

# Izbor optimalnih materijala za postolje i lopatice edukacijskog robota ventilatora

---

Kajinić, Maja

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:235:886303>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-08-01**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Maja Kajinić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Student:

Maja Kajinić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentorici Veri Rede na nesebičnoj pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada. Velika hvala i svim članovima moje obitelji, roditeljima Juri i Mirjani te sestrama Moniki i Marini, koji su mi uvijek bili ogromna podrška i koji su me motivirali za rad. Hvala mojim prijateljima koji su bili uz mene kroz cijeli fakultet, kroz sve suze i smijeh. Posebno hvala svim mladima iz oratorija Dominik Savio na Jarunu i salezijancima koji su budno pratili moj put. Najveća hvala Bogu bez čijeg blagoslova ništa od ovoga ne bi bilo moguće.

Maja Kajinić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

### DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MAJA KAJINIĆ** Mat. br.: 0035206633

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Izbor optimalnih materijala za postolje i lopatice edukacijskog robotskog ventilatora**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Selection of optimal materials for the stand and blades of the educational robotic fan**

#### Opis zadatka:

Izbor materijala je važan sastavni dio procesa razvoja bilo kojeg proizvoda. U kombinaciji s konstrukcijskim rješenjem te odgovarajućim postupcima izrade, izbor optimalnog materijala uvelike doprinosi razvoju proizvoda s boljim uporabnim svojstvima, nižom cijenom i dopadljivijim izgledom. Time će se postići osnovni cilj svake proizvodnje, a to je tržišno konkurentan proizvod kojim će se ostvariti dobit.

U diplomskom radu potrebno je opisati kako je proveden postupak izbora optimalnog materijala za postolje i lopatice robotskog ventilatora koji služi za edukaciju djece u srednjim i višim razredima osnovne škole. Posebnu pozornost treba posvetiti zahtjevima i ograničenjima koji se postavljaju na ovaj vrlo specifični proizvod. Na temelju postavljenih zahtjeva i ograničenja potrebno je definirati svojstva na temelju kojih se provodi predizbor te konačni izbor optimalnog materijala.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:  
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:  
8. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane:  
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: *Rede*  
prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:  
*Runje*  
prof. dr. sc. Biserka Runje

## SADRŽAJ

|   |     |
|---|-----|
| SADRŽAJ .....   | I   |
| POPIS SLIKA .....   | II  |
| POPIS TABLICA.....  | III |
| POPIS OZNAKA .....  | IV  |
| SAŽETAK .....   | V   |
| SUMMARY .....   | VI  |
| 1. Uvod.....  | 1   |
| 2. Izbor materijala.....                                    | 2   |
| 3. Povijest ventilatora.....                                | 18  |
| 4. Materijali za izradu ventilatora.....                    | 21  |
| 5. Izbor materijala za lopatice robotskog ventilatora ..... | 27  |
| 6. Izbor materijala za postolje robotskog ventilatora ..... | 38  |
| 7. Zaključak .....  | 45  |
| 8. Literatura.....  | 46  |

## POPIS SLIKA

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Prikaz izbora materijala u tri faze razvoja proizvoda [1] .....        | 3  |
| Slika 2.  | Tijek postupka razvoja proizvoda i izbora materijala [1] .....         | 4  |
| Slika 3.  | Povezanost različitih aktivnosti u postupku razvoja proizvoda [1]..... | 6  |
| Slika 4.  | Tijek izbora materijala [1] .....                                      | 7  |
| Slika 5.  | Poligon zahtijevanih i postojećih svojstava materijala [1] .....       | 13 |
| Slika 6.  | AHP [2] .....  | 16 |
| Slika 7.  | Prvi ventilatori u Egiptu [3] .....                                    | 18 |
| Slika 8.  | Kineske lepeze [5] .....   | 18 |
| Slika 9.  | Wheelerov poboljšani ventilator [4].....                               | 19 |
| Slika 10. | Uobičajeni dizajn modernog ventilatora [6] .....                       | 20 |
| Slika 11. | Ventilator od nehrđajućeg čelika [11] .....                            | 23 |
| Slika 12. | Ventilator od aluminija [13] .....                                     | 24 |
| Slika 13. | Plastični ventilator[15] .....   | 25 |
| Slika 14. | Ručni ventilator [17] .....  | 27 |
| Slika 15. | Lopatice robotskog ventilatora .....                                   | 28 |
| Slika 16. | Dimenzije lopatica robotskog ventilatora .....                         | 28 |
| Slika 17. | Prikaz mehanizma škara [18].....                                       | 31 |
| Slika 18. | Odnos rezne sile i produženja kod PP i PE-HD [21] .....                | 33 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Saatyeva skala[2].....   | 16 |
| Tablica 2. Digitalno-logička metoda za lopatice ventilatora.....                            | 30 |
| Tablica 3. Predizbor materijala za lopatice ventilatora.....                                | 32 |
| Tablica 4. Skalirane vrijednosti svojstava za lopatice ventilatora .....                    | 32 |
| Tablica 5. AHP pri izboru materijala za lopatice ventilatora .....                          | 34 |
| Tablica 6. Normalizirana tablica usporedbe parova svojstava za lopaticu ventilatora .....   | 35 |
| Tablica 7. Izračun konzistencije za lopatice ventilatora .....                              | 35 |
| Tablica 8. Skalirane vrijednosti za lopatice ventilatora.....                               | 36 |
| Tablica 9. Izračun pokazatelja radne karakteristike i poretka za lopatice ventilatora ..... | 36 |
| Tablica 10. Prikaz vrijednosti faktora važnosti za lopatice ventilatora .....               | 37 |
| Tablica 11. Digitalno-logička metoda za postolje ventilatora.....                           | 39 |
| Tablica 12. Predizbor materijala za postolje ventilatora.....                               | 40 |
| Tablica 13. Skalirane vrijednosti za postolje ventilatora.....                              | 40 |
| Tablica 14. AHP pri izboru materijala za postolje ventilatora .....                         | 41 |
| Tablica 15. Normalizirana tablica usporedbe parova svojstava za postolje ventilatora .....  | 41 |
| Tablica 16. Izračun konzistencije za postolje ventilatora .....                             | 42 |
| Tablica 17. Skalirane vrijednosti za postolje ventilatora.....                              | 42 |
| Tablica 18. Izračun parametra vrednovanja i poretka za postolje ventilatora .....           | 43 |
| Tablica 19. Prikaz vrijednosti faktora važnosti za postolje ventilatora .....               | 44 |



**POPIS OZNAKA**

| <b>Oznaka</b> | <b>Jedinica</b>   | <b>Opis</b>                     |
|---------------|-------------------|---------------------------------|
| $F_i$         |                   | Funkcija cilja                  |
| $X_i$         |                   | Postojeće vrijednosti           |
| $Y_i$         |                   | Zahtijevane vrijednosti         |
| $B_i$         |                   | Faktor važnosti                 |
| $V_r$         |                   | Pokazatelj radne karakteristike |
| $M$           |                   | Pokazatelj vrednovanja          |
| $F_r$         | N                 | Rezna sila dječje ruke          |
| $\rho$        | g/cm <sup>3</sup> | Gustoća                         |
| $KV$          | kJ/m <sup>2</sup> | Žilavost                        |
| $R_d$         | MPa               | Dinamička izdržljivost          |
| $E$           | MPa               | Modul elastičnosti              |
| $\sigma$      | MPa               | Čvrstoća                        |
| $\mu$         |                   | Koeficijent trenja              |

## SAŽETAK

U ovom radu proveden je izbor optimalnog materijala za lopatice i postolje edukacijskog robotskog ventilatora. Ovaj robot služi za edukaciju osnovnoškolske djece (dijelovi robota-ventilatora daju se djeci koja uz pomoću edukatora dovršavaju pojedine dijelove i sastavljaju ih u funkcionalnu cjelinu). Kroz to djeca usvajaju: osnove programiranja, osnove metoda izbora optimalnog materijala, dizajniranje proizvoda, znanja o obnovljivim izvorima i sl.

Optimalni materijal birao se kvantitativnom metodom utjecajnosti svojstava materijala. Kod ove metode važno je što objektivnije odrediti faktor važnosti. Faktor važnosti ima veliki utjecaj na izbor materijala (što je pokazano kroz rad) i zbog toga se odredio na dva načina: digitalno-logičkom metodom i analitičko hijerarhijskim procesom.

Optimalan materijal za lopatice ventilatora je PE-HD, a optimalan materijal za postolje ventilatora je šperploča.

Ključne riječi: izbor materijala, faktor važnosti, edukacija, robot, djeca

## **SUMMARY**

In this paper, the selection of the optimal material for the blades and the base of the educational robotic fan was performed. This robot is used for the education of primary school children (parts of the robot-fan are given to children who, with the help of educators, complete individual parts and assemble them into a functional whole). Through this, children learn: the basics of programming, the basics of methods for choosing the optimal material, product design, knowledge of renewable sources, etc.

The optimal material was chosen by the quantitative method of influencing the properties of the material. With this method, it is important to determine the importance factor as objectively as possible. The importance factor has a great influence on the choice of materials (which is shown through the paper) and is therefore determined in two ways: by digital-logical method and analytical hierarchical process.

The optimal material for the fan blades is PE-HD, and the optimal material for the fan base is plywood.

Key words: material selection, importance factor, education, robot, kids

## 1. Uvod

Izbor materijala je izuzetno važan dio razvoja proizvoda. Temelj za bilo koji proizvod je dobro izabran materijal. U ovom radu, važnost izbora materijala predstavljena je preko izbora materijala za lopatice i postolje robotskog ventilatora za edukaciju djece u osnovnoj školi.

Manje ili više, gotovi dijelovi robotskog ventilatora daju se djeci koja uz pomoć edukatora dovršavaju pojedine dijelove i sastavljaju ih u funkcionalnu cjelinu. Kroz navedene aktivnosti djeca usvajaju:

- osnove mehanike – rotaciju lopatica, nosivost postolja
- programiranje – unutar ventilatora nalazi se arduino pločica na kojoj djeca programiraju prvenstveno različite brzine rotacija, ali i druge performanse ovisno o sensorima koji se dodaju na robot
- osnove izbora materijala – biraju odgovarajući materijal koji će moći lako ručno oblikovati, a koji istodobno zadovoljava kriterij recikličnosti
- dizajniranje proizvoda – ručno izrezuju lopatice ventilatora te tako pokazuju svoju kreativnu stranu
- znanja o obnovljivim izvorima energije – ventilatori imaju sličan dizajn kao vjetrenjače, što može potaknuti educiranje o obnovljivim izvorima energije.

Da bi se došlo do optimalnog materijala za lopatice i postolje robotskog ventilatora korištena je jedna od kvantitativnih metoda izbora materijala – metoda utjecajnosti svojstava.

Uobičajeni tijek izbora optimalnog materijala sastoji se od nekoliko faza. Na početku treba precizno definirati zahtjeve koji se postavljaju na proizvod. Kako se radi o proizvodu koji služi za edukaciju djece, u ovoj fazi treba, uz uobičajene skupine kriterija za izbor materijala, uključiti i neke specifične zahtjeve. Zahtjevi na proizvod preslikavaju se u svojstva materijala, a nakon toga određuju se faktori važnosti pojedinih svojstava. U ovom radu faktor važnosti određen je pomoću digitalno-logičke metode i analitičko-hijerarhijskim procesom (AHP). Kako bi se izbjegao negativan utjecaj različitih apsolutnih vrijednosti pojedinih svojstava na izbor optimalnog materijala, njihove vrijednosti se skaliraju. Zbrajanjem umnožaka skaliranih vrijednosti pojedinih svojstava i pripadajućih faktora važnosti dobije se vrijednost pokazatelja radne karakteristike za svaki predizabrani materijal. Optimalan materijal je onaj čija je vrijednost pokazatelja radne karakteristike najviša.

## **2. Izbor materijala**

### **2.1. Izbor materijala i postupak konstruiranja [1]**

Osnovni cilj svake proizvodnje je izraditi što bolji proizvod uz što kvalitetnija svojstva, ljepši izgled i što nižu cijenu, a da sve to bude što isplativije. To je moguće postići poboljšavanjem postupka izrade, postupka konstruiranja i postupka izbora materijala. Treba naglasiti da je postupak izbora materijala važan dio procesa razvoja bilo kojeg proizvoda.

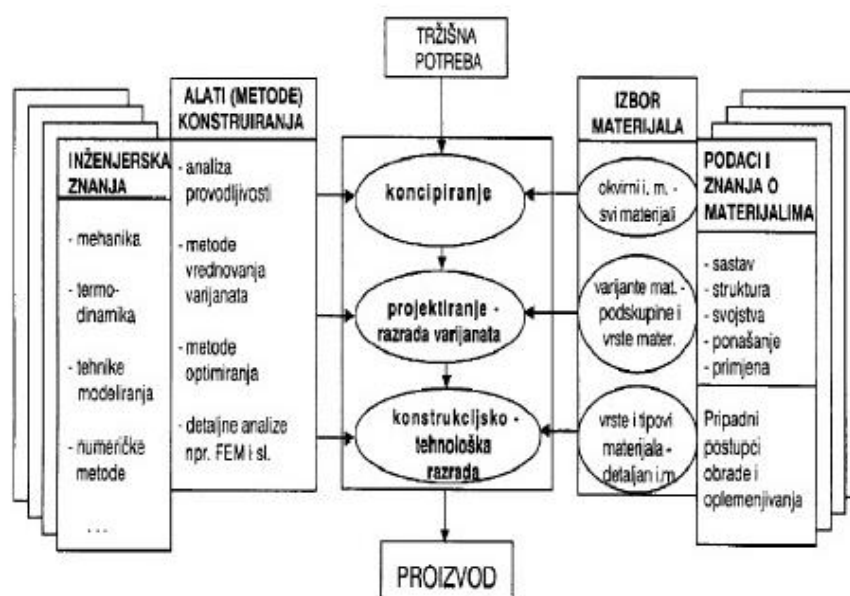
Na proces razvoja proizvoda utječe veliki broj čimbenika, koji se mogu podijeliti u četiri osnovne skupine:

1. tehnički čimbenici – odnosi se na funkcijske i eksploatacijske zahtjeve te proizvodna i energetska svojstva proizvoda
2. ekonomski čimbenici – odnosi se na troškove proizvodnje, cijenu proizvoda, troškove investicija i sl.
3. društveni i humani čimbenici – odnose se na društvene potrebe, mogućnost uporabe i recikliranja, kulturološka te informacijska svojstva
4. pravni čimbenici – odnose se na zakone, norme i propise koji vrijede u nekoj državi.

Pri konstruiranju proizvoda javlja se puno problema. Neki se moraju riješiti odmah na početku kako bi se proizvod mogao dalje razvijati. Jedan od takvih problema je definiranje uloge proizvoda u eksploataciji. Također je potrebno dobro razraditi postupak proizvodnje i napraviti podloge za izrade proizvoda.

Proces konstruiranja može se podijeliti u 3 faze koje su shematski prikazane na slici 1:

- faza koncipiranja varijanti
- faza projektiranja i razrada varijanti rješenja
- faza konstruiranja dijelova i tehnološka razrada.



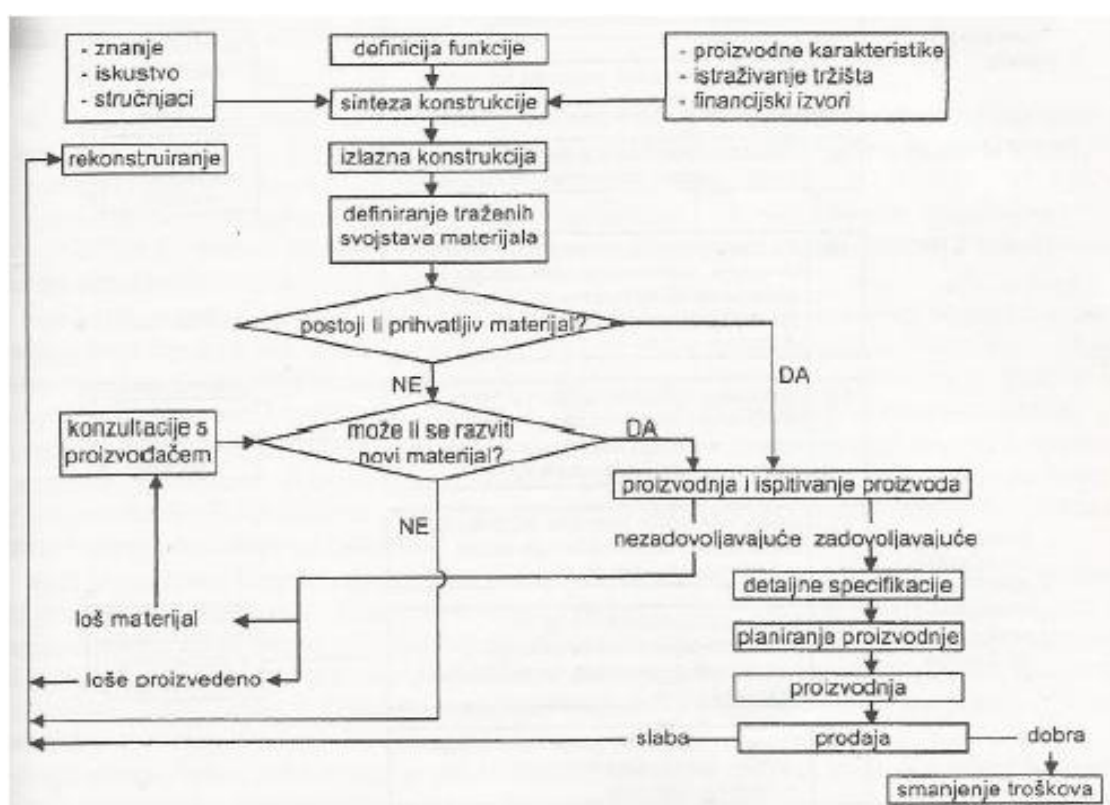
**Slika 1. Prikaz izbora materijala u tri faze razvoja proizvoda [1]**

1. Faza koncipiranja varijanti je vrlo važna faza u razvoju bilo kojeg proizvoda. Svaki razvoj počinje s poznatim zahtjevima. Kreiranje potpuno novih proizvoda je rjeđe od prilagođavanja postojećih rješenja nekim novim zahtjevima ili procesima proizvodnje. Što se tiče izbora materijala, u ovoj fazi bi sve varijante trebale biti podjednako prikladne. U ovoj fazi odabiru se osnovna svojstva materijala i utvrđuju zahtjevi za izbor materijala. U početku obično prevladavaju uobičajene skupine materijala pa treba paziti da se u izbor uključi što širi spektar različitih materijala koji odgovaraju početnim zahtjevima npr. čelici, razne legure, polimeri, prirodni materijali i sl.
2. Nakon prve faze slijedi faza projektiranja i razrade varijanti rješenja. Kako su modeli za daljnje razrađivanje i ostvarivost proizvoda utvrđeni, pristupa se detaljnijim procjenama osnovnih funkcijskih i konstrukcijskih zahtjeva. U ovoj fazi je potrebno prikupiti što više informacija o različitim materijalima iz što više baza podataka i kataloga kako bi imali što širu sliku o potencijalnim materijalima koji odgovaraju zahtjevima proizvoda. Detaljnije se promatraju i izabiru najprikladnije vrste materijala. Nakon ove faze trebali bi dobiti praktične specifikacije dijelova i sklopova, te utvrditi skupine materijala koji odgovaraju proizvodnom tijeku. Također, u ovoj fazi može doći do smanjenja ugrađenih vrsta materijala, kao i ugradbenih dijelova.
3. Treća faza, konstruiranje dijelova i tehnološka razrada, počinje s detaljnim provjerama funkcije novog proizvoda i posljedica koje nastaju primjenom tog proizvoda. U ovoj fazi

najčešće je preostalo samo nekoliko materijala za krajnju analizu. Te materijale se detaljno proučava i uspoređuje njihov način oblikovanja, ponašanje u eksploataciji, utjecaj materijala na okoliš te životni vijek proizvoda. Također se definira proizvođač materijala, oblik poluproizvoda, dimenzije, troškovi i mogućnost isporuke.

Navedene informacije o materijalima dobivaju se iz različitih izvora i bitno je paziti na njihovu pouzdanost. Potrebno je znati što točnije vrijednosti zbog kasnijih kalkulacija. Za neke posebno kritične dijelove može se napraviti dodatno ispitivanje u laboratorijskim uvjetima ili simulacijama.

Na slici 2. prikazan je dijagram u kojem se može vidjeti utjecaj funkcije i izgleda proizvoda te proizvodnje i troškova izrade na položaj izbora materijala u razvoju i realizaciji proizvoda. U ovom iterativnom postupku nastoje se uskladiti često kontradiktorni zahtjevi kupaca, naručitelja, trgovaca, proizvođača i konstruktora.



Slika 2. Tijek postupka razvoja proizvoda i izbora materijala [1]

Izbor materijala proteže se kroz sve dijelove konstruiranja nekog proizvoda i zato je izrazito važno raspolagati sa što više informacija o svojstvima novih, suvremenih materijala, jer je to ključno za razvoj novih tehničkih tvorevina.

## 2.2. Način i metodologija izbora materijala [1]

U praksi je, vrlo često, izbor materijala sveden na nekoliko vrsta materijala koje konstruktori poznaju. Materijali su uglavnom unaprijed određeni i više imaju ulogu konstante nego varijable u procesu konstruiranja. Na odabir materijala većinom više utječe iskustvo i subjektivnost nego mjerljive objektivne veličine.

Istraživanjem koje je provedeno među konstruktorima i tehnolozima dobivena su sljedeća četiri kriterija o načinima dobivanja informacija pri izboru materijala:

1. informacije dobivene iz već izvedenih konstrukcija što bi se moglo okarakterizirati kao „prepisivanje“ iz vlastite ili strane dokumentacije materijala koji je već prije bio izabran za sličan dio
2. informacije koje se temelje na kvalitativnim i najčešće vrlo subjektivnim procjenama i iskustvima pojedinaca (potrebne vrijednosti otpornosti na trošenje, mehanička opterećenja, procjena troškova...)
3. informacije o svojstvima materijala koje su dobivene različitim konkretnim mjerenjima, koje su najčešće kvantitativne (mogu se brojčano izraziti) i puno su objektivnije od prethodna dva načina (npr. mehanička svojstva i troškovi izrade)
4. informacije dobivene iz internih ili nacionalnih normi koje propisuju različita ograničenja i sl.

Rezultati istraživanja pokazuju da se konstruktori često opredjeljuju za rješenja koja su bazirana na iskustvu iako ona nisu uvijek i najbolja. Mogući razlog za to jest manjak preglednih kataloga ili nekih drugih pomagala koji omogućuju kvalitetnu usporedbu svojstava pojedinih materijala.

Sistematičnost u izboru materijala postaje nužna zbog sve kompliciranijih zahtjeva pri izboru.

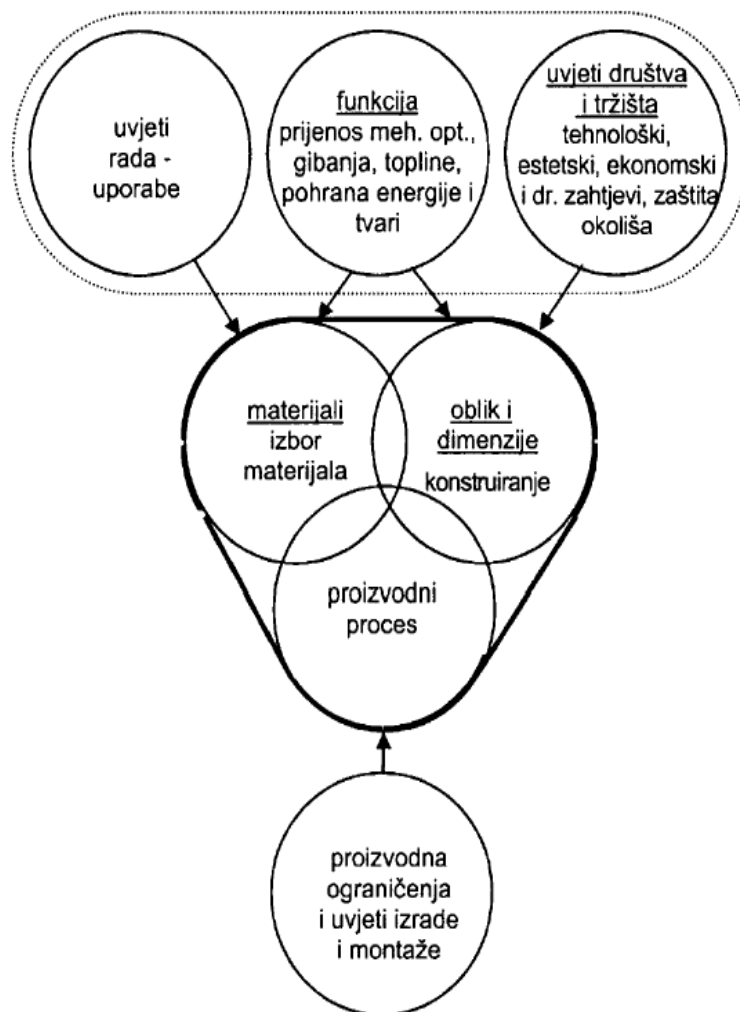
Izbor materijala je važan korak pri materijalizaciji neke konstrukcije. Pravilan izbor uključuje promatranje različitih kriterija i zahtjeva proizvodnje, proizvoda i troškova.

U postupku razvoja proizvoda ravnopravno sudjeluju tri različite aktivnosti:

- konstrukcijsko oblikovanje
- izbor materijala
- izbor postupaka proizvodnje.

Ove tri aktivnosti međusobno su povezane, kako je prikazano na slici 3.





**Slika 3. Povezanost različitih aktivnosti u postupku razvoja proizvoda [1]**

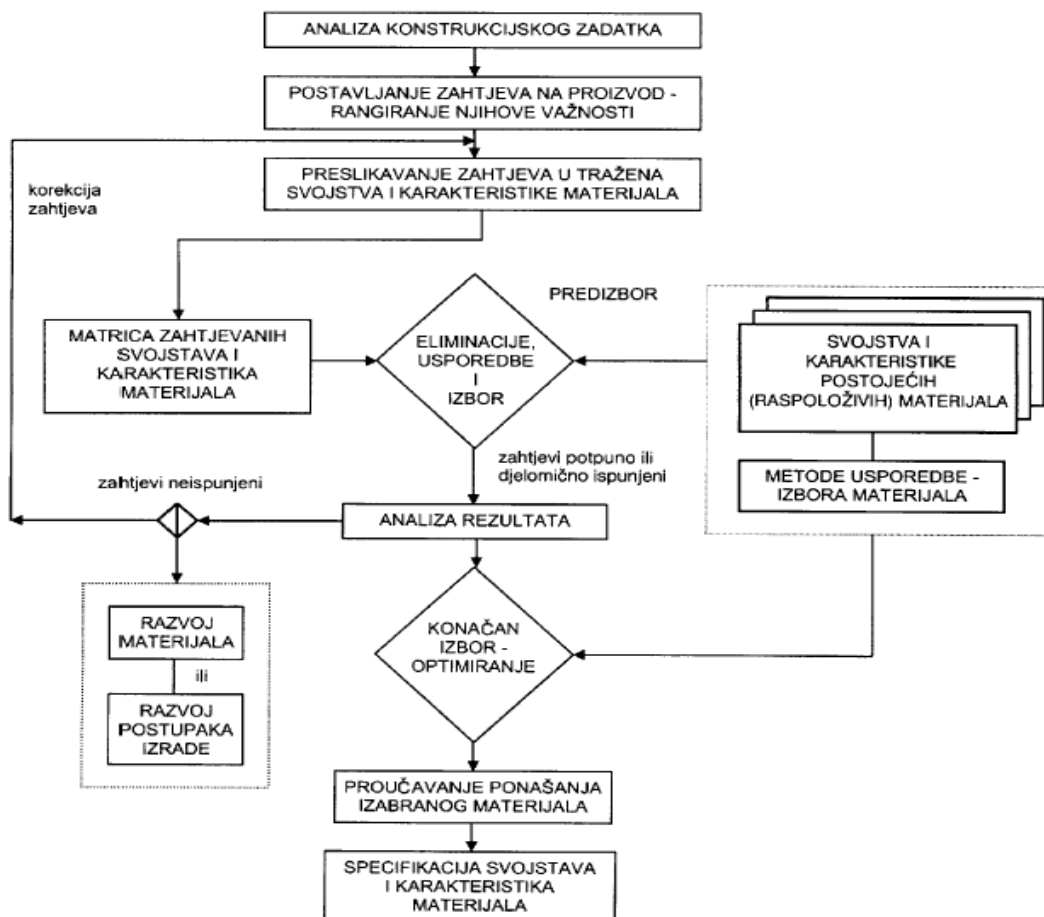
Promjene bilo kojeg segmenta u gornjem prikazu mogu dovesti do vrlo različitih rješenja u postupku razvoja proizvoda. Materijal ne smije biti unaprijed određen već mora proizići iz mogućnosti ostvarenja svih zahtjeva na proizvod. Pooštavanjem zahtjeva na proizvod sve je teže odabrati odgovarajući materijal. Odabrani materijal ima odlučujući utjecaj na svojstva proizvoda. Zbog toga se u praksi sve više počinju koristiti neki od metodičkih postupaka izbora materijala.

Opći postupak izbora materijala se sastoji od sljedećih faza:

1. analiza konstrukcijskog zadatka
2. izdvajanje pripadajućih zahtjeva i kriterija vrednovanja materijala iz skupa zahtjeva i kriterija za vrednovanje proizvoda
3. izbor i rangiranje kriterija te preslikavanje u svojstva koja su potrebna za usporedbu materijala ili za vrednovanje proizvoda u pogledu materijala

4. izdvajanje neprikladnih materijala
5. razrada varijanti
6. analiza i ocjena pojedinih varijanata
7. izbor optimalne varijante i njoj pridruženih materijala
8. oblikovanje izlaznih informacija o izabranim materijalima.

Na slici 4 prikazane je tijek izbora materijala s gore navedenim fazama.



**Slika 4. Tijek izbora materijala [1]**

Postoji puno zahtjeva prilikom razvoja proizvoda i s obzirom na važnost ispunjenja tih zahtjeva imamo invarijantne i varijantne zahtjeve. Invarijantni su oni zahtjevi koji se moraju ispuniti, a varijantni su promjenjivi i moguće ih je zadovoljiti do neke određene granice, ne nužno u potpunosti. Invarijantni zahtjevi otklanjaju neprikladne materijale, a varijantni služe kako bi se

odabrao optimalan materijal između više materijala koji zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Prilikom postavljanja zahtjeva na svojstva materijala treba biti jako oprezan, jer ako su zahtjevi previsoki onda možda niti jedan od poznatih materijala neće odgovarati nego će se morati razviti neki novi materijal koji će imati zahtijevana svojstva.

Za analizu materijala unutar procesa važno je:

- postaviti zahtjeve i kriterije izbora
- definirati tražena svojstva i karakteristike
- izabrati metodu odlučivanja i optimiranja.

### 2.3. Osnove skupine kriterija za izbor materijala [1]

Neki kriteriji se odnose na materijal, a neki na željene karakteristike proizvoda. Na početku izbora važno je primijetiti koja se svojstva odnose samo na materijal, a ne na cijeli proizvod čime se olakšava izbor unutar definirane skupine materijala.

Skupine kriterija za izbor materijala su:

1. Funkcionalnost
2. Eksploatabilnost
3. Tehnologičnost
4. Recikličnost
5. Raspoloživost (ekonomičnost)
6. Standardiziranost (normiranost)
7. Estetičnost i taktilnost

**Funkcionalni** zahtjevi su oni koji definiraju izvršenje funkcija proizvoda u uporabi tj. eksploataciji. Zahtjevi koji se odnose na funkcionalnost usko su povezani s kriterijima eksploatabilnosti.

**Eksploatabilni** zahtjevi su prvenstveno povezani s neželjenim ponašanjima tijekom uporabe proizvoda poput:

- promjene dimenzija i oblika zbog prevelike elastične ili plastične deformacije
- lomova
- promjene stanja površine zbog npr. trošenja ili korozije.

---

Funkcionalnost i eksploataбилnost definiraju se preko kriterija poput:

- nosivosti
- sigurnosti
- pouzdanosti
- trajnosti
- otpornosti
- krutosti
- žilavosti.

**Tehnolođičnost** sadrži zahtjeve koji se odnose na prikladnost materijala za pojedine načine praoblikovanja, preoblikovanja i oblikovanja. Najkraće rečeno, odgovaraju na pitanje može li se materijal izraditi određenim proizvodnim postupcima. Početna svojstva materijala mijenjaju se tijekom proizvodnih postupaka pa bi se ovaj kriterij trebao razumjeti kao nastojanje da se propisana kvaliteta najjednostavnijih i najjeftinijih materijala postigne izradom najjeftinijim i najjednostavnijim postupcima.

Kriteriji koji se mogu navesti kod tehnolođičnosti nekog materijala su npr.:

- livljivost
- rezljivost
- deformabilnost
- zavarljivost i sl.

**Recikličnost** sadrži zahtjeve koji se fokusiraju na što bolje iskorištavanje otpada, cijelog proizvoda ili dijela nekog proizvoda, te na zaštitu okoliša.

Neki zahtjevi koji se mogu definirati unutar ovog kriterija su:

- mogućnost prirodne razgradnje
- složenost recikliranja
- mogućnost ponovne uporabe proizvoda ili dijela proizvoda
- mogućnost uporabe
- troškovi recikliranja
- utjecaj na okoliš.

**Raspoloživost (ekonomičnost)** je kriterij koji definira zahtjeve tržišnosti materijala.

Neki od tih zahtjeva su:

- cijena materijala
- troškovi nabave
- profitabilnost materijala
- porijeklo materijala
- uvoz i nabava materijala.

**Standardiziranost (normiranost)** stavlja naglasak na izbor onih materijala koji se uglavnom proizvode i koji su lako nabavljivi. Ovi zahtjevi polaze od zakona, normi i preporuka koje je nužno poštivati. Oni definiraju tehničke uvjete i ograničenja, sigurnosne i zdravstvene zahtjeve, te zaštitu ljudi i okoliša.

**Estetičnost** sadrži važnu skupinu kriterija pogotovo za korisnike proizvoda. Ovi kriteriji odnose se na boju, transparentnost, površinski sjaj, skladnost oblika i sl. Teško se mogu brojčano izraziti jer npr. opis nekog proizvoda kao „lijepog“ ovisi od osobe do osobe i kulture kojoj pripadaju kupci.

**Taktilnost** ili **osjetilnost** obuhvaća zahtjeve koji se odnose na doživljaj proizvoda preko osjeta dodira. Preko ovog osjeta proizvod se može opisati kao topao, hladan, mekan, tvrd, krut, gladak i sl. Osim osjeta dodira za neke proizvode važan je i podražaj koji se dobiva preko osjeta sluha. Različiti materijali imaju različita akustična svojstva pa se mogu opisati kao npr. zvonki, prigušujući i sl.

Zahtjevi koji se odnose na taktilnosti i osjetilnosti povezani su s toplinskim svojstvima materijala, s modulom elastičnosti, tvrdoćom i sl.

Svi navedeni kriteriji teško su ostvarljivi u jednom materijalu pa se uglavnom traži neko kompromisno ispunjenje tih kriterija. Nakon određivanja zahtjeva, problem izbora materijala se prebacuje na pronalazak optimalnog materijala.

## 2.4. Kvantitativne metode izbora materijala

U želji da odlučivanje pri izboru materijala bude što efikasnije, razvijeno je više kvantitativnih metoda izbora materijala. Korištenje tih metoda uvjetovano je postojanjem brojčanih vrijednosti promatranih zahtjeva i svojstava. Brojčane vrijednosti mogu biti dobivene mjerenjem ili procjenom (ocjene). Većina tih vrijednosti može se pronaći u različitim *online* bazama podataka

ili priručnicima. Navedene vrijednosti mogu se razlikovati ovisno o pouzdanosti izvora, stoga je bitno proučiti što više izvora kako bi vrijednosti koje se uzimaju u obzir pri računanju bile što vjerodostojnije. Kod većine metoda radi se usporedba traženih i postojećih svojstava.

Postoje tri načina usporedbe svojstava:

1. Zadovoljavanje minimalne ili maksimalne vrijednosti (ekstremi) ili odbacivanje preko nul-zahjeva. Ovaj način je prikladan za invarijantne zahtjeve.
2. Uspoređivanje svojstava koja su u intervalu zadovoljavajućih vrijednosti što je prikladno za varijantne zahtjeve.

Moguća su tri ishoda ove usporedbe:

- niti jedan materijal ne zadovoljava zahtjeve
- jedan materijal zadovoljava sve zahtjeve, što se u praksi vrlo rijetko događa
- više materijala jednim dijelom zadovoljava više zahtjeva, što je najčešći slučaj u praksi

3. Usporedba svojstava može se provesti preko minimalnih ili maksimalnih vrijednosti funkcije cilja.

Funkcija cilja ( $F_i$ ) u općem obliku zapisuje se kao zbroj omjera postojećih vrijednosti ( $X_i$ ) i zahtijevanih vrijednosti ( $Y_i$ ) odgovarajućih svojstava. Pritom se svaki omjer još pomnoži s faktorom važnosti ( $B_i$ ).

$$F_i = \sum_{i=1}^n B_i \times \frac{X_i}{Y_i} \rightarrow maks. \quad (1)$$

Vrijednosti svojstava različitih materijala potrebno je skalirati tj. svesti sve rezultate na isti red veličine, najčešće u rasponu od 1 do 100. Tako se poništava utjecaj različitih apsolutnih vrijednosti svojstava. Skaliranje se provodi u odnosu na minimalne ili maksimalne vrijednosti materijala.

Faktor važnosti definira relativnu važnost zahtjeva i iznosi između 0 i 1. Zbroj svih faktora važnosti mora biti jednak 1. Faktor važnosti određuje se digitalno-logičkom metodom.

Kod digitalno-logičke metode zahtjevi se međusobno uspoređuju i svaki važniji zahtjev dobije vrijednost 1, a manje važan zahtjev dobije vrijednost 0. Za neki broj zahtjeva ( $n$ ) ukupni broj usporedbi iznositi će  $n(n-1)/2$ .

Najpoznatije metode izbora materijala su:

1. Metoda „cijena jedinica svojstava“
2. Metoda najmanjih odstupanja svojstava od traženih
3. Metoda utjecajnosti svojstava
4. Metoda graničnih vrijednosti

#### 2.4.1. Metoda „cijena jedinica svojstava“ [1]

Kod ove metode razmatra se jedno ili nekoliko svojstava s njihovim cijenama ili troškovima materijala. To su najbitnija svojstva u usporedbi s ostalim zahtjevima na proizvod, zato je ova metoda jednostavna, ali je važno uočiti situacije u kojim se može primijeniti. Bitno je odrediti najvažnije svojstvo u definiranim uvjetima.

#### 2.4.2. Metoda najmanjih odstupanja svojstava od traženih [1]

Ova metoda može se primijeniti algebarski i geometrijski.

Algebarskim pristupom materijali se uspoređuju na osnovi apsolutne vrijednosti sume odstupanja od traženih. Računa se minimalna vrijednost sljedećeg izraza:

$$F_j = \sum_{i=1}^n B_i \left| \frac{X_i}{Y_i} - 1 \right| \quad (2)$$

gdje je:

$F_j$  – funkcija cilja

$X_i$  – vrijednost svojstava materijala

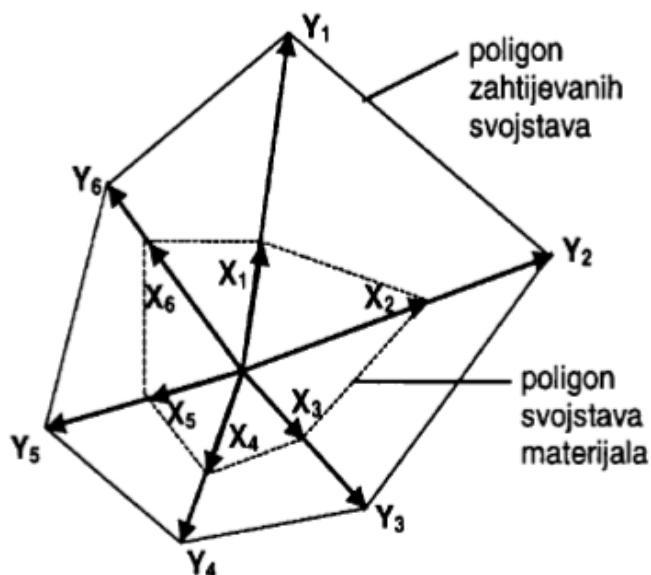
$Y_i$  – vrijednost zahtijevanog svojstva materijala

$n$  – broj svojstava

$j$  – broj materijala

$B_i$  – faktor važnosti za svaki zahtjev

Geometrijskim pristupom uspoređuju se poligon zahtijevanih svojstva materijala i poligon postojećih svojstava materijala. Izgled poligona prikazan je na slici 5:



Slika 5. Poligon zahtijevanih i postojećih svojstava materijala [1]

S  $Y_i$  označene su vrijednosti zahtijevanih svojstava, a sa  $X_i$  vrijednosti materijala koji ulazi u postupak usporedbe.

Odgovarajući materijal može se i brojčano definirati prema:

- Sličnosti površine poligona
- Sličnosti oblika poligona
- Subjektivnom procjenom važnosti odstupanja svojstava

Sličnost površine poligona može se iskazati izrazom:

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^m B_i \frac{X_i}{Y_i}}{\sum_{i=1}^n B_i} \quad (3)$$

Kako se vrijednost  $P_j$  za pojedini materijal više približava 1, tako se i veličina poligona njegovih svojstava sve više približava poligonu "zahtijevanog" materijala.

Sličnost oblika poligona može se iskazati izrazom:

$$O_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i}{Y_i} - P \right)^2} \quad (4)$$

Slično kao u prethodnoj formuli, što je sličnost oblika poligona  $O_j$  bliža vrijednosti 1, to su i svojstva promatranog materijala bliža zahtijevanim svojstvima.

Kriterij za izbor je što manja udaljenost ( $F_j$ ) na dijagramu koji bi imao koordinate  $P_j$  i  $O_j$ .



$$F_j = \sqrt{(1 - P_j)^2 + O_j^2} \quad (5)$$

### 2.4.3. Metoda utjecajnosti svojstava [1]

Ova metoda koristi se kada treba razmatrati više svojstava. Promatraju se ona svojstva koja su važna za proizvod. S obzirom da imamo puno promatranih svojstava s različitim mjernim jedinicama koriste se skalirane vrijednosti tih svojstava. Skalirane vrijednosti su bezdimenzijske veličine pa se zato svojstva rangiraju tako da najbolja vrijednost ima ocjenu 100, dok se ostale vrijednosti definiraju proporcionalno toj vrijednosti 100. Najbolja vrijednost može biti minimalna ili maksimalna, ovisno o svojstvu koje promatramo.

Kada se teži minimalnoj vrijednosti nekog svojstva koristi se izraz:

$$S_{vi} = \frac{\text{minimum vrijednosti u listi}}{\text{brojčana vrijednost svojstava}} \times 100 \quad (6)$$

Kada se promatra maksimalna vrijednost koristi se izraz:

$$S_{vi} = \frac{\text{brojčana vrijednost svojstava}}{\text{maksimalna vrijednost u listi}} \times 100 \quad (7)$$

Dobivene vrijednosti množe se s pripadnim faktorom važnosti ( $B_i$ ) kako bi se izračunala relativna važnost pojedinog svojstva. Zbrojem tako vrednovanih svojstava dobije se pokazatelj radne karakteristike ( $V_r$ ) koji je važan za računanje pokazatelja vrednovanja ( $M$ ).

$$M = \frac{V_r}{C \times \rho} = \frac{\sum_{i=1}^n B_i \times S_{vi}}{C \times \rho} \rightarrow \text{maks.} \quad (8)$$

### 2.4.4. Metoda graničnih vrijednosti [1]

Ova metoda je preslikavanje zahtjeva u granične vrijednosti. Postoje:

1. Donje granične vrijednosti svojstava
2. Gornje granične vrijednosti svojstava
3. Ciljane vrijednosti svojstava

Koja od ovih podvrsta će se primijeniti ovisi o zahtijevanim svojstvima. Ovom metodom mogu se lako eliminirati oni materijali koji izlaze van postavljenih granica. Primjenjuje se uglavnom pri izboru između jako velikog broja materijala, gdje postoji jako puno različitih mogućnosti. Sužavanjem se dolazi do skupa materijala koji ide u daljnju analizu. Poslije analize pojedinom se svojstvu pridružuje faktor važnosti i onda se računa pokazatelj vrednovanja (M) sljedećim izrazom:

$$M = \left[ \sum_{i=1}^{n_d} B_i \frac{Y_i}{X_i} \right]_d \times \left[ \sum_{j=1}^{n_c} B_j \frac{X_j}{Y_j} \right]_g \times \left[ \sum_{k=1}^{n_c} B_k \left| \left( \frac{Y_k}{X_k} \right) - 1 \right| \right]_c \rightarrow \min. \quad (9)$$

n – označava broj donjih, gornjih i ciljanih vrijednosti

B – označava faktore vrijednosti za pojedino svojstvo

X – su donje, gornje i ciljane vrijednosti svojstava

Y – su specificirane donje, gornje i ciljane vrijednosti.

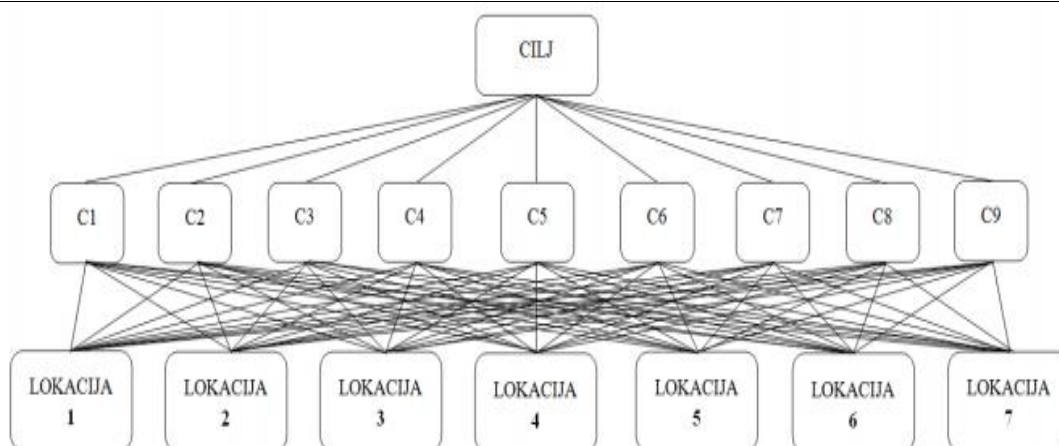
#### 2.4.5. Izračunavanje faktora važnosti

##### 2.4.5.1. Digitalno-logička metoda

Digitalno-logička metoda jedna je od metoda koja se koristi za određivanje faktora važnosti. Kod ove metode, svako svojstvo uspoređuje se sa svakim i pri tome se važnijem svojstvu dodijeli ocjena 1, a manje važnom 0. Za svako svojstvo dobije se broj pozitivnih odluka te je onda faktor važnosti jednak omjeru pozitivnih odluka i ukupnog broja pitanja.

##### 2.4.5.2. Analitičko hijerarhijski proces (AHP)

Rješavanje složenih problema odlučivanja analitičko hijerarhijskim procesom utemeljeno je na raščlanjivanju u hijerarhijsku strukturu čiji su elementi cilj, kriteriji, potkriteriji i alternative. Cilj se nalazi na vrhu hijerarhije dok su kriteriji, potkriteriji i alternative na nižim razinama, što je prikazano na slici 6. Time je napravljen prvi korak u primjeni ove metode. Kompleksnost određivanja faktora važnosti raste s brojem kriterija i s brojem alternativa. [2]



Slika 6. AHP [2]

U slijedećem koraku se na svakoj razini hijerarhijske strukture u parovima uzajamno uspoređuju elementi tih struktura. Donositelj odluke prednost nekom paru izražava preko Saatyjeve skale koja ima 5 stupnjeva i 4 međustupnja koji su opisani riječima i imaju brožane vrijednosti u rasponu od 1 do 9. Neparnim brojevima pridružene su osnovne vrijednosti dok su parnim brojevima pridružene međuvrijednosti osnovnih vrijednosti. Intenziteti važnosti, definicije i njihova objašnjenja prikazani su u tablici 1.[2]

Tablica 1.Saatyjeva skala[2]

| Intenzitet važnosti | Definicija                            | Objašnjenje  |
|---------------------|---------------------------------------|--|
| 1                   | Jednako važno                         | Dvije aktivnosti jednako doprinose cilju   |
| 2                   | Jednako važno do umjereno važnije     | Međuvrijednost između jednakog doprinosa cilju i umjerene važnosti jedne aktivnosti u odnosu na drugu          |
| 3                   | Umjereno važnije                      | Na temelju iskustva i procjena daje se umjerena prednost jednoj aktivnosti u odnosu na drugu                   |
| 4                   | Umjereno do strogo važnije            | Međuvrijednost između umjerene prednosti do strogo važnije prednosti jedne aktivnosti u odnosu na drugu        |
| 5                   | Strogo važnije                        | Na temelju iskustva i procjena strogo se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu                          |
| 6                   | Strogo važnije do vrlo stroga važnost | Međuvrijednost od strogo važnije prednosti do vrlo stroge dokazane važnosti jedne aktivnosti u odnosu na drugu |
| 7                   | Vrlo stroga, dokazana važnost         | Jedna aktivnost izrazito se favorizira u odnosu na drugu; njezina dominacija dokazuje se u praksi              |
| 8                   | Vrlo stroga do ekstremna važnost      | Međuvrijednost od vrlo stroge do ekstremne važnosti jedne aktivnosti u odnosu na drugu                         |
| 9                   | Ekstremna važnost                     | Dokazi na temelju kojih se favorizira jedna aktivnost u odnosu na drugu potvrđeni su s najvećom uvjerljivošću  |

U trećem koraku računaju se lokalne težine kriterija, tj. prioriteta alternativa.

Postupak se sastoji od sljedećih faza:

1. prioriteta iz uspoređenih parova unose se u tablicu omjera prioriteta alternativa po kriteriju
2. zbroje se vrijednosti svakog stupca te se kreira nova tablica koja se sastoji od elemenata koji su nastali tako što se svaki element prethodne tablice podijelio sa zbrojem odgovarajućeg stupca te se tako dobije tablica normaliziranih vrijednosti
3. izračunaju se aritmetičke sredine vrijednosti elemenata pojedinih redova normalizirane tablice. Rezultat su faktori važnosti, tj. prioriteta alternativa s time da zbroj svih faktora važnosti mora iznositi 1.

U zadnjem koraku dolazi do provođenja analize osjetljivosti. Svrha analize je vidjeti u kojoj mjeri promjene ulaznih podataka utječu na konačne prioritete alternativa. Pomoću ulaznih podataka izračunaju se prioriteta, procjene relativnih faktora važnosti i omjera lokalnih prioriteta. Navedene procjene mogu odstupati u određenim rasponima, a da i dalje budu u skladu sa sklonostima donositelja odluke. Prednost ovog načina dobivanja faktora važnosti pokazuje se kada su kod procjene važni kvalitativni kriteriji koji se ne mogu egzaktno kvantificirati nekom vrijednošću, ali svakako se mogu procjenjivati u relativnom međuodnosu varijanti. [2]

### 3. Povijest ventilatora

Ljudi već tisućama godina koriste ventilatore. Prvi zapisi o tome pojavljuju se kod starih Egipćana gdje su ih robovi rashlađivali mašući ogromnim lotosovim lišćem, kao što je prikazano na slici 7. Egipćani su to naknadno unaprijedili tako što su radili strujanje zraka kroz vlažne prostirke ili posude napunjene vodom. Za razliku od njih, stari Grci i Rimljani koristili su paunovo perje za rashlađivanje. [3]



**Slika 7. Prvi ventilatori u Egiptu [3]**

Iskorak u načinu rashlađivanja napravili su Japanci u osmom stoljeću, kada su izmislili lepeze. Vrhunac razvoja lepeza bio je u Kini za vrijeme vladavine dinastije Ming (1368. do 1644.), kada su se lepeze počele ukrašavati raznim bojama kao što je prikazano na slici 8. Portugalski trgovci donijeli su prve lepeze u Europu u 14. stoljeću. [3]

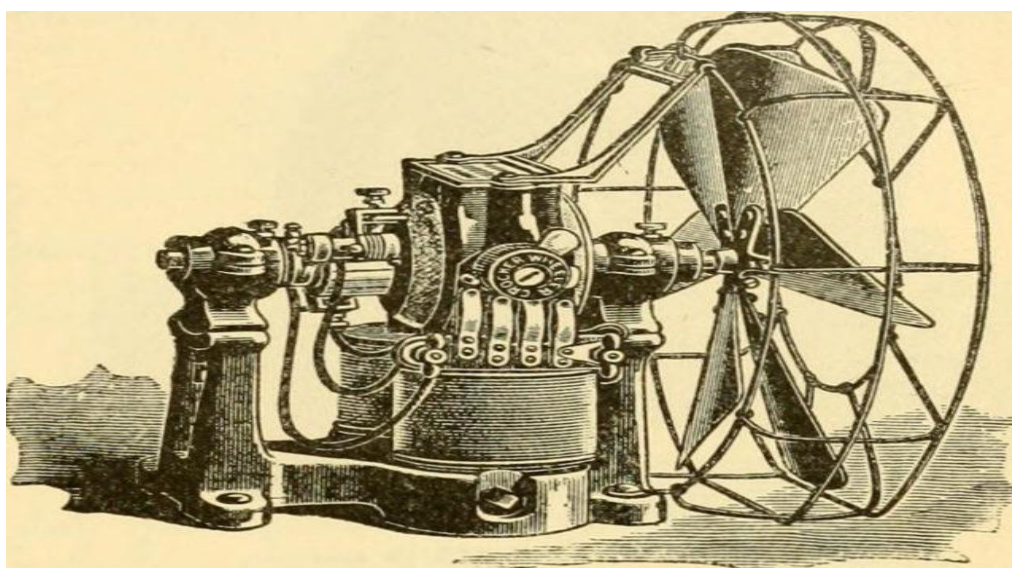


**Slika 8. Kineske lepeze [5]**

Kinezi su također bili pioniri u mehanizaciji ventilatora. Oko 180. g., poznati izumitelj dinastije Han, Ting Huan, stvorio je rotacijski ventilator koji je koristio sedam kotača promjera 10 stopa, pomoću kojih bi jedan čovjek pedaliranjem, mogao rashladiti cijelu dvoranu. Kasnije su ti ventilatori korišteni ne samo za hlađenje, već i za osvježavanje prostorija i prozračivanje rudničkih okana.

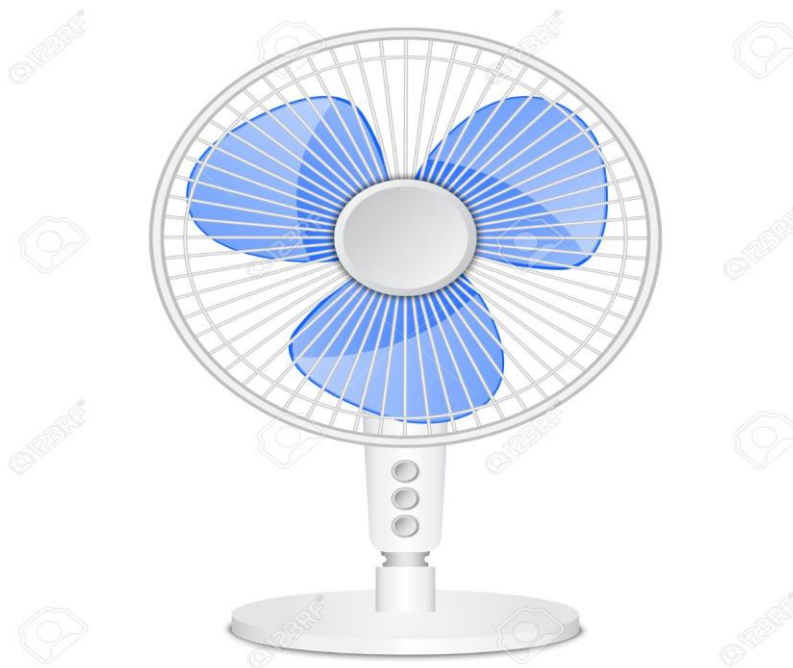
Svi su se ti uređaji za hlađenje oslanjali na ventilatore s pogonom na ljude ili na životinje. Američki inženjer Wheeler 1830-ih godina smislio je kako implementirati tadašnje nove spoznaje o električnoj energiji za pokretanje ventilatora. Oslanjajući se na rad Thomasa Edisona i Nikole Tesle, Wheeler je izumio stolni ventilator koji se sastojao od dvije elise, koje nisu bile zaštićene zaštitnim kavezom, a koje je pokretao električni motor. Oštrice su se okretale nevjerovatnom brzinom, ali zbog nedostatka zaštite često je dolazilo do nesreća. Ti rani ventilatori bili su prilično skupi pa su se mogli naći ili u kućama bogatih obitelji ili u uredima.

Kraj 19. stoljeća donio je nekoliko poboljšanja dizajna, što je prikazano na slici 9. Uveden je zaštitni kavez radi zaštite korisnika i radi zaštite skupih lopatica ventilatora. Lopatice ventilatora su bile skupe zbog skupih materijala od kojih su bile izrađene. Motor i instalacijski kablovi (žice) bili su skriveni. Prvi ventilatori koristili su istosmjernu struju. Nakon što je Tesla izumio indukcijski motor, proizvođači ventilatora su ga počeli koristiti umjesto motora na istosmjernu struju. [3]



**Slika 9. Wheelerov poboljšani ventilator [4]**

Godine 1934. izrađeni su prvi ventilatori u kojima je umjesto metala za neke dijelove korištena plastika. Razvojem novih vrsta plastike za elise 1937. godine, oni su postali tiši i otpornijim na kvarove ili koroziju. To je bio početak masovne proizvodnje i prodaje ventilatora koje poznajemo danas. Na slici 10 prikazan je jedan takav moderni ventilator.[3, 4]



**Slika 10. Uobičajeni dizajn modernog ventilatora [6]**

## 4. Materijali za izradu ventilatora

Materijali koji se danas uglavnom koriste za izradu ventilatora su: nehrđajući čelici, aluminij i njegove legure, te razne vrste polimernih materijala. Kompoziti (i to plastomerni kompoziti) uglavnom se koriste za izradu lopatica koje se primjenjuju na turbinama velikih snaga. Zbog skupe i kompleksne izrade nisu uzeti u obzir prilikom razmatranja materijala za izradu ventilatora. [7]

Materijali koji su se uglavnom koristili u prošlosti, poput lišća i kože, danas se koriste minimalno.

### 4.1. Prirodni materijali

Ova vrsta materijala najviše se koristila u prošlosti, pogotovo kožni i drvni materijali. Danas se također mogu pronaći, ali u puno manjoj mjeri. Nisu konkurentni na tržištu zbog visoke cijene. Proizvode se uglavnom zbog estetske i povijesne vrijednosti. [8]

### 4.2. Metalni materijali

#### 4.2.1. Nehrđajući čelici

Nehrđajući čelici su skupina čelika velike korozijske postojanosti. Da bi se čelik smatrao nehrđajućim mora imati minimalno oko 12 % kroma. Nehrđajući čelici općenito se svrstavaju u četiri skupine: martenzitni, feritni, austenitni, te dupleks čelik. [9]

Feritni nehrđajući čelici sadrže više od 12 % kroma i manje od 0,1 % ugljika. Ovi čelici imaju visoku korozijsku postojanost prema djelovanju dušične, fosforne i solne kiseline, nisu korozijski postojani prilikom djelovanja nekih rastaljenih metala poput aluminija, antimona, olova, te kloridne, bromne i octene kiseline.

Ostala svojstva ovih nehrđajućih čelika su:

- relativno mekani
- magnetični
- slabo zavarljivi
- loša deformabilnost



- dobra obradivost odvajanjem čestica
- nepostojanost u otopinama klorida (npr. morska voda)
- otporni su na pojavu napetosne korozije
- jeftiniji su od ostalih vrsta nehrđajućih čelika
- podložni su lomu pri niskim temperaturama. [10]

Austenitni nehrđajući čelici sadrže 0,02 do 0,15 % ugljika, 15 do 20 % kroma, 7 do 20 % nikla, uz mogućnost dodavanja određene količine Mo, Ti, Nb, Ta i N.

Glavni problem što se tiče korozijske otpornosti je kromov karbid čiji se nastanak može spriječiti ukoliko čelik sadrži jake karbidotvorce (npr. Ti, Ta, Nb) koji otežavaju spajanje ugljika s kromom te na taj način sprječavaju smanjenje udjela kroma ispod 12 % u rubnim područjima austenitnih zrna.

Neka svojstva austenitnih nehrđajućih čelika su:

- nisu magnetični
- posjeduju veliku žilavost
- otporni su na oksidaciju i koroziju
- imaju velik omjer čvrstoća/gustoća
- posjeduju dobra svojstva pri niskim temperaturama
- mogu se primijeniti na višim radnim temperaturama od svih nehrđajućih čelika
- deformabilni su. [10]

Martenzitni nehrđajući čelici imaju 0,20 do 1,2 % ugljika, više od 12 % kroma, te mogu imati i određene količine Mo i Ni.

Neka svojstva ove skupine nehrđajućih čelika su:

- visoka otpornost na koroziju
- relativno visoke radne temperature
- magnetični su
- ne mogu se hladno oblikovati u toplinski obrađenom stanju
- loše zavarljivi. [10]

Dupleks nehrđajući čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu. Omjer faza ovisi o sastavu i toplinskoj obradi, ali je uglavnom 50:50. Osnovni legirni elementi su Cr i Ni, a sadrže i druge legirne elemente ( Mo, Si, Ti, Nb, Mn, Cu i N). Povišenjem temperature iznad 1000 °C raste udio ferita, a smanjuje se udio austenita tako da čelik s 22 % kroma i 8 % nikla pri 1350 °C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu. [10]

Na slici 11 prikazan je dizajn ventilatora izrađenog uglavnom od nehrđajućeg čelika.



**Slika 11. Ventilator od nehrđajućeg čelika [11]**

#### **4.2.2. Aluminij**

Aluminij je mekan metal. Lagan je i može se lako kovati, izvući u fine niti ili valjati u vrlo tanke listiće. Bez obzira na to što spada u skupinu metala koji nisu plemeniti on je vrlo korozijski postojan. Niska vlačna čvrstoća tehnički čistog aluminija može se poprilično povisiti legiranjem, toplinskom obradom i hladnom ili toplom plastičnom deformacijom. Kao multifunkcionalan metal aluminij se uglavnom koristi kao legura. Jedna od najvažnijih osobina aluminija i njegovih legura je mogućnost ostvarivanja raznih toplinskih stanja. Jednostavno se oblikuju plastičnom deformacijom.

Neka svojstva aluminijevih legura su:

- mala gustoća - aluminij i njegove legure su oko tri puta lakše od čelika
- relativno visoka čvrstoća - neke legure imaju čvrstoću i do  $700 \text{ N/mm}^2$ , što je jednako kao čvrstoća srednje čvrstih čelika
- mehanička svojstva većine legura ostaju nepromijenjena pri sniženim temperaturama
- nisu magnetične
- nisu otrovne i ne utječu negativno na okoliš
- lako se obrađuju plastičnom deformacijom i imaju dobru rezljivost
- prirodno se zaštićuju slojem oksida čime se postiže korozijska zaštita

- izuzetno su reciklične pa stoga sakupljanje rabljenog aluminija postaje ekonomski i ekološki sve važnije (međutim tada se dobivaju legure niže čistoće). [12]

Na slici 12 prikazan je dizajn ventilatora izrađenog od aluminija.



**Slika 12. Ventilator od aluminija [13]**

### 4.3. Polimeri

Polimerni materijali dijele se na plastomere, duromere i elastomere.

Plastomeri su materijali koji zagrijavanjem omekšavaju, ali do temperature mekšanja, tj. taljenja, ne mijenjaju svoju kemijsku strukturu. Porastom temperature dolazi do rasta nepravilnog gibanja atoma oko njihovih ravnotežnih položaja, te dolazi do prekidanja veze između atoma. Hlađenjem se sekundarne veze opet uspostavljaju i plastomer se vraća u početno stanje. Pri temperaturama iznad temperature mekšanja mogu se oblikovati i hlađenjem zadržavaju taj novi oblik. Mogu biti amorfni ili kristalasti, linearne ili razgranate strukture.

Na slici 13 je prikazan ventilator izrađen od plastomera.

Duromeri su netaljivi i netopljivi polimeri trodimenzionalne, umrežene strukture koja nastaje tijekom prerade. Pri povišenim temperaturama razgrađuju se radi kidanja primarnih kemijskih veza. Amorfni su. Izrađeni su od raznih smola, kojima se dodaju potrebni sastojci ovisno o zahtijevanim mehaničkim, kemijskim ili fizikalnim svojstvima.

Elastomeri su polimerni materijali koji nemaju uređenu strukturu i koji su na sobnoj temperaturi u gumastom stanju. Djelomično su umreženi. To su materijali koji imaju mogućnost velikih elastičnih deformacija.

Postoji puno vrsta polimernih materijala i između pojedinih podvrsta postoje velike razlike u svojstvima. Tako imamo polimere koji su: kruti, elastični, hladno ili toplo oblikovljivi, lagani, mekani, s povišenom ili sniženom čvrstoćom, s povišenom ili sniženom istezljivošću, reciklični, otrovni, jeftini, skupi i sl. Prilikom odabira optimalnog materijala bit će razmatrano više podvrsta polimernih materijala. [14]



**Slika 13. Plastični ventilator[15]**

#### **4.4. Papir i karton**

Papir je masa nastala ispreplitanjem vlakana koja nastaju mehaničkom ili kemijskom obradom sirovina. Papiri se razlikuju prema načinu dorade, površinskoj obradi, fazi proizvodnje, kvaliteti površinske obrade, upotrijebljenim i ugrađenim sirovinama, karakterističnim svojstvima, namjeni te finoći. Prednosti papira su biorazgradivost, jednostavnost grafičke obrade i relativno niska cijena. Nedostaci papira su visoka poroznost, savitljivost te slaba barijera za kisik, ugljikov dioksid i vodenu paru. Pri izradi papir se često kombinira s drugim vrstama materijala.

---

Prevlačenjem papira polimernim materijalima dobiva se plastificirani papir koji je bolje kvalitete, ne vlaži se i ne masti te ima bolje barijerne karakteristike za plinove i vodenu paru. Npropustan je za mikroorganizme i prikladan za ambalažu jer ga je moguće oblikovati i taliti.

Valoviti karton je cijenjeni materijal ponajviše zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava u odnosu na masu i cijenu. Prilikom mehaničkih opterećenja, slojevi valovite ljepenke različito se naprežu i zbog toga moraju imati različita mehanička svojstva. Ravni slojevi su najviše napregnuti na vlak pa se koriste papiri velike vlačne čvrstoće. Valoviti slojevi moraju biti kruti i žilavi te dobro oblikovljivi. Koji će se papir upotrijebiti za izradu valovitog kartona ovisi i o tome kakvoj vrsti primjene je namijenjen. [16]

## 5. Izbor materijala za lopatice robotskog ventilatora

### 5.1. Zahtjevi na lopatice ventilatora

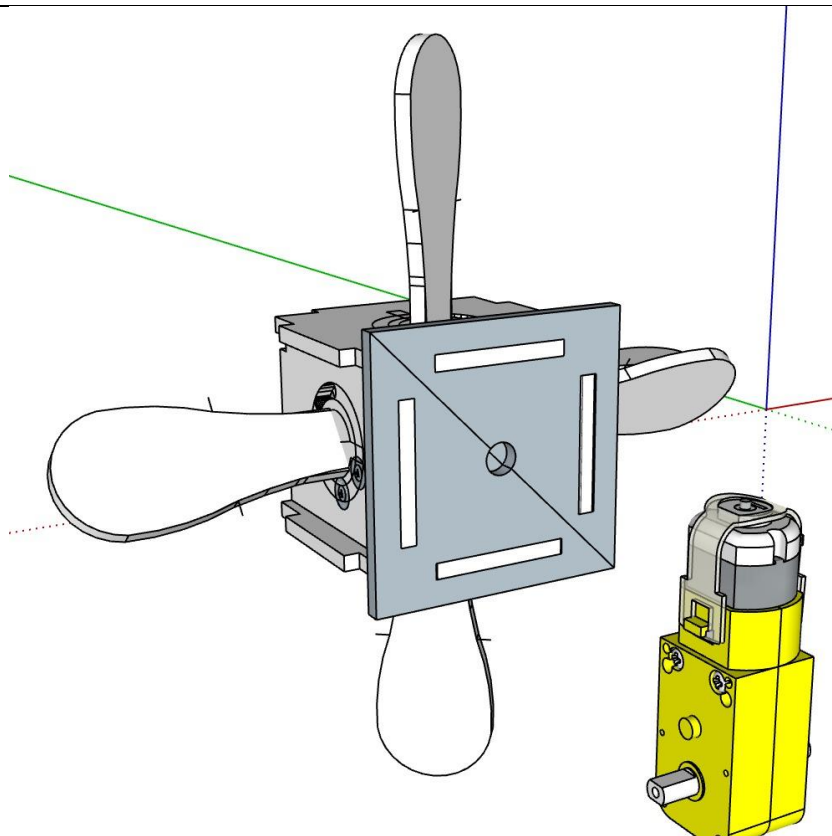
Glavna svrha robotskog ventilatora jest da pokreće strujanje zraka i na taj način hladi ili zagrijava prostoriju u kojoj se nalazi. Važno je da se s njime može lako rukovati, te da bude prilagođen svima, pogotovo djeci kako bi ga mogli u edukacijske svrhe samostalno izraditi. Kroz izradu ventilatora djeca će uz osnovne funkcije ventilatora na zabavan način moći naučiti više o obnovljivim izvorima energije (vjetrenjače) i kako se kroz korištene materijale može doprinosti smanjenju zagađenja okoliša. Uz to uče kako samostalno isprogramirati ventilator da radi ono što oni hoće - odrediti brzinu rotacije i smjer vrtnje glave ventilatora.

Na slici 14 prikazan je ručni ventilator čiji je dizajn bio temelj za izradu vlastitog robotskog ventilatora.

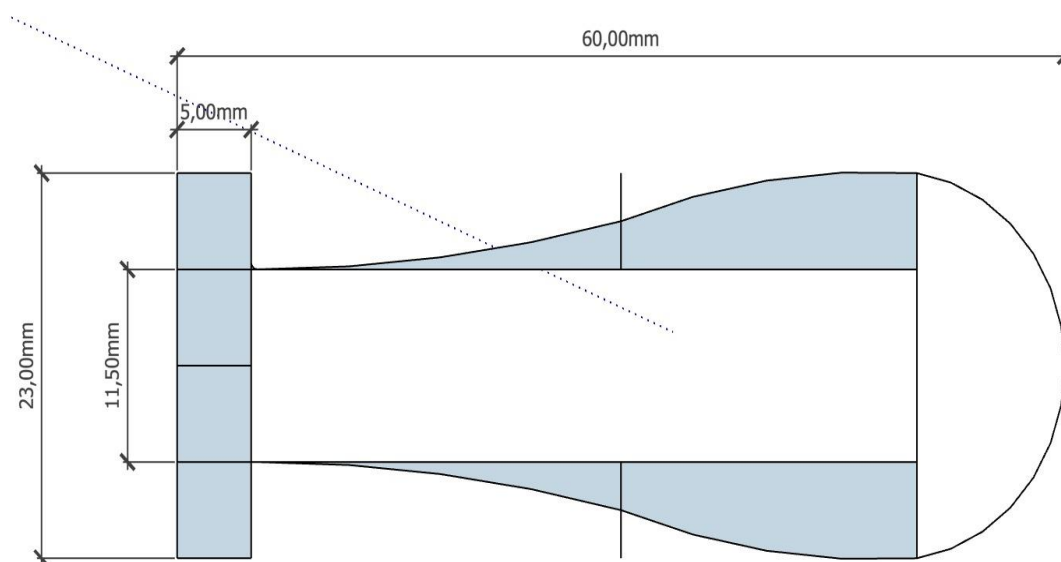


**Slika 14. Ručni ventilator [17]**

Na slikama 15 i 16 prikazane su lopatice robotskog ventilatora za koje je trebalo izabrati optimalan materijal.



**Slika 15. Lopatice robotskog ventilatora**



**Slika 16. Dimenzije lopatica robotskog ventilatora**

Ukupna visina robotskog ventilatora ne bi trebala biti veća od 30 cm kako bi se omogućilo lakše rukovanje s njime. Debljina lopatice je 3 mm.

---

Zahtjevi koji se postavljaju na lopatice ventilatora su:

- što manja masa kako bi se moglo što lakše rukovati s njim
- što niža cijena kako bi bio dostupan široj populaciji, pogotovo zato što je elektronički dio proizvoda skuplji nego kod uobičajenog ventilatora igračke, jer se nabavlja u dijelovima i oni koji su zainteresirani sami ga sklapaju
- sigurnost pri korištenju kako ne bi došlo do ozljede prilikom rukovanja, prvenstveno zaobljeni svi rubovi i materijali koji ne utječu negativno na zdravlje
- estetičnost i taktilnost – primamljiv izgled u raznim bojama i ugodno na dodir
- trajnost, dinamička izdržljivost kako ne bi došlo do kvara nakon kratkog vremena
- dovoljna krutost kako ne bi došlo do savijanja lopatica prilikom rotacije ili izvijanja kućišta ventilatora
- žilavost, otpornost na udar kako ne bi došlo do pucanja prilikom padanja na pod ili neku drugu površinu
- otpornost na opću koroziju više zbog estetike i znojnih prstiju nego stvarne opasnosti
- recikličnost kako bi se djeci približila važnost ekologije u današnjem vremenu i objasnio pojam obnovljivih izvora energije
- sposobnost oblikovanja sječanjem kako bi djeca mogla sama škarama oblikovati lopatice reznom silom koja se može postići stiskom dječje ruke.



## 5.2. Izbor materijala za lopatice ventilatora

Izbor optimalnog materijala za lopatice ventilatora provest će se pomoću metode utjecajnosti svojstava. Kod ove metode važno je što objektivnije odrediti faktor važnosti za odabrana svojstva materijala. Zato će se faktor važnosti odrediti na dva načina:

- digitalno-logičkom metodom i
- analitičko hijerarhijskim procesom.

Svojstva koja treba imati materijal za lopatice:

- mogućnost oblikovanja škarama reznom silom dječje ruke ( $F_r$ ) - smična čvrstoća
- što manja gustoća ( $\rho$ )
- što niža cijena
- što veća žilavost ( $KV$ )
- što bolja dinamička izdržljivost ( $R_d$ )
- zadovoljavajuća krutost ( $E$ ).

### 5.2.1. Određivanje faktora važnosti pomoću digitalno-logičke metode

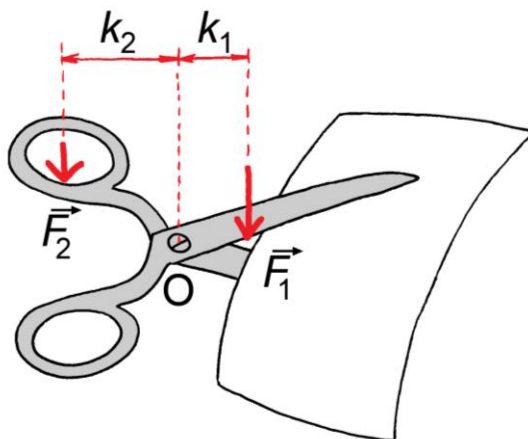
U tablici 2 prikazani su rezultati digitalno-logičke metode i faktori važnosti za pojedina svojstva.

**Tablica 2. Digitalno-logička metoda za lopatice ventilatora**

| Svojstvo               | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Pozitivne odluke | Faktor važnosti |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|------------------|-----------------|
| Smična čvrstoća        | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 5/15             | <b>0,333</b>    |
| Gustoća                | 0 |   |   |   |   | 0 | 1 | 0 | 1 |    |    |    |    |    |    | 2/15             | 0,133           |
| Cijena                 |   | 0 |   |   |   | 1 |   |   |   | 1  | 1  | 1  |    |    |    | 4/15             | 0,267           |
| Žilavost               |   |   | 0 |   |   |   | 0 |   |   | 0  |    |    | 1  | 1  |    | 2/15             | 0,133           |
| Dinamička izdržljivost |   |   |   | 0 |   |   |   | 1 |   |    | 0  |    | 0  |    | 0  | 1/15             | 0,067           |
| Modul elastičnosti     |   |   |   |   | 0 |   |   |   | 0 |    |    | 0  |    | 0  | 1  | 1/15             | 0,067           |
| $\Sigma$               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 15               | 1               |

Iz tablice 2 je vidljivo da je najvažnije svojstvo pri izboru materijala za lopatice ventilatora mogućnost rezanja materijala škarama. Sila koja je potrebna za rezanje izračunata je u proračunu

običnih „kućnih“ škara koje će djeca koristiti prilikom izrezivanja. Na slici 17. prikazan je mehanizam škara.



Slika 17. Prikaz mehanizma škara [18]

Djeca 4. i 5. razred osnovne škole imaju prosječan stisak ruke od oko 404 N. [19]

Za proračun su korištene dimenzije škara za papir. [20]

Potrebna sila za rezanje može se izračunati iz sljedećeg izraza:

$$F_2 \cdot k_2 = F_1 \cdot k_1 \quad (10)$$

Dalje slijedi:

$$F_2 = \frac{F_1 \cdot k_1}{k_2}$$

$$F_2 = \frac{204 \cdot 13,5}{8,5}$$

$$F_2 = 324 \text{ N}$$

Iznos sile pri kojoj bi trebalo doći do rezanja materijala za lopatice ventilatora jest 324 N.

S obzirom na postavljene zahtjeve na lopatice i svojstva koja treba imati materijal za izradu lopatica, pretraživanjem online baza podataka materijala, odabrani su materijali koji ulaze u

daljnji izbor i među kojima se nalazi optimalni materijal. Svi navedeni materijali s pripadajućim svojstvima prikazani su tablici 3. [21-33]

**Tablica 3. Predizbor materijala za lopatice ventilatora**

| MATERIJAL                          | SVOJSTVA             |                            |              |                             |                             |                         |
|------------------------------------|----------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
|                                    | Smična čvrstoća, MPa | Gustoća, g/cm <sup>3</sup> | Cijena, €/kg | Žilavost, kJ/m <sup>2</sup> | Dinamička izdržljivost, MPa | Modul elastičnosti, MPa |
| ABS (Akrilonitril butadien stiren) | 3,40                 | 1,08                       | 0,61         | 20,00                       | 15,00                       | 2500                    |
| PE-HD (Polietilen visoke gustoće)  | 7,05                 | 1,01                       | 0,51         | 69,00                       | 13,80                       | 1500                    |
| PP (Polipropilen)                  | 10,28                | 1,05                       | 0,52         | 55,00                       | 28,40                       | 3000                    |
| PS (Polistiren)                    | 25,00                | 1,05                       | 0,62         | 6,00                        | 10,20                       | 3200                    |
| Papir debljine 5 mm                | 1,70                 | 0,83                       | 2,00         | 0,01                        | 1,30                        | 10500                   |

Kako bi se dobile ocjene svojstava pomoću kojih se računa funkcija cilja, potrebno je prvo skalirati vrijednosti svojstava iz tablice 3. Skaliranje se radi tako da najbolja vrijednost svojstva dobije vrijednost 100 dok se ostale određuju pomoću formula (6) i (7).

Skalirana svojstava materijala, zajedno s njihovim faktorom važnosti prikazane su u tablici 4.

**Tablica 4. Skalirane vrijednosti svojstava za lopatice ventilatora**

| MATERIJAL           | SKALIRANA SVOJSTVA |         |        |          |                        |                    | Pokazatelj radne karakteristike |
|---------------------|--------------------|---------|--------|----------|------------------------|--------------------|---------------------------------|
|                     | Smična čvrstoća    | Gustoća | Cijena | Žilavost | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti |                                 |
| ABS                 | 50,00              | 76,85   | 89,61  | 28,99    | 52,81                  | 23,81              | 59,82                           |
| PE-HD               | 24,11              | 82,18   | 100,00 | 100,00   | 48,59                  | 14,29              | 63,04                           |
| PP                  | 16,54              | 79,05   | 98,08  | 79,71    | 100,00                 | 28,57              | 61,58                           |
| PS                  | 6,80               | 79,05   | 82,26  | 8,70     | 35,21                  | 30,48              | 40,46                           |
| Papir debljine 5 mm | 100,00             | 100,00  | 25,50  | 0,02     | 4,58                   | 100                | 60,21                           |
| Faktor važnosti     | 0,33               | 0,13    | 0,27   | 0,13     | 0,07                   | 0,07               |                                 |

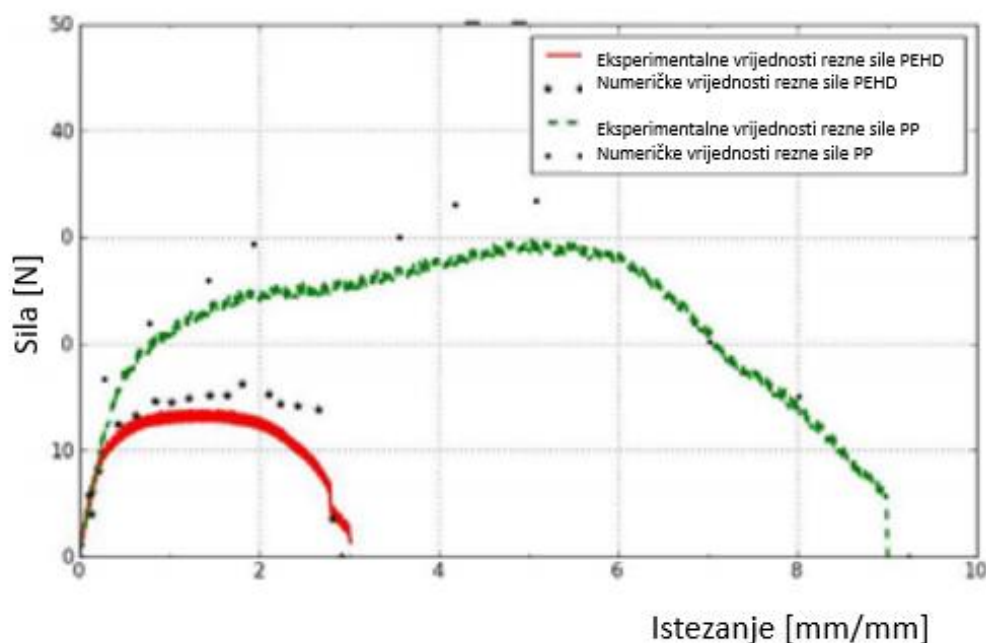
Pokazatelj radne karakteristike računa se pomoću jednadžbe:

$$\sum_{i=1}^6 B_i \times S_{vi} \rightarrow maks. \quad (11)$$

Gdje su  $B_i$  faktori važnosti zahtjeva na materijale, a  $S_{vi}$  skalirane vrijednosti svojstava pojedinih materijala. Obje vrijednosti daju se iščitati iz tablice 4. Materijal koji ima najveću vrijednost trebao bi biti najbolji izbor od ponuđenih.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da polietilen visoke gustoće ima najveću vrijednost funkcije cilja i on predstavlja optimalan materijal za lopatice. Drugi po redoslijedu je polipropilen koji ima nešto nižu vrijednost funkcije cilja.

Na slici 18 grafički je prikazan utjecaj rezne sile i istežanja na polipropilen i na polietilen visoke gustoće.



Slika 18. Odnos rezne sile i produženja kod PP i PE-HD [21]

Svojstva PE-HD:

- mala gustoća
- fleksibilan
- kemijski postojan
- postojan prema utjecajima okoline

- mali faktor trenja
- recikličan.

Na svojstva polietilena ne utječe slana voda ni drugi slani ili kiseli mediji. To je za lopatice dosta važno svojstvo jer se ruke dosta znoje i stvaraju kiseli medij prilikom rukovanja. [34]

### 5.2.2. Određivanje faktora važnosti pomoću analitičko hijerarhijskog procesa

Usporedba svojstava i ocjene važnosti prikazane su u tablici 5.

**Tablica 5. AHP pri izboru materijala za lopatice ventilatora**

|                        | Smična čvrstoća | Gustoća | Cijena | Žilavost | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti |
|------------------------|-----------------|---------|--------|----------|------------------------|--------------------|
| Smična čvrstoća        | 1               | 3       | 3      | 5        | 5                      | 7                  |
| Gustoća                | 1/3             | 1       | 1      | 3        | 3                      | 5                  |
| Cijena                 | 1/3             | 1       | 1      | 3        | 3                      | 5                  |
| Udarna čvrstoća        | 1/5             | 1/3     | 1/3    | 1        | 3                      | 3                  |
| Dinamička izdržljivost | 1/5             | 1/3     | 1/3    | 1/3      | 1                      | 3                  |
| Modul elastičnosti     | 1/7             | 1/5     | 1/5    | 1/3      | 1/3                    | 1                  |
| Zbroj                  | 2,2095          | 5,8667  | 5,8667 | 12,6667  | 15,3333                | 24                 |

Potom se u tablici 6 normaliziraju svojstva tako što se podjele sa zbrojem te dobijemo faktor važnosti tako što sumu podijelimo s brojem svojstava.

**Tablica 6. Normalizirana tablica usporedbe parova svojstava za lopaticu ventilatora**

|                        | Smična čvrstoća | Gustoća | Cijena | Žilavost | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti | Faktori važnosti |
|------------------------|-----------------|---------|--------|----------|------------------------|--------------------|------------------|
| Smična čvrstoća        | 0,45            | 0,51    | 0,51   | 0,39     | 0,33                   | 0,29               | 0,41             |
| Gustoća                | 0,15            | 0,17    | 0,17   | 0,24     | 0,20                   | 0,21               | 0,29             |
| Cijena                 | 0,15            | 0,17    | 0,17   | 0,24     | 0,20                   | 0,21               | 0,29             |
| Žilavost               | 0,09            | 0,06    | 0,06   | 0,08     | 0,20                   | 0,13               | 0,10             |
| Dinamička izdržljivost | 0,09            | 0,06    | 0,06   | 0,03     | 0,07                   | 0,13               | 0,07             |
| Modul elastičnosti     | 0,06            | 0,03    | 0,03   | 0,03     | 0,02                   | 0,04               | 0,04             |

Potom pomnožimo vrijednost svakog kriterija s faktorom važnosti i izračuna se otežana suma, a potom vektor konzistencije tako što otežanu sumu podijelimo s faktorom važnosti i to je prikazano u tablici 7.

**Tablica 7. Izračun konzistencije za lopatice ventilatora**

|                        | Smična čvrstoća | Gustoća | Cijena | Žilavost | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti | Otežana suma | Faktori važnosti | Vektor konzistencije |
|------------------------|-----------------|---------|--------|----------|------------------------|--------------------|--------------|------------------|----------------------|
| Smična čvrstoća        | 0,42            | 0,57    | 0,57   | 0,50     | 0,35                   | 0,26               | 2,66         | 0,41             | 6,42                 |
| Gustoća                | 0,14            | 0,19    | 0,19   | 0,30     | 0,21                   | 0,19               | 1,21         | 0,19             | 6,46                 |
| Cijena                 | 0,14            | 0,19    | 0,19   | 0,30     | 0,21                   | 0,19               | 1,21         | 0,19             | 6,46                 |
| Udarne čvrstoća        | 0,08            | 0,06    | 0,06   | 0,10     | 0,21                   | 0,11               | 0,63         | 0,10             | 6,27                 |
| Dinamička izdržljivost | 0,08            | 0,06    | 0,06   | 0,03     | 0,07                   | 0,11               | 0,42         | 0,07             | 6,04                 |
| Modul elastičnosti     | 0,06            | 0,04    | 0,04   | 0,02     | 0,02                   | 0,04               | 0,21         | 0,04             | 5,80                 |

$$\lambda_{\max} = 6,42$$

Indeks konzistencije:  $C.I. = 0,08$

Omjer konzistencije:  $C.R. = 0,07 < 0,1$  - odgovori su relativno konzistentni.

Metodom utjecajnosti svojstava ćemo dobiti optimalni materijal lopatice ventilatora. U tablici 8 su skalirane vrijednosti te faktori važnosti.

**Tablica 8. Skalirane vrijednosti za lopatice ventilatora**

|                         | Smična čvrstoća | Gustoća     | Cijena      | Žilavost    | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti |
|-------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|------------------------|--------------------|
| ABS                     | 50,00           | 76,85       | 89,61       | 28,99       | 60,00                  | 52,81              |
| PE-HD                   | 24,11           | 82,18       | 100,00      | 100,00      | 100,00                 | 48,59              |
| PP                      | 16,54           | 79,05       | 98,08       | 79,71       | 50,00                  | 100,00             |
| PS                      | 6,80            | 79,05       | 82,26       | 8,70        | 46,86                  | 35,21              |
| Papir debljine 5 mm     | 100,00          | 100,00      | 25,50       | 0,02        | 14,29                  | 4,58               |
| <b>Faktori važnosti</b> | <b>0,41</b>     | <b>0,19</b> | <b>0,19</b> | <b>0,10</b> | <b>0,07</b>            | <b>0,04</b>        |

Materijal koji ima najveću vrijednost trebao bi biti najbolji izbor od ponuđenih. U tablici 9 prikazan je izračun pokazatelja radne karakteristike.

**Tablica 9. Izračun pokazatelja radne karakteristike i poretka za lopatice ventilatora**

|                     | Smična čvrstoća | Gustoća | Cijena | Žilavost | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti | Pokazatelj radne karakteristike | Rang |
|---------------------|-----------------|---------|--------|----------|------------------------|--------------------|---------------------------------|------|
| ABS                 | 50,00           | 76,85   | 89,61  | 28,99    | 60,00                  | 52,81              | 61,34                           | 3    |
| PE-HD               | 24,11           | 82,18   | 100,00 | 100,00   | 100,00                 | 48,59              | 63,44                           | 2    |
| PP                  | 16,54           | 79,05   | 98,08  | 79,71    | 50,00                  | 100,00             | 55,91                           | 4    |
| PS                  | 6,80            | 79,05   | 82,26  | 8,70     | 46,86                  | 35,21              | 38,99                           | 5    |
| Papir debljine 5 mm | 100,00          | 100,00  | 25,50  | 0,02     | 14,29                  | 4,58               | 66,03                           | 1    |

Iz rezultata vidljivo je da je optimalan materijal papir debljine 5 mm, a drugi po redoslijedu je polietilen visoke gustoće.

### 5.3. Zaključak izbora materijala za lopatice ventilatora

Određivanjem faktora važnosti pojedinih svojstava, njihovim skaliranjem i izračunavanjem pokazatelja radne karakteristike dobiven je optimalni materijal za lopatice robotskog ventilatora za edukaciju. Vrijednost faktora važnosti ima veliki utjecaj na vrijednost pokazatelja radne karakteristike i na konačni izbor materijala pa je zato određen na dva načina.

U tablici 10 prikazane su vrijednosti faktora važnosti za pojedina svojstva dobivene digitalno-logičkom metodom i analitičko hijerarhijskim procesom. Kod obje primijenjene metode najviši faktor važnosti dobiven je za smičnu čvrstoću, ali se njihove vrijednosti ipak razlikuju. To je dovelo do toga da optimalni materijal, u slučaju kad je faktor važnosti računat digitalno-logičkom metodom, bude PE-HD, a drugi po redoslijedu je PP. U slučaju kad je optimalni materijal određen AHP-om kao optimalni materijal izabran je papir debljine 5 mm, a PE-HD je na drugom mjestu po vrijednosti pokazatelja radne karakteristike.

Najlošiji od promatranih materijala u obje varijante pokazao se polistiren.

**Tablica 10. Prikaz vrijednosti faktora važnosti za lopatice ventilatora**

| <b>FAKTOR VAŽNOSTI</b>   | Smična čvrstoća | Gustoća | Cijena | Udarna čvrstoća | Dinamička izdržljivost | Modul elastičnosti |
|--------------------------|-----------------|---------|--------|-----------------|------------------------|--------------------|
| Digitalno logička metoda | 0,33            | 0,13    | 0,27   | 0,13            | 0,07                   | 0,07               |
| AHP                      | 0,41            | 0,19    | 0,19   | 0,10            | 0,07                   | 0,04               |

Činjenica da su dvije primijenjene metode računanja faktora važnosti pri izboru optimalnog materijala dale različite rezultate, ukazuje na to da je vrijednost faktora važnosti za pojedina svojstva potrebno vrlo pažljivo odrediti.

Usporedbom svojstava i faktora važnosti kod obje metode te ranga materijala dolazi se do zaključka kako bi bilo bolje izabrati polietilen visoke gustoće kao materijal za lopatice ventilatora nego papir debljine 5 mm.



## **6. Izbor materijala za postolje robotskog ventilatora**

### **6.1. Zahtjevi na postolje ventilatora**

Postolje je okomiti dio ventilatora namijenjen prijenosu tlačnog opterećenja uzrokovanog masom ventilatora. Postolje ima važnu ulogu u cijelom mehanizmu prijenosa tereta i bez njega struktura ne postoji. Čvrstoća postolja ovisi uglavnom o čvrstoći upotrijebljenog materijala, geometriji, obliku i veličini presjeka te visini. Glavna funkcija postolja jest da ventilator održava u vertikalnom položaju, da ne dođe do izvijanja ili pomjeranja prilikom korištenja ventilatora [35].

Postolje ventilatora djeca će sama spajati kako bi se unutar postolja lagano mogla staviti elektronika robota koju će kasnije moći zamijeniti ukoliko dođe do kvara. Postolje se sastoji od četiri pločice koje će se spojiti u kvadratni oblik.

Zahtjevi na postolje ventilatora su:

- što manja masa kako bi se omogućilo što lakše rukovanje s njim
- što niža cijena materijala da proizvodni troškovi ne bi bili preveliki
- estetika – primamljiv izgled, u raznim bojama
- što viša čvrstoća i krutost kako ne bi došlo do izvijanja zbog mase glave ventilatora
- žilavost, otpornost na udar kako ne bi došlo do pucanja prilikom padanja na pod ili neku drugu površinu
- otpornost na opću koroziju zbog estetike i znojnih prstiju
- recikličnost jer je jedna od motivacija izrade ovog robota upoznavanje djece s pojmom recikličnosti i ekološkičnosti
- zadovoljavajući faktor trenja kako ne bi došlo do ispadanja pločica i istovremeno da ne bude preteško spajanje dijelova
- dovoljna dinamička izdržljivost zbog dugotrajnog dinamičkog opterećenja.

## 6.2. Izbor materijala za postolje ventilatora

Svojstva materijala koja ćemo dalje promatrati su:

- što veći modul elastičnosti ( $E$ )
- što manja gustoća materijala ( $\rho$ )
- što niža cijena
- što veća tlačna čvrstoća ( $\sigma$ )
- što bolja dinamička izdržljivost ( $Rd$ )
- što manji koeficijent trenja ( $\mu$ ).

I kod postolja ventilatora faktor važnosti odredit će se na dva načina: digitalno-logičkom metodom i analitičko hijerarhijskim procesom.

### 6.2.1. Određivanje faktora važnosti pomoću digitalno-logičke metode

Digitalno-logička metoda i pripadajući faktori važnosti za pojedina svojstva prikazani su u tablici 11.

**Tablica 11. Digitalno-logička metoda za postolje ventilatora**

| Svojstvo               | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | Pozitivne odluke | Faktor važnosti |
|------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|------------------|-----------------|
| Modul elastičnosti     | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 5/15             | <b>0,333</b>    |
| Gustoća                | 0 |   |   |   |   | 0 | 1 | 1 | 0 |    |    |    |    |    |    | 2/15             | 0,133           |
| Cijena                 |   | 0 |   |   |   | 1 |   |   |   | 1  | 0  | 0  |    |    |    | 2/15             | 0,133           |
| Tlačna čvrstoća        |   |   | 0 |   |   |   | 0 |   |   | 0  |    |    | 1  | 0  |    | 1/15             | 0,067           |
| Dinamička izdržljivost |   |   |   | 0 |   |   |   | 0 |   |    | 1  |    | 0  |    | 0  | 1/15             | 0,067           |
| Koeficijent trenja     |   |   |   |   | 0 |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    | 1  | 1  | 4/15             | 0,267           |
| $\Sigma$               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 15               | 1               |

Iz tablice 11 je vidljivo da je najvažnije svojstvo pri izboru materijala za postolje ventilatora aksijalna krutost.

S obzirom na zadane zahtjeve na materijal postolja, iz online baza podataka uneseni su podatci za svojstva materijala prikazanih u tablici 12. [21]-[33].

**Tablica 12. Predizbor materijala za postolje ventilatora**

| MATERIJAL                                | SVOJSTVA                |                    |                            |              |                             |                      |
|--|-------------------------|--------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------|
|  | Modul elastičnosti, GPa | Koeficijent trenja | Gustoća, g/cm <sup>3</sup> | Cijena, €/kg | Dinamička izdržljivost, MPa | Tlačna čvrstoća, MPa |
| <b>PE-HD</b> (Polietilen visoke gustoće) | 1,5                     | 0,32               | 1,01                       | 0,51         | 28,4                        | 700,0                |
| <b>PP</b> (Polipropilen)                 | 3,0                     | 0,21               | 1,05                       | 0,52         | 13,8                        | 1380,0               |
| <b>PMMA</b> (Poli(metil metakrilat))     | 3,1                     | 0,24               | 1,18                       | 8,46         | 15,0                        | 124,0                |
| <b>Karton</b>                            | 0,6                     | 0,50               | 0,69                       | 3,31         | 5,4                         | 2,7                  |
| <b>Šperploča</b>                         | 9,2                     | 0,38               | 0,49                       | 3,93         | 55,0                        | 36,2                 |

Kako bi se dobile ocjene svojstava pomoću kojih se računa pokazatelj radne karakteristike, potrebno je prvo skalirati vrijednosti svojstava iz tablice 12. Skaliranje se radi tako da najbolja ( najniža ili najviša) vrijednost svojstva dobije vrijednost 100 dok se ostale određuju pomoću formula (6) i (7).

Skalirana svojstva materijala, zajedno s njihovim faktorima važnosti prikazane su u tablici 13.

**Tablica 13. Skalirane vrijednosti za postolje ventilatora**

| MATERIJAL              | SVOJSTVA           |                    |             |             |                        |                 | Pokazatelj radne karakteristike |
|------------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|------------------------|-----------------|---------------------------------|
|                        | Modul elastičnosti | Koeficijent trenja | Gustoća     | Cijena      | Dinamička izdržljivost | Tlačna čvrstoća |                                 |
| <b>PE-HD</b>           | 16,3               | 65,6               | 48,02       | 100,00      | 51,60                  | 50,72           | 49,50                           |
| <b>PP</b>              | 32,6               | 100,0              | 46,19       | 98,08       | 25,10                  | 100,00          | 65,13                           |
| <b>PMMA</b>            | 33,7               | 87,5               | 41,10       | 6,03        | 27,30                  | 8,99            | 43,28                           |
| <b>Karton</b>          | 7,0                | 42,0               | 70,39       | 15,41       | 9,70                   | 0,20            | 25,62                           |
| <b>Šperploča</b>       | 100,0              | 56,0               | 100,00      | 15,04       | 100,00                 | 2,62            | 70,43                           |
| <b>Faktor važnosti</b> | <b>0,3</b>         | <b>0,3</b>         | <b>0,13</b> | <b>0,13</b> | <b>0,07</b>            | <b>0,07</b>     |                                 |

Pokazatelj radne karakteristike računa se pomoću jednadžbe (11)

Iz rezultata vidljivo je da je optimalan materijal šperploča, a drugi po redoslijedu je polipropilen.

### 6.2.2. Određivanje faktora važnosti pomoću analitičko hijerarhijskog procesa

Usporedba svojstava i ocjene važnosti prikazane su u tablici 14.

**Tablica 14. AHP pri izboru materijala za postolje ventilatora**

|                        | Modul elastičnosti | Koeficijent trenja | Gustoća | Cijena | Dinamička izdržljivost | Tlačna čvrstoća |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------|--------|------------------------|-----------------|
| Modul elastičnosti     | 1                  | 2                  | 3       | 4      | 5                      | 6               |
| Koeficijent trenja     | 1/2                | 1                  | 2       | 3      | 4                      | 5               |
| Gustoća                | 1/3                | 1/2                | 1       | 2      | 3                      | 4               |
| Cijena                 | 1/4                | 1/3                | 1/2     | 1      | 2                      | 3               |
| Dinamička izdržljivost | 1/5                | 1/4                | 1/3     | 1/2    | 1                      | 2               |
| Tlačna čvrstoća        | 1/6                | 1/5                | 1/4     | 1/3    | 1/2                    | 1               |
| Zbroj                  | 2,45               | 4,283              | 7,083   | 10,833 | 15,5                   | 21              |

U tablici 15 prikazana su normalizirana svojstva i faktor važnosti za sva svojstva.

**Tablica 15. Normalizirana tablica usporedbe parova svojstava za postolje ventilatora**

|                        | Modul elastičnosti | Koeficijent trenja | Gustoća | Cijena | Dinamička izdržljivost | Tlačna čvrstoća | Faktori važnosti |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------|--------|------------------------|-----------------|------------------|
| Modul elastičnosti     | 0,41               | 0,47               | 0,42    | 0,37   | 0,32                   | 0,29            | 0,38             |
| Koeficijent trenja     | 0,20               | 0,23               | 0,28    | 0,28   | 0,26                   | 0,24            | 0,24             |
| Gustoća                | 0,10               | 0,12               | 0,14    | 0,18   | 0,19                   | 0,19            | 0,15             |
| Cijena                 | 0,14               | 0,08               | 0,07    | 0,09   | 0,13                   | 0,14            | 0,12             |
| Dinamička izdržljivost | 0,08               | 0,06               | 0,05    | 0,05   | 0,06                   | 0,09            | 0,07             |
| Tlačna čvrstoća        | 0,07               | 0,05               | 0,04    | 0,03   | 0,03                   | 0,05            | 0,04             |

Množenjem vrijednost svakog kriterija s faktorom važnosti izračunata je otežana suma i vektor konzistencije (tako što otežanu sumu podijelimo s faktorom važnosti) i to je prikazano u tablici 16.

**Tablica 16. Izračun konzistencije za postolje ventilatora**

|                        | Modul elastičnosti | Koeficijent trenja | Gustoća | Cijena | Dinamička izdržljivost | Tlačna čvrstoća | Otežana suma | Faktori važnosti | Vektor konzistencije |
|------------------------|--------------------|--------------------|---------|--------|------------------------|-----------------|--------------|------------------|----------------------|
| Modul elastičnosti     | 0,38               | 0,50               | 0,46    | 0,43   | 0,33                   | 0,26            | 2,36         | 0,38             | 6,23                 |
| Koeficijent trenja     | 0,19               | 0,25               | 0,31    | 0,32   | 0,2620                 | 0,22            | 1,55         | 0,25             | 6,23                 |
| Gustoća                | 0,13               | 0,12               | 0,15    | 0,22   | 0,20                   | 0,17            | 0,99         | 0,15             | 6,40                 |
| Cijena                 | 0,09               | 0,08               | 0,08    | 0,11   | 0,13                   | 0,13            | 0,62         | 0,12             | 5,78                 |
| Dinamička izdržljivost | 0,08               | 0,06               | 0,05    | 0,05   | 0,07                   | 0,09            | 0,40         | 0,07             | 6,05                 |
| Tlačna čvrstoća        | 0,06               | 0,05               | 0,04    | 0,04   | 0,03                   | 0,04            | 0,26         | 0,04             | 6,08                 |

$$\lambda_{\max} = 6,13$$

Indeks konzistencije:  $C.I. = 0,03$

Omjer konzistencije:  $C.R. = 0,002 < 0,1$  - odgovori su relativno konzistentni

Metodom utjecajnosti svojstva dobije se optimalni materijal za postolje ventilatora.

U tablici 17 vide se skalirane vrijednosti pomnožene s faktorom važnosti.

**Tablica 17. Skalirane vrijednosti za postolje ventilatora**

|                         | Modul elastičnosti | Koeficijent trenja | Gustoća     | Cijena      | Dinamička izdržljivost | Tlačna čvrstoća |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-------------|-------------|------------------------|-----------------|
| <b>PE-HD</b>            | 16,30              | 65,60              | 48,02       | 100,00      | 51,60                  | 50,72           |
| <b>PP</b>               | 32,60              | 100,00             | 46,19       | 98,08       | 25,10                  | 100,00          |
| <b>PMMA</b>             | 33,70              | 87,50              | 41,10       | 6,03        | 27,30                  | 8,99            |
| <b>Karton</b>           | 7,00               | 42,00              | 70,39       | 15,41       | 9,70                   | 0,20            |
| <b>Šperploča</b>        | 100,00             | 56,00              | 100,00      | 15,04       | 100,00                 | 2,62            |
| <b>Faktori važnosti</b> | <b>0,38</b>        | <b>0,25</b>        | <b>0,15</b> | <b>0,12</b> | <b>0,07</b>            | <b>0,04</b>     |

Materijal koji ima najveću vrijednost trebao bi biti najbolji izbor od ponuđenih. U tablici 18 prikazana je vrijednost pokazatelja radne karakteristike svih materijala koji su ušli u predizbor te rang pojedinih materijala.

**Tablica 18. Izračun parametra vrednovanja i poretka za postolje ventilatora**

|                  | Modul elastičnosti | Koeficijent trenja | Gustoća | Cijena | Dinamička izdržljivost | Tlačna čvrstoća | Pokazatelj radne karakteristike | Rang     |
|------------------|--------------------|--------------------|---------|--------|------------------------|-----------------|---------------------------------|----------|
| <b>PE-HD</b>     | 16,30              | 65,60              | 48,02   | 100,00 | 51,60                  | 50,72           | 47,44                           | 3        |
| <b>PP</b>        | 32,60              | 100,00             | 46,19   | 98,08  | 25,10                  | 100,00          | 61,84                           | 2        |
| <b>PMMA</b>      | 33,70              | 87,50              | 41,10   | 6,03   | 27,30                  | 8,99            | 43,84                           | 4        |
| <b>Karton</b>    | 7,00               | 42,00              | 70,39   | 15,41  | 9,70                   | 0,20            | 26,25                           | 5        |
| <b>Šperploča</b> | 100,00             | 56,00              | 100,00  | 15,04  | 100,00                 | 2,62            | 75,91                           | <b>1</b> |

Iz rezultata vidljivo je da je optimalan materijal šperploča, a drugi po redoslijedu je polipropilen.

### 6.3. Zaključak izbora materijala za postolje ventilatora

Određivanjem faktora važnosti pojedinih svojstava, njihovim skaliranjem i izračunavanjem pokazatelja radne karakteristike dobiven je optimalni materijal za postolje robotskog ventilatora za edukaciju.

U tablici 19 prikazane su vrijednosti faktora važnosti za pojedina svojstva dobivene digitalno-logičkom metodom i analitičko hijerarhijskim procesom. Vrijednosti faktora važnosti nisu potpuno iste, ali ne razlikuju se značajno. Kod obje primijenjene metode najviši faktor važnosti dobiven je za modul elastičnosti. To je dovelo do toga da optimalni materijal, u slučaju kad je faktor važnosti računat digitalno-logičkom metodom, bude šperploča, a drugi po redoslijedu je PP. U slučaju kad je optimalni materijal određen AHP-om kao optimalni materijal također je izabrana šperploča, a PP je također na drugom mjestu po vrijednosti pokazatelja radne karakteristike.

Najlošiji od promatranih materijala u obje varijante pokazao se PMMA.

**Tablica 19. Prikaz vrijednosti faktora važnosti za postolje ventilatora**

| <b>FAKTOR<br/>VAŽNOSTI</b>  | Modul<br>elastičnosti | Koeficijent<br>trenja | Gustoća | Cijena | Dinamička<br>izdržljivost | Tlačna<br>čvrstoća |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------|--------|---------------------------|--------------------|
| Digitalno<br>logička metoda | 0,33                  | 0,27                  | 0,13    | 0,13   | 0,07                      | 0,07               |
| AHP                         | 0,38                  | 0,25                  | 0,15    | 0,12   | 0,07                      | 0,04               |

Obzirom da su dvije primijenjene metode računanja faktora važnosti pri izboru optimalnog materijala dale iste rezultate, može se zaključiti s velikom sigurnošću kako je šperploča optimalan materijal za postolje robotskog ventilatora za edukaciju.

## 7. Zaključak

Pomoću online baza podataka materijala te stečenih znanja kroz fakultetsko obrazovanje, u ovom radu istraženi su i proučeni razni materijali u svrhu određivanja optimalnog materijala za lopatice i postolje robotskog ventilatora za edukaciju. Svi ti materijali trebali su ispuniti postavljene zahtjeve i posjedovati čim bolja svojstva, kao što su mogućnost oblikovanja rezanjem škarama reznom silom dječje ruke, što manja gustoća materijala, što niža cijena, što veća žilavost, što bolja dinamička izdržljivost te zadovoljavajuća krutost.

Određivanjem faktora važnosti svojstava, njihovim skaliranjem te izračunavanjem pokazatelja radne karakteristike dobiveni su optimalni materijali za lopatice i postolje robotskog ventilatora za edukaciju. Za određivanje faktora važnosti korištene su digitalno-logička metoda i analitičko hijerarhijski proces. Utvrđeno je da faktor važnosti ima velik utjecaj na izbor optimalnog materijala i zato mu je potrebno posvetiti veliku pozornost.

Pri izboru optimalnog materijala za lopatice robotskog ventilatora za edukaciju primijenjene su obje metode i najveći faktor važnosti dobiven je za smičnu čvrstoću. Dobivene vrijednosti faktora važnosti su se razlikovale pa su dobiveni različiti optimalni materijali. U slučaju kada je faktor važnosti određen digitalno-logičkom metodom optimalni materijal je PE-HD, a u slučaju kada je faktor važnosti određen analitičko hijerarhijskim procesom optimalni materijal bio je papir debljine 5 mm.

Kod izbora optimalnog materijala za postolje robotskog ventilatora za edukaciju, faktor važnosti se također računao na dva načina. Najveći faktor važnosti dobiven je za modul elastičnosti. Dobivene vrijednosti faktora važnosti nisu se značajno razlikovale. Rezultat toga je da je optimalni materijal, u slučaju kada je faktor važnosti određen digitalno-logičkom metodom, isti kao u slučaju kada je određen analitičko hijerarhijskim procesom. Optimalni materijal u oba slučaja bila je šperploča.



## 8. Literatura

- [1] Izbor materijala pri razvoju proizvoda, Tomislav Filetin, Zagreb, 2000. Godina
- [2] Földing B., Primjena analitičkoga hijerarhijskog procesa u planiranju aktivnosti i projekata usluga računskog centra, Zagreb, 2015.
- [3]<https://www.wallswithstories.com/household/a-brief-history-of-the-electric-fan-one-of-the-earliest-mass-produced-home-appliances.html> [25.04.2021.]
- [4] <https://www.familytreemagazine.com/premium/cooling-trends/> [25.04.2021.]
- [5] <https://www.theworldofchinese.com/2014/11/the-story-of-the-chinese-fan/> [25.04.2021.]
- [6][https://www.123rf.com/photo\\_19059587\\_vector-illustration-of-electric-fan.html](https://www.123rf.com/photo_19059587_vector-illustration-of-electric-fan.html) [26.04.2021.]
- [7]<http://hr.lft-pa.com/info/can-thermoplastic-composites-be-used-for-fan-b-27852169.html> [26.04.2021.]
- [8] <https://foter.com/palm-frond-fan-blades> [26.04.2021.]
- [9] <http://www.enciklopedija.hr> [02.05.2021.]
- [10] Dujak M., Svojstva i primjena nehrđajućih čelika pri izradi dijelova poljoprivredne tehnike, Osijek, 2019.
- [11]<https://www.craftmadeonline.com/Craftmade-BW116SS3-16-Oscillating-Wall-Fan-Stainless-Steel-Bellows/p485738> [05.05.2021.]
- [12] Prerad D., Utjecaj kemijskog sastava na značajke Al-Si legure, Zagreb, 2015
- [13] <http://www.marckeez.com/lt/kgcp1/showproduct.php?lang=en&id=287> [10.05.2021.]
- [14] Podloge za predavanja Polimerni materijali, Andričić, B., Split, 2010
- [15]<https://www.alamy.com/stock-photo-green-plastic-electric-fan-isolated-on-white-86767612.html> [10.05.2021.]
- [16] Bubanić N., Fleksibilna ambalaža, Varaždin, 2007.
- [17] <https://www.conrad.hr/rucni-ventilator-ampercell-handy-fan-00673-plavi> [11.05.2021.]
- [18][https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/673a7966-985a-40c6-976c-5562c11d277f/html/1012\\_Poluga.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/673a7966-985a-40c6-976c-5562c11d277f/html/1012_Poluga.html) [11.05.2021.]
- [19] Hager-Ross C, Rosblad B. Norms for grip strength in children aged 4–16 years; Stockholm, 2002.
- [20] <http://www.cdelectronic.com.hr/artikel.php?ks=823601> [12.05.2021.]

- [21] Islam S., Khan A., Kao-Walter S., Jian L.; A Study of Shear Stress Intensity Factor of PP and HDPE by a Modified Experimental Method together with FEM, 2013
- [22] Liu X. H., Bai Z.H., Shuang Y. H., Zhou C. L., Shao J. ,Advanced materials and process technology, Tajvan, 2012.
- [23] Koppelaar R. W. Properties of paper: The mechanical behavior of single paper fibers, Eindhoven, 2009.
- [24][https://plasticker.de/preise/pms\\_en.php?kat=Mahlgut&aog=A&show=ok&make=ok](https://plasticker.de/preise/pms_en.php?kat=Mahlgut&aog=A&show=ok&make=ok)  
[20.05.2021.]
- [25][https://www.alibaba.com/product-detail/1mm-2mm-3mm-4mm-5mm-Thickness\\_62592300706.html?spm=a2700.7735675.normalList.24.61d837efJEyDuR&s=p&fullFirstScreen=true](https://www.alibaba.com/product-detail/1mm-2mm-3mm-4mm-5mm-Thickness_62592300706.html?spm=a2700.7735675.normalList.24.61d837efJEyDuR&s=p&fullFirstScreen=true) [20.05.2021.]
- [26] D. Schudy, A. V. J. M. Kemp, S. M. H. Coolen, W. G. Duijings, A. Van Der Pol, A. J. Van Gulick, The effect of material defects on the fatigue behaviour and the fracture strain of ABS, Nizozemska, 2001.
- [27] Grinschgl M., Fatigue Behaviour of Filled Polypropylene, Leoben, 2009.
- [28] Lampman S. Characterization and Failure Analysis of Plastics, SAD, 2003.
- [29] <http://matweb.com/search/PropertySearch.aspx> [20.05.2021.]
- [30] <https://www.campusplastics.com> [20.05.2021.]
- [31] D.M.S. Wanigaratne, W.J. Batvhelor, I.H. Parker Comparison of Fracture Toughness of Paper with Tensile Properties, Australija, 2002.
- [32] Scandinavian pulp, paper and board testing committee anFracture toughness paper and boards, Švedska, 1995.
- [33] I.Šarčević, D.Banić, D.Milčić Evaluation of compressive test methods for paper using a mathematical model, based on compressive test for corrugated bord, Zagreb, 2016
- [34]<http://www.vodoskok.hr/prodajni-program/sustavi-vodoopskrbe/cijevi-za-opskrbu-pitkom-vodom/> [01.06.2021.]
- [35]<https://structuralengineeringbasics.com/what-are-beams-and-columns-building-construction/>  
[05.06.2021.]