temelju funkcijskih dekompozicija proizvoda. Za kvalitetnu izradu lanaca fizikalnih efekata, osoba koja provodi metodu mora se upoznati s tehnikom generiranja istih, što zahtjeva dodatan trošak vremena. Definiranje sekundarnih efekata na okoliš te ocjenjivanje istih, iako definirano tablicom, nije potpuno pouzdano jer prvenstveno konstruktori generalno imaju jako malo znanja o tome. Metoda, kao i prethodna, je dosta subjektivna i ovisi o stručnosti i iskustvu osobe koja je provodi. Metoda postaje vrlo komplicirana ako se primjenjuje na složenije proizvode jer treba generirati velik broj lanaca pretvorbi energije koji postaju sve više isprepleteni.

Ekoefektivnost pretvorbi energije je koncept koji je na vrlo inovativan i nov način implementiran u ovu metodu odlučivanja o ekološkoj prihvatljivosti. Primjenjivost tih faktora na ovaj način nije do sada ispitana u praksi.

Bitno je naglasiti da je ovo metoda koja zahtjeva najmanju količinu podataka kako bi se pravilno provela. Nisu potrebne nikakve karakteristike fizičkog proizvoda poput informacija o geometriji. Dovoljno je definirati fizikalne efekte na kojima se temelje funkcije proizvoda.

Metodom nije egzaktno određeno treba li definirati važnosti kriterija vrednovanja. Dodjeljivanje važnosti rezultiralo bi realnijim rezultatima.

***Eco-QFD + Function Impact Matrix metoda*** [11][5] provodi se u dva dijela. Prvi dio je kreiranje *Function Impact Matrix* matrice. U članku je predloženo da se promatrani proizvod raščlani na komponente i funkcije te se za svaku komponentu definiraju podaci o emisiji CO<sub>2</sub> nastalog prilikom njene proizvodnje. Takvi podaci dobivaju se iz *Life Cycle Assessment* analize sličnog postojećeg proizvoda. Pošto u okviru ovog rada nije bilo moguće provesti *Life Cycle Assessment* analizu, iskorišteni su podaci o ekoefektivnostima pretvorbe energije. Određivanje postotka kojim komponenta sudjeluje u obavljanju pojedine funkcije subjektivno je i uvelike ovisi o stručnosti i iskustvu osobe koja provodi metodu. Provođenje LCA analize zahtjeva puno vremena, veliki opseg potrebnih podataka do kojih je teško doći te posjedovanje odgovarajućeg softvera.

Drugi dio metode je izrada *Eco-QFD* kuće kvalitete. Prema članku, u kuću kvalitete kao korisnički zahtjev i tehničku specifikaciju trebalo bi onda uvrstiti podatak prema kojem se radila *FIM* matrica (emisija CO<sub>2</sub>, tj. u ovome radu ekoefektivnost pretvorbi energije). Može se primijetiti da su *FIM* matrica i kuća kvalitete samo povezane preko jednog korisničkog zahtjeva, tj. tehničke specifikacije. Kuća kvalitete daje vrlo dobar vizualni prikaz svih korištenih podataka na jednom mjestu. Velika prednost je i činjenica da se temelji na željama korisnika te se te želje direktno uključuju u proces razvoja proizvoda. Mane kuće kvalitete su dostupnost mjerljivih tehničkih specifikacija u ranoj fazi razvoj proizvoda. Neke specifikacije korištene u ovom radu, npr. *GWP* (utjecaj na globalno zatopljenje), *SEC* (specifična potrošnja energije u radu) mogu se dobiti isključivo na temelju gotovog proizvoda te kao kriterij koristiti sa zadržkom o pouzdanosti i primjenjivosti podataka na promatrani proizvod. Istaknuti problem ove metode je to što nije definiran postupak rangiranja koncepata. Kuća kvalitete daje krajnji podatak o važnost pojedine tehničke specifikacije jer je orijentirana na razvoj novog proizvoda, a u tu svrhu nije korištena u ovom radu. Također je bitno istaknuti da metoda nije komplicirana i stoga ne zahtijeva puno vremena.

**MCDM for Sustainability and Value Assessment metoda** [17][16] je posljednje provedena metoda koja zahtjeva najviše potrebnih podataka i vremena za prikupljanje istih te provođenja same metode. Pristup problemu je vrlo sistematično organiziran te je sa sigurnošću najobjektivnija metoda od sve četiri obrađene u okviru ovog rada.

U okviru metode potrebno je definirati kriterije vrijednosti i inženjerske karakteristike, vrlo slično kao i za izradu kuće kvalitete. Za definiranje vezu među njima potrebno je izraditi IBIS dijagrame što može postati vrlo opsežan i vremenski zahtjevan posao ukoliko je veza puno. Svakom argumentu u IBIS dijagramu potrebno je još dodati i KM vrijednost koja podrazumijeva evaluaciju pouzdanosti podataka, metode te stručnosti osobe koja je isporučile podatke. Uz to, mora se uzeti u obzir da je potrebno prikupiti podatke iz velikog broja izvora te uključiti ljude iz različitih sektora. Nerealno je očekivati dostupnost pouzdanih i realnih podataka na toj razini u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda. Valja spomenuti potrebu za poznavanjem vrlo specifičnih vrijednosti kao npr. određivanje neutralne (optimalne) vrijednosti za svaku inženjersku karakteristiku. Vrlo je teško odrediti s kojom vrijednosti će korisnik u prosjeku biti 50 % zadovoljan. Problem u kvalitetnom određivanju te vrijednosti eskalira zbog korištenja upravo te vrijednosti za izračun svake vrijednosti dobrote što znači da se ukupan rezultat cijele metode oslanja na podatak koji je vrlo nepouzdan.

Metodom se potiče intenzivno razmišljanje o svakom aspektu promatranog proizvoda, koordiniraju se odluke i prikupljaju podaci unutar cijelog tima koji sudjeluje u razvoju.

### 6.3 Ograničenja istraživanja

U okviru ovog rada napravljen je pregled metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja proizvoda te su provedene četiri koje su najbolje zadovoljavale postavljene kriterije. Za primjer su uzeta tri uređaja za aditivnu proizvodnju (3D printera) koja rade na principu tri različite tehnologije.

**Korišteni podaci o konceptima uređaja za aditivnu proizvodnju** kako je navedeno ranije, preuzeti su iz studentskih radova. Mora se uzeti u obzir da je bilo predviđeno relativno kratko vrijeme za izradu te se pretpostavlja da studenti nemaju ili imaju jako malo iskustva i znanja o uređajima za aditivnu proizvodnju te ograničena iskustva o konstruiranju proizvoda općenito. Iako

su neke pronađene nelogičnosti i netočnosti ispravljene, pouzdanost podataka nije na maksimalnoj razini.

Podaci koji su nedostajali za uspješno provođenje svake metode preuzeti su iz znanstvenih radova i od sličnih uređaja dostupnih na tržištu. To naravno znači da je set podataka za jedan uređaj dobiven iz više različitih izvora te se treba promatrati s velikim oprezom. Neki podaci su generalni i može se reći primjenjivi na slične uređaje koji rade na principu iste tehnologije, dok drugi podaci strogo ovise o specifičnostima pojedinog uređaja.

Kako bi se dobili pouzdaniji podaci, trebalo bi ih prikupiti empirijski, odnosno pokušati što više potrebnih podataka odrediti na realnim uređajima za aditivnu proizvodnju.

**Generalni problem o nedostatku podataka o aditivnoj proizvodnji u znanstvenoj literaturi** naglašava se kroz velik broj radova koji se bave tim područjem. Manjak standarda u području aditivne proizvodnje je razlog zašto se dijelovi tako proizvedeni ne koriste toliko u npr. medicini i industriji koja uglavnom počiva na standardnim procesima i izboru materijala kako bi se osigurala konzistentnost kvalitete [1]. Sirovi materijali koji se koriste su nedovoljno dokumentirani i nema podataka o utjecaju na okoliš [48]. Trenutne LCA studije o aditivnoj proizvodnji imaju jako puno pretpostavki i pojednostavljenja. Često se nalaze konfliktni rezultati u literaturi. Najveće rupe u podacima vezane su uz proizvodnju sirovog materijala i kraj životnog vijeka proizvoda. Također, velika većina podataka prikupljena je u laboratorijskim uvjetima, a ne u realnim uvjetima korištenja [8].

**Izbor metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja** bio je proveden prema kriterijima opisanim u drugom poglavlju. Odabrane su metode koje se uglavnom razlikuju jedna od druge, a time zahtijevaju i različitu vrstu podataka, pristupa i potrebnih znanja osobe koja ju provodi. Prednosti i mane svake od metoda detaljno su opisane u prošlom poglavlju. U stručnoj literaturi ne postoji „idealna“ metoda koja bi zadovoljavala sva očekivanja ovog istraživanja. Zbog toga su obrađene metode prilagođene ovom slučaju u manjoj ili većoj mjeri. Usprkos tome što se pazilo da se ne naruši smisao metode, upitno je koliko je zadržan integritet iste. To se pogotovo može primijetiti na sustavima vrednovanja koji za prvu i treću metodu nisu ni definirani, već su proizvoljno odabrani.

Općenito postoji vrlo mali broj metoda za analizu ekološke prihvatljivosti koje su primjenjive u konceptualnoj fazi razvoja.

## 7 ZAKLJUČAK

U okviru ovog rada istražene su metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti te su četiri metode provedene na primjeru konceptata uređaja za aditivnu proizvodnju, tj. 3D printera.

Metode za vrednovanje ekološke prihvatljivosti još uvijek su rijetko korištene u procesu razvoja proizvoda. Najpopularnija, i jedina standardizirana, metoda je analiza životnog ciklusa (engl. LCA - *Life Cycle Assessment*) koja zahtjeva vrlo detaljne podatke o svim fazama životnog ciklusa promatranog proizvoda te sukladno tome značajnu količinu resursa (počevši od potrebnog vremena pa do troška tako opsežne analize). Provedba LCA analize je iz tog razloga općenito problematična, a pogotovo u konceptualnoj fazi razvoja kada nedostaje adekvatnih informacija o proizvodu te se one uglavnom kvalitativne. Pošto se upravo u konceptualnoj fazi donose najvažnije odluke u cijelom procesu razvoja, koje je u kasnijim fazama vrlo teško i skupo ispraviti, potrebno je pronaći metodu kojom se tada može procijeniti ekološka prihvatljivost. Nakon pregleda literature, odabrane su četiri metode koje su najbolje odgovarale postavljenim kriterijima u poglavlju 2.1. Odabrane metode su: *Eco-QFD + Function Impact Matrix* [5], [11], *Eco Design Value* [14], *MCDM for Sustainability and Value Assessment* [16][17] i *Ekotransformabilnost* [4].

Metode su provedene na primjeru konceptata uređaja za aditivnu proizvodnju koji su preuzeti iz studentskih radova [28], [29] i [30]. Radi se o tri koncepta uređaja koja koriste tri različite tehnologije aditivne proizvodnje: taložno srašćivanje (FDM - *Fused Deposition Modelling*), selektivno lasersko srašćivanje (SLS - *Selective Laser Sintering*) i stereolitografija (SLA - *Stereolitography*). Koncepti su opisani u poglavlju 4, a detaljan postupak provedbe svake metode dan je u poglavlju 5.

Šesto poglavlje obuhvaća usporedbu rezultata, osvrt na prednosti i nedostatke metoda te ograničena provedenog istraživanja. FDM i SLA koncepti uređaja bili su jednako puta prvo i drugo rangirani te su im se krajnje vrijednosti uvijek slično kretale u svim metodama za razliku od SLS uređaja koji je u sve četiri metode bio na zadnjem mjestu. Uzimajući sve u obzir, može se reći da je koncept SLA uređaja najbliži ekološkoj prihvatljivosti. Tome je tako jer ima najnižu maksimalnu temperaturu koju postiže u radu, specifična potrošnja energije tijekom rada mu je najniža, a time i utjecaj na globalno zatopljenje što se tiče energije. Ti kriteriji imali su dodijeljene najveće važnosti.

*Eco Design Value* [14] metoda najjednostavnije je i zahtijeva najmanje vremena i podataka od svih obrađenih metoda, a obzirom da je pružila zadovoljavajući rezultat, može se reći da je vrlo dobar izbor za inicijalnu procjenu ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi, ali se mora uzeti u obzir da je primarno subjektivnog karaktera. *Ekotransformabilnost* [4] metoda temelji se na generiranju lanaca fizikalnih efekata za pojedine funkcije proizvoda te ocjenjivanja ekoeftivnosti pretvorbi energije i signala što ju čini izuzetno pogodnom za koncepte koji su razrađeni samo na razini funkcijskih struktura bez ikakvog definiranja fizičkih značajki poput geometrije. *Eco-QFD + Function Impact Matrix* [5], [11] i *MCDM for Sustainability and Value Assessment* [16][17] su slične metode koje zahtijevaju kvantitativne informacije o proizvodu te značajno više vremena i dostupnih podataka. Obzirom da su dale analogne rezultate kao i prve dvije metode koje su jednostavnije, upitno je je li ih potrebno provoditi u svrhu analize ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi. Kada bi se uz kriterij ekološke prihvatljivosti uzimali i drugi kriteriji pri odluci o najboljem konceptu (što i je slučaj u praksi), jedino bi njih bilo moguće koristiti.

Osim specifičnih ograničenja ovog istraživanja koja su vezana uz korištene podatke o konceptima uređaja za aditivnu proizvodnju i generalnog manjka podataka o životnom ciklusu takvih uređaja u znanstvenoj literaturi, najvažniji problem je upravo vrlo ograničen izbor metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja. Odabrane četiri metode zadovoljile su kriterije postavljene na početku istraživanja te su dobiveni poprilično konzistentni rezultati. Valja naglasiti da su metode u manjoj ili većoj mjeri prilagođene kako bi se mogle koristiti (npr. *Eco-QFD + Function Impact Matrix* [5], [11] metoda zahtijeva podatke dobivene LCA analizom što se zamijenilo podacima o efektivnosti pretvorbi energije). Sa sigurnošću se može zaključiti da i dalje u znanstvenoj literaturi postoji značajan tzv. "research gap" u području metoda za vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja. Još veći zaostatak očituje se u primjeni takvih metoda u praksi. Ovim radom prikazana je uporaba četiri metode na primjeru koncepata uređaja za aditivnu proizvodnju preuzetih iz studentskih radova. Smjer budućih istraživanja za početak bi bio testirati metode na više različitih primjera, testirati ih na realnom primjeru iz prakse te proširiti pregled znanstvene literature iz područja s ciljem pronalaska dodatnih metoda koje odgovaraju postavljenim kriterijima.

## LITERATURA

- [1] M. Mani, K. W. Lyons, and S. K. Gupta, Sustainability characterization for additive manufacturing, *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 419–428, 2014
- [2] S. Ahmad, K. Y. Wong, M. L. Tseng, and W. P. Wong, Sustainable product design and development: A review of tools, applications and research prospects, *Resources, Conservation and Recycling*, 49–61, 2018
- [3] G. Taddese, S. Durieux, and E. Duc, Sustainability performance indicators for additive manufacturing: a literature review based on product life cycle studies, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 3109–3134, 2020
- [4] I. Midžić, *Vrednovanje ekološke prihvatljivosti u konceptualnoj fazi razvoja tehničkih sustava*, 2018.
- [5] S. Devanathan, D. Ramanujan, W. Z. Bernstein, F. Zhao, and K. Ramani, Integration of sustainability into early design through the function impact matrix, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 2010
- [6] S. Ford and M. Despeisse, Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges, *Journal of Cleaner Production*, 1573–1587, 2016
- [7] *The Next Production Revolution: Implications for Governments and Business*, OECD Publishing, 2017.
- [8] D. Rejeski, F. Zhao, and Y. Huang, Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing, *Additive Manufacturing*, Elsevier, 21–28, 2018
- [9] P. Rousseaux et al., Eco-tool-seeker: A new and unique business guide for choosing ecodesign tools, *Journal of Cleaner Production*, 546–577, 2017
- [10] F. le Bourhis, O. Kerbrat, J. Y. Hascoet, and P. Mognol, Sustainable manufacturing: Evaluation and modeling of environmental impacts in additive

- manufacturing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1927–1939, 2013
- [11] W. Z. Bernstein, D. Ramanujan, S. Devanathan, F. Zhao, J. Sutherland, and K. Ramani, Function impact matrix for sustainable concept generation: a designer's perspective, 2010.
- [12] D. C. Eddy, S. Krishnamurty, I. R. Grosse, J. C. Wileden, and K. E. Lewis, A normative decision analysis method for the sustainability-based design of products, *Journal of Engineering Design*, 342–362, 2013
- [13] M. Inoue, K. Lindow, R. Stark, K. Tanaka, Y. E. Nahm, and H. Ishikawa, Decision-making support for sustainable product creation, in *Advanced Engineering Informatics*, 782–792, 2012
- [14] S.-Y. Koh, S.-J. Lee, M.-K. Chang, H.-Y. Liang, S.-H. Lee, and S.-C. Boo, Study on the guideline for analyzing eco design value system and establishing product design strategy, 2007.
- [15] Q. Meng, F. Y. Li, L. R. Zhou, J. Li, Q. Q. Ji, and X. Yang, A rapid life cycle assessment method based on green features in supporting conceptual design, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 189–196, 2015
- [16] M. Bertoni, Multi-criteria decision making for sustainability and value assessment in early PSS design, *Sustainability (Switzerland)*, 2019
- [17] M. H. Eres, M. Bertoni, M. Kossmann, and J. Scanlan, Mapping customer needs to engineering characteristics: an aerospace perspective for conceptual design, *Journal of Engineering Design*, 64–87, 2014
- [18] C. Y. Ng and K. B. Chuah, Evaluation of design alternatives' environmental performance using AHP and ER approaches, *IEEE Systems Journal*, 1185–1192, 2014.



- [19] A. Romli, P. Prickett, R. Setchi, and S. Soe, Integrated eco-design decision-making for sustainable product development, *International Journal of Production Research*, 549–571, 2015.
- [20] X. Wang, H. K. Chan, and L. White, A comprehensive decision support model for the evaluation of eco-designs, *Journal of the Operational Research Society*, 917–934, 2014.
- [21] D. Frațila and H. Rotaru, Additive manufacturing-a sustainable manufacturing route, *MATEC Web of Conferences*, 2017.
- [22] T. Peng, K. Kellens, R. Tang, C. Chen, and G. Chen, Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact, *Additive Manufacturing*, 694–704, 2018.
- [23] Y. Li, B. S. Linke, H. Voet, B. Falk, R. Schmitt, and M. Lam, Cost, sustainability and surface roughness quality – A comprehensive analysis of products made with personal 3D printers, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 1–11, 2017.
- [24] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, and C. Visser, A global sustainability perspective on 3D printing technologies, *Energy Policy*, 158–167, 2014.
- [25] B. Keppner, W. Kahlenborn, A. Lessmann, S. Richter, T. Jetzke, and M. Bovenschulte, Focus on the future: 3D printing Trend report for assessing the environmental impacts, *Umweltbundesamt*, 2018.
- [26] H. T. Odum, *Environmental accounting, energy and environmental decision making*. Toronto: John Wiley and Sons Inc. 1996.
- [27] C. Johansson, B. Hicks, A.C. Larsson, M. Bertoni, Knowledge Maturity as a Means to Support Decision Making during Product-Service Systems Development Projects in the Aerospace Sector, *Project Management Journal*, 32-50, 2011.
- [28] Tim 1, Izvještaj FDM uređaj za aditivnu proizvodnju, FSB, 2020.
- [29] Tim 2, Izvještaj SLS uređaj za aditivnu proizvodnju, FSB, 2020.

- [30] Tim 3, Izvještaj SLA uređaj za aditivnu proizvodnju, FSB, 2020.
- [31] Tim 4, Izvještaj Polyjet uređaj za aditivnu proizvodnju, FSB 2020.
- [32] D. Godec, I. Vidović, M. Šercer, Optimiranje parametara niskobudžetnog 3D tiskanja, Aditivne tehnologije - 4. industrijska revolucija, 2015.
- [33] <https://www.structo3d.com/>, 15.1.2021.
- [34] Z. Liu et al., Investigation of energy requirements and environmental performance for additive manufacturing processes, Sustainability (Switzerland), 2018.
- [35] Sinterit LISA Product specification, <https://www.sinterit.com/>, 10.1.2021.
- [36] 3D printing handbook user manual for 3D printers: Original Prusa SL1, [www.prusa3d.de/treiber/](http://www.prusa3d.de/treiber/), 10.1.021.
- [37] Original Prusa i3 MK3 from Prusa, [www.prusa3d.de/treiber/](http://www.prusa3d.de/treiber/), 10.1.021.
- [38] C. M. Choudhari and V. D. Patil, Product Development and its Comparative Analysis by SLA, SLS and FDM Rapid Prototyping Processes, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2016.
- [39] <https://www.sinterit.com/post-processing-in-3d-printing-how-do-sls-sla-and-fdm-compare/>, 12.2.2021.
- [40] G. A. Roth, C. L. Geraci, A. Stefaniak, V. Murashov, and J. Howard, Potential occupational hazards of additive manufacturing, Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 321–328, 2019.
- [41] J. Faludi, Z. Hu, S. Alrashed, C. Braunholz, S. Kaul, and L. Kassaye, “Does Material Choice Drive Sustainability of 3D Printing?”, International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering, 2015.
- [42] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, M. Camargo, and J. M. Pearce, Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy, Journal of Cleaner Production, , 2020.
- [43] M. van den Eynde and P. van Puyvelde, 3D Printing of Poly(lactic acid), 2017.

- 
- [44] 3D Printer Maintenance: Preventive and Corrective Tasks, <https://chocedge.com>., 27.1.2021.
- [45] Product Environmental Profile Lexium BRS Stepper Motor, <http://www2.schneider-electric.com/sites/corporate/en/products-services/green-premium/green-premium.page>, 24.1.2021.
- [46] S. Salhofer, M. Spitzbart, and K. Maurer, Recycling of LCD screens in Europe - State of the art and challenges, Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing - Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, 454–458, 2011.
- [47] N. Vidakis, M. Petousis, A. Maniadi, E. Koudoumas, A. Vairis, and J. Kechagias, Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of acrylonitrile-butadiene-styrene over multiple recycling processes, Sustainability (Switzerland), 2020.
- [48] K. Kellens, R. Mertens, D. Paraskevas, W. Dewulf, and J. R. Duflou, Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing?, Procedia CIRP, 582–587, 2017.

## **PRILOG**

1. Kuća kvalitete
2. CODA matrica za koncept FDM uređaja
3. CODA matrica za koncept SLA uređaja
4. CODA matrica za koncept SLS uređaja



## Prilog 2: CODA matrica za koncept FDM uređaja

|  |                    | Korisnički zahtjevi                |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|--|--------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|--|------------------------|---|-------------------------|---------------------|--|-------------------------|---|--|---|----------------------------|--|---------------------------------------|
|  |                    | 44,00                              | Lagana prenosivost                 | Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji | Volumen prostora dovoljan i za veće ispite (> 3 dm <sup>3</sup> ) | Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu | Jednostavno korištenje | Jednostavnost sastavljanje/rastavljanje | Minimalan broj dijelova | Prihvatljiva cijena | Mogućnost printanja u različitim kvalitetama | Najmanje završne obrade | Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka | Što manja potrošnja električne energije u radu | Što manji utjecaj na globalno zatopljenje | Ne šteti ljudskom zdravlju | Što kraće vrijeme potrebno za jedan proces | Zadovoljavajuća produktivnost procesa |
|  |                    | Normalizirani težinski faktori [%] | 0,741                              | 1,481   | 5,926   | 9,63   | 4,444                  | 2,222                                   | 5,185                   | 5,926               | 3,704  | 8,889                   | 6,667   | 11,11  | 11,11                                     | 10,37                      | 6,667                                      | 5,926                                 |
| Masa uređaja [kg]  | Korelacija         |                                    | 0,9                                |   |   |  |                        |   | 0,1                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 19                                 | Neutralna ili optimalna vrijednost | 25  |   |  |                        |   | 30                      |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 45                                 | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 10                                 | Vrsta veze                         | Min   |   |  |                        |   | Min                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    | 59,83%  |   |  |                        |   | 66,53%                  |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Volumen cijelog uređaja [dm <sup>3</sup> ]                     | Korelacija         |                                    | 0,9                                | 0,9   |   |  |                        |   | 0,1                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 172,125                            | Neutralna ili optimalna vrijednost | 180   | 150   |  |                        |   | 160                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 200                                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 50                                 | Vrsta veze                         | Min   | Min   |  |                        |   | Min                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    | 51,56%  | 45,34%  |  |                        |   | 47,50%                  |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Volumen koji uređaj zauzima u prostoru [dm <sup>3</sup> ]      | Korelacija         |                                    |                                    |   | 0,9   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 11,025                             | Neutralna ili optimalna vrijednost |   | 10  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 10                                    |
|  | Gornja granica     | 15                                 | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 1                                  | Vrsta veze                         |   | Max   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | Max                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   | 53,43%  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 53,43%                                |
| Maksimalna temperatura u procesu [°C]                          | Korelacija         |                                    |                                    |   |   | 0,9  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,9  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 255                                | Neutralna ili optimalna vrijednost |   | 100   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 130  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 285                                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 25                                 | Vrsta veze                         |   | Min   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   | 23,80%   |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 29,77%   |   |                            |  |                                       |
| Set up time [min]  | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  | 0,9                    |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 10                                 | Neutralna ili optimalna vrijednost |   | 12  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 15                                    |
|  | Gornja granica     | 20                                 | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 2                                  | Vrsta veze                         |   | Min   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | Min                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   | 56,47%   |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 64,64%                                |
| Vrijeme sastavljanja uređaja [h]                               | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        | 0,9                                     | 0,3                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 3                                  | Neutralna ili optimalna vrijednost |   | 4   | 6  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 8                                  | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 2,5                                | Vrsta veze                         |   | Min   | Min  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   | 60,31%   | 75,00%                 |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Cijena uređaja [\$]  | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   | 0,9                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 900                                | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   | 2000                    |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 5000                               | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   | 1500                    |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 800                                | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   | Opt                     |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   | 0,6503                  |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Raspon debljine sloja [mm]                                     | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   | 0,9                     | 0,3                 | 0,1  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 0,4-0,05=0,35                      | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   | 0,3                     | 0,15                | 0,25   |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 0,5                                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         | 0,05                |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0,05                               | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   | Max                     | Opt                 | Max  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   | 55,46%                  | 5,88%               | 62,11%                                       |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Broj koraka u završnoj obradi [-]                              | Korelacija         |                                    |                                    |   |   | 0,3  |                        |   |                         | 0,9                 | 0,3  |                         |   |  |   |                            | 0,3  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 1                                  | Neutralna ili optimalna vrijednost |   | 2   |  |                        |   |                         | 1                   | 2  |                         |   |  |   |                            | 2  | 2                                     |
|  | Gornja granica     | 3                                  | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 1                                     |
|  | Donja granica      | 0                                  | Vrsta veze                         |   | Min   |  |                        |   | Min                     | Min                 |  |                         |   |  | Min                                       | Opt                        |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   | 75,00%   |                        |   |                         | 50,00%              | 75,00%                                       |                         |   |  | 75,00%                                    | 50,00%                     |  |                                       |
| SEC [J/cm <sup>3</sup> ]                                       | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 0,9   | 0,3  |   |                            | 0,3  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 4,327·10 <sup>5</sup>              | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 0,2·10 <sup>5</sup>                                     | 4·10 <sup>5</sup>                              |   |                            | 4·10 <sup>5</sup>                          | 4·10 <sup>5</sup>                     |
|  | Gornja granica     | 17·10 <sup>5</sup>                 | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            | 0,5·10 <sup>5</sup>                        | 0,5·10 <sup>5</sup>                   |
|  | Donja granica      | 0,1·10 <sup>5</sup>                | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         | Min   | Min  |   | Opt                        | Opt  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 3,15%   | 47,31%   |   | 70,04%                     | 70,04%                                     |                                       |
| GWP - materijal [kg CO <sub>2</sub> ]                          | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,9  | 0,3                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 3,7·10 <sup>-3</sup>               | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 10·10 <sup>-3</sup>                            | 12·10 <sup>-3</sup>                       |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 25·10 <sup>-3</sup>                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 1·10 <sup>-3</sup>                 | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 84,64%   | 89,44%                                    |                            |  |                                       |
| GWP - energija [kg CO <sub>2</sub> ]                           | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,9  | 0,3                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 0,3                                | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,2  | 0,3                                       |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 1,3                                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0,1                                | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 37,00%   | 50,00%                                    |                            |  |                                       |
| Broj potencijalnih opasnosti za ljudsko zdravlje [-]           | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  | 0,3                                       | 0,9                        |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 2                                  | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  | 1   | 0                          |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 3                                  | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0                                  | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 29,29%   | 0,00%                                     |                            |  |                                       |
| Postignuta površinska hrapavost modela [Ra]                    | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         | 0,3                 | 0,3  | 0,1                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 3,74                               | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         | 3                   | 2,3  | 2,6                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 4                                  | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         | 1,5                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 2                                  | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         | Opt                 | Min  | Min                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         | 80,43%              | 34,71%                                       | 38,24%                  |   |  |   |                            |  |                                       |
| Postotak povećanja vremena za izradu dva objekata odjednom [%] | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            | 0,1  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 100                                | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            | 50   | 20                                    |
|  | Gornja granica     | 100                                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  | 20                                    |
|  | Donja granica      | 0                                  | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  | Min                                       | Min                        |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 29,29%   | 12,94%                                    | 12,94%                     |  |                                       |
| Brzina printanja [cm <sup>3</sup> /s]                          | Korelacija         |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         | 0,3                 |  |                         |   | 0,3  |   |                            | 0,9  | 0,9                                   |
|  | Vrijednost         | 2,22·10 <sup>-3</sup>              | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |   |  |                        |   |                         | 10·10 <sup>-3</sup> |  |                         |   | 5·10 <sup>-3</sup>                             |   |                            | 5·10 <sup>-3</sup>                         | 20·10 <sup>-3</sup>                   |
|  | Gornja granica     | 30·10 <sup>-3</sup>                | Tolerancija                        |   |   |  |                        |   |                         | 8·10 <sup>-3</sup>  |  |                         |   | 2·10 <sup>-3</sup>                             |   |                            | 2·10 <sup>-3</sup>                         |                                       |
|  | Donja granica      | 1·10 <sup>-3</sup>                 | Vrsta veze                         |   |   |  |                        |   |                         | Opt                 |  |                         |   | Opt  |   | Opt                        | Max  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         | 51,39%              |  |                         |   | 34,11%   |   | 34,11%                     | 7,40%                                      |                                       |
| Suma korelacija SCF  |                    | 1,8                                | 0,9                                | 0,9   | 0,9   | 1,2  | 0,9                    | 0,5                                     | 0,9                     | 1,5                 | 1,5  | 0,5                     | 2,2   | 2,4  | 1,5                                       | 1,8                        | 2,4  |                                       |
| Suma vrijednosti dobrota CS                                    |                    | 0,4127                             | 0,6715                             | 3,1662  | 2,292   | 2,7155   | 1,3402                 | 3,5157                                  | 3,8536                  | 2,2089              | 3,3883                                       | 4,3381                  | 2,16081   | 6,1318   | 2,892                                     | 2,8925                     | 2,02416                                    |                                       |
| Srednja vrijednost KM  |                    | 4                                  | 5                                  | 4   | 4   | 3,5  | 4                      | 1,33                                    | 5                       | 3                   | 3,33   | 3                       | 3,75  | 4,5  | 4,67                                      | 3                          | 3  |                                       |
| Ukupna vrijednost KM   |                    |                                    |                                    |   |   |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 3,6925  |  |   |                            |  |                                       |

### Prilog 3: CODA matrica za koncept SLA uređaja

| Ukupna vrijednost dobrote koncepta [%]                         |                    | Korisnički zahtjevi            |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|--|--------------------|--------------------------------|---|--|--|------------------------|---|-------------------------|---------------------|--|-------------------------|---|--|---|----------------------------|--|---------------------------------------|--------|--|
|  |                    | Lagana prenosivost             | Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji | Volumen prostora dovoljan i za veće isplise (> 3 dm <sup>3</sup> ) | Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu | Jednostavno korištenje | Jednostavnost sastavljanje/rastavljanje | Minimalan broj dijelova | Prihvatljiva cijena | Mogućnost printanja u različitim kvalitetama | Najmanje završne obrade | Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka | Što manja potrošnja električne energije u radu | Što manji utjecaj na globalno zatopljenje | Ne šteti ljudskom zdravlju | Što kraće vrijeme potrebno az jedan proces | Zadovoljavajuća produktivnost procesa |        |  |
| 43,19  |                    | Normalizirani težinski faktori | 0,741   | 1,481  | 5,926  | 9,63                   | 4,444                                   | 2,222                   | 5,185               | 5,926  | 3,704                   | 8,889   | 6,667  | 11,11                                     | 11,11                      | 10,37                                      | 6,667                                 | 5,926  |  |
| Masa uređaja [kg]  |                    | Korelacija                     | 0,9   |  |  |                        |   |                         | 0,1                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 20                             | Neutralna ili optimalna vrijednost            | 25   |  |                        |   |                         | 30                  |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 45                             | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 10                             | Vrsta veze                                    | Min  |  |                        |   |                         | Min                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   | 57,96%   |  |                        |   |                         |                     | 64,64%                                       |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Volumen cijelog uređaja [dm <sup>3</sup> ]                     |                    | Korelacija                     | 0,9   | 0,9  |  |                        |   |                         | 0,1                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 74,052                         | Neutralna ili optimalna vrijednost            | 180  | 150  |                        |   |                         | 160                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 200                            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 50                             | Vrsta veze                                    | Min  | Min  |                        |   |                         | Min                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   | 81,45%   | 75,44%   |                        |   |                         |                     | 77,63%                                       |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Volumen koji uređaj zauzima u prostoru [dm <sup>3</sup> ]      |                    | Korelacija                     |   |  | 0,9  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 0,3    |  |
|  | Vrijednost         | 1,224                          | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  | 10   |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 10     |  |
|  | Gornja granica     | 15                             | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 1                              | Vrsta veze                                    |  | Max  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | Max    |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  | 8,13%  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 8,13%  |  |
| Maksimalna temperatura u procesu [°C]                          |                    | Korelacija                     |   |  | 0,9  |                        |   |                         |                     |  |                         | 0,9   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 60                             | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  | 100  |                        |   |                         |                     |  |                         | 130   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 285                            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 25                             | Vrsta veze                                    |  | Min  |                        |   |                         |                     |  |                         | Min   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  | 68,50%   |                        |   |                         |                     |  |                         | 77,73%  |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Set up time [min]  |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        | 0,9                                     |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 0,3    |  |
|  | Vrijednost         | 13                             | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  | 12   |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 15     |  |
|  | Gornja granica     | 20                             | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 2                              | Vrsta veze                                    |  | Min  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | Min    |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  | 47,26%   |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 55,06% |  |
| Vrijeme sastavljanja uređaja [h]                               |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   | 0,9                     | 0,3                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 10                             | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   | 4                       | 6                   |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 8                              | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 2,5                            | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   | Min                     | Min                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   | 24,21%                  | 34,02%              |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Cijena uređaja [\$]  |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         | 0,9                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 1500                           | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         | 2000                |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 5000                           | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         | 1500                |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 800                            | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         | Opt                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         | 0,9                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Raspon debljine sloja [mm]                                     |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         | 0,9                 | 0,3  | 0,1                     |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 0,1-0,025=0,075                | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         | 0,3                 | 0,15   | 0,25                    |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 0,5                            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     | 0,05   |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 0,05                           | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         | Max                 | Opt  | Max                     |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         | 15,91%              | 30,77%                                       | 18,77%                  |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Broj koraka u završnoj obradi [-]                              |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        | 0,3                                     |                         |                     | 0,9  | 0,3                     |   |  |   |                            |  | 0,3                                   | 0,3    |  |
|  | Vrijednost         | 3                              | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  | 2  |                        |   |                         | 1                   | 2  |                         |   |  |   |                            |  | 2                                     | 2      |  |
|  | Gornja granica     | 3                              | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       | 1      |  |
|  | Donja granica      | 0                              | Vrsta veze                                    |  | Min  |                        |   |                         | Min                 | Min  |                         |   |  |   |                            | Min  | Opt                                   |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  | 37,00%   |                        |   |                         | 20,63%              | 37,00%                                       |                         |   |  |   |                            | 37,00%                                     | 50,00%                                |        |  |
| SEC [l/cm <sup>3</sup> ]                                       |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 0,9   | 0,3  |   |                            |  | 0,3                                   | 0,3    |  |
|  | Vrijednost         | 0,5596·10 <sup>-5</sup>        | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 0,2·10 <sup>-5</sup>                                    | 4·10 <sup>-5</sup>                             |   |                            | 4·10 <sup>-5</sup>                         | 4·10 <sup>-5</sup>                    |        |  |
|  | Gornja granica     | 17·10 <sup>-5</sup>            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            | 0,5·10 <sup>-5</sup>                       | 0,5·10 <sup>-5</sup>                  |        |  |
|  | Donja granica      | 0,1·10 <sup>-5</sup>           | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         | Min   | Min  |   |                            | Opt  | Opt                                   |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         | 21,94%  | 99,29%   |   |                            | 2,07%                                      | 2,07%                                 |        |  |
| GWP - materijal [kg CO <sub>2</sub> ]                          |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,9  | 0,3                                       |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 13,4·10 <sup>-3</sup>          | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 10·10 <sup>-3</sup>                            | 12·10 <sup>-3</sup>                       |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 25·10 <sup>-3</sup>            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 1·10 <sup>-3</sup>             | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 40,39%   | 46,24%                                    |                            |  |                                       |        |  |
| GWP - energija [kg CO <sub>2</sub> ]                           |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,9  | 0,3                                       |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 0,123                          | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,2  | 0,3                                       |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 1,3                            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 0,1                            | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 67,60%   | 81,56%                                    |                            |  |                                       |        |  |
| Broj potencijalnih opasnosti za ljudsko zdravlje [-]           |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  | 0,3                                       | 0,9                        |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 3                              | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  | 1   | 0                          |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 3                              | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 0                              | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  | Min                                       | Min                        |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  | 20,63%                                    | 0,00%                      |  |                                       |        |  |
| Postignuta površinska hrapavost modela [Ra]                    |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         | 0,3                 | 0,3  | 0,1                     |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost         | 2,28                           | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         | 3                   | 2,3  | 2,6                     |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Gornja granica     | 4                              | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         | 1,5                 |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 2                              | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         | Opt                 | Min  | Min                     |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         | 81,27%              | 50,30%                                       | 54,64%                  |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
| Postotak povećanja vremena za izradu dva objekata odjednom [%] |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 0,1  |   |                            | 0,3  | 0,3                                   |        |  |
|  | Vrijednost         | 10                             | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 50   |   |                            | 20   | 20                                    |        |  |
|  | Gornja granica     | 100                            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 0                              | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | Min  |   |                            | Min  | Min                                   |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   | 96,88%   |   | 75,00%                     | 75,00%                                     |                                       |        |  |
| Brzina printanja [cm <sup>3</sup> /s]                          |                    | Korelacija                     |   |  |  |                        |   |                         | 0,3                 |  |                         |   | 0,3  |   |                            | 0,9  | 0,9                                   |        |  |
|  | Vrijednost         | 1,44·10 <sup>-3</sup>          | Neutralna ili optimalna vrijednost            |  |  |                        |   |                         | 10·10 <sup>-3</sup> |  |                         |   | 5·10 <sup>-3</sup>                             |   |                            | 5·10 <sup>-3</sup>                         | 20·10 <sup>-3</sup>                   |        |  |
|  | Gornja granica     | 30·10 <sup>-3</sup>            | Tolerancija                                   |  |  |                        |   |                         | 8·10 <sup>-3</sup>  |  |                         |   | 2·10 <sup>-3</sup>                             |   |                            | 2·10 <sup>-3</sup>                         |                                       |        |  |
|  | Donja granica      | 1·10 <sup>-3</sup>             | Vrsta veze                                    |  |  |                        |   |                         | Opt                 |  |                         |   | Opt  |   |                            | Opt  | Max                                   |        |  |
|  | Vrijednost dobrote |                                |   |  |  |                        |   |                         | 46,62%              |  |                         |   | 23,99%   |   | 23,99%                     | 4,87%                                      |                                       |        |  |
| Suma korelacija SCF  |                    |                                | 1,8   | 0,9  | 0,9  | 0,9                    | 1,2                                     | 0,9                     | 0,5                 | 0,9  | 1,5                     | 1,5   | 0,5  | 2,2                                       | 2,4                        | 1,5  | 1,8                                   | 2,4    |  |
| Suma vrijednosti dobrote CS                                    |                    |                                | 0,5165  | 1,1173   | 0,482  | 6,5967                 | 1,9863                                  | 0,538                   | 2,5339              | 5,3334                                       | 1,301                   | 2,5416  | 2,4591   | 5,3826                                    | 6,1646                     | 2,6506                                     | 2,0673                                | 1,5176 |  |
| Srednja vrijednost KM  |                    |                                | 4   | 5  | 4  | 4                      | 3,5                                     | 4                       | 1,33                | 5  | 3                       | 3,33  | 3  | 3,75                                      | 4,5                        | 4,67                                       | 3                                     | 3      |  |
| Ukupna vrijednost KM   |                    |                                | 3,6925  |  |  |                        |   |                         |                     |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |        |  |

# Prilog 4: CODA matrica za koncept SLS uređaja

|  |                    | Korisnički zahtjevi            |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|--|--------------------|--------------------------------|------------------------------------|---|--|--|------------------------|---|-------------------------|----------------------|--|-------------------------|---|--|---|----------------------------|--|---------------------------------------|
|  |                    | 31,97                          | Lagana prenosivost                 | Uređaj ne zauzima previše mjesta u prostoriji | Volumen prostora dovoljan i za veće ispile (> 3 dm3) | Uređaj ne koristi visoke temperature u procesu | Jednostavno korištenje | Jednostavnost sastavljanje/rastavljanje | Minimalan broj dijelova | Prilagodljiva cijena | Mogućnost printanja u različitim kvalitetama | Najmanje završne obrade | Smanjena količina nastalog otpada i neuspjelih izradaka | Što manja potrošnja električne energije u radu | Što manji utjecaj na globalno zatopljenje | Ne šteti ljudskom zdravlju | Što kraće vrijeme potrebno za jedan proces | Zadovoljavajuća produktivnost procesa |
|  |                    | Normalizirani težinski faktori | 0,741                              | 1,481   | 5,926  | 9,63   | 4,444                  | 2,222                                   | 5,185                   | 5,926                | 3,704  | 8,889                   | 6,667   | 11,11  | 11,11                                     | 10,37                      | 6,667                                      | 5,926                                 |
| Masa uređaja [kg]  | Korelacija         |                                | 0,9                                |   |  |  |                        |   | 0,1                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 41                             | Neutralna ili optimalna vrijednost | 25  |  |  |                        |   | 30                      |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 45                             | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 10                             | Vrsta veze                         | Min   |  |  |                        |   | Min                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    | 34,47%  |  |  |                        |   |                         | 39,78%               |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Volumen cijelog uređaja [dm3]                                  | Korelacija         |                                | 0,9                                | 0,9   |  |  |                        |   | 0,1                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 164,68                         | Neutralna ili optimalna vrijednost | 180   | 150  |  |                        |   | 160                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 200                            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 50                             | Vrsta veze                         | Min   | Min  |  |                        |   | Min                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    | 53,12%  | 46,81%   |  |                        |   |                         | 49,01%               |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Volumen koji uređaj zauzima u prostoru [dm3]                   | Korelacija         |                                |                                    |   | 0,9  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 4,5                            | Neutralna ili optimalna vrijednost |   | 10   |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 10                                    |
|  | Gornja granica     | 15                             | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 1                              | Vrsta veze                         |   | Max  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | Max                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  | 26,80%   |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 26,80%                                |
| Maksimalna temperatura u procesu [°C]                          | Korelacija         |                                |                                    |   |  | 0,9  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 0,9                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 190                            | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  | 100  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 130                                       |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 285                            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 25                             | Vrsta veze                         |   |  | Min  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  | 30,57%                 |   |                         |                      |  |                         |   |  |   | 37,77%                     |  |                                       |
| Set up time [min]  | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  | 0,9                    |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 17                             | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  | 12                     |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 15                                    |
|  | Gornja granica     | 20                             | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 2                              | Vrsta veze                         |   |  |  | Min                    |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | Min                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        | 38,69%                                  |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 45,75%                                |
| Vrijeme sastavljanja uređaja [h]                               | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        | 0,9                                     | 0,3                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 24                             | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        | 4                                       | 6                       |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 8                              | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 2,5                            | Vrsta veze                         |   |  |  |                        | Min                                     | Min                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         | 10,91%               | 15,91%                                       |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Cijena uređaja [\$]  | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   | 0,9                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 9700                           | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   | 2000                    |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 5000                           | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   | 1500                    |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 800                            | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   | Opt                     |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         | 0,0366               |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
| Raspon debljine sloja [mm]                                     | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         | 0,9                  | 0,3  | 0,1                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 0,175-0,075=0,1                | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         | 0,3                  | 0,15   | 0,25                    |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 0,5                            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      | 0,05   |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0,05                           | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         | Max                  | Opt  | Max                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      | 20,63%                                       | 50,00%                  | 24,21%  |  |   |                            |  |                                       |
| Broj koraka u završnoj obradi [-]                              | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  | 0,3                    |   |                         |                      | 0,9  | 0,3                     |   |  |   |                            | 0,3  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 0                              | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  | 2                      |   |                         |                      | 1  | 2                       |   |  |   |                            | 2  | 2                                     |
|  | Gornja granica     | 3                              | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  | 1                                     |
|  | Donja granica      | 0                              | Vrsta veze                         |   |  |  | Min                    |   |                         |                      | Min  | Min                     |   |  |   |                            | Min  | Opt                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        | 100,00%                                 |                         |                      |  | 100,00%                 | 100,00%   |  |   |                            |  | 100,00%                               |
| SEC [J/cm3]  | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         | 0,9   | 0,3  |   |                            | 0,3  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 15,56·10 <sup>5</sup>          | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         | 0,2·10 <sup>5</sup>                                     | 4·10 <sup>5</sup>                              |   |                            | 4·10 <sup>5</sup>                          | 4·10 <sup>5</sup>                     |
|  | Gornja granica     | 17·10 <sup>5</sup>             | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            | 0,5·10 <sup>5</sup>                        | 0,5·10 <sup>5</sup>                   |
|  | Donja granica      | 0,1·10 <sup>5</sup>            | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         | Min   | Min  |   |                            | Opt  | Opt                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | 0,89%  | 16,32%                                    |                            | 0,19%                                      | 0,19%                                 |
| GWP - materijal [kg CO2]                                       | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | 0,9  | 0,3                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 22,4·10 <sup>-3</sup>          | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | 10·10 <sup>-3</sup>                            | 12·10 <sup>-3</sup>                       |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 25·10 <sup>-3</sup>            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 1·10 <sup>-3</sup>             | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 26,61%                                    | 31,02%                     |  |                                       |
| GWP - energija [kg CO2]  | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 0,9                                       | 0,3                        |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 1,09                           | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 0,2                                       | 0,3                        |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 1,3                            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0,1                            | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 11,94%                                    | 17,37%                     |  |                                       |
| Broj potencijalnih opasnosti za ljudsko zdravlje [-]           | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 0,3                                       | 0,9                        |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 3                              | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 1   | 0                          |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 3                              | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0                              | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | Min  | Min                                       |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 20,63%                                    | 0,00%                      |  |                                       |
| Postignuta površinska hrapavost modela [Ra]                    | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         | 0,3                  | 0,3  | 0,1                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost         | 2,9                            | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         | 3                    | 2,3  | 2,6                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Gornja granica     | 4                              | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         | 1,5                  |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 2                              | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         | Opt                  | Min  | Min                     |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      | 99,56%                                       | 42,29%                  | 46,28%  |  |   |                            |  |                                       |
| Postotak povećanja vremena za izradu dva objekata odjednom [%] | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 0,1                                       |                            | 0,3  | 0,3                                   |
|  | Vrijednost         | 40                             | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 50  |                            | 20   | 20                                    |
|  | Gornja granica     | 100                            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |
|  | Donja granica      | 0                              | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   | Min  |   |                            | Min  | Min                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  | 57,96%                                    |                            | 29,29%                                     | 29,29%                                |
| Brzina printanja [cm3/s]                                       | Korelacija         |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         | 0,3                  |  |                         |   | 0,3  |   |                            | 0,9  | 0,9                                   |
|  | Vrijednost         | 26,4·10 <sup>-3</sup>          | Neutralna ili optimalna vrijednost |   |  |  |                        |   |                         | 10·10 <sup>-3</sup>  |  |                         |   | 5·10 <sup>-3</sup>                             |   |                            | 5·10 <sup>-3</sup>                         | 20·10 <sup>-3</sup>                   |
|  | Gornja granica     | 30·10 <sup>-3</sup>            | Tolerancija                        |   |  |  |                        |   |                         | 8·10 <sup>-3</sup>   |  |                         |   | 2·10 <sup>-3</sup>                             |   |                            | 2·10 <sup>-3</sup>                         |                                       |
|  | Donja granica      | 1·10 <sup>-3</sup>             | Vrsta veze                         |   |  |  |                        |   |                         | Opt                  |  |                         |   | Opt  |   |                            | Opt  | Max                                   |
|  | Vrijednost dobrote |                                |                                    |   |  |  |                        |   |                         |                      | 19,22%                                       |                         |   |  | 0,87%                                     |                            | 0,87%                                      | 59,95%                                |
| Suma korelacija SCF  |                    |                                | 1,8                                | 0,9   | 0,9  | 0,9  | 1,2                    | 0,9                                     | 0,5                     | 0,9                  | 1,5  | 1,5                     | 0,5   | 2,2  | 2,4                                       | 1,5                        | 1,8  | 2,4                                   |
| Suma vrijednosti dobrote CS                                    |                    |                                | 0,3245                             | 0,6933  | 1,5879   | 2,9436   | 2,4065                 | 0,2424                                  | 1,4157                  | 0,2167               | 1,3384                                       | 6,97413                 | 4,94021   | 2,0627   | 2,1193                                    | 1,00357                    | 1,46773                                    | 2,2373                                |
| Srednja vrijednost KM  |                    |                                | 4                                  | 5   | 4  | 4  | 3,5                    | 4                                       | 1,33                    | 5                    | 3  | 3,33                    | 3   | 3,75   | 4,5                                       | 4,67                       | 3  | 3                                     |
| Ukupna vrijednost KM   |                    |                                | 3,6925                             |   |  |  |                        |   |                         |                      |  |                         |   |  |   |                            |  |                                       |