

Razvoj personalizirane biciklističke kacige izrađene aditivnom proizvodnjom

Masnica, Bruno

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

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:235:781964>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-04**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Bruno Masnica

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić, dipl. ing.

Student:

Bruno Masnica

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se dr. sc. Filipu Valjku, mag. ing. mech. na stručnoj pomoći i savjetima prilikom izrade rada. Hvala obitelji i djevojci na podršci tijekom studija.

Bruno Masnica



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Bruno Masnica** JMBAG: **0035225263**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj personalizirane biciklističke kacige izrađene aditivnom proizvodnjom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of personalised bicycle helmet made with additive manufacturing**

Opis zadatka:

Aditivna proizvodnja nudi mnoge prednosti u konstrukcijskom oblikovanju proizvoda kako bi se zadovoljile potrebe korisnika, te povećala funkcionalnost i performanse proizvoda u odnosu na konvencionalne proizvodne postupke. U ovom radu potrebno je koncipirati i konstruirati biciklističku kacigu, ergonomski prilagođenu pojedinom korisniku, koja će biti izrađena aditivnom proizvodnjom pritom koristeći prednosti aditivne proizvodnje u konstrukcijskom oblikovanju kako bi se zadovoljili konstrukcijski zahtjevi i korisničke potrebe.

U radu je potrebno:

- Analizom tržišta definirati zahtjeve i izraditi tehničku specifikaciju za razvoj biciklističke kacige.
- Napraviti funkcijsku analizu biciklističke kacige.
- Metodičkom razradom koncipirati više varijanti rješenja aditivno izrađene biciklističke kacige.
- Izradom prototipa parcijalnih rješenja i tehnno-ekonomskom analizom odabrati projektno rješenje.
- Odabrano rješenje razraditi upotrebom konstrukcijskih principa po kriteriju prihvatljivosti za aditivnu proizvodnju, pritom pazeći na trenutne tehničke mogućnosti aditivne proizvodnje.
- Izraditi računalni model biciklističke kacige u 3D CAD programskom paketu.

Opseg funkcijske analize, izrade prototipa, konstrukcijske razrade i modeliranja dogovoriti tijekom izrade rada.

U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Nenad Bojčetić

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vladimir Soldo

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD	1
1.1. Aditivna proizvodnja	1
1.2. Biciklistička kaciga.....	2
1.3. Proces razvoja.....	3
2. ISTRAŽIVANJE TRŽIŠTA	5
2.1. HEXR	6
2.2. KUPOL.....	8
2.3. KOLLIDE.....	8
2.4. KAV Portola Helmet	9
2.5. PYLO.....	10
2.6. Voronoi 3D	11
2.7. Zaključak analize tržišta	12
3. DEFINICIJA CILJA RAZVOJA	14
3.1. Korisničke potrebe.....	15
3.2. Tehnička specifikacija	16
4. KONCEPTUALIZACIJA	17
4.1. Funkcijska dekompozicija	17
4.2. Traženje parcijalnih rješenja.....	19
4.2.1. Pozicioniranje kacige na korisnika.....	19
4.2.2. Osiguravanje kacige na glavi korisnika	21
4.2.3. Zaštita glave korisnika	23
4.2.3.1. Modularnost kacige.....	23
4.2.3.2. Izbor materijala	25
4.2.3.3. Izbor ispune.....	27
4.2.4. Odvođenje toplinske energije.....	27
4.2.5. Prihvat i osiguravanje sunčanih naočala	29

5. VALIDACIJA I ODABIR PARCIJALNIH RJEŠENJA.....	32
5.1. Odabir načina pozicioniranja.....	33
5.2. Odabir osiguravanja kacige na glavi korisnika.....	34
5.3. Odabir parcijalnih rješenja zaštite glave korisnika.....	35
5.3.1. Odabir broja modula.....	35
5.3.2. Odabir materijala.....	35
5.3.3. Eksperimentalno ispitivanje s ciljem određivanja vrste ispune	37
5.4. Način odvođenja topline	44
5.5. Odabir načina prihvata sunčanih naočala	45
5.6. Prikaz odabranih parcijalnih rješenja	46
6. IZRADA PARAMETARSKOG CAD MODELA S MOGUĆNOŠĆU PRILAGODBE POJEDINOM KORISNIKU	47
6.1. Skeniranje glave korisnika.....	47
6.2. Izrada parametarskog modela površine glave	49
6.3. Izrada parametarskog modela biciklističke kacige	50
6.4. Prilagodba drugom korisniku	52
6.5. Prihvat sunčanih naočala i personalizacija kacige.....	53
6.6. Priprema završnog modela za izradu	54
7. ZAKLJUČAK	55
8. LITERATURA	57

POPIS SLIKA

Slika 1.	Dobavljački lanac danas [1].....	2
Slika 2.	Dobavljački lanac budućnosti [1]	2
Slika 3.	Proces razvoja proizvoda u ovom radu	3
Slika 4.	Skeniranje za HEXR kacigu [2].....	6
Slika 5.	HEXR kaciga [2].....	7
Slika 6.	KUPOL [3].....	8
Slika 7.	KOLLIDE kaciga [6]	9
Slika 8.	KAV Portola helmet [7].....	10
Slika 9.	PYLO [8]	11
Slika 10.	Voronoi 3D [9].....	11
Slika 11.	Recenzija 1 [10]	14
Slika 12.	Recenzija 2 [11]	14
Slika 13.	Glavna funkcijska dekompozicija.....	18
Slika 14.	Blok funkcija za pozicioniranje kacige na korisnika	19
Slika 15.	3D model glave korisnika	20
Slika 16.	Karakteristične dimenzije glave, izrađeno prema [15]	21
Slika 17.	Blok funkcija za osiguravanje kacige na glavi korisnika.....	21
Slika 18.	Remen B1 [16]	22
Slika 19.	Remen B2 [17]	22
Slika 20.	Blok funkcija za osiguravanje glave korisnika	23
Slika 21.	Jednodijelna kaciga	24
Slika 22.	Višedijelna kaciga	24
Slika 23.	Prikaz vrsta ispuna	27
Slika 24.	Blok funkcija za odvođenje topline	27
Slika 25.	D1	28
Slika 26.	D2 [20]	29
Slika 27.	Blok funkcija za prihvat i osiguravanje sunčanih naočala.....	29
Slika 28.	E1	30
Slika 29.	E2	31
Slika 30.	E3	31
Slika 31.	Naprave za testiranje čvrstoće remena (lijevo) i stabilnosti (desno) [23].....	38
Slika 32.	S lijeva na desno prikazan je ravni, polukupolasti te nakovanj u obliku rubnjaka [23]	39
Slika 33.	Eksperimentalni postav	40
Slika 34.	Uzorci za 1. testiranje.....	41
Slika 35.	Uzorci nakon 1. testiranja	42
Slika 36.	Uzorci s 25 % ispune	43
Slika 37.	Uzorci s 40 % ispune	43
Slika 38.	Model kacige.....	47
Slika 39.	Creality CR - Scan 01	48
Slika 40.	Usporedba skeniranja s kapom i bez kape	48
Slika 41.	Referentne površine pri modeliranju.....	49
Slika 42.	Prikaz funkcionalnih dijelova kacige	50
Slika 43.	Provjera minimalne debljine ispune.....	51
Slika 44.	Stvaranje ergonomske prilagodbe.....	51

Slika 45.	Provjera minimalne debljine ispune kod drugog korisnika	52
Slika 46.	Ergonomska prilagodba drugom korisniku.....	52
Slika 47.	Prihvat sunčanih naočala.....	53
Slika 48.	Personalizacija biciklističke kacige	53
Slika 49.	Model unutar PrusaSlicera	54

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Primarne potrebe	15
Tablica 2.	Sekundarne potrebe	15
Tablica 3.	Latentne potrebe	15
Tablica 4.	Tehnička specifikacija	16
Tablica 5.	Parcijalna rješenja pozicioniranja kacige	33
Tablica 6.	Parcijalna rješenja osiguravanja kacige.....	34
Tablica 7.	Parcijalna rješenja za broj dijelova kacige	35
Tablica 8.	Svojstva materijala	36
Tablica 9.	Usporedba PLA i PETG	36
Tablica 10.	Prvo testiranje.....	41
Tablica 11.	Drugo testiranje	42
Tablica 12.	Parcijalna rješenja za odvođenje topline	44
Tablica 13.	Parcijalna rješenja prihvata sunčanih naočala	45

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	<i>3 dimensional</i>
FDM	<i>Fused deposition modeling</i>
SLS	<i>Selective laser sintering</i>
MTB	<i>Mountain bike</i>
CPSC	<i>Consumer Product Safety Commission</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
LED	<i>Light emitting diode</i>
PLA	<i>Polylactic acid</i>
PETG	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol</i>
ABS	<i>Acrylonitrile butadiene styrene</i>
TPU	<i>Thermoplastic polyurethane</i>
PC	<i>Polycarbonate</i>
CE	<i>« conforme européenne »</i>
EN	<i>European Standard</i>
2D	<i>2 dimensional</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>

SAŽETAK

Tema ovog rada je razvoj personalizirane biciklističke kacige korištenjem prednosti aditivne proizvodnje u konstrukcijskom oblikovanju s ciljem personalizacije i ergonomske prilagodbe biciklističke kacige pojedinom korisniku. Rad je podijeljen na četiri faze procesa razvoja te započinje analizom tržišta s ciljem uvida u postojeća rješenja te na osnovu toga definiranje zahtjeva korisnika i tehničke specifikacije proizvoda. Drugi dio razvoja započinje funkcijskom dekompozicijom proizvoda na temelju koje se pomoću funkcijskog mapiranja generiraju parcijalna rješenja za tražene blokove funkcija. Nakon toga, provodi se validacija parcijalnih rješenja prema smislenim kriterijima s ciljem implementacije najboljih parcijalnih rješenja svakog bloka funkcija u završnom konceptu. Zadnja faza je modeliranje završnog koncepta u računalnom programu SolidWorks gdje se pomoću parametarskog modela i 3D skena glave korisnika izrađuje ergonomski prilagođena biciklistička kaciga namijenjena izradi pomoću FDM tehnologije.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, biciklistička kaciga, FDM, ergonomska prilagodba

SUMMARY

The subject of this thesis is development of personalised bicycle helmet using advantages of additive manufacturing in structural design with the aim of personalising and ergonomically adapting the bicycle helmet to the individual user. The work is divided into four phases of the development process and begins with a market analysis with the aim of gaining insight into existing solutions and based on that, defining user requirements and technical specifications. The second part of the development begins with the functional decomposition of the product, which is then used as a base for partial solutions generated using functional mapping. After that, the validation of partial solutions is carried out according to meaningful criteria with the aim of implementing the best partial solutions of each block of functions in the final concept. The last stage is the modelling of the final concept in SolidWorks, where an ergonomically adapted bicycle helmet intended for production using FDM technology is created using a parametric model and a 3D scan of the user's head.

Key words: additive manufacturing, bike helmet, FDM, ergonomic adaption

1. UVOD

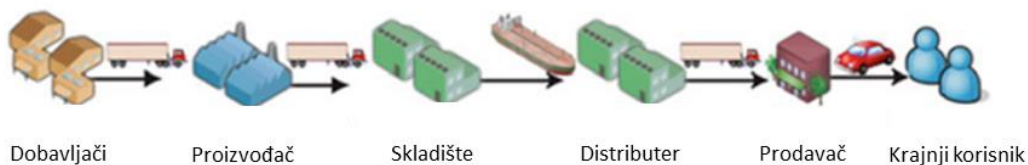
1.1. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja obuhvaća mnoštvo tehnologija koje omogućavaju proizvodnju komponenti izravno iz 3D računalnog modela dodajući materijal sloj po sloj sve dok komponenta nije izrađena. U usporedbi s obradom odvajanjem čestica gdje proces proizvodnje dijela kreće od punog bloka materijala nakon čega se neželjeni dijelovi odvajaju kako bi ostao konačan oblik, aditivna proizvodnja dodaje materijal samo na mjesta na kojima je on potreban te time smanjuje količinu korištenog materijala [1].

U svojim počecima aditivna se proizvodnja koristila primarno za izradu prototipova, no značajnim napretkom u samoj tehnologiji i rastom njene popularnosti zadnjih godina počinje se koristiti i pri proizvodnji funkcionalnih proizvoda u raznim industrijama. Zbog fundamentalnih razlika u odnosu na tradicionalne načine proizvodnje, omogućava izradu kompleksnih geometrija bez značajnog povećanja cijene izrade. Danas, aditivna proizvodnja najčešće se koristi pri proizvodnji malih serija i personaliziranih proizvoda te omogućuje proizvodnju u trenutku potrebe na mjestu na kojem je proizvod potreban. Aditivna proizvodnja ima potencijal promijeniti način proizvodnje te postati okosnica inovacije i kreativnosti u razvoju novih proizvoda [1].

Jedna od najzastupljenijih tehnologija aditivne proizvodnje je FDM tehnologija [1] (eng. *Fused deposition modeling*) koja radi na principu istiskivanja materijala, najčešće polimera, u obliku filameta kroz grijanu mlaznicu te tako sloj po sloj u submilimetarskim razmacima taloži otopljeni materijal na grijanu podlogu i stvara proizvod dodajući materijal samo na potrebna mjesta. Zbog isticanja ključnih patenata omogućen je razvoj jednostavnijih hobi primjerenih 3D printera koji koriste FDM tehnologiju. Upravo jednostavnost korištenja uz nisku cijenu razlog je velikog porasta popularnosti ove tehnologije među velikim brojem korisnika. Dostupnost novih i slabije zastupljenih tehnologija kreativnim pojedincima omogućava istraživanje vlastitih ideja koje u tom trenutku nisu komercijalno isplative velikim korporacijama motiviranim prvenstveno profitom. FDM tehnologija postala je idealan način za samostalan razvoj od ideje do funkcionalnog prototipa u udobnosti vlastitog doma, a razvojem globalizacije ta ideja može biti dostupna cijelom svijetu te neizravno potaknuti velike korporacije na dubinske promjene u načinu njihova poslovanja.

Jedna od značajnijih karakteristika aditivne proizvodnje je promjena dobavljačkih lanaca gdje se predstavlja mogućnost lokalne ili samostalne proizvodnje željenih proizvoda korištenih u svakodnevnom životu. Dobavljački lanac danas prikazan je na Slici 1., a glavni iznos uštede postiže se anuliranjem potrebe za dostavljanjem i skladištenjem proizvoda te njegovim manipuliranjem i procesom prodaje. Skraćivanjem dobavljačkog lanca raste povezanost između proizvođača i krajnjeg korisnika, a s rastom povezanosti dolazi do stvaranja boljeg odnosa i razumijevanja želja i potreba korisnika u puno bržem roku što može dovesti do bržeg razvoja proizvoda i također skraćivanja vremenskog roka samog razvoja. Bolji odnos i razumijevanje otvaraju mogućnost personalizacije raznih proizvoda među kojima se ističe biciklistička kaciga.



Slika 1. Dobavljački lanac danas [1]



Slika 2. Dobavljački lanac budućnosti [1]

1.2. Biciklistička kaciga

Biciklistička kaciga je proizvod kojeg nose biciklisti s ciljem smanjenja rizika od ozljede glave prilikom pada ili sudara. Kacige dolaze u raznim konfiguracijama i dizajnima, no u pravilu su izrađene od tvrdog vanjskog dijela koji štiti od tvrdih i oštrih predmeta te mekog unutarnjeg dijela koji služi za apsorpciju energije.

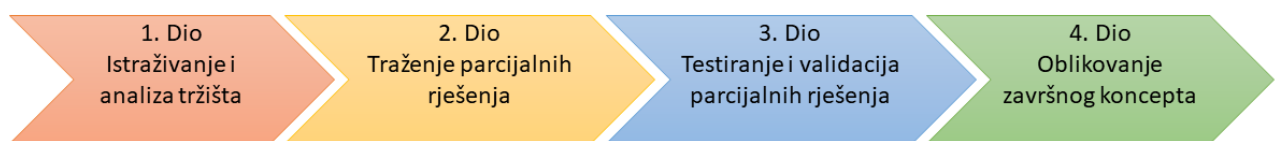
Naime, mnogi biciklisti odbijaju nositi zaštitnu kacigu zbog raznih nedostataka, prvenstveno zbog neudobnosti i velike mase koja predstavlja problem prilikom nošenja tijekom duljeg vremenskog perioda, a osim toga i zbog lažnog osjećaja sigurnosti koji uvjeri korisnike kako zaštitna kaciga nije potrebna osobi koja zna voziti bicikl. Također, mnogi ljudi odbijaju koristiti biciklističku kacigu iz estetskih razloga.

U velikim urbanim područjima zbog emisija štetnih plinova te velikih gužvi bicikl postaje sve zastupljenije prijevozno sredstvo te se stvara povećana potreba za adekvatnom biciklističkom kacigom koja bi zadovoljila potrebe zahtjevnih korisnika. Biciklistička kaciga proizvod je kojeg korisnik nosi, a o čijoj ergonomiji ovisi sigurnost korisnika te upravo zbog toga ima smisla biciklističku kacigu umjesto masovnom proizvodnjom kaciga univerzalnih veličina proizvesti kacigu veličinom i oblikom prilagođenu korisniku uz pomoć aditivne proizvodnje.

Cilj ovog rada je istražiti mogućnosti aditivne proizvodnje i FDM tehnologije za izradu biciklističke kacige te napraviti konceptualno rješenje korištenjem konstrukcijskih rješenja koja naglašavaju prednosti aditivne proizvodnje. Na konceptualnom rješenju će se ispitati mogućnost personalizacije te izvidjeti mogućnosti i opasnosti pojedinačne proizvodnje te proizvodnje od strane korisnika.

1.3. Proces razvoja

Proces razvoja proizvoda u ovom radu podijeljen je na četiri dijela prema Slici 3.



Slika 3. Proces razvoja proizvoda u ovom radu

Prvi dio razvoja započinje istraživanjem i analizom tržišta u kojoj se pronalaze prilike za poboljšavanje odabranog proizvoda, istraživanje specifičnog dijela tržišta na koje se proizvod planira plasirati te postojećih proizvoda, njihovih prednosti i nedostataka. Poseban fokus stavlja se na aditivno proizvedene biciklističke kacige. Završavanjem istraživanja i analize definiraju se zahtjevi korisnika i tehnička specifikacija proizvoda.

Drugi dio razvoja započinje se funkcijskom dekompozicijom unutar koje se proizvod rastavlja na apstraktne funkcije koje ne sugeriraju tehničko rješenje. Na osnovu funkcijske dekompozicije traže se parcijalna rješenja funkcija ili blokova funkcija koja su kasnije korištena pri oblikovanju krajnjeg rješenja.

Treći dio razvoja započinje definiranjem načina validacije parcijalnih rješenja, nakon čega se ocjenjuju sva rješenja prema odlučnim kriterijima i provodi testiranje gdje je to moguće u svrhu validacije i odabira zadovoljavajućeg parcijalnog rješenja.

Četvrti dio razvoja uključuje oblikovanje završnog koncepta na temelju odabranih parcijalnih rješenja iz prethodnog koraka.

2. ISTRAŽIVANJE TRŽIŠTA

Prvi korak razvoja biciklističke kacige je provesti detaljno istraživanje i analizu tržišta kako bi se pronašli postojeći proizvodi koji obavljaju istu funkciju na željeni način. Uvidom u postojeća rješenja dolazi se do popisa funkcija koje dostupni proizvodi ispunjavaju te na temelju toga i dodatnog istraživanja želja korisnika definiraju se korisnički zahtjevi i potrebe koje biciklistička kaciga mora ispunjavati kako bi bila poželjna među većinom korisnika. Osim korisničkih zahtjeva, na temelju analize tržišta izradit će se i tehnička specifikacija za razvoj biciklističke kacige.

Izbor kaciga je uglavnom podijeljen prema namjeni te tako razlikujemo kacige za brdski biciklizam, cestovno utrkiavanje, vožnju BMX bicikla, gradsku vožnju te dječje kacige. Najbrojniji korisnici od navedenih skupina su uvjerljivo korisnici koji prakticiraju gradsku vožnju, bilo zbog osobnog zadovoljstva, zdravstvenih benefita, praktičnosti ili uštede vremena i novca.

Prema tome, logičan je slijed po pitanju donošenja sigurnosti što većem broju korisnika razvijati biciklističku kacigu upravo za primjenu u gradskoj vožnji koja pruža balans između zaštite, udobnosti i estetike u odnosu na kacige specijalizirane primjene. Osim toga, ostale namjene obuhvaćaju manji broj korisnika koji se biciklizmom bave na ozbiljnijoj razini te iz tog razloga shvaćaju sigurnosne rizike ne nošenja zaštitne kacige ili su je dužni nositi zbog pravila propisanih od strane organizacije pod čijim okriljem se odvijaju natjecanja i ostale aktivnosti.

Također, u poslovnom smislu bolje je imati velik broj ciljanih korisnika unutar primarnog tržišta, posebice u slučaju donošenja radikalnih promjena u načinu proizvodnje dosad u pravilu monotonog proizvoda kao što je u ovom slučaju biciklistička kaciga. Nedostatak velikog broja ciljanih korisnika je taj što za velik broj korisnika se natječe i velik broj proizvođača koji žele plasirati svoj proizvod i upravo zbog toga poseban izazov je izboriti se s konkurencijom.

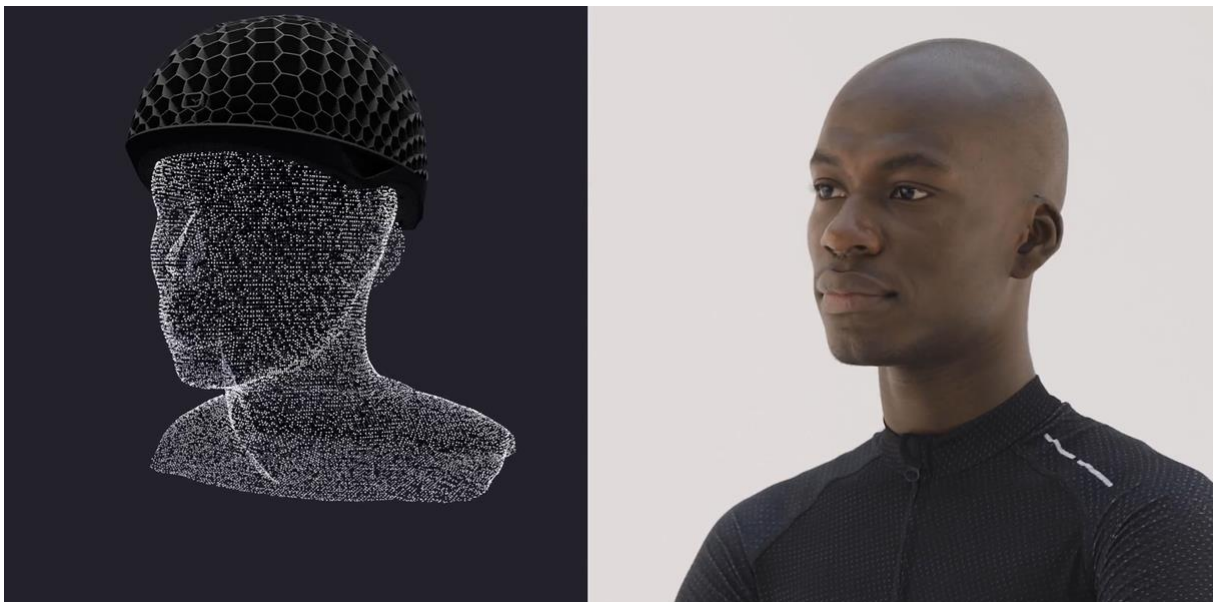
Glavna prepreka prilikom razvoja biciklističke kacige koja će uvjeriti korisnike na nošenje iste je otkrivanje i shvaćanje razloga odbijanja nošenja kacige te otkrivanje zahtjeva korisnika i u konačnici rješavanje problema kako bi se razvio proizvod koji je kompletniji od proizvoda dostupnih na tržištu.

Istraživanje je prvenstveno usmjereno na biciklističke kacige koje su izrađene aditivnom proizvodnjom te personalizirane na način da personalizacija direktno utječe na bolje ispunjavanje funkcija kao što su udobnost i sigurnost prilikom korištenja, a zatim na sve ostale aditivno proizvedene kacige.

2.1. HEXR

HEXR biciklistička kaciga u potpunosti je prilagođena korisniku, nastala kao ideja na Sveučilištu u Londonu gdje je njen suosnivač Jamie Cook prilikom ispitivanja materijala i struktura zaključio kako ćelijske strukture imaju najviši omjer čvrstoće i mase te su idealna konstrukcija za upijanje udaraca što predstavlja odlično svojstvo za primjenu u biciklističkoj kacigi, a razvijena na Sveučilištu u Oxfordu [2].

Motivacija im je bila proizvesti kacigu koja savršeno pristaje glavi korisnika, za razliku od ograničenog broja veličina koje su dostupne u slobodnoj prodaji. Savršeno pristajanje osiguravaju besplatnim slanjem kape nakon naručivanja kacige koju korisnik koristi za skeniranje vlastite glave putem aplikacije koju podržavaju uređaji s iOS operacijskim sustavom te se tako stvara 3D mreža od 250000 točaka.



Slika 4. Skeniranje za HEXR kacigu [2]

Kaciga je izrađena korištenjem SLS tehnologije (eng. *Selective Laser Sintering*) u ponavljajućim slojevima debljine 0,1 mm koristeći materijal dobiven u potpunosti iz ulja sjemenki ricinusa. Ima ukupnu masu oko 310 g ovisno o veličini i sastoji se od dva dijela, unutarnjeg dijela u obliku pčelinjeg saća koje služi za apsorpciju energije te vanjskog izmjenjivog dijela koji štiti od udaraca i oštih predmeta, a osim toga pruža i mogućnost personalizacije graviranjem teksta ili slike uz nadoplatu. Kacige se trenutno proizvode kod vanjskog suradnika, 6 kaciga odjednom te ukupno trajanje printa traje 36 sati, nakon čega ih je potrebno obojati kako bi se spriječilo propadanje uzrokovano UV zračenjem.

Zadovoljava sigurnosnu normu EN 1078 te je na testovima pokazala 26% veću sigurnost i manji rizik od ozljede mozga nego tradicionalne biciklističke kacige.



Slika 5. HEXR kaciga [2]

2.2. KUPOL

KUPOL biciklistička kaciga razvijena je u Kanadi s ciljem povećavanja sigurnosti korisnika koristeći prednosti aditivne proizvodnje. Revolucionarna tehnologija naziva *KOLLIDE Safety System™* koja predstavlja 3 ključne značajke: sigurnost, udobnost i prozračnost. Sadrži 3D *KORE™* unutrašnju strukturu razvijenu kako bi upila energiju udara, jastučice naziva *KINETIC BUMPERS™* koji ublažavaju udar glave te preko 100 sisaljki nalik onima na hobotnici, naziva *OKTOPUS™* koje osiguravaju idealno pristajanje [3] [4].

Također omogućavaju 6 različitih veličina kako bi svakom korisniku osigurali odlično pristajanje. Osim toga, svestranost smatraju vrlinom te je kaciga dizajnirana na način da ima odvojivi vizir koji pretvara aerodinamičnu cestovnu kacigu u MTB (eng. *Mountain Bike*) kacigu za brdski biciklizam. Sa stražnje strane postoji dodatan prihvat glave koji osigurava veću sigurnost, a unutar njega je ostavljen prostor za kosu kod ženskih korisnika.



Slika 6. KUPOL [3]

2.3. KOLLIDE

KOLLIDE kaciga razvijena je u Kanadi od strane vlasnika prethodno navedene biciklističke kacige KUPOL specijalizirana za američki nogomet. Posebnost kacige su mali aditivno proizvedeni 3D umetci koji se mogu slobodno gibati u odnosu jedan na drugi te uz pomoć matrične strukture odlično apsorbirati velike količine energije. Zbog posebnosti aditivne proizvodnje moguće je personalizirati kacigu prema veličini glave i poziciji na terenu kako bi se postigla veća razina sigurnosti, a osim toga 3D printani materijali pružaju neusporedivu zaštitu s obzirom na težinu te vrlo dobar protok zraka [5].



Slika 7. KOLLIDE kaciga [6]

2.4.KAV Portola Helmet

KAV Portola Helmet je 3D printana biciklistička kaciga dizajnirana i proizvedena u Kaliforniji s ciljem pružanja ultimativne sigurnosti koje im aditivna proizvodnja omogućava. Prvi korak prilikom kupnje kacige je naručivanje kompleta za mjerenje nakon čega kupac putem video poziva stupi u kontakt sa stručnjakom iz navedene tvrtke te izmjeri 7 dimenzija nakon čega se proizvodi kalup koji predstavlja unutrašnjost kacige i pošalje kupcu. Kupac zatim provjerava točnost i ukoliko sve odgovara, odobrava početak proizvodnje kacige [7].

Materijal izrade je mješavina ugljičnih vlakana i mješavine polimera te se naziva *KAV Carbon CompositeTM* koji je dizajniran za odličnu čvrstoću i svojstva upijanja energije, a kaciga se proizvodi pomoću FDM tehnologije. Osim toga, vlastita razvijena struktura inspirirana pčelinjim saćem naziva *Hex Honeycomb StructureTM* omogućava do 3 puta veće komprimiranje u odnosu na tradicionalne kacige. Za dodatnu ugodu te bolje pristajanje uz glavu ima i pomične jastučiće. Ukupna masa ove kacige iznosi oko 300 g.

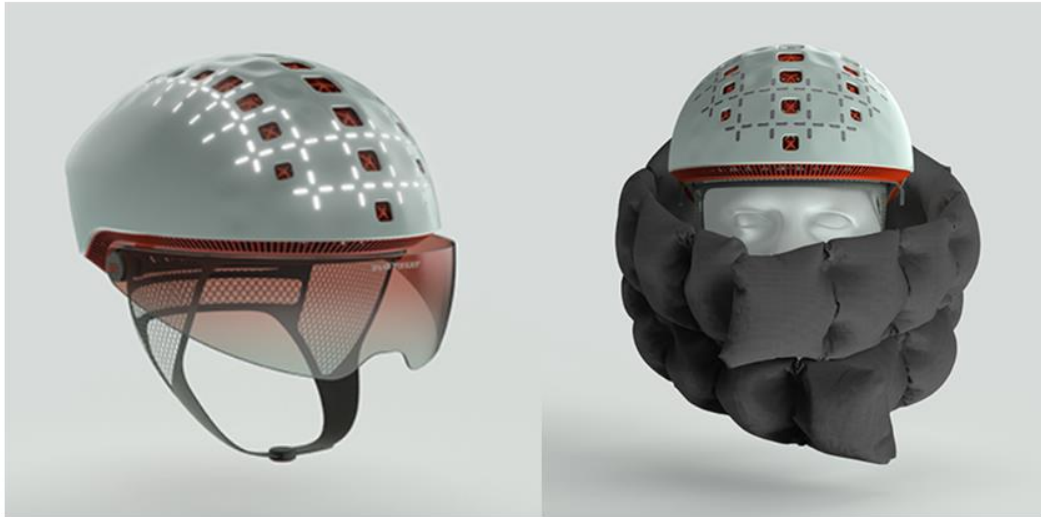


Slika 8. KAV Portola helmet [7]

Ova kaciga bez problema zadovoljava CPSC (eng. *Consumer Product Safety Commission*) sigurnosni standard u Sjedinjenim Američkim Državama, a testiranjem u neovisnoj ustanovi je dokazano kako je minimalno 25% sigurnija u odnosu na sigurnost zahtijevanu standardom. Također, nude 5 godina garancije unutar koje kupac ima pravo na 1 besplatnu zamjenu cijele kacige u slučaju sudara što im ujedno omogućava dodatna testiranja kako bi povećali sigurnost i unaprijedili proizvod. Dodatna značajka ove kacige je integrirani prostor unutar kacige koji služi za odlaganje sunčanih naočala.

2.5. PYLO

Biciklistička kaciga PYLO je prototip inovacijskog studija nFrontier u Berlinu. Ova kaciga kombinira prednosti aditivne proizvodnje sa laganim materijalima i novim tehnologijama kako bi ostvarila sigurnost na puno većoj razini nego što je trenutno dostupno s drugim proizvođačima. Kaciga je opremljena LIDAR senzorom koji pomoću laserskih zraka skenira okolinu te zvučnim signalom upozorava korisnika na opasnost, osim toga unutar kacige integriran je i žiroskopski senzor te LED svijetlo koje osigurava bolju vidljivost te vizir za zaštitu očiju. Upravljanje kacigom omogućeno je i pomoću aplikacije za pametne telefone. Najinovativnija stvar koju ovaj koncept pruža je definitivno integrirani zračni jastuk koji se aktivira prilikom pada te tako dodatno štiti korisnika [8].



Slika 9. PYLO [8]

2.6. Voronoi 3D

Voronoi 3D printana kaciga razvijena je u Kini. Njeni dizajneri su Yuefeng Zhou, Zhecheng Xu i Haiwei Wang. Razvijena je koristeći kombinaciju bionike i parametarske tehnike. Unutarnja struktura inspirirana je Voronoi uzorkom koji je moguće pronaći u unutarnjoj strukturi životinjskih kostiju ili oklopu kornjače i upravo ta struktura pomaže raspršiti vanjski udar kroz cijelu površinu kacige te tako povećava sigurnost korisnika [9].

Kaciga je osvojila *A' DESIGN Award* nagradu u kategoriji sigurnosne opreme i odjeće u godini 2019-2020.



Slika 10. Voronoi 3D [9]

2.7. Zaključak analize tržišta

Nakon provedene analize tržišta pronađene su razne biciklističke kacige koje koriste prednosti aditivne proizvodnje s ciljem stjecanja prednosti nad konvencionalnim kacigama na tržištu, prvenstveno u sferi povećavanja sigurnosti implementiranjem konstrukcijskih principa namijenjenih maksimalnom iskorištavanju potencijala aditivne proizvodnje zajedno sa znanjem o materijalima i strukturama što je najbolje vidljivo na primjeru Jamesa Cooka u razvoju HEXR biciklističke kacige.

Osim sigurnosti, izrazito važan faktor predstavlja i udobnost same kacige gdje je posebno vidljiva prednost aditivne proizvodnje. Udobnost je po mnogima značajka koja stvara prevagu prilikom odabira aditivno proizvedene kacige u odnosu na ostale kacige i to je sfera u kojoj tradicionalno proizvedene kacige ne mogu konkurirati aditivnoj proizvodnji s obzirom da bi u tom slučaju morali imati poseban kalup za svakog korisnika što bi poskupilo i usporilo proizvodnju te donijelo velike gubitke materijala i financijskih sredstava što u konačnici onemogućuje takav pristup, dok u slučaju aditivne proizvodnje takav pristup nema značajnog utjecaja na cijenu i kompleksnost izrade.

Ergonomska prilagodba pojedinom korisniku rezultira udobnošću zbog praćenja kontura glave, a unikatna kontura postiže se promjenama u računalnom programu te ne zahtjeva kalupe i ne utječe na kompleksnost i cijenu izrade u odnosu na kacigu koja bi bila aditivno proizvedena, ali bez ergonomske prilagodbe.

Treća velika prednost koju navedene kacige ističu je prozračnost koja je također ostvarena jedinstvenim strukturama kacige koje ne utječu na cijenu izrade, a donose velike benefite. Jedna od dodatnih značajki koja razlikuje aditivno proizvedene kacige je mogućnost personalizacije, mnogi proizvođači imaju predodređen prostor na kacigi ostavljen za mogućnost graviranja teksta ili slike određenog formata koji se u konačnici proizvodi bez dodatnog troška proizvodnje.

Osim prednosti, jasno su vidljive razlike između navedenih kaciga. Jedna skupina kaciga rezultat je višegodišnjeg razvoja s ciljem povećavanja sigurnosti, razvoja vlastite strukture i načina zaštite, posebne mješavine materijala i optimiranja konstrukcije koje su u konačnici zaštićene kao intelektualno vlasništvo svake tvrtke. Ta skupina predstavlja vrhunac karakteristika koje su trenutno izvedive te ih donosi na tržište tako da su dostupne svima.

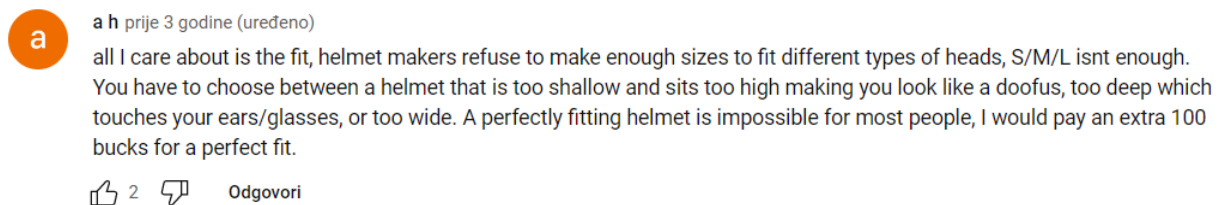
S druge strane, postoje kacige koje su još uvijek u konceptualnoj fazi te funkcioniranje njihovih tehnologija u stvarnoj primjeni još uvijek nije moguće ili nije praktično dokazano. Bez obzira na to, njihovo postojanje predstavlja smjer u kojem je vrlo vjerojatno kako budućnost tehnologije ide te je izgledno kako će brojni znanstvenici i inženjeri staviti svoj fokus kako bi navedeni koncepti u bližoj budućnosti zadovoljili sve sigurnosne zahtjeve te bili dostupni širokoj populaciji korisnika.

Zaključno tome, aditivno proizvedene kacige još uvijek imaju neznatan udio na tržištu unatoč značajnom povećavanju popularnosti aditivne proizvodnje. Smanjen udio na tržištu može se pripisati prvenstveno povišenoj cijeni proizvoda, ograničenju po pitanju brzine proizvodnje, a svakako i dostupnosti takvih kaciga s obzirom da je za kupnju kacige potrebno proći više koraka te čekati i do par tjedana od kupnje do gotovog proizvoda u odnosu na konvencionalne kacige koje su dostupne u svakoj trgovini sportske opreme.

Izgledno je kako će daljnjim razvojem aditivne proizvodnje padati cijena i vrijeme izrade, a time i rasti udio aditivno proizvedenih i prodanih biciklističkih kaciga u ukupnom broju. Svakako je potrebno olakšati proces naručivanja i personalizacije kacige svakom korisniku zajedno sa približavanjem proizvodnje krajnjem korisniku, prvotno u okviru specijaliziranih trgovina sportske opreme gdje je moguće upoznavanje sa tehnologijom i prednostima, a zatim skeniranje glave i sama narudžba.

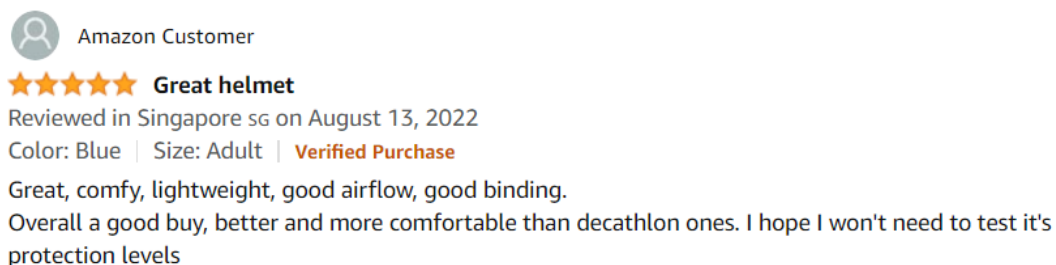
3. DEFINICIJA CILJA RAZVOJA

Na osnovu analize tržišta, jasno su vidljivi glavni zahtjevi, potrebe i prednosti koje je potrebno obuhvatiti prilikom razvoja biciklističke kacige. Neki od proizvoda su kompleksniji i kompletniji od drugih, ali niti jedan nema integrirane sve značajke. Na osnovi pretraživanja komentara u internetskim trgovinama koje prodaju biciklističke kacige, video recenzija postojećih 3D printanih kaciga te komentara potencijalnih korisnika na tim recenzijama dobiva se bolji uvid u relativnu važnost svakog zahtjeva te u kojoj mjeri bi zanemarivanje nekog zahtjeva utjecalo na smanjenje zadovoljstva korisnika prilikom korištenja proizvoda te utjecaj zadovoljstva prilikom ispunjavanja latentnih potreba. Primjer dvije recenzije prikazane na slikama 11. i 12. daju dobre ulazne podatke za definiranje potreba korisnika.



Slika 11. Recenzija 1 [10]

Prijevod recenzije 1: „Najvažnija mi je udobnost, proizvođači odbijaju napraviti dovoljno veličina za različite glave. S/M/L veličine nisu dovoljne. Mora se birati između kaciga koje su plitke i pozicionirane su previsoko na glavi što izgleda smiješno ili kacige koje su previsoke i preširoke te dodiruju uši nakon pozicioniranja. Većini ljudi je gotovo nemoguće pronaći kacigu koja savršeno pristaje, ja bih platio dodatnih 100 \$ za savršeno pristajanje.“



Slika 12. Recenzija 2 [11]

Prijevod recenzije 2: „Odlična, udobna, lagana, dobar protok zraka, dobro prijanjanje. Sve u svemu dobra kupovina, bolja i udobnija kaciga nego u Decathlonu. Nadam se da neću morati testirati njenu razinu sigurnosti.“

3.1. Korisničke potrebe

Potrebe korisnika podijeljene su na primarne i sekundarne te latentne potrebe koje korisnik nije svjestan da treba, no kad ih otkrije stvaraju dojam više vrijednosti proizvoda.

Tablica 1. Primarne potrebe

PRIMARNE POTREBE
Kaciga efektivno dissipira energiju tijekom udara
Kaciga osigurava ventilaciju glave prilikom dugotrajne vožnje
Kaciga je udobna za dugotrajno nošenje i ne stvara osjećaj težine
Kaciga dobro pristaje obliku glave

Tablica 2. Sekundarne potrebe

SEKUNDARNE POTREBE
Vizualan identitet prilagodljiv korisniku
Kaciga se jednostavno pričvršćuje na glavu korisnika
Kaciga omogućava jednostavno održavanje
Kaciga pruža mogućnost zamjene potrošnih dijelova

Tablica 3. Latentne potrebe

LATENTNE POTREBE
Kaciga ima mogućnost prihvaćanja osobnih stvari
Kaciga pruža mogućnost personalizacije
Vanjske površine kacige zadržavaju boju tijekom vremena

Nakon određivanja popisa potreba idući je korak formiranje tehničke prema kojoj se svaka od navedenih funkcija proizvoda prevodi u tehnički zahtjev koji izražava što proizvod mora zadovoljiti, a ne kako će to zadovoljiti.

3.2. Tehnička specifikacija

Na temelju analize tržišta i zahtjeva korisnika određuju se mjerljive tehničke specifikacije koje proizvod mora imati kako bi uspješno zadovoljio sve zahtjeve koji su mu pripisani. Važno je svaku tehničku specifikaciju dobro opisati kako bi se onemogućila greška zbog subjektivne interpretacije. [12]

U Tablici 4. prikazane su tehničke specifikacije proizvoda, a u stupcu Važnost unutar tablice prikazana je važnost svake tehničke specifikacije u iznosu od I do III gdje je I najveća važnost, a III najniža važnost određena prema važnosti korisničkih potreba iz prethodnog odjeljka.

Tablica 4. Tehnička specifikacija

Specifikacija br.	Specifikacija	Važnost	Mjera
1	Zadovoljava sigurnosne norme prema zahtjevima tržišta	I	Da/Ne
2	Protok zraka kroz kacigu u iznosu 20 l/min	I	l/min
3	Maksimalna ukupna masa do 350 g	I	g
4	Ergonomska prilagodljivost svakom korisniku	I	Da/Ne
5	Opseg glave prema mjerenom iznosu	I	Lista
6	Cijena izrade do 40 €	II	€
7	Maksimalno vrijeme trajanja proizvodnje 48 h	II	h
8	Maksimalno vrijeme trajanja dodatne obrade i sklapanja 2 h	II	h
9	Ulijeva ponos	II	Subjektivno
10	Kompatibilnost sa zamjenskim remenima	II	Da/Ne
11	Mogućnost izmjene zamjenskih komponenti bez alata	II	Da/Ne
12	Mogućnost ispravnog postavljanja na glavu jednom rukom unutar 30 s	II	s
13	Odstupanje izvedenih dimenzija u maksimalnom iznosu od 1 mm	II	mm
14	Ne dolazi do degradacije vanjskog izgleda prilikom izlaganju UV zračenju unutar 365 dana	III	Dan
15	Kompatibilnost sa modnim ili funkcionalnim dodatcima	III	Lista
16	Personalizacija do 30 znakova ili 500 mm ²	III	Da/Ne

4. KONCEPTUALIZACIJA

4.1. Funkcijska dekompozicija

Kako bi se u potpunosti razumjela svrha proizvoda te što on mora moći obaviti, provodi se funkcijska dekompozicija u kojoj se proizvod rastavlja na jednostavne apstraktno opisane funkcije kojima se izriče što je potrebno obaviti, a ne na koji način je to potrebno obaviti.

Cilj funkcijske dekompozicije je dobivanje skupina podfunkcija koje su nužne za obavljanje većeg zadatka te mogućnost implementacije kreativnosti u rješavanju tog zadatka kroz generiranje više parcijalnih rješenja. Glavna prednost ovog pristupa je apstrakcija u prikazu funkcija i blokova funkcija bez sugeriranja očitih tehničkih rješenja što posljedično tome potiče kreativnost pri traženju rješenja za svaku funkciju [12].

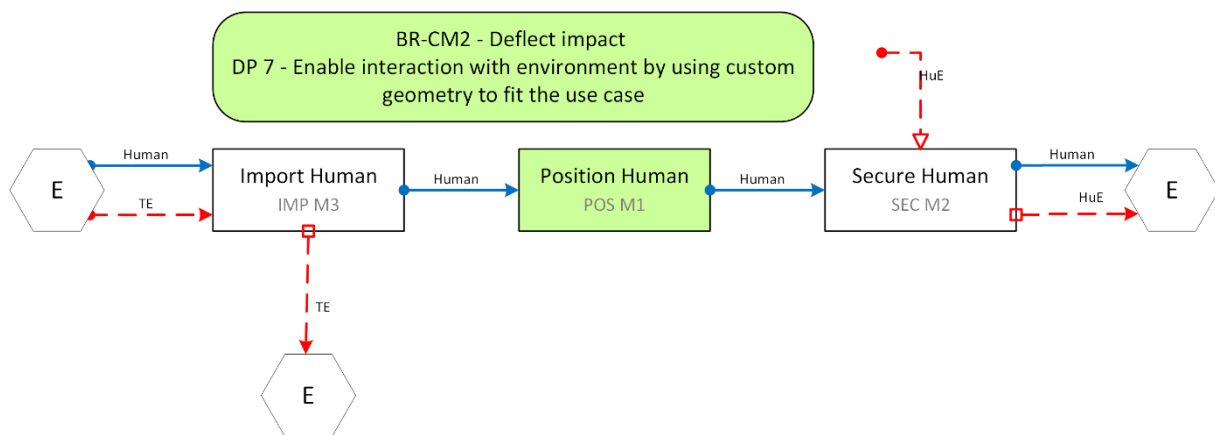
Funkcijska dekompozicija napravljena je pomoću *Function Class* pristupa modeliranju [13]. Osim glavne funkcijske dekompozicije, pri traženju parcijalnih rješenja za svaki lanac funkcija prikazan je isječak tog dijela iz glavne funkcijske dekompozicije te na njemu primijenjeno mapiranje funkcija (eng. *Function Mapping*) [14].

Na Slici 13. prikazana je glavna funkcijska dekompozicija, a na njoj zelenom bojom je prikazan tijek informacija, plavom bojom tijek materijala i crvenom bojom tijek energije kroz sustav.

4.2. Traženje parcijalnih rješenja

Prema funkcijskoj dekompoziciji, odabrani su pojedini blokovi funkcija koji čine smislenu i povezanu cjelinu za koju su tražena parcijalna rješenja. Ovakav pristup koncipiranju povećava produktivnost samog razvoja proizvoda s obzirom na tradicionalnu rutu prema kojoj bi iz morfološke matrice razvijali nekoliko koncepata s većinski istim značajkama uz minimalne razlike. Ovdje se upravo izabiru te minimalne razlike između tradicionalnih koncepata te za svaku od funkcija rade parcijalni koncepti koji će se nakon ocjenjivanja sklopiti u završni koncept sastavljen od najboljih parcijalnih rješenja.

4.2.1. Pozicioniranje kacige na korisnika



Slika 14. Blok funkcija za pozicioniranje kacige na korisnika

A1 – Prilagodba geometrije prema podacima dobivenim 3D skeniranjem

Prvo parcijalno rješenje za pozicioniranje kacige na korisnika temelji se na što boljem praćenju kontura glave. Oblik glave značajno varira od korisnika do korisnika, iako je to često slabo primjetno zbog kose te je pojedincu gotovo nemoguće pronaći kacigu koja savršeno odgovara njegovom obliku glave.

3D skeniranje glave korisnika predstavlja izrazito točno prevođenje oblika glave iz stvarnosti u računalni model, a aditivna proizvodnja omogućava izradu geometrije kacige prateći oblik 3D skena. Nakon proizvodnje, unutrašnjost kacige i glava će tako imati najveću zajedničku dodirnu površinu što za rezultat ima optimalnu disperziju energije po glavi prilikom udara, drugim riječima, najveću sigurnost.



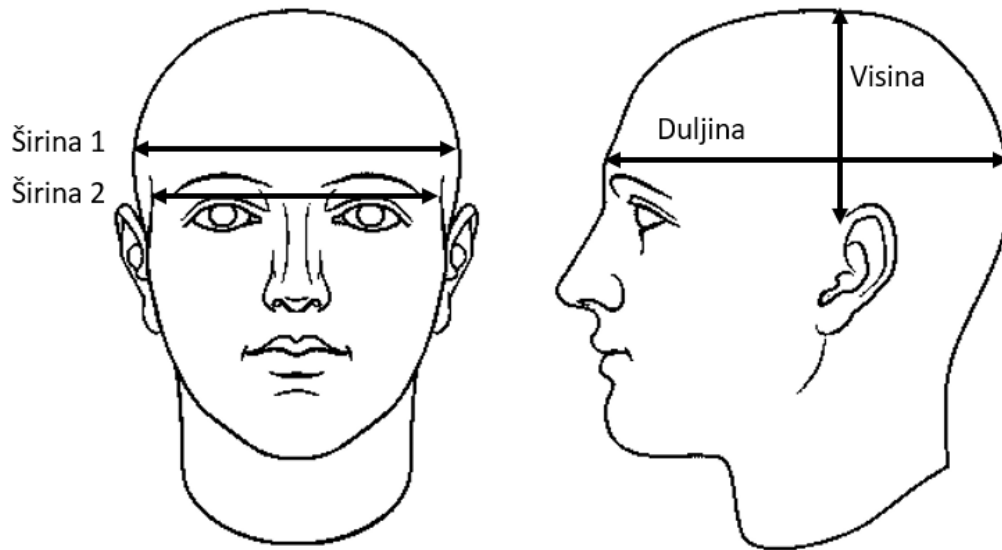
Slika 15. 3D model glave korisnika

A2 - Prilagodba geometrije mjerenjem karakterističnih točaka

Drugo parcijalno rješenje za pozicioniranje kacige na glavu korisnika temelji se na mjerenju karakterističnih dimenzija korisnika te na temelju njih konstruiranje kacige aproksimirajući ostatak modela osigurava se prilagodba geometrije kacige.

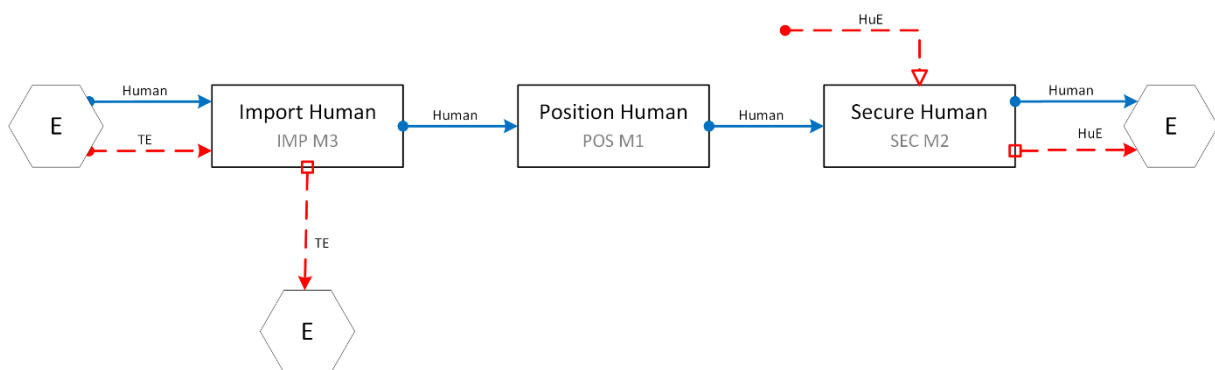
Karakteristične dimenzije određuju se prema antropometriji ljudske glave. Potrebno je osigurati precizno mjerenje korisnika na referentnim mjestima kako bi se dobile točne vrijednosti i kaciga dobro pristajala korisniku. Točne mjere za svakog korisnika lako je postići zbog prednosti aditivne proizvodnje kojom je moguće svakom korisniku pružiti individualan pristup prilikom razvoja i same proizvodnje.

Prilikom konstruiranja potrebno je obratiti pozornost da je dio dimenzija aproksimiran te iz tog razloga ostaviti dovoljno mjesta za eventualne nesavršenosti glave koje su promakle pri mjerenju i voditi računa kako će korisnik nositi kacigu i u vrijeme lošeg vremena sa kapom na glavi što također treba predvidjeti tijekom konstruiranja.



Slika 16. Karakteristične dimenzije glave, izrađeno prema [15]

4.2.2. Osiguravanje kacige na glavi korisnika



Slika 17. Blok funkcija za osiguravanje kacige na glavi korisnika

Osiguravanje kacige od rotacije i pada s glave postiže se remenom i kopčom, u okviru ovog rada razmatrat će se kupovni sklop remena i kopče koji zadovoljava potrebne sigurnosne norme.

B1 – remen s košaricom za bradu

Prvo parcijalno rješenje napravljeno je od kvalitetnog materijala koji osigurava kacigu na glavi prilikom udara, podesive duljine te ima košaricu za bradu koja osigurava stabilnost i dobar prijenos energije. Prihvaća se u 4 točke te ravnomjerno pridržiava kacigu.



Slika 18. Remen B1 [16]

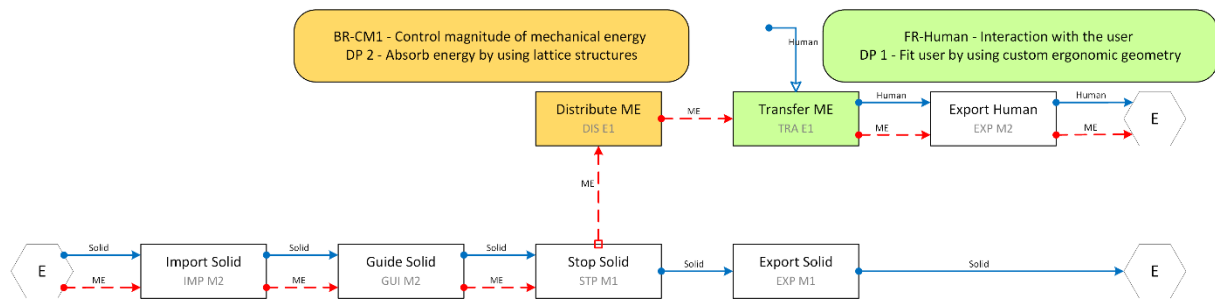
B2 – remen bez košarice za bradu

Drugo parcijalno rješenje predstavlja običan podesivi remen bez košarice za bradu, pruža manju sigurnost te prilikom udara prenosi opterećenje na osjetljivije područje donjeg dijela glave, ali veći dio korisnika zbog praktičnosti izabire ovu opciju. Prihvaća se u 4 točke te ravnomjerno pridržiava kacigu.



Slika 19. Remen B2 [17]

4.2.3. Zaštita glave korisnika



Slika 20. Blok funkcija za osiguravanje glave korisnika

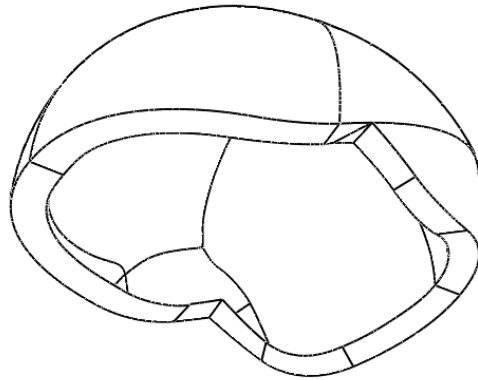
Blok funkcija povezuje udarac, odnosno kontakt kacige i objekta udara s funkcijama defleksije objekta te prihvata, apsorpcije i prijenosa energije nakon čega se za navedeni blok funkcija predlažu skupovi parcijalnih rješenja u tri međusobno povezane karakteristike rješenja za osiguravanje korisnika. Prvo se odabire hoće li kaciga biti izrađena iz jednog ili više dijelova, zatim slijedi odabir materijala te na kraju odabir pogodne ispune. Odabir svake od tri karakteristike daje konačno parcijalno rješenje za navedeni blok funkcija.

Kaciga mora zaštititi glavu korisnika od prodora raznih objekata, apsorbirati energiju udara te ju zatim na siguran način raspršiti dijelom u okolinu a drugim dijelom na korisnika na način da taj iznos energije bude minimalan mogući. Kaciga može, ovisno o izvedbi, zaštititi korisnika od sunca, vjetra i kiše.

4.2.3.1. Modularnost kacige

C1 - Jednodijelna kaciga

Opcija proizvodnje kacige iz jednog dijela kao glavnu prednost ima što proizvod dolazi kao cjelina te nije potrebno dodatno sklapanje. Jednodijelnost omogućava bolju personalizaciju proizvoda svakom korisniku te je posebice primjenjivo u slučaju izrade proizvoda od jednog materijala.

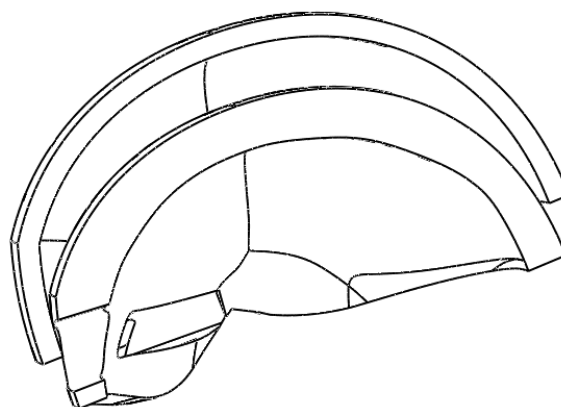


Slika 21. Jednodijelna kaciga

C2 - Višedijelna kaciga

Višedijelna kaciga najveće benefite ima pri proizvodnji različitih dijelova s različitim materijalima. U tom slučaju odabrani materijal za unutarnju strukturu posvećen je apsorpciji i raspršivanju energije te savršenom pristajanju glavi korisnika, dok vanjski dio štiti korisnika od prodora objekata do glave i prihvaća se na unutarnji dio kojemu vanjska površina ima konstantnu konturu.

Vanjski dio izgrađen je od tvrdog, izdržljivog materijala te njegova izgradnja nije nužno potrebna pomoću aditivne proizvodnje što u slučaju većih serija ubrzava i pojeftinjuje proizvodnju. Proizvodnjom pomoću konvencionalnih metoda gubi se mogućnost personalizacije, a u slučaju aditivne proizvodnje, potrebna je veća količina potpornog materijala.



Slika 22. Višedijelna kaciga

4.2.3.2. Izbor materijala

Izabrani su materijali pogodni za korištenje u izabranoj FDM tehnologiji izrade te su obuhvaćeni materijali raznih svojstava kako bi se odlučilo koji najbolje služi svrsi prilikom razvoja biciklističke kacige u okviru ovog rada.

PLA (eng. *Polylactic acid*)

Jedan od najčešće korištenih materijala zbog lake mogućnosti printanja i prilagođenosti početnicima. Temperatura printanja kreće već od 180 °C te grijana podloga nije nužna za printanje prvih slojeva uz uvjet da je okolna temperatura iznad 20 °C, no zbog niske temperature printanja pokazuje i slabu otpornost na visoke temperature. Materijal ima visoku čvrstoću, no zbog toga ima nisku žilavost te pod opterećenjem dolazi do puzanja materijala pri sobnoj temperaturi kao i iskrivljivanja pri direktnom utjecaju sunčevih zraka ili u okolnoj temperaturi većoj od 57 °C. Zbog toga nije optimalan izbor za funkcionalne dijelove pa je najčešće korišten za izradu pokaznih dijelova. Prednost materijala u ekološkom smislu je njegova 100% biorazgradivost [18].

PETG (eng. *Polyethylene Terephthalate Glycol*)

PETG filament vrlo je sličan materijalu od kojeg su izrađene plastične boce, uz dodatak glikola sa svrhom poboljšanja printljivosti. U odnosu na PLA, ovaj materijal je čvršći, otporniji na visoke temperature te na puzanje pri sobnoj temperaturi zbog čega je prikladan za korištenje u funkcionalnim proizvodima. Materijal je higroskopan, što znači da veže vodu koja može dovesti do lošije kvalitete ili potpunog uništavanja izratka. Otopljeni materijal je viskoznan što rezultira dobrom adhezijom između slojeva, ali zbog toga nije pogodan za strme prijelaze bez potpornog materijala te premošćivanje, odnosno spajanje dva kraja bez potpornog materijala između [18].

ABS (eng. *Acrylonitrile butadiene styrene*)

ABS kao materijal najčešće je korišten prilikom injekcijskog prešanja korisničkih proizvoda zbog odličnog balansa cijene i svojstava te se ta odlika prenosi i na inačicu ABS filameta za 3D printanje industrijskih proizvoda. Ima dobru otpornost na toplinu te je zbog toga potrebno zagrijavanje na 250 °C prilikom printanja te kućište koje osigurava višu okolnu temperaturu koja poboljšava prijanjanje na podlogu te adheziju između slojeva i iskrivljavanje zbog naglog hlađenja. Kućište također usporava širenje štetnih plinova koji se oslobađaju otapanjem ABS filameta [18].

TPU (eng. *Thermoplastic polyurethane*)

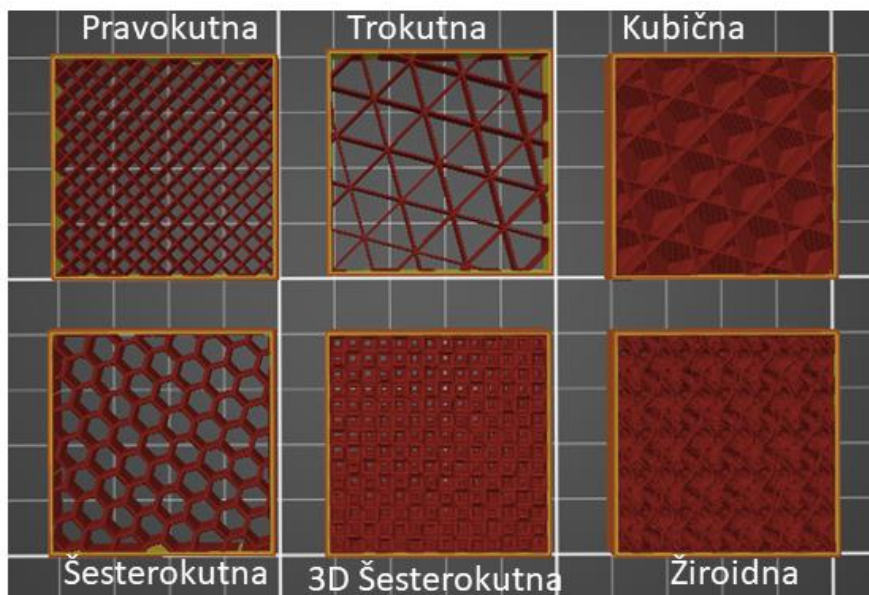
TPU filament ima svojstva nalik gumi, izraženu elastičnu deformaciju te nisku čvrstoću. Koristi se u primjenama gdje su primarni zahtjevi savitljivost, upijanje vibracija te dobro prijanjanje važniji od krutosti. Zbog svoje savitljivosti izrazito se teško printa te postiže lošu kvalitetu površine, a printa se na negrijanoj podlozi na kojoj je nužno koristiti sredstvo za oslobađanje kako ne bi došlo do trajnog povezivanja izratka i podloge [18].

PC (eng. *Polycarbonate*)

PC filament ima odlična mehanička svojstva kao što su visoka čvrstoća i otpornost na udare te visoku temperaturu, ali upravo ga ta svojstva čine teškim za printanje. Zahtijevana temperatura mlaznice je 300 °C, a podloge preko 100 °C, osim toga dolazi do iskrivljavanja printanog dijela te slabog prijanjanja na podlogu. Zbog navedenih svojstava materijal je najčešće korišten u industrijskim primjenama [18].

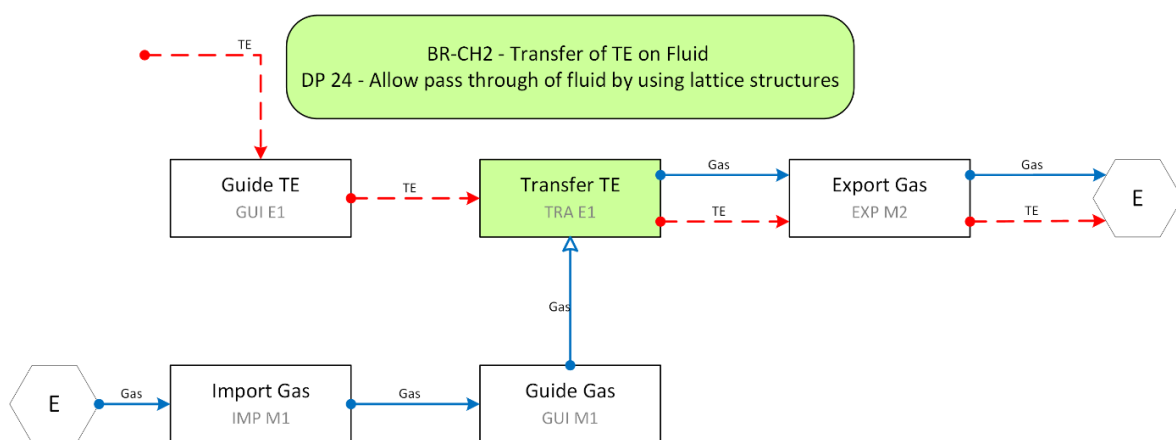
4.2.3.3. Izbor ispune

Izabrano je 6 vrsta ispune prema programskom alatu PrusaSlicer [19] koji služi za pripremu računalnog modela u oblik pogodan za učitavanje u 3D printer. Izabrane su ispune prvenstveno ćelijske strukture s obzirom da imaju najveći omjer mase i čvrstoće te osim toga i neke 3D ispune koje bi bolje trebale apsorbirati energiju udara. Osim vrste ispune moguće je varirati i postotak ispune, a testiranjem će biti određeno koja kombinacija ispuna je idealna za primjenu na aditivno proizvedenoj biciklističkoj kacigi.



Slika 23. Prikaz vrsta ispuna

4.2.4. Odvođenje toplinske energije

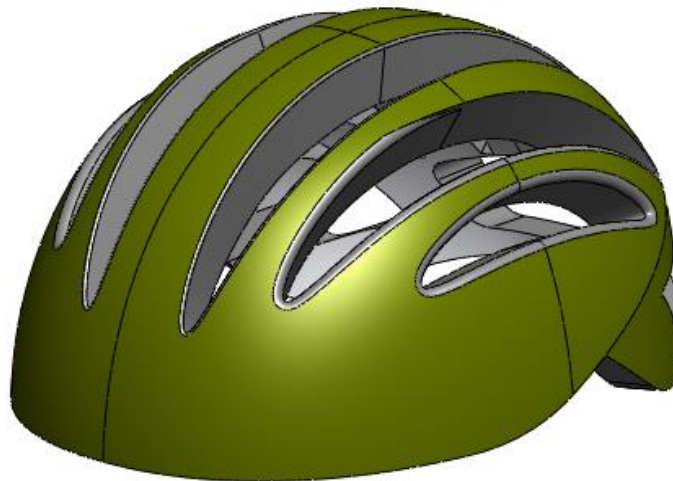


Slika 24. Blok funkcija za odvođenje topline

Prilikom dugotrajnih vožnji u toplijem okruženju korisnici oslobađaju više topline te u slučaju neefikasnog odvođenja topline dolazi do znojenja kako bi se tijelo ohladilo. Upravo zbog te neizbježne pojave, kao jedan od najčešćih zahtjeva korisnika spominjana je dobro ventilirana, prozračna kaciga. Većina odvedene topline odvodi se zagrijavanjem struje zraka koja prolazi kroz kacigu. Izazov je konstruirati kacigu koja osigurava optimalno odvođenje topline u različitim scenarijima s obzirom na promjenjive vanjske uvjete kao što su temperatura te brzina i smjer vjetrova i dodatno, brzinu vožnje te položaj vozača u odnosu na vjetrova.

D1 – odvođenje topline pomoću otvora na kacigi i kanala za protok zraka

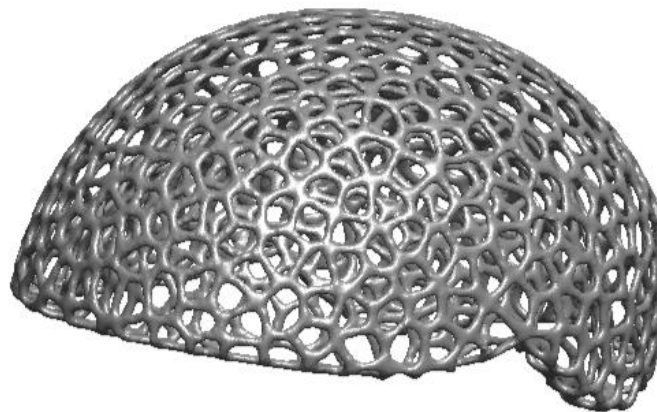
Prvo parcijalno rješenje odvođenja topline temelji se na tradicionalnom pristupu gdje kaciga ima vanjske otvore te kanale kroz svoju unutrašnjost koji su posvećeni protoku zraka koji ovisi o dimenzijama i veličini otvora. Prednost je mogućnost variranja oblika i veličine otvora koji su ujedno i značajka dizajna kacige te tako pronalaženje balansa između izgleda, protoka zraka i sigurnosti.



Slika 25. D1

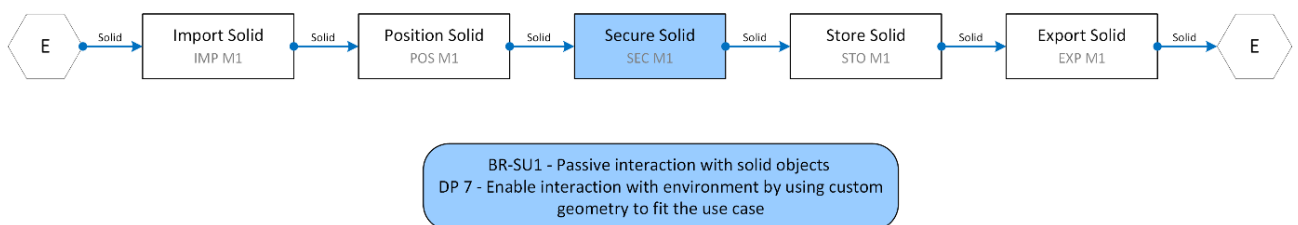
D2 – odvođenje topline protokom kroz ćelijsku strukturu

Drugo parcijalno rješenje prikazuje kacigu u potpunosti izrađenu pomoću ćelijske strukture, bez vanjske ljuske. Takvo rješenje pruža bolji protok zraka, ali ujedno i povećava rizik od ozljede u slučaju udara u oštar predmet, osim toga nošenje kacige bez vanjske ljuske izlaže glavu vanjskim utjecajima koji istovremeno smanjuju sigurnost i ugodu prilikom nošenja te ubrzavaju degradaciju materijala.



Slika 26. D2 [20]

4.2.5. Prihvat i osiguravanje sunčanih naočala



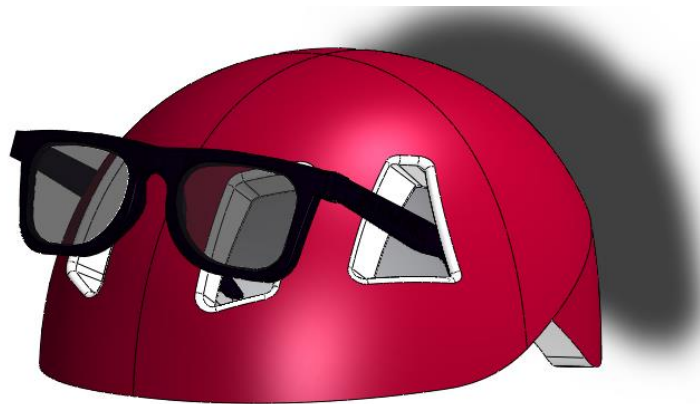
Slika 27. Blok funkcija za prihvat i osiguravanje sunčanih naočala

Jedna od najčešćih stvari koje prosječan korisnik nosi prilikom vožnje bicikla su sunčane naočale, no zbog promjenjivog vremena, one nisu nužno potrebne tijekom cijelog vremena trajanja aktivnosti, stoga odjeljak za odlaganje sunčanih naočala predstavlja značajku koja bi mnogim korisnicima mogla biti od velikog značaja.

Prihvat sunčanih naočala na biciklističkoj kacigi nepovoljno utječe na aerodinamiku, no prosječnom korisniku takav utjecaj predstavlja zanemariv faktor i zbog toga praktično mjesto za prihvat naočala je značajka koja donosi veću prednost nego nedostatak.

E1 – prihvat oblikom s prednje strane

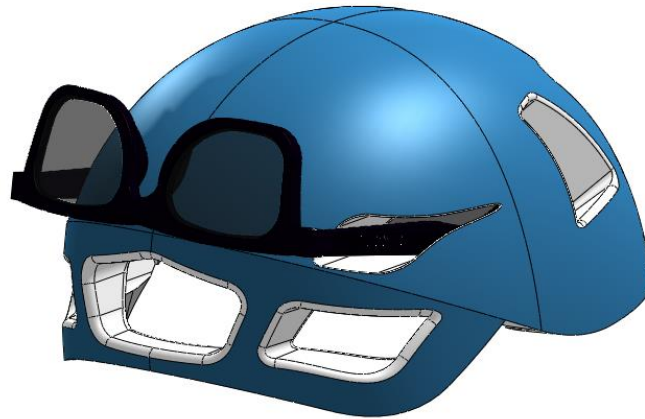
Utor za sunčane naočale nalazi se s prednje strane kacige, ujedno ispunjava funkciju otvora za strujanje zraka. Prihvat i pozicioniranje naočala osigurava se oblikom otvora koji je ujedno i kanal za protok zraka. Jedini potencijalni nedostatak predstavlja smanjenje protoka zraka kroz kacigu, a složenija geometrija još jednom ne predstavlja problem zbog prednosti koje pruža aditivna proizvodnja.



Slika 28. E1

E2 – prihvat oblikom sa stražnje strane

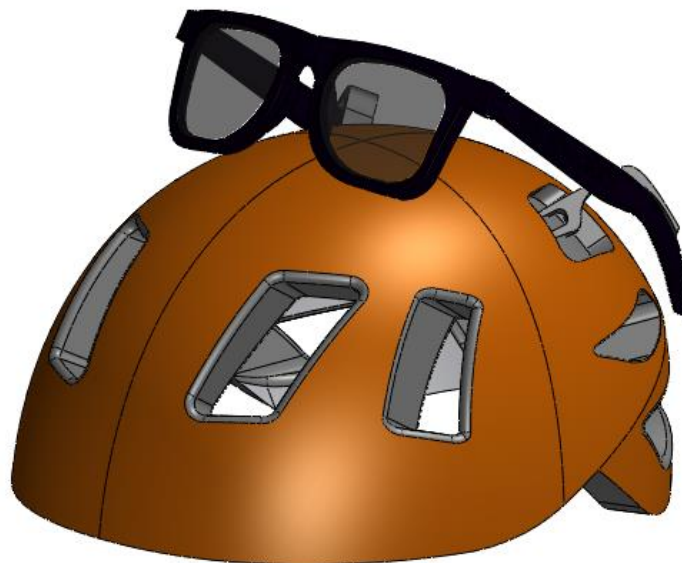
Drugo parcijalno rješenje također je izvedeno kao utor za sunčane naočale, ali u ovom slučaju sa stražnje strane unutar otvora za izlazak toplog zraka. Nedostatak ovog koncepta je restrikcija protoka zagrijanog zraka te suprotno od prvog koncepta, struja zraka u ovom slučaju želi izbaciti sunčane naočale iz kacige zbog čega je potrebno osiguravanje oblikom i/ili dodatno elastičnom gumicom.



Slika 29. E2

E3 – učvršćivanje kopčama na sredini kacige

Treće parcijalno rješenje prihvaća sunčane naočale na gornjem dijelu kacige, blago pomaknuto prema nazad. U kacigi su integrirane kopče u koje ulaze sunčane naočale, a sam njihov položaj je takav da im vlastita težina djeluje tako da ih osigurava od ispadanja zajedno sa strujom zraka koja ih dodatno osigurava. Kao i u svakom konceptu, skladištenje sunčanih naočala na kacigi nepovoljno utječe na aerodinamiku, no položaj prikazan u ovom konceptu predstavlja najmanji utjecaj na ukupni protok zraka.



Slika 30. E3

5. VALIDACIJA I ODABIR PARCIJALNIH RJEŠENJA

Odabir parcijalnih rješenja ključan je korak pri razvoju proizvoda koji će najbolje ispunjavati pronađene korisničke potrebe. Konstruiranje i razvoj su iterativni procesi te optimalno rješenje nikada nije moguće postići, razvojem novih tehnologija te razvijanjem novih verzija istog proizvoda uklanjaju se eventualni nedostaci te implementiraju promjene koje donose benefite. Posljedično tome, cilj validacije je odabrati najbolja rješenja raznim metodologijama te postaviti čvrst temelj za iduće generacije proizvoda.

Neke od metoda odabira koncepata prema [12] su:

- Vanjska odluka – koncepti su predani klijentu ili nekoj osobi izvan tima na odlučivanje
- Osobne preferencije – proizvod odabran od strane najiskusnije osobe unutar tima
- Intuicija – odabir proizvoda prema osjećaju, bez kriterija
- Glasanje – svaka osoba unutar tima glasa za jedan koncept te se odabire koncept s najviše glasova
- Usporedba prednosti i nedostataka
- Izrada prototipa i ispitivanje
- Matrice odlučivanja – ocjenjivanje svakog rješenja na temelju predodređenih kriterija koji mogu imati svoju težinsku vrijednost
- Anketa – moguće anonimno ocjenjivanje te u slučaju ankete putem interneta, o najboljem rješenju može odlučiti velik broj ljudi

Niti jedna metoda od nabrojanih nije najbolja za svaki koncept, iz tog razloga svaka metoda ili skupina metoda koristit će se za validaciju onog koncepta kojemu specifična metoda najbolje odgovara.

5.1. Odabir načina pozicioniranja

Predložena su dva parcijalna rješenja pozicioniranja kacige na glavu korisnika, oba rješenja pružaju bolju udobnost i praćenje konture glave korisnika u odnosu na konvencionalno proizvedene kacige. Prvo rješenje izvedeno je korištenjem 3D skenera kojim se dobiva izrazito precizan računalni model glave, a drugo rješenje izmjerom karakterističnih dimenzija na temelju kojih se stvara model.

Ovaj odabir vrši se pomoću matrice za ocjenjivanje ocjenama od 1 do 5 gdje je 5 najviša ocjena te parcijalno rješenje s najvišom ukupnom ocjenom će se smatrati boljim rješenjem.

Tablica 5. Parcijalna rješenja pozicioniranja kacige

Kriteriji ocjenjivanja	Težinski faktor %	Parcijalna rješenja			
		A1 – 3D skeniranje		A2 – mjerenje karakterističnih dimenzija	
		Ocjena	Ponderirana ocjena	Ocjena	Ponderirana ocjena
Odstupanje od geometrije glave korisnika	50	5	2,5	3	1,5
Zahtjevnost procesa stvaranja modela	7	2	0,14	3	0,21
Potrebno ulaganje u znanje i opremu	3	1	0,03	4	0,12
Trajanje procesa stvaranja modela	10	3	0,3	3	0,3
Utjecaj na zadovoljstvo korisnika	30	5	1,5	4	1,2
Ukupna ocjena		4,47		3,33	

Vidljivo je kako parcijalno rješenje A1 koje osigurava dobro pozicioniranje biciklističke kacige na glavu korisnika pomoću skeniranja glave ima značajno bolju ukupnu ocjenu te će biti korišten pri razvoju glavnog koncepta. Ovaj koncept je također potvrđen metodom intuicije, s obzirom da skeniranje pruža bolju točnost i zadovoljstvo korisnika koji će cijeniti korištenje naprednih tehnologija i činjenicu kako ima personaliziran komad opreme za prihvatljivu cijenu što je do pojave šireg rasprostranjenja ovakve tehnologije bilo dostupno samo profesionalnim sportašima.

5.2. Odabir osiguravanja kacige na glavi korisnika

Odabir osiguravanja kacige na glavi korisnika odabrat će se na temelju osobnog iskustva, intuicije i ocjenjivanja po kriterijima različite važnosti. Kako je odlučeno da će remeni za osiguravanje biti kupovni, odnosno neće se razvijati u okviru ovog rada, pretpostavlja se da su jednako sigurni s obzirom da svaki korišteni remen mora zadovoljavati potrebne sigurnosne norme.

Parcijalno rješenje B1 ima košaricu za bradu koja osigurava veću stabilnost kacige, ali samim time pokazalo se kako je i veća distrakcija tijekom korištenja što smeta većini korisnika i u konačnici može dovesti do toga kako kacigu ne bi nosili ispravno što bi dovelo do većeg problema ili bi se zbog toga odlučili za konkurentsku kacigu. Parcijalno rješenje B2 ima standardan remen sa kopčom ispod brade koja manje smeta korisnicima, a postiže zadovoljavajuću sigurnost.

Tablica 6. Parcijalna rješenja osiguravanja kacige

Kriteriji ocjenjivanja	Težinski faktor %	Parcijalna rješenja			
		B1 – remen s košaricom		B2 – remen bez košarice	
		Ocjena	Ponderirana ocjena	Ocjena	Ponderirana ocjena
Sigurnost od pucanja remena	30	4	1,2	4	1,2
Stabilnost kacige na glavi korisnika	25	5	1,25	4	1,0
Udobnost pri korištenju	30	3	0,9	4	1,2
Utjecaj na zadovoljstvo korisnika	15	3	0,45	4	0,6
Ukupna ocjena		3,8		4,0	

Na temelju osobnog iskustva, intuicije i ocjenjivanja, bolji izbor za proizvod je standardno rješenje koje pruža parcijalno rješenje B2 te je zbog toga odabrano kao bolje od dva navedena rješenja koja rješavaju problem osiguravanja kacige na glavi korisnika. Alternativno, pri prodaji bi se mogla nuditi i druga opcija kao dodatna oprema za korisnike koji žele dodatnu sigurnost.

5.3. Odabir parcijalnih rješenja zaštite glave korisnika

5.3.1. Odabir broja modula

Prvenstveno je potrebno odabrati hoće li se kaciga izrađivati iz jednog ili više dijelova. Odabir se vrši pomoću matrice za ocjenjivanje ocjenama od 1 do 5 gdje je 5 najviša ocjena te parcijalno rješenje s najvišom ukupnom ocjenom će se smatrati boljim rješenjem.

Tablica 7. Parcijalna rješenja za broj dijelova kacige

Kriteriji ocjenjivanja	Težinski faktor %	Parcijalna rješenja			
		C1 – jednodijelna kaciga		C2 – višedijelna kaciga	
		Ocjena	Ponderirana ocjena	Ocjena	Ponderirana ocjena
Praktičnost tijekom proizvodnje	10	5	0,5	3	0,3
Vrijeme printanja	30	5	1,5	3	0,9
Utrošak materijala	20	4	0,8	2	0,4
Količina korištenog potpornog materijala	30	4	1,2	3	0,9
Trajanje sklapanja	10	5	0,5	3	0,3
Ukupna ocjena		4,5		2,8	

Nakon ocjenjivanja, vidljivo je da za ovu primjenu parcijalno rješenje C1 - jednodijelna kaciga neupitno bolje rješenje s obzirom da anulira potrebu za proizvodnjom više dijelova te njihovo sklapanje i pričvršćivanje, a također i dugoročno zadržavanje na mjestu pri dinamičnom korištenju tijekom aktivnosti kao što je vožnja biciklom. Osim sklapanja, dodatno se smanjuje utrošak materijala, posebice potpornog i skraćuje vrijeme printanja što znači da u istom vremenu je moguće proizvesti i na tržište plasirati veći broj kaciga.

5.3.2. Odabir materijala

Svaki od navedenih materijala ima svoje prednosti i nedostatke, u sljedećoj tablici navedeni su kriteriji relevantni za primjenu u okviru ovog rada te će svaki od materijala biti ocijenjen na temelju tih kriterija te prema intuiciji, iskustvu i preporuci mentora vodeći računa o ograničenjima u vidu dostupne opreme i resursa biti odabran materijal za izradu uzoraka za testiranje te izradu biciklističke kacige kao cjeline. Kriteriji i ocjene svakog materijala su odabrane prema [18].

Tablica 8. Svojstva materijala

Kriteriji/Materijali	PLA	PETG	ABS	TPU	PC
Printljivost	5	4	3	3	2
Otpornost na toplinu	2	3	4	3	4
Čvrstoća	5	3	4	3	4
Žilavost	2	3	4	5	5
Otpornost na UV zračenje	5	5	3	3	4
Otpornost na vlagu	5	2	4	2	2
Otpornost na puzanje	2	3	5	3	3
Prosječna ocjena	3,71	3,28	3,86	3,14	3,43

Dodatne prednosti nekih materijala:

- PLA – 100 % biorazgradivost
- TPU – apsorpcija vibracija
- PC – otpornost na udare

Vidljivo je kako su ABS i PLA najviše ocijenjeni, no zbog ograničenja u vidu dostupnog 3D printera koji nije idealan za printanje zahtjevnih materijala i kontinuirano postizanje uspješnih izradaka odlučuje se kako materijali ABS, TPU i PC neće biti razmatrani, iako bi u stvarnosti neka od svojstava tih materijala donijela velik doprinos u sigurnosti.

U daljnju razradu stoga idu materijali PLA i PETG gdje će biti uspoređeni na osnovu istih kriterija uz dodane težinske faktore kako bi se odredio bolji materijal za korištenje prilikom testiranja uzoraka, izrade prototipa i sveukupni razvoj u ovoj fazi.

Tablica 9. Usporedba PLA i PETG

Kriteriji ocjenjivanja	Težinski faktor %	Materijali			
		PLA		PETG	
		Ocjena	Ponderirana ocjena	Ocjena	Ponderirana ocjena
Printljivost	25	5	1,25	4	1
Otpornost na toplinu	15	2	0,3	3	0,45
Čvrstoća	20	5	1	3	0,6
Žilavost	25	2	0,5	3	0,75
Otpornost na vlagu	10	5	0,5	2	0,2
Otpornost na puzanje	5	2	0,1	3	0,15
Ukupna ocjena			3,65		3,15

Prema Tablici 9. vidljivo je kako je materijal PLA pogodniji za ovu primjenu u ovim uvjetima vodeći računa o dostupnoj opremi. Kriteriji prema kojima PLA ima lošija svojstva od PETG materijala su otpornost na toplinu, žilavost i otpornost na puzanje. Toplina koju biciklistička kaciga mora izdržati nije blizu kritičnoj temperaturi pri kojoj se svojstva materijala reduciraju i materijal više nije tehnički upotrebljiv, a kako kaciga nije konstantno opterećena, otpornost na puzanje također ne predstavlja problem. Jedino svojstvo od veće važnosti u kojemu PETG ima prednost je žilavost što će se pokušati nadoknaditi izborom ispune koja je pogodna upijanju vibracija te primjenom konstrukcijskih principa vezanih uz aditivnu proizvodnju kako bi se iskoristile postojeće prednosti materijala i na taj način apsorbirala energija udara.

5.3.3. Eksperimentalno ispitivanje s ciljem određivanja vrste ispune

Prije odabira ispune potrebno je upoznati se sa normiranim eksperimentalnim postavom i sigurnosnim standardima. Zadovoljavanje sigurnosnih standarda nužno je za svaki proizvod kako bi se mogao prodavati na određenom tržištu, to se posebno odnosi na zaštitnu opremu.

Kako bi aditivno proizvedena kaciga osim atraktivnog izgleda i napredne tehnologije proizvodnje bila i sigurna za korištenje nužno je zadovoljavanje niza testova sigurnosti korisnika.

Opis sigurnosnih zahtjeva i normiranih eksperimentalnih postava

Unutar Europske unije oznaka CE obavezna je za proizvode za koje postoje europske specifikacije koje zahtijevaju stavljanje oznake CE. CE certifikat osigurava da proizvod posjeduje sve potrebne sigurnosne, zdravstvene i ekološke zahtjeve [21].

Norma koju je potrebno zadovoljiti za dobivanje CE certifikata je EN 1078. Norma propisuje testove udara gdje se instrumentalni oblik glave s kacigom ispušta na ravni nakovanj te nakovanj koji imitira rubnjak brzinom 5,42 m/s i 4,57 m/s , što odgovara visini 1,5 m i 1,06 m. Pri svakom udaru, ukupna deceleracija ne smije premašiti 250 g. Gdje $g=9,81\text{m/s}^2$ i predstavlja ubrzanje slobodnog pada [22].

Osim toga, norma propisuje testiranje čvrstoće i stabilnosti sustava zadržavanja kacige. Testiranje čvrstoće provodi se inercijskim čekićem mase 10 kg ovješnim na remene koji se ispušta s visine 600 mm. Remeni se ne smiju dinamično produljiti više od 35 mm, a ukupna plastična deformacija nakon prestanka opterećenja ne smije premašiti 25 mm. Također je zahtijevana mogućnost otkopčavanja jednom rukom pri punim opterećenjem [23].

Testiranje stabilnosti također se provodi inercijskim čekićem mase 10 kg koji se ispušta s visine 250 mm na postav koji je vezan kabelom na suprotnu stranu kacige i tako uzrokuje rotaciju. Kako bi kaciga zadovoljila, smije se pomicati, ali ne smije pasti s glave korisnika.



Slika 31. Naprave za testiranje čvrstoće remena (lijevo) i stabilnosti (desno) [23]

Prema zakonu Sjedinjenih Američkih Država, sve biciklističke kacige moraju zadovoljiti CPSC 16 CFR 1203 kako bi se prodavale na njihovom tržištu. Norma također propisuje test udara instrumentalnog oblika glave na ravni nakovanj brzinom 6,2 m/s što odgovara visini 2,0 m te udar na polukupolasti nakovanj i nakovanj u obliku rubnjaka brzinom 4,8 m/s što odgovara visini 1,2 m. Pri svakom udaru, ukupna deceleracija ne smije premašiti 300 g.



Slika 32. S lijeva na desno prikazan je ravni, polukupolasti te nakovanj u obliku rubnjaka [23]

Također propisana su testiranja čvrstoće i stabilnosti sustava za zadržavanje. Testiranje čvrstoće provodi se inercijskim čekićem mase 4 kg ovješnim na remene koji se ispušta s visine 600 mm. Remeni se ne smiju produljiti više od 30 mm. Testiranje stabilnosti provodi se na način opisan prema normi EN 1078 s jedinom razlikom u masi utega koji u ovom slučaju ima masu 4 kg.

Testiranje i validacija provedena u okviru ovog rada

Zbog ograničenja u obliku nedostupnosti normiranog eksperimentalnog postava za ispitivanje sigurnosti biciklističke kacige te uređaja za mjerenje deceleracije prilikom udara, testiranje je provedeno na nešto drugačiji način, no vodeći računa o dosljednosti samog postupka kako bi se uvidjele razlike između uzoraka variranjem samo jednog parametra. Jedini način validacije u ovom slučaju, zbog već spomenute nedostupnosti opreme, bila je vizualna kontrola i usporedba s drugim uzorcima.

Za potrebe ovog rada korišten je Original Prusa i3 MK3S 3D printer sa dodatkom MMU2S za višebojno printanje koji u isto vrijeme može primiti do 5 različitih filamenata te ih izmjenjivati za vrijeme jednog printa. Opremljen je mnoštvom senzora te ventilatorom za hlađenje ispisa kako bi se postigla bolja kvaliteta površine, a maksimalna brzina printanja prelazi 200 mm/s. Radni volumen ovog printera iznosi 250x210x210 mm [24].

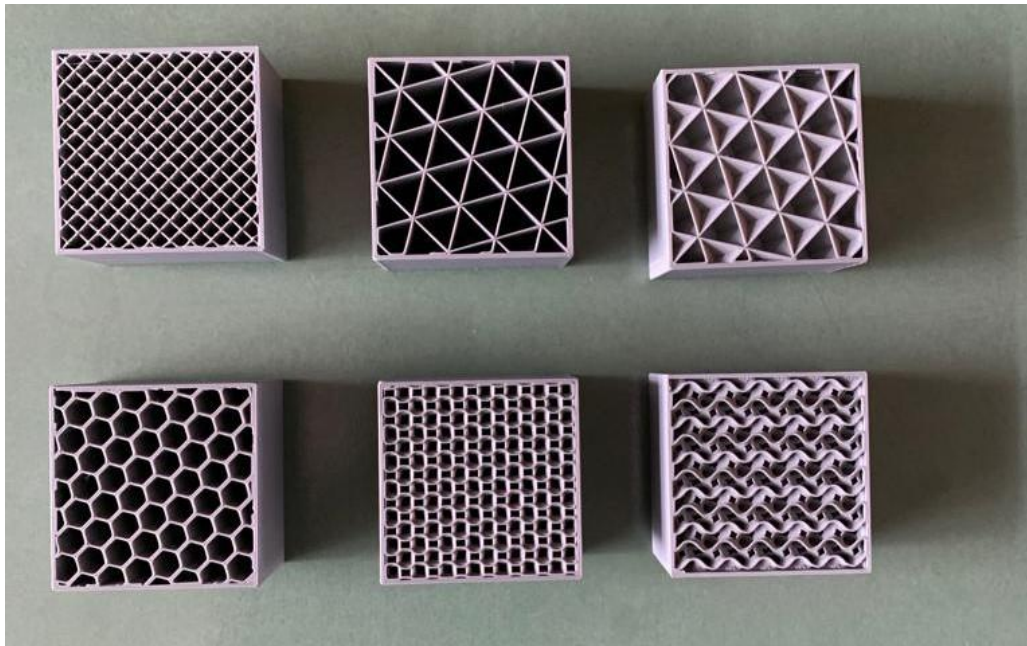
Na Slici 33. prikazan je eksperimentalni postav korišten za testiranje umetaka. Ukupna masa dijela koji udarno opterećuje uzorke iznosi 55 kg, a visina ispuštanja određena je testiranjem krenuvši od 1 m visine, no zbog potpunog uništavanja uzoraka pri toj visini, referentna visina ispuštanja utega nakon par testnih pokušaja na različitim visinama postavljena je na 0,15 m.



Slika 33. Eksperimentalni postav

Za šest odabranih vrsta ispune isprintani su modeli dimenzija 40 x 40 x 25 mm u odabranim postotcima ispune iz PLA materijala te visinom jednog sloja iznosa 0,20 mm. Prvenstveno je uspoređena razlika u masi i vremenu printanja između uzoraka istog postotka ispune za što su korišteni podatci iz PrusaSlicera [19]. Osim toga provedeno je i ispitivanje na eksperimentalnom postavu u okviru kojega se ispušta uteg određene mase sa željene visine i tako predstavlja udar nekog objekta u biciklističku kacigu.

Ispitivanje je provedeno u etapama te nakon provedenog prvog dijela ispitivanja uzoraka sa 15 % ispune, drugi dio ispitivanja sa 25 % ispune nastavljen je samo sa vrstama ispune koje su pokazale bolje rezultate. Nastavno tome, 40 % ispune je testirano na samo dvije vrste ispune za koje je procijenjeno da je potrebno dodatno usporediti rezultate.



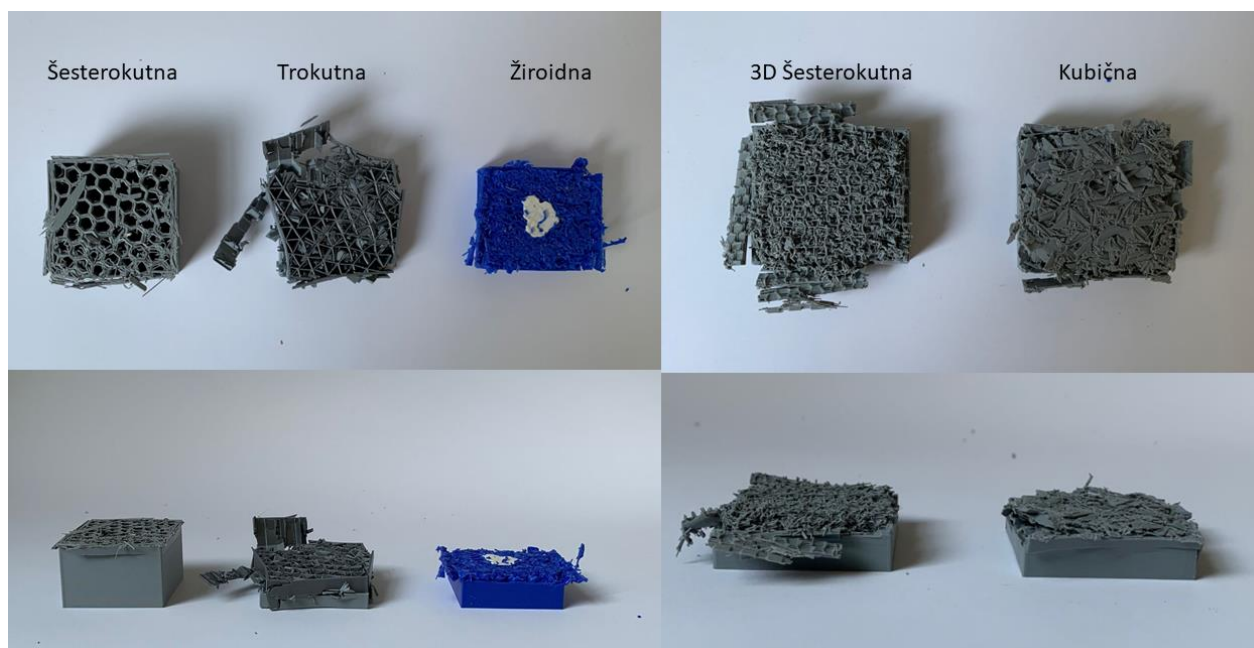
Slika 34. Uzorci za 1. testiranje

Tablica 10. Prvo testiranje

Vrsta ispune	Postotak ispune	Masa [g]	Vrijeme printanja [min]	Visina ispuštanja utega [m]
Pravokutna	15	11,76	45	0,15
Trokutna	15	11,58	48	0,15
Kubična	15	11,52	48	0,15
Šesterokutna	15	13,59	77	0,15
3D Šesterokutna	15	12,58	75	0,15
Žiroidna	15	11,26	55	0,15

Vidljivo je kako za isti postotak ispune masa i vrijeme printanja se zanemarivo razlikuju, osim u slučaju šesterokutne ispune koja ima nešto veću masu i vrijeme printanja. Nakon prvog testiranja, zaključuje se kako su ćelijske strukture u ovom slučaju značajno bolje izdržale udar, dok su 3D strukture gotovo uništene. Pretpostavka je kako su 3D strukture optimirane za višeosno opterećenje, a u ovom slučaju zbog slabe žilavosti materijala dolazi do pucanja, dok su 2D strukture optimirane za jednoosno opterećenje te su zbog toga i značajno bolje izdržale testni udar.

Rezultati testiranja



Slika 35. Uzorci nakon 1. testiranja

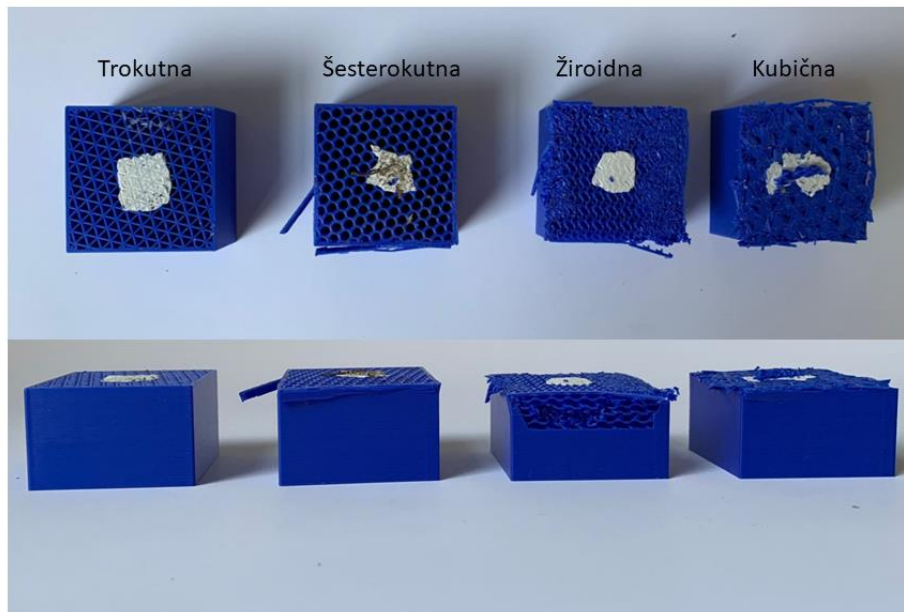
Vidljivo je kako šesterokutna ispuna uvjerljivo najbolje podnijela udar te unatoč nešto većoj masi i duljem vremenu printanja za isti postotak ispune pokazuje značajno bolja svojstva u ovoj primjeni.

Nakon analiziranja rezultata prvog ispitivanja, odlučeno je kako će se provesti još jedno dodatno ispitivanje odabranih uzoraka sa 25 % ispune s ciljem validacije rezultata prethodnog testiranja te provjere ponašanja pri većem postotku ispune. S istim ciljem, uspoređuju se šesterokutni i trokutni uzorak s 40 % ispune.

Tablica 11. Drugo testiranje

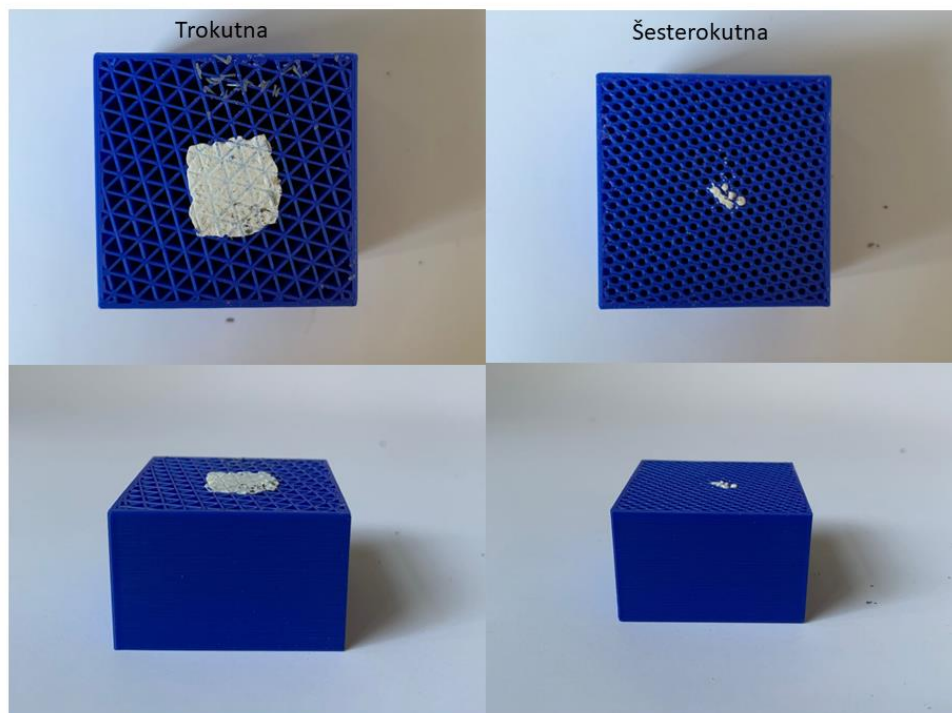
Vrsta ispune	% ispune	Masa [g]	Vrijeme printanja [min]	Visina ispuštanja utega [m]
Trokutna	25	16,16	61	0,15
Kubična	25	16,18	62	0,15
Šesterokutna	25	19,24	126	0,15
Žiroidna	25	15,48	89	0,15
Šesterokutna	40	26,73	198	0,15
Trokutna	40	23,12	84	0,15

Na Slici 36. prikazane su s lijeva na desno trokutna, šesterokutna, žiroidna i kubična ispuna.



Slika 36. Uzorci s 25 % ispune

Na Slici 37. prikazane su trokutna ispuna lijevo i šesterokutna ispuna desno.



Slika 37. Uzorci s 40 % ispune

Još jednom je potvrđeno kako za ovu primjenu 2D ispune pokazuju bolja svojstva od 3D ispuna, a šesterokutna ispuna u ovom slučaju pokazala neznatno lošiju izdržljivost od trokutne ispune pri gustoći od 25 %, no takva razlika može biti rezultat nesavršenosti adhezije između slojeva. Pri 40 % ispune oba uzorka prolaze bez oštećenja, a taj postotak ispune neće se razmatrati pri izradi rada zbog većeg iznosa mase i smanjenog protoka zraka.

Konačno odabrana vrsta ispune je šesterokutna ispuna jer je kontinuirano bolje podnosila udarna opterećenja nego druge ispune, posebno pri manjem postotku ispune kojem se teži prilikom razvoja biciklističke kacige kako bi se osigurao dovoljan protok zraka zbog hlađenja te nizak iznos mase zbog udobnosti korisnika prilikom duljeg nošenja biciklističke kacige.

5.4. Način odvođenja topline

Oba predložena parcijalna rješenja mogu efektivno odvoditi toplinu, a protok zraka direktno ovisi o veličini i rasporedu otvora kod prvog rješenja ili gustoći ispune ćelijske strukture kod drugog rješenja. Iz tog razloga uspoređuju se prednosti i nedostaci svakog od predloženih rješenja te njihov utjecaj na ostale funkcije biciklističke kacige.

Tablica 12. Parcijalna rješenja za odvođenje topline

Kriteriji	Parcijalna rješenja	
	D1 – otvori na kacigi	D2 – ćelijska struktura
Ukupni utjecaj na sigurnost	+	-
Dugotrajnost kacige	+	-
Osjećaj ugone prilikom nošenja	+	-
Postiziv protok zraka	-	+
Upijanje energije prilikom pada	-	+
Ukupna ocjena	3	2

Uspoređivanjem prednosti i nedostataka zaključuje se kako najbolje rješenje nije jedno od dva navedena, nego njihova kompozicija na način da se preuzmu prednosti od svakog rješenja. U tom slučaju s unutrašnje strane nalazi se ćelijska struktura koja poboljšava protok zraka i upijanje energije, dok s vanjske strane ljuska kacige štiti korisnika od oštih predmeta i atmosferskih utjecaja.

5.5. Odabir načina prihvata sunčanih naočala

Prikazana su tri načina prihvata sunčanih naočala, svaki od kojih nepovoljno utječe na aerodinamiku kacige u različitim iznosima, no kako za prosječnog korisnika to nije važan faktor, u ovom slučaju neće biti razmatran. Definirani su kriteriji koji imaju značajan utjecaj na zadovoljstvo korisnika i općenito funkcioniranje proizvoda. Prvi koncept predstavlja prihvaćanje sunčanih naočala s prednje strane u integrirani prostor namijenjen naočalima, drugi koncept predstavlja prihvaćanje sa stražnje strane, također u integrirani prihvat, dok treći koncept prihvaća naočale na sredini kacige pomoću integriranih kopči.

Tablica 13. Parcijalna rješenja prihvata sunčanih naočala

Kriteriji ocjenjivanja	Parcijalna rješenja						
	Težinski faktor %	E1 – prihvata s prednje strane kacige		E2 – prihvata sa stražnje strane kacige		E3 – prihvata na sredini kacige	
		Ocjena	Ponderirana ocjena	Ocjena	Ponderirana ocjena	Ocjena	Ponderirana ocjena
Lakoća pozicioniranja tijekom vožnje	35	5	1,75	2	0,7	4	1,4
Sigurnost od ispadanja	30	3	0,9	2	0,6	4	1,2
Utjecaj na protok zraka kroz kacigu	25	3	0,75	3	0,75	5	1,25
Kolizija s drugim značajkama	10	3	0,3	1	0,1	5	0,5
Ukupna ocjena			3,7		2,15		4,35

Prema Tablici 13. vidljivo je kako je parcijalno rješenje E3 koje prihvaća sunčane naočale pomoću kopči na sredini kacige najbolji izbor zbog najveće sigurnosti od ispadanja, najmanjeg utjecaja na protok zraka kroz kacigu te najmanje vjerojatnosti na moguću koliziju dodatnim značajkama koje se mogu pojaviti razvojem ove kacige u budućnosti kao što su vizir s prednje strane ili dodatan prihvat za svjetlo sa stražnje strane kacige.

5.6. Prikaz odabranih parcijalnih rješenja

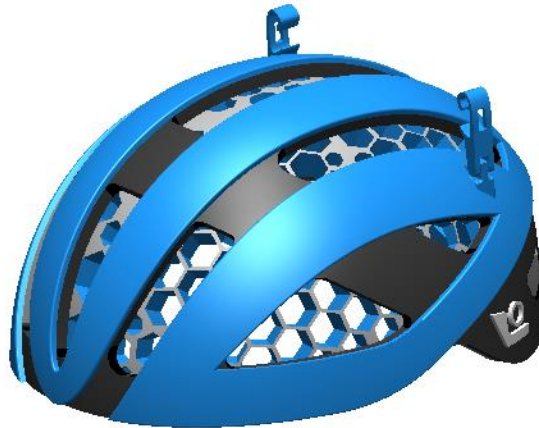
Na temelju validacije parcijalnih rješenja odabrano je najbolje rješenje za svaki traženi skup funkcija te će se kombinacijom odabranih parcijalnih rješenja definirati izgled konačnog koncepta. Konačni koncept najbolje ispunjava željene tehničke specifikacije definirane pomoću zahtjeva korisnika.

Definiranje završnog koncepta:

- Pozicioniranje kacige na korisnika osigurava se ergonomskom prilagodbom unutrašnjeg dijela kacige uz pomoć 3D skeniranja glave korisnika
- Osiguravanje kacige na glavu postiže se pomoću remena koji se kopča ispod brade
- Kaciga izrađena iz jednog dijela
- Odabrani materijal s obzirom na ograničenja prilikom izrade je PLA
- Odabrana vrsta ispune je šesterokutna ispuna
- Odvođenje zraka kroz rešetkastu strukturu i kanale posvećene protoku zraka
- Prihvat sunčanih naočala na sredini glave pomoću integriranih kopči

6. IZRADA PARAMETARSKOG CAD MODELA S MOGUĆNOŠĆU PRILAGODBE POJEDINOM KORISNIKU

Konstruirana je biciklistička kaciga s mogućnošću promjene dimenzija visine, širine i duljine ovisno o veličini glave korisnika. Konstruiranje je provedeno na način da je unutar istog dijela modelirana površina glave čijom promjenom se ostvaruje ergonomska prilagodba pojedinom korisniku te površina na osnovu koje se generira unutrašnja ispuna i vanjska ljuska kacige.



Slika 38. Model kacige

Proces ergonomske prilagodbe parametarskog CAD modela pojedinom korisniku podijeljen je u četiri dijela:

1. Skeniranje glave korisnika
2. Modeliranje aproksimirane površine glave
3. Modeliranje biciklističke kacige
4. Ergonomska prilagodba pomoću modela kacige i aproksimirane površine glave

6.1. Skeniranje glave korisnika

Prvi korak pri modeliranju personalizirane biciklističke kacige je skeniranje glave korisnika. Skeniranje je moguće sa raznim skenerima, od hobi razine do profesionalnih skenera, ovisno o zahtijevanoj točnosti. Također je moguće skeniranje s pametnim telefonom, no kvaliteta ovisi o kvaliteti senzora i u pravilu je lošije od uređaja kojima je skeniranje jedina funkcija. Za potrebe ovog rada bit će korišten Creality CR- Scan 01 3D skener s deklariranom preciznošću od 0,1 mm što je za ovu primjenu više nego dovoljno [25].



Slika 39. Creality CR - Scan 01

Skener projicira svjetlosne zrake na objekt koji je skeniran iz raznih kutova, nakon što se svjetlosne zrake odbiju od objekt, kamera ih prepoznaje te stvara računalni model skeniranog objekta. Na temelju 3D skena će se postići praćenje konture glave korisnika u aditivno proizvedenoj biciklističkoj kacigi kako bi dobili ergonomiju prilagođenu korisniku.

Skeniranje je provedeno na dva načina, skeniranje glave s kosom i skeniranje s kapom. Skeniranje s kosom ima nedostatke pri vrhu glave gdje zbog loma svjetlosti uzrokovanim vlasima kose korištenim skenerom nije moguće stvoriti cjelovit, zatvoren model, a osim toga i u slučaju uspješnog skeniranja, takav model ne bi dao točan model glave. Kako bi se dobio točniji model glave, pri sljedećem skeniranju korištena je tanka kapa za trčanje kako bi se što bolje pratio oblik glave, a što manje utjecalo na krajnju točnost dobivenog modela.



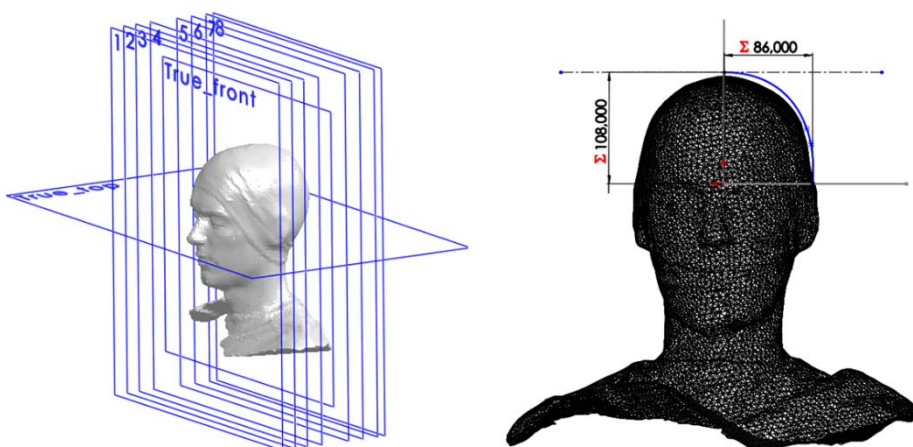
Slika 40. Usporedba skeniranja s kapom i bez kape

Nakon skeniranja, izvezena .stl datoteka ima velik broj detalja te zahtijeva velike računalne resurse prilikom modeliranja, iz toga razloga je reducirana gustoća mreže pomoću programa Meshmixer [26] nakon čega se .stl datoteka učitava u obliku površine u računalni program za modeliranje, u ovom slučaju SolidWorks [27] tvrtke Dassault Systemes unutar kojega je provedeno svo modeliranje za potrebe ovog rada.

6.2. Izrada parametarskog modela površine glave

Cilj parametarskog modela je jednostavnost i brzina mijenjanja dimenzija unutar modela što anulira potrebu za ponovnim modeliranjem u slučaju promjena modela, a u ovom slučaju omogućava personalizaciju velikom broju korisnika. Modeliranje površine glave započinje stvaranjem sklopa unutar kojega se nalaze sken glave i referentni dio (eng. *Reference part*) unutar kojega se modelira vanjska površina glave.

Kako bi se dobila aproksimacija površine glave za potrebe izrade CAD modela, definirane su ključne ravnine presjeka i krivulje pomoću kojih se konstruira aproksimativan model glave za pojedinog korisnika kao što je vidljivo na Slici 41. Na svakoj referentnoj ravnini na krivulje je dodan globalni parametar za najveću širinu i najveću visinu. U slučaju da sken glave značajnije odstupa od parametarski opisanih veličina, moguće je ručno pomicanje točaka krivulje kako bi se osiguralo bolje praćenje konture glave. Zbog pojednostavljenja, unutar ovog rada pretpostavlja se kako je glava svakog korisnika simetrična te se modeliranjem jedne strane glave i zrcaljenjem dobivene površine dobiva ukupna površina glave korisnika.

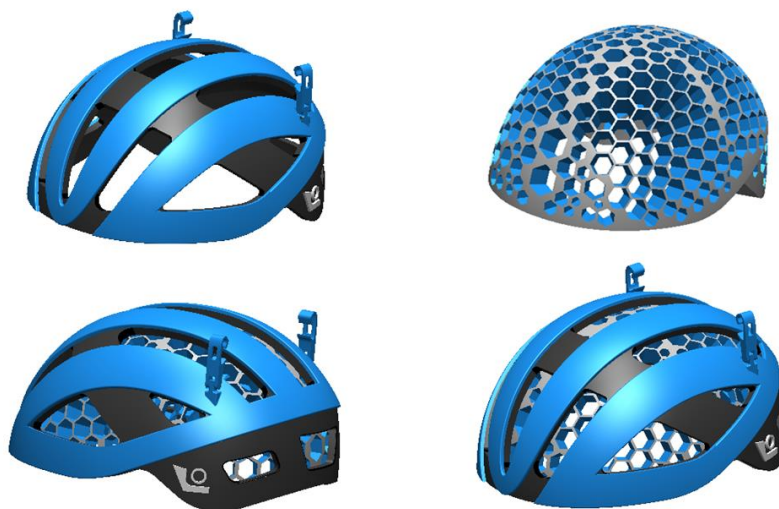


Slika 41. Referentne površine pri modeliranju

6.3. Izrada parametarskog modela biciklističke kacige

Nakon modeliranja površine glave korisnika potrebno je modelirati biciklističku kacigu unutar istog referentnog dijela prema određenim parcijalnim rješenjima. Prema tome, kaciga je izrađena iz jednog dijela s ciljem brže izrade i smanjenog korištenja potpornog materijala te boljeg povezivanja dijelova kacige u cjelinu. Iako je kaciga izrađena od jednog dijela, validacijom parcijalnih rješenja odlučeno je kako se kaciga konstruira sa dvije funkcionalne cjeline. Prva od njih je vanjska ljuska koja osigurava zaštitu od oštih predmeta, atmosferskih utjecaja i omogućava ulaz zraka u unutrašnjost kacige.

Unutrašnji dio kacige druga je funkcionalna cjelina s primarnim ciljem apsorpcije energije prilikom udara, a osim toga poboljšava protok zraka preko glave korisnika te pomaže pri odvođenju topline. Unutrašnji dio, na temelju saznanja dobivenih prilikom testiranja uzoraka, izveden je kao šesterokutna ispuna. Posebna važnost unutrašnjeg dijela unutar ove kacige je praćenje konture glave korisnika s njene unutrašnje strane. Dodatno, omogućen je prihvat sunčanih naočala pomoću integriranih kopči na gornjem dijelu kacige.

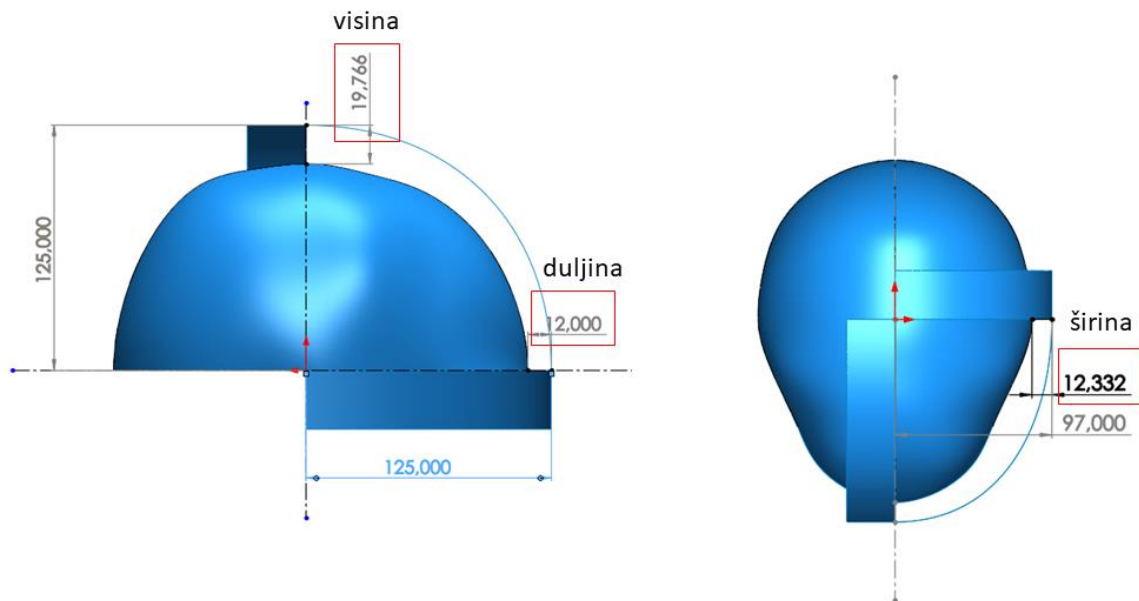


Slika 42. Prikaz funkcionalnih dijelova kacige

Početna površina prilikom izrade modela kacige ima pridružene parametre duljine, širine i visine te je po potrebi njihovom promjenom je moguće promijeniti dimenzije kacige ovisno o veličini glave korisnika.

Prije početka generiranja potrebno je provjeriti zadovoljava li vanjska površina prema kojoj se stvara model kacige minimalnu određenu udaljenost od modelirane površine glave kako bi se osigurala minimalna zadovoljavajuća širina unutrašnje ispune namijenjene apsorpciji energije.

Zahtijevana minimalna širina ispune je u rasponu od 10 do 15 mm po duljini i širini kacige, a po visini u rasponu od 15 do 20 mm.



Slika 43. Provjera minimalne debljine ispune

Nakon modeliranja kacige, posljednji korak kojim se postiže ergonomska prilagodba je izrezivanje viška unutrašnje ispune koja je u koliziji s modeliranom površinom glave korisnika što se postiže opcijom izrezivanja pomoću površine.

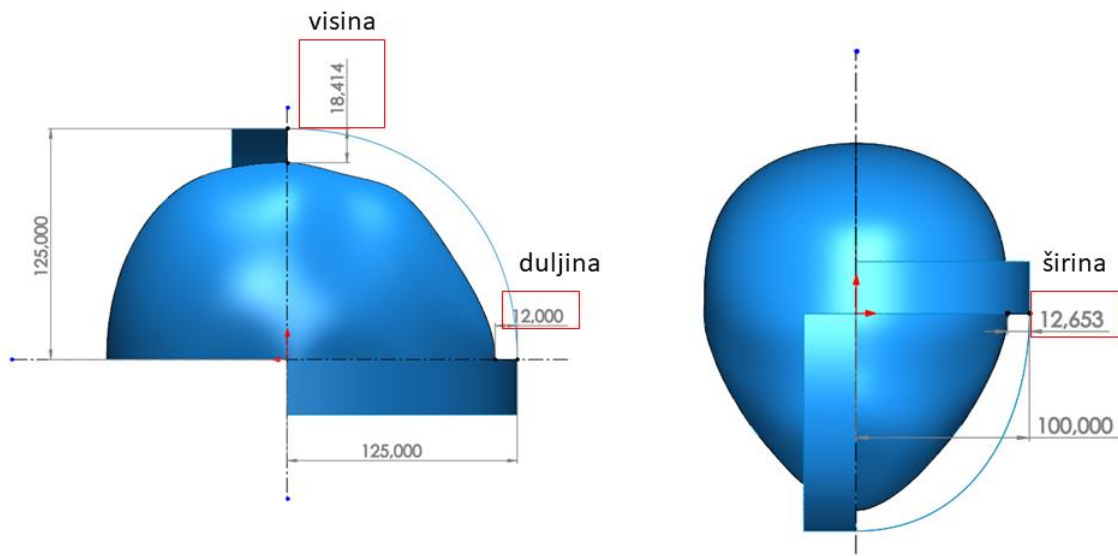


Slika 44. Stvaranje ergonomske prilagodbe

6.4. Prilagodba drugom korisniku

Kako bi se osigurala ergonomska prilagodba drugom korisniku, prvenstveno je potrebno napraviti 3D sken glave koji se zatim u obliku površine učitava u sklop zajedno sa referentnim dijelom unutar kojega je modelirana površina glave prethodnog korisnika te cijela biciklistička kaciga. Nakon toga je potrebno promijeniti karakteristične dimenzije i po potrebi raspored točaka koje opisuju ravninu na svakoj referentnoj površini.

Vrlo važan sljedeći korak je provjera minimalne udaljenosti između površine kacige i površine glave te po potrebi korigirati vanjske dimenzije kacige. U ovom slučaju početna širina kacige nije zadovoljavala minimalan iznos ispune te je bilo potrebno povećati ukupnu širinu kacige.



Slika 45. Provjera minimalne debljine ispune kod drugog korisnika

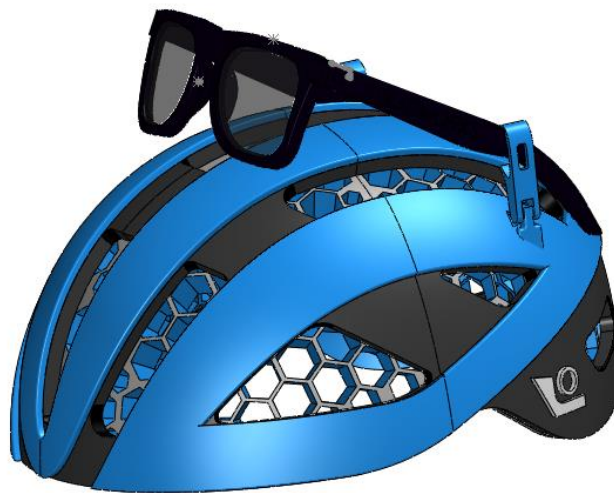
Nakon što je potvrđen uvjet minimalne debljine unutrašnje ispune, zadnji korak je unutar referentnog dijela izrezivanje dijela unutrašnje ispune pomoću modelirane površine glave.



Slika 46. Ergonomska prilagodba drugom korisniku

6.5. Prihvat sunčanih naočala i personalizacija kacige

Aditivna proizvodnja omogućava izradu posebnih zahtjeva i potreba korisnika bez značajnog povećavanja cijene i kompleksnosti proizvodnje te je zbog toga odlučeno modelirati integriran prihvat sunčanih naočala na vanjsku površinu kacige, a sukladno parcijalnom rješenju E3 odabran način prijvata je pomoću integriranih kopči na gornjem dijelu kacige. Izgled kopči i prihvat naočala prikazan je na Slici 47.



Slika 47. Prihvat sunčanih naočala

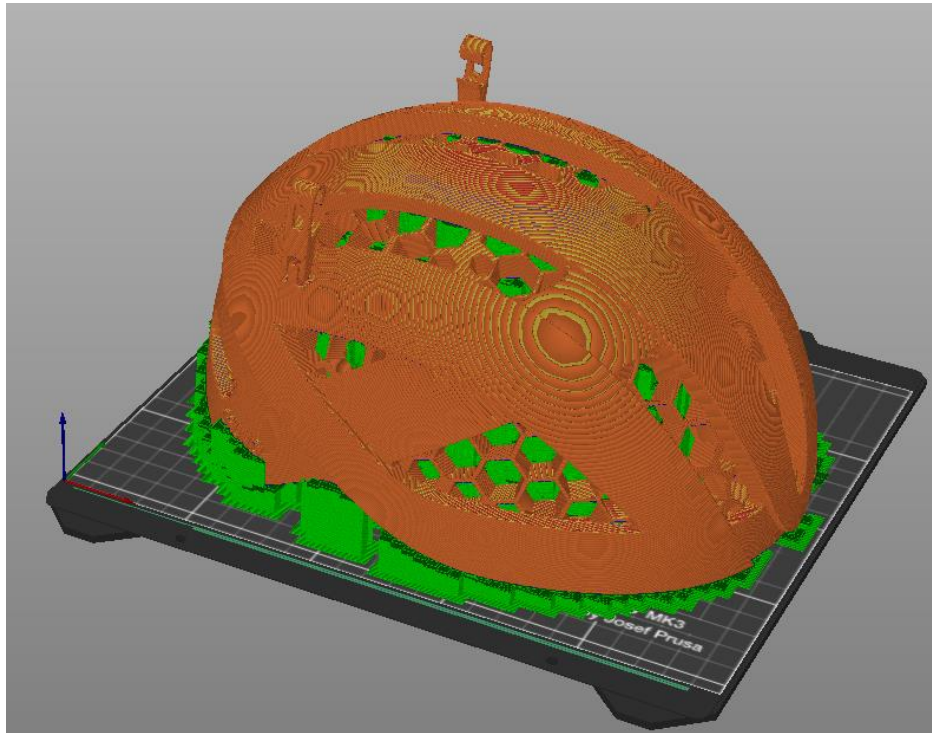
Osim prijvata sunčanih naočala, omogućena je i personalizacija na predviđenim mjestima s obje strane kacige.



Slika 48. Personalizacija biciklističke kacige

6.6. Priprema završnog modela za izradu

Nakon završetka konstruiranja i ergonomске prilagodbe korisniku, sljedeći korak je izrada biciklističke kacige. Kako bi se računalni model iz SolidWorksa pretvorio u model kojeg 3D printer može učitati i izraditi koristi se PrusaSlicer unutar kojega se podešavaju parametri cijelog procesa izrade.



Slika 49. Model unutar PrusaSlicera

Vrijeme i količina korištenog materijala prilikom izrade izravno su povezani s postavkama printanja, a ukupno trajanje izrade ovog prototipa bilo bi 53 h od kojega gotovo pola je utrošeno na izradu potpornog materijala. Navedeno vrijeme moguće je smanjiti podešavanjem postavki printanja.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je koncipirana i konstruirana biciklistička kaciga ergonomski prilagođena pojedinom korisniku te namijenjena izradi pomoću aditivne proizvodnje. Cilj rada bio je istražiti mogućnosti i prednosti aditivne proizvodnje te posebno FDM tehnologije u konstrukcijskom oblikovanju prilikom razvoja proizvoda te na temelju toga koncipirati moguća rješenja. Pomoću funkcijske dekompozicije biciklistička kaciga rastavlja se na blokove funkcija povezanih u smislene cjeline za koje se zatim pronalaze parcijalna rješenja. Primjenom mapiranja funkcija na svaki blok funkcija dolazi se do prijedloga rješenja temeljenog na prednostima aditivne proizvodnje.

Sljedeći korak bila je implementacija prijedloga dobivenih mapiranjem funkcija na parcijalna rješenja za svaki blok funkcija. Unutar ovog rada proveden je nešto drugačiji pristup razvoju proizvoda te je umjesto modeliranja nekoliko različitih koncepata sa minimalnim razlikama fokus usmjeren isključivo na definiranje i validaciju parcijalnih rješenja za pojedine blokove funkcija. Parcijalna rješenja su zatim odabrana raznim metodama ili skupinama metoda koje najbolje uspoređuju razlike između rješenja, a gdje je bilo moguće, provedeno je i eksperimentalno ispitivanje.

Završni koncept rezultat je implementacije najbolje ocijenjenih parcijalnih rješenja u jedan sklop koji najbolje ispunjava tehničke specifikacije dobivene na temelju korisničkih zahtjeva, vodeći računa o ograničenjima u obliku dostupne opreme i drugih resursa. Prilikom izrade završnog koncepta prvi je korak skeniranje glave korisnika na temelju čega se modelira površina koja prati konturu glave. Oko te površine unutar istog dijela modelira se biciklistička kaciga, a na kraju modeliranja dobivena površina glave služi kao alat za izrezivanje viška unutrašnje ispune i tako dobivanje ergonomske prilagodbe pojedinom korisniku. U slučaju potrebe ergonomske prilagodbe drugom korisniku, učitavanjem skeniranog modela te promjenom parametara i potrebnih točaka dobiva se površina glave drugog korisnika.

Unatoč tome što aditivna proizvodnja omogućava izradu kompleksnih geometrija bez značajnog poskupljenja i otežavanja izrade, zbog mnogih ograničenja i smanjene dostupnosti prosječnom korisniku još uvijek nije spremna za masovnu uporabu, a implementacija prednosti aditivne proizvodnje u izabranim primjenama svakako je korak u pravom smjeru. Rad je pokazao kako je moguće primjenom FDM tehnologije napraviti kacigu prilagođenu pojedinom korisniku koja se temelji na parametarskom CAD modelu te teoretsku mogućnost samostalne izrade kacige.

Problem se pojavljuje kod testiranja i certifikacije sigurnosti kacige s obzirom da je svaka kaciga drugačija, a dodatan problem je nemogućnost provjere kvalitete izrade i provedba naknadne obrade za što je potrebno naprednije znanje o aditivnoj proizvodnji nego što ga ima prosječan korisnik. Upravo zbog toga, kako bi u budućnosti bila moguća samostalna izrada vlastite kacige na temelju unaprijed definiranog modela, a koja je prilagođena pojedinom korisniku bit će potrebno uspostaviti novi sustav certifikacije prilagođen personalizaciji proizvoda i lokalnoj proizvodnji [28].

8. LITERATURA

- [1] O. Diegel, A. Nordin i D. Motte, *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*, Springer, 2020.
- [2] »HEXR,« [Mrežno]. Available: <https://hexr.com/> . [Pokušaj pristupa 20 01 2023].
- [3] »KUPOL,« [Mrežno]. Available: <https://www.kupol.ca/> . [Pokušaj pristupa 21 1 2023].
- [4] »Kickstarter,« [Mrežno]. Available: <https://www.kickstarter.com/projects/kupol/kupol-reinventing-the-helmet-with-3d-printing/description> . [Pokušaj pristupa 22 1 2023].
- [5] »Kollide,« [Mrežno]. Available: <https://www.kollide.ca> . [Pokušaj pristupa 22 01 2023].
- [6] »Montreal News,« [Mrežno]. Available: <https://montreal.ctvnews.ca/nfl-awards-a-montreal-start-up-550-000-to-work-on-its-design-for-a-safer-football-helmet-1.5637705> . [Pokušaj pristupa 23 1 2023].
- [7] »KAV Sports,« [Mrežno]. Available: <https://kavsports.com/> . [Pokušaj pristupa 23 1 2023].
- [8] »Design Boom,« nFrontier, [Mrežno]. Available: <https://www.designboom.com/design/smart-bike-helmet-3d-printed-nylon-shell-high-tech-nfrontier-08-14-2022/> . [Pokušaj pristupa 24 1 2023].
- [9] »3D Natives,« [Mrežno]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-bicycle-helmet-voronoi-190820204/#!> . [Pokušaj pristupa 15 1 2023].
- [10] »YouTube,« [Mrežno]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=6_4dILJtUIE . [Pokušaj pristupa 24 1 2023].
- [11] »Amazon,« [Mrežno]. Available: https://www.amazon.com/Schwinn-Lightweight-Microshell-Featuring-Adjustment/product-reviews/B00012M5MS/ref=cm_cr_arp_d_paging_btm_prev_1?ie=UTF8&reviewerType=all_reviews&pageNumber=1 . [Pokušaj pristupa 25 1 2023].
- [12] K. Ulrich, S. Eppinger i M. Yang, *Product Design and Development*, McGraw Hill, 2020.
- [13] F. Valjak i N. Bojčetić, »Functional modelling through Function Class approach: A case from DfAM domain,« 2022.
- [14] F. Valjak, »Mapping of product functions and design principles for additive manufacturing,« Zagreb, 2022..

- [15] »Dreamstime,« [Mrežno]. Available: <https://www.dreamstime.com/hand-drawn-human-head-face-profile-top-views-flat-vector-isolated-white-background-drawings-can-be-used-image121301514>. [Pokušaj pristupa 20 2 2023].
- [16] »AliExpress,« [Mrežno]. Available: https://www.aliexpress.com/item/1005004291195954.html?spm=a2g0o.productlist.main.39.46b34a46u9r1VT&algo_pvid=e5e7c26a-6c60-4a52-bb70-9766ef3d6df4&algo_exp_id=e5e7c26a-6c60-4a52-bb70-9766ef3d6df4-19&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000028649573479%22%7D&pd. [Pokušaj pristupa 2 2 2023].
- [17] »Ergodyne,« Skullerz Safety Helmets, [Mrežno]. Available: <https://www.ergodyne.com/skullerz-8992-safety-helmet-replacement-chin-strap> . [Pokušaj pristupa 2 2 2023].
- [18] »Make Use Of,« [Mrežno]. Available: <https://www.makeuseof.com/what-are-the-3d-printer-filament-types/> . [Pokušaj pristupa 3 2 2023].
- [19] »Prusa3D,« [Mrežno]. Available: https://help.prusa3d.com/category/prusaslicer_204. [Pokušaj pristupa 15 2 2023].
- [20] »Voronator,« [Mrežno]. Available: <https://www.voronator.com/>. [Pokušaj pristupa 15 2 2023].
- [21] »Satra,« [Mrežno]. Available: <https://www.satra.com/spotlight/article.php?id=291> . [Pokušaj pristupa 4 2 2023].
- [22] T. S. Z. D. Connor, »Heads,« 1 7 2016. [Mrežno]. Available: http://www.heads-itn.eu/pdfs/Helmets_Standard_Evaluation.pdf . [Pokušaj pristupa 5 2 2023].
- [23] »Europa EU,« [Mrežno]. Available: https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/labels-markings/ce-marking/index_en.htm . [Pokušaj pristupa 5 2 2023].
- [24] »Prusa 3D,« [Mrežno]. Available: <https://www.prusa3d.com/product/original-prusa-i3-mk3s-kit-9/> . [Pokušaj pristupa 1 2 2023].
- [25] »Creality,« Creality, [Mrežno]. Available: [25.] https://store.creality.com/products/cr-scan-01-3d-scanner-upgraded-combo?official-website-top=&spm=..product_844d79f1-cbf3-4193-9ef9-d9bba3dd3975.products_display_1.1. [Pokušaj pristupa 12 2 2023].
- [26] *Meshmixer*, Autodesk.
- [27] *SolidWorks*, Dassault Systemes.
- [28] H. Lipson i M. Kurman, The new word of 3D printing, John Wiley & Sons, 2013.