



doktorska disertacija

**Integrisani pristup fabrikaciji složenih
arhitektonskih formi od penastih
polistirena primenom industrijskih robota**

Kandidat:

Marko Jovanović

Mentori:

Prof. dr Bojan Teravčević

Prof. dr Mirko Raković

Novi Sad, 2018.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ • ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Redni broj, RBR :		
Identifikacioni broj, IBR :		
Tip dokumentacije, TD :	Monografska dokumentacija	
Tip zapisa, TZ :	Tekstualni štampani materijal	
Vrsta rada VR (dipl., mag., dokt.),	Doktorska disertacija	
Ime i prezime autora, AU :	Marko Jovanović	
Mentori (titula, ime, prezime, zvanje), MN :	Dr Bojan Tepavčević, vanredni profesor Dr Mirko Raković, vanredni profesor	
Naslov rada, NR :	Integrirani pristup fabrikaciji složenih arhitektonskih formi od penastih polistirena primenom industrijskih robota	
Jezik publikacije, JP :	Srpski (latinica)	
Jezik izvoda, Ji :	Srpski (latinica), Engleski	
Zemlja publikovanja, ZP :	Republika Srbija	
Uže geografsko područje, UGP :	AP Vojvodina, Novi Sad	
Godina, GO :	2018	
Izdavač, IZ :	Autorski reprint	
Mesto i adresa, MA :	Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad	
Fizički opis rada, FO :	7 poglavlja / 84 strane / 50 slika / 13 tabela / 78 referenci	
Naučna oblast, NO :	Arhitektura	
Naučna disciplina, ND :	Teorije i interpretacije geometrijskog prostora u arhitekturi i urbanizmu	
Predmetna odrednica, ključne reči, PO :	integrirani pristup, robotska fabrikacija, zagrejana žica, penasti polistiren, algoritam	
UDK :		
Čuva se, ČU :	Biblioteka Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu	
Važna napomena, VN :		
Izvod, IZ :	Integrisanjem više različitih oblasti - arhitekture, poznavanja svojstava materijala, fabrikacije, zajedno sa primenom digitalnih alata, postalo je moguće lakše i efikasnije fabrikovati složene arhitektonske forme. Primena penastog polistirena u arhitektonskoj fabrikaciji je pogodna zbog dobrih svojstava polistirena, prevashodno njegove lake obradivosti. Upotrebom zagrejane žice za obradu materijala i industrijskog robota kao mašine za fabrikaciju, u ovom istraživanju su pokazana tri projektantska scenarija, koja predlažu automatizovan proces fabrikovanja složenih arhitektonskih formi različitih veličina od penastog polistirena i primenom različitih strategija za fabrikaciju. Rezultati su predstavljeni u vidu fabrikovanih prototipova.	
Datum prihvatanja teme od strane Senata, DP :		
Datum odbrane, DO :		
Članovi komisije, KO :		
Predsednik:	dr Vesna Stojaković, vanredni profesor	Potpis mentora
Član:	dr Branislav Borovac, redovni profesor	
Član:	dr Radovan Štulić, redovni profesor	
Član:	dr Đorđe Stojanović, docent	
Mentor:	dr Bojan Tepavčević, vanredni profesor	
Mentor:	dr Mirko Raković, docent	



UNIVERSITY OF NOVI SAD • FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :		
Identification number, INO :		
Document type, DT :	Monographic publication	
Type of record, TR :	Textual printed document	
Contents code, CC :	PhD thesis	
Author, AU :	Marko Jovanović	
Mentors, MN :	PhD Bojan Tepavčević, Associate Professor PhD Mirko Raković, Associate Professor	
Title, TI :	Integrated Fabrication Approach of Complex, Architectural Forms Made from Foamed Polystyrene Using Industrial Robots	
Language of text, LT :	Serbian (Latin)	
Language of abstract, LA :	Serbian (Latin), English	
Country of publication, CP :	Republic of Serbia	
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina, Novi Sad	
Publication year, PY :	2018	
Publisher, PB :	Author's reprint	
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad	
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures /graphs/appendixes):	7 poglavlja / 84 strane / 50 slika / 13 tabela / 78 referenci	
Scientific field, SF :	Architecture	
Scientific discipline, SD :	Theories and interpretation of geometric space in architecture and urbanism	
Subject, Key words, SKW :	Integrated approach, robotic fabrication, hot-wire, foamed polystyrene, algorithm	
UC :		
Holding data, HD :	The Library of Faculty of Technical Sciences in Novi Sad	
Note, N :		
Abstract, AB :	The integration of multiple different fields - architecture, material properties, fabrication, combined with the application of digital tools has made the fabrication of complex architectural forms easy and efficient. The application of foamed polystyrene in architectural fabrication is suitable due to the good properties of foamed polystyrene, especially the ease of milling or cutting the material. In this research, the application of a hot-wire as a tool and an industrial robot as a fabrication machine has enabled three different design scenarios, which suggest an automated fabrication process for complex architectural forms of different sizes, made from polystyrene and by using different fabrication strategies. The results are presented in a form of fabricated prototypes.	
Accepted on Senate on, AS :		
Defended, DE :		
Thesis Defend Board, DB :		
President:	PhD Vesna Stojaković, Associate Professor	Mentors' signature
Member:	PhD Branislav Borovac, Full Professor	
Member:	PhD Radovan Štulić, Full Professor	
Member:	PhD Đorđe Stojanović, Assistant Professor	
Mentor:	PhD Bojan Tepavčević, Associate Professor	
Mentor:	PhD Mirko Raković, Assistant Professor	

Zahvalnica

Ova doktorska disertacija urađena je na Fakultetu tehničkih nauka, na Katedri za teorije i interpretacije prostora u arhitekturi i urbanizmu pri Departmanu za arhitekturu i urbanizam u Novom Sadu. Veliku zahvalnost dugujem svojim mentorima, prof. dr Bojanu Tepavčeviću i prof. dr Mirku Rakoviću, na dragocenim smernicama, komentarima, konstruktivnim idejama kao i ogromnoj podršci i nesebičnoj pomoći pruženoj prilikom celokupnog istraživanja i izrade ove doktorske disertacije.

Na uspešnoj saradnji, diskusijama, sugestijama, kao i na pozitivnoj radnoj atmosferi tokom istraživanja zahvaljujem se kolegama iz Centra za digitalni dizajn pri Departmanu za arhitekturu i urbanizam u Novom Sadu, kolegama Jovici Tasevskom i Milutinu Nikoliću sa Katedre za mehatroniku, robotiku i automatizaciju na strpljenju prilikom rada sa industrijskim robotima, kao i kolegi Slobodanu Tašinu sa Katedre za mehaniku fluida i hidropneumatske sisteme na savetima za proračun debljine reza.

Zahvaljujem se svim članovima komisije na korisnim sugestijama prilikom izrade ove doktorske disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici i prijateljima za ogromnu podršku koju su mi pružili.

Novi Sad, februar 2018. Marko Jovanović

Sadržaj

Sažetak	I
Summary	II
1. Uvod.....	1
1.1. Potreba za istraživanjem	2
1.2. Predmet i problem istraživanja	4
1.3. Cilj istraživanja	6
1.4. Metode primenjene u istraživanju.....	6
1.5. Pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti.....	8
1.6. Očekivani rezultati istraživanja i mogućnost njihove primene	14
1.7. Struktura doktorske disertacije.....	15
2. Integrisani pristup fabrikaciji.....	17
2.1. Projektantski scenario 1 - Integrisani pristup fabrikaciji uz minimalni utrošak materijala i efikasnost uklapanja elemenata.....	18
2.1.1. Projektantski kriterijumi i proces projektovanja	18
2.1.1.1. Generisanje forme	18
2.1.1.2. Panelizacija površi na elemente	19
2.1.1.3. Numeracija i proces pakovanja elemenata.....	23
2.1.1.4. Generisanje putanje sečenja	25
2.1.2. Proces fabrikacije.....	28
2.1.2.1. Program napisan u Rapidu	28
2.1.2.2. Dopuna programa u RAPIDU - C# skripta za generisanje targeta	29
2.1.2.3. Realizacija složene forme	30
2.2. Projektantski scenario 2 - Integrisani pristup fabrikaciji sa nestandardnom veličinom i oblikom elementa	34
2.2.1. Projektantski kriterijumi i proces dizajna	34
2.2.1.1. Generisanje forme	34
2.2.1.2. Panelizacija površi na elemente	35
2.2.1.3. Generisanje putanje sečenja	39
2.2.2. Proces fabrikacije.....	42

2.2.2.1. Generisanje scene sa dva industrijska robota.....	42
2.2.2.2. Generisanje programa za fabrikaciju	42
2.2.2.3. Realizacija složene forme	43
2.3. Projektantski scenario 3 - Integrisani pristup fabrikaciji sa krivolinijskim sečenjem elemenata	47
2.3.1. Projektantski kriterijumi i proces dizajna	47
2.3.1.1. Generisanje forme	48
2.3.1.2. Podela površi na elemente.....	51
2.3.1.3. Generisanje putanje sečenja	54
2.3.2. Proces fabrikacije	58
2.3.2.1. Prva putanja sečenja.....	58
2.3.2.2. Druga putanja sečenja	59
2.3.2.3. Realizacija složene forme	60
3. Svojstva materijala i alata prilikom fabrikacije	65
3.1. Penasti polistiren.....	65
3.2. Zagrejana metalna žica.....	66
3.3. Debljina reza	67
4. Zaključak i buduća istraživanja.....	77
5. Spisak ilustracija	82
6. Reference	83
Prilog A.....	88

Sažetak

Integrisanje više različitih oblasti (arhitekture, poznavanja svojstava materijala, fabrikacije, građevinarstva, instalacija i sličnih oblasti) u cilju fabrikovanja arhitektonskih formi je oduvek postojalo. Takav integrisani pristup fabrikaciji podrazumeva rešavanje projektantskih ograničenja jedne oblasti (u vidu crteža, modela, proračunatih brojevnih vrednosti) pre primene njenih rezultata u drugoj oblasti. Skup svih projektantskih ograničenja, zajedno sa problemom koji treba da se reši u jednom integrisanom pristupu predstavlja projektantski scenario. Ovakav pristup rešavanja problema različitih projektantskih scenarija je spor. Primenom digitalnih alata, integrisani pristup fabrikaciji je postao efikasniji i lakši. Digitalni alati omogućavaju da se projektantska ograničenja datih oblasti (kao što su analiza performansi, strukturalna stabilnost, osunčanost, minimalan utrošak materijala, kvalitet završne obrade površine elemenata konstrukcije i slično) uvedu kao parametri u ranoj fazi projektovanja, a zatim primenom računara uvrste u proces bržeg rešavanja problema određenog projektantskog scenarija (dobijanja finalne arhitektonske forme). Cilj ovog istraživanja je da se generiše proces integrisanog pristupa fabrikaciji primenom digitalnih alata (koji uključuje oblasti projektovanja, svojstava materijala i fabrikacije) kako bi se rešili problemi određenih projektantskih scenarija prilikom fabrikovanja složenih arhitektonskih formi od penastog polistirena.

Penasti polistiren ima takva svojstva, koja pružaju prednosti prilikom njegove primene u arhitekturi. Penasti polistiren je dobar termoizolator objekata. Materijal se lako oblikuje i obrađuje, što je primetno prilikom njegove upotrebe kao kalupa. U određenim slučajevima, moguće je koristiti polistiren i kao oplatu. Obrada penastog polistirena za potrebe fabrikovanja složenih arhitektonskih formi (izvan standardne primene kao ploča na spoljašnjoj strani objekta) se obično vrši primenom alata, koji uklanjaju višak materijala, kao što su glodalo ili zagrejana žica. U zavisnosti od mašine, koja nosi alat, strategije fabrikovanja elemenata su različite. U poslednjoj deceniji, industrijski robot se sve više koristi, zbog većih mogućnosti koje ovakav vid fabrikovanja nudi. Kao najbitnije mogućnosti ističu se mogućnost promene alata za fabrikaciju kao i pravljenje različitih vrsta formi, koje se ne mogu postići standardnim alatima i mašinama. Iz tih razloga je industrijski robot izabran kao mašina za fabrikovanje složenih arhitektonskih formi od penastog polistirena primenom zagrejanje žice.

Upotreba industrijskih robota u integrisanom pristupu fabrikaciji složenih arhitektonskih formi od penastog polistirena primenom zagrejanje žice je aktuelna oblast istraživanja. Kako bi se ispitalo dati pristup, prvo su definisana određena projektantska ograničenja kao što su: minimalni utrošak materijala i efikasno uklapanje, fabrikovanje struktura većih od radnog prostora jednog robota, kvalitet završne obrade površine elementa. Na osnovu datih ograničenja su definisani projektantski scenariji, koji su testirani kroz fabrikovane prototipove. Za te potrebe su korišćena dva ABB IRB 140 industrijska robota, kao i ekstrudirani i ekspanzirani polistiren. Svaki prototip je fabrikovan od zasebnih elemenata, panela, koji su kasnije spojeni u jednu završenu strukturu.

Ključne reči: integrisani pristup fabrikaciji, robotska fabrikacija, zagrejana žica, penasti polistiren, podela složenih arhitektonskih formi

Summary

Such an integrated fabrication approach entails the resolution of one field's design restrictions (in form of drawings, models, calculated numerical values) before applying the results into another field. The set of design restriction along with the problem that needs to be resolved in one integrated approach represents a design scenario. This approach type for resolving different design scenario problems is slow. With the utilization of digital tools, the integrated fabrication approach has become more efficient and easier. The digital tools enable the design restrictions of the desired fields (like performance analysis, structural stability, insulation, minimal material usage, the quality of the cut surface texture and similar design restrictions) to be used as parameters in the early design stages and then, by computer application, be implemented in the process of solving the design scenario problems quickly (generating the final architectural form). The goal of this research is to generate the integrated fabrication approach by using digital tools (which include the fields of design, material properties and fabrication) in order to solve the design scenario problems in the process of fabricating complex architectural forms out of foamed polystyrene.

Foamed polystyrene has such properties, which provide advantages for its application into architecture. Foamed polystyrene is a good thermal insulator for buildings. The material is easily shaped and processed which is noticeable during its application as a mold. In certain cases, it is possible to use the polystyrene as falsework as well. The foamed polystyrene processing for the purposes of fabricating complex architectural forms (outside of its standard application as planar sheets on the outer side of the building) is usually performed by tools, which remove excess material, such as milling tools and hot wires. Depending on the machine that holds the tool, the fabrication strategies differ. In the last decade, an industrial robot is increasingly being implemented, due to its larger capabilities. The most important abilities are the ability to change the fabrication tool as well as the fabrication of a myriad of different forms, which cannot be achieved by means of standard tools and machines. For these reasons, an industrial robot is chosen as fabrication machine for fabricating complex architectural forms out of foamed polystyrene by using a hotwire cutter.

The industrial robot application in the integrated approach for fabricating complex architectural forms out of foamed polystyrene with the means of a hotwire cutter is a current research topic. In order to explore the suggested approach, first a set of design restrictions are defined such as: minimal material usage and efficient assembly connection, fabrication of structures larger than the working area of a single robot, the quality of the cut surface texture. Based on these restrictions, design scenarios are defined, which are tested through fabricated prototypes. For these purposes, two ABB IRB 140 industrial robots are used, as well as extruded and expanded polystyrene. Each prototype is fabricated out of separate elements, panels, which are later on assembled in a finished structure.

Key words: integrated fabrication approach, robotic fabrication, hotwire cutter, foamed polystyrene, tessellation of complex architectural forms

1. Uvod

Materijali i njihova svojstva su oduvek imali uticaja na arhitektonsku formu. Primena materijala poput kamena ili opeke, uticala je na razvoj samonosećih arhitektonskih formi - svodova i kupola, dok je primena drveta i čelika, uticala na pojavu vitkih i samim tim elegantnijih arhitektonskih formi. U XX veku je građenje betonom uticalo na pojavu složenih formi, koje se ne mogu jednostavno izvesti iz tradicionalnih geometrijskih površi. Pod pojmom složene arhitektonske forme se podrazumevaju površi, skupovi površi ili tela, koja čine spoljašnju opnu ili deo opne arhitektonskog objekta čije izvođenje podrazumeva složen proces rada (Pottmann et al, 2015). TWA terminal na aerodromu u Njujorku je primer takve forme (slika 1) gde je arhitekta Ero Sarinen (*Eero Saarinen*) generisao zakrivljenu formu, koja nije tradicionalna geometrijska površ.



Slika 1 - Prikaz primene betona za generisanje složene arhitektonske forme - TWA Terminal, Njujork, Ero Sarinen (preuzeto u septembru 2017sa www.cntraveler.com/stories/2016-08-03/twa-terminal-hotel-construction-begins-at-jfk)

Složene arhitektonske forme se nisu u velikoj meri primenjivale u arhitekturi, jer je njihova izrada bila spora i složena. Međutim, primetna je veza između odabira željene forme i primene odgovarajućeg materijala i obrnuto. Potreba da se izvrši adekvatan odabir, zahteva integraciju različitih oblasti poput arhitekture, svojstava materijala, konstrukcije, fabrikacije, kroz primenu digitalnih alata.

Arhitektura je oduvek podrazumevala integrisani pristup gore pomenutih oblasti. U poslednjih nekoliko decenija, osim svojstava materijala, konstrukcije, forme i geometrije, integrisani pristup u arhitekturi podrazumeva i primenu digitalnih alata. Digitalni alati omogućavaju da se projektantska ograničenja (kao što su analiza performansi, strukturalna stabilnost, osunčanost, minimalan utrošak materijala, kvalitet završne obrade površine elemenata konstrukcije i slično) uvedu kao parametri u ranoj fazi projektovanja, a zatim primenom računara uvrste u proces bržeg rešavanja problema određenog projektantskog scenarija. Novi alati za projektovanje kao i tehnike digitalne fabrikacije omogućile su ekspanziju složenih arhitektonskih formi. Dok je modelovanje složenih formi savremenim digitalnim alatima dobro poznato, izazov je kako fabrikovati takvu formu (Pottmann et al, 2015). Primeri primene integrisanog pristupa fabrikaciji su oduvek bili intenzivni (Reichert et al, 2014; Pigram & McGee, 2011). To je primetno uvođenjem industrijskih robota¹ kao alata u procesu fabrikacije, zbog njihovog velikog potencijala u proširivanju mogućnosti fabrikacije složenih arhitektonskih formi. S obzirom da postoje različiti načini obrade materijala (aditivni, substraktivni, formativni), promenom alata kojom industrijski robot vrši proces fabrikacije, moguće je vršiti sečenje, glodanje, savijanje i dodavanje materijala i elemenata.

¹ Industrijski robot je automatizovani robotski sistem za fabrikaciju sa mogućnošću višestrukog programiranja i pomeranja u dve ili više osa

Osim tradicionalnih materijala u arhitekturi, danas se sve češće koriste i novi, sintetički materijali na bazi polimera. U takve materijale spada i polistiren. Polistiren je materijal koji se u arhitekturi, pre svega, koristi zbog svojih termoizolacionih svojstava. Zbog svojih mehaničkih svojstava, penasti polistiren se smatra građevinskim materijalom četvrte generacije, nakon drveta, čelika i betona (Modular homes, 2016). Pored velike primene kao termoizolatora, penasti polistiren se koristi i za izradu kalupa i oplata, a nedavno je pokazana i primena za izgradnju konstrukcije stambenih jedinica (Modular homes, 2016). Dobra svojstva materijala na bazi polimera su da se lako obrađuje, može da se reciklira i nije podložan uticaju štetočina. Sa druge strane, nedostaci su zapaljivost materijala, što se može prevazići odgovarajućim premazima. Ekspandirani polistiren nije otporan na uticaje atmosferskih padavina, jer je porozan, te je potrebno adekvatno ga zaštititi u slučaju izlaganja spoljnim uticajima. Uzevši u obzir sva dobra nabrojana svojstva, penasti polistiren zauzima značajno mesto u istraživanju teme složenih formi u arhitekturi.

1.1. Potreba za istraživanjem

U oblasti arhitekture i građevinarstva, primena penastih polistirena je veoma česta. Penasti polistiren se najčešće koristi kao izolacioni materijal. Elementi se fabrikuju u vidu ploča, koji se postavljaju na fasade objekata. Pojavom složenih formi, javlja se potreba za modifikovanjem takvih elemenata, kako bi mogli da budu upotrebljeni u sličnom maniru (kao spoljni toplotni izolator). Na slici 2 levo, prikazan je element od penastog polistirena koji se istovremeno postavlja kao izolacija (u vidu modula, koji se uklapaju) i kao kalup za izlivanje zida. Sličan princip kalupa se primenjuje i za fabrikovanje ukrasnih elemenata od gipsa u enterijeru i eksterijeru (slika 2, desno).



Slika 2 - levo - modularni elementi od penastog polistirena za potrebe izolacije (kompanija *Fox Block Products*, preuzeto februara 2017 sa www.foxblocks.com/products/fox-blocks/radius-block/); desno - različiti kalupi od penastih polistirena za potrebe generisanje gipsanih elemenata, ukrasa (kompanija *Prekaston*, preuzeto oktobra 2017 sa <http://prekaston.com/ozelurunler.html>)

Upotreba penastog polistirena, kao kalupa za izlivanje panela fasade, korišćena je u projektu proširenja Muzeja moderne umetnosti u San Francisku, projekat arhitektonskog biroa Snohetta (Snohetta) (slika 3). Ovakav primer je značajan jer je penasti polistiren, kao materijal, direktno uticao na arhitektonsko oblikovanje. Oko 700 kalupa je fabrikovano primenom CNC glodanja. Ovaj proces bi tekao mnogo efikasnije i brže da se sečenje realizovalo užarenom žicom promenljivog oblika primenom dva industrijska robota, metodama, koje će biti opisane u ovoj disertaciji.



Slika 3 - Kalupi od penastog polistirena korišćeni za izlivanje panela za fasadu (arhitektonski biro Snohetta, MoMA, San Francisko, slika levo preuzeta februara 2017 sa www.archdaily.com/786762/sfmoma-expansion-snohetta slika desno preuzeta februara 2017 sa www.architecturaldigest.com/story/san-francisco-museum-of-modern-art-snohetta)

U većoj razmeri, primena polistirena kao kalupa može da preraste i u njegovu primenu kao oplata. U građevinskoj industriji često je neophodno izliti betonske elemente, za koje se obezbeđuje određena vrsta oplata. Materijal, koji se najčešće koristi je drvo, gde velika količina bude neupotrebljiva nakon korišćenja. Time se povećava otpadni materijal (Llatas, 2011; Johnston, 2008) što utiče na cenu drvene oplata i ceo proces čini ekonomski neisplativim (Schipper, 2014). Stoga se javila potreba da materijali za oplatu, poput penastih polistirena, budu deo takvih struktura (Sondergaard et al, 2016). Primer upotrebe veće količine elemenata od penastih polistirena kao oplata može se videti na projektu Spenser Dok Bridž (Spenser Dock Bridge) (slika 4). U ovom slučaju, utisak fluidnih formi je postignut primenom CNC glodalice, gde su elementi fabrikovani i postavljeni kao oplata za izlivanje betonskih elemenata.



Slika 4 - Prikaz donje strane Spenser Dok Bridž projekta, za koji je korišćen polistiren kao oplata (projektni biro Amanda Levetej Arhitekts (*Amanda Levete Architects*) preuzeto februara 2017 sa www.archdaily.com/96400/spencer-dock-bridge-amanda-levete-architects)

Penasti polistireni su primenu našli i u vidu završnih slojeva fasada. Usled svojstva visokog nivoa obradivosti, moguće je postići velik broj varijacija složenih formi i u umetničkim projektima (slika 5,

levo). U poslednjih nekoliko godina, došlo je i do afirmacije primene penastih polistirena i kao građivnog materijala. Na taj način mogu da se generišu cele samonoseće strukture, sa dobrim izolacionim svojstvima (slika 5, desno).



Slika 5 - levo - izgled kuće nakon aplikacije polistirena kao završnog fasadnog sloja (Bedager i Pežu (*Bedaguer i Pejus*), projekat Goust Haus (*Ghost House*), preuzeto februara 2017 sa www.house-crazy.com/ghost-house-for-guests/); desno - Generisanje kupolastih struktura u potpunosti izvedenih od polistirena (Doum Haus Internešnal (*Dome House International*) projekat preuzet februara 2017 sa www.usadomes.com/ februara 2017)

Veći elementi složenih formi imaju mnogostruku primenu koja, pored gore navedenih u oblasti arhitekture, može još biti i u: industriji zabave, konceptualnom dizajnu komercijalnih proizvoda, automobilskoj industriji, aerodinamičkim i hidrodinamičkim merenjima, u industriji reklama itd. (Brooks & Aitchison, 2010). Ova tema je aktuelna u savremenoj arhitektonskoj praksi te se istraživanje u ovoj oblasti fokusira na povećavanju mogućnosti obradivosti polistirena, bez generisanja negativnih efekata ili problema.

1.2. Predmet i problem istraživanja

Predmet ovog istraživanja je integrisani pristup fabrikaciji složenih arhitektonskih formi od penastih polistirena primenom industrijskih robota. Integrisani pristup fabrikaciji predstavlja holističko sagledavanje više naizgled različitih oblasti prilikom izvođenja arhitektonske forme (uključujući i proračun statičke stabilnosti i građevinarstvo) još u ranim fazama projektovanja. Oblasti, koje su obuhvaćene pod pojmom integrisani pristup fabrikaciji u ovom istraživanju su:

- projektovanje
- svojstva materijala
- fabrikacija

Interakcija ovakvog skupa oblasti ne predstavlja linearan proces, gde se nakon završetka rada u jednoj oblasti, projekat prosleđuje u neku drugu. Takav proces se sagledava kroz kompromise između dizajnerskih namera i drugih uticaja. Drugi uticaji uključuju ograničenja fabrikacije i svojstva materijala, kao i ekonomske i kontekstualne kriterijume, koji moraju biti ispunjeni (Pigram & McGee, 2011). Integrisani pristup je u velikoj meri uznapredovao primenom digitalnih modela (u procesima projektovanja, analize, fabrikacije) i programa (Reichert et al, 2014). Digitalni modeli, programi i

alati omogućavaju brže izvršavanje mnogostruko više operacija nego što su to mogli prethodni pristupi.

Za razliku od tradicionalnih geometrijskih oblika baziranih na primeni planarnih elemenata, složene arhitektonske forme zahtevaju nestandardne pristupe fabrikaciji. U ovom radu, pod pojmom složene arhitektonske forme, se podrazumevaju one arhitektonske forme koje se upotrebljavaju kao konstruktivni i gradivni elementi objekta, a ne mogu se jednostavno opisati jezikom geometrije i primenom tradicionalnih geometrijskih površi. Oslanjajući se na Mangelsdorfov kategorizaciju složenih formi (Mangelsdorf, 2010) moguće je definisati 4 načina za njihovo generisanje:

- digitalnim traženjem forme (*form-finding*) - krajnji oblik složene forme se dobija pri uspostavljanju ravnoteže skupa unutrašnjih ili spoljašnjih sila koja deluju na inicijalni oblik forme, odnosno nakon zadovoljavanja određenog konstruktivnog kriterijuma
- spajanjem elementarnih (tradicionalnih) geometrijskih entiteta koji se mogu opisati matematičkim jednačinama (poput sfere, cilindra, torusa, linije, kruga, elipse i drugih entiteta) u jednu neprekinutu kontinualnu² celinu, postiže se krajnji izgled složene forme
- primenom slobodnih formi koje su dobijene jednom od dve strategije: 1) deformacijama početnog oblika određene površi, pomeranjem njenih tačaka u skladu sa geometrijskim transformacijama koji dati softver definiše 2) opštim (vođenim) površima, najčešće primenom NURBS³ krivih i površi
- hibridnim pristupom - spajanjem aspekata prethodno opisanih kategorija u jedan pristup generisanju složene forme

U ovom istraživanju je sagledano više različitih načina generisanja složenih formi. U cilju lakše fabrikacije, složene forme su podeljene na manje delove, panele. Odabir materijala umnogome doprinosi efikasnom procesu fabrikacije takvih panela. Penasti polistiren ima veliki potencijal u fabrikaciji složenih formi, jer se lako obrađuje, te je potrebno sagledati mogućnosti njegove obrade, kako bi bili korišćeni pri fabrikaciji složenih arhitektonskih formi.

Obrada penastog polistirena je najčešće zasnovana na primeni glodala ili zagrejjane žice kao alata CNC⁴ mašine. Upotreba glodalice je vremenski zahtevan proces, proizvodi dosta sitnih čestica otpada i veličina radnog predmeta je ograničena veličinom radnog prostora mašina za fabrikaciju. Nivo detalja, koji može da se postigne ovim načinom fabrikacije je visok. Razlog za to je što se glodanjem obrađuje relativno mali segment celine. Takođe, postoji velika preciznost pozicioniranja alata i mogućnost ostvarivanja malih pomeraja. Uzimajući da su CNC glodalice obično troosne (imaju tri stepena slobode, koristeći tri linearne ose), postoje i ograničenja u smislu šta može da se izvede. Najčešći problem je dovođenje alata određene orijentacije do mesta obrade u slučajevima kada je potrebno obraditi složene forme.

Primenom zagrejjane žice za sečenje, otpadni materijal je u komadima, koji mogu da se recikliraju. Proces obrade zagrejjanom žicom može biti i preko 100 puta brži u poređenju sa odgovarajućim pristupima upotrebe glodanja za fabrikaciju tradicionalnih i pravoizvodnih površi (Brander et al, 2016a, McGee et al, 2013). Nivo detalja je manji nego kod glodanja, jer oblik i veličina žice unose

² Neprekidnost je pojam koji se koristi da definiše način spajanja određenih delova geometrije u veću celinu i opisuje se sa oznakom C (continuity) uz dodatak broja, koji označava: 0 - dve dela se samo spajaju, 1 - prethodni uslov uz dodatak glatkog dodira, 2 - prethodni uslovi uz dodatak iste krivine na mestu dodira itd.

³ NURBS - Akronim od *Non-Uniform Rational Basis Spline*, matematički model prikazivanja krivih i površi u računarskoj grafici, uz mogućnost velike fleksibilnosti i preciznosti u radu sa analitičkim i modelovanim oblicima

⁴ CNC - computer numeric control - upravljanje mašinom koristeći računarske numeričke vrednosti

velika ograničenja na lokalne karakteristike površi, koje mogu da se postignu. Primenom industrijskih robota, sa šest stepeni slobode, mogućnosti generisanja složenih formi se povećavaju. Mogućnosti oblikovanja se dodatno šire primenom žice, koja može da menja svoj oblik prilikom procesa sečenja (Brander et al, 2016b; Rust et al, 2016b). Prema aktuelnom istraživanju Romane Rast (*Romane Rust*) ovom metodom fabrikacije (Rust et al, 2016a, Rust et al, 2016b), postoje veća odstupanja između digitalnih i fabrikovanih modela, usled direktnog dodira zagrejane žice i materijala. U pomenutim istraživanjima Romane Rast, ne postoji mogućnost generisanja forme, na osnovu koje se dobijaju putanje sečenja, već se direktno definišu putanje sečenja i pruža uvid u formu, koja treba da se dobije. Sa druge strane, u aktuelnim istraživanjima Brander i drugih (Brander et al, 2016b), korišćena su čak tri industrijska robota kako bi se manipuliralo oblikom žice i procesom fabrikacije zarad dobijanja željene zakrivljene geometrije. Ovakav proces se primenjuje u cilju veće preciznosti sečenja elemenata od penastog polistirena sa dvostruko zakrivljenim površima. Upotreba tri robota za postizanje ovakvog rezultata deluje redundantno, jer ne koristi sve mogućnosti takvog sistema. Problem koji treba rešiti je kako proširiti mogućnosti i smanjiti trenutna ograničenja u oblasti primene robotike u fabrikaciji elemenata od penastog polistirena zagrejanom žicom. Potrebno je, dakle, na adekvatan način uspostaviti vezu između generisanja elemenata složene forme (u saglasnosti sa procesom fabrikacije) i oblika žice i ograničenjima radnog prostora i/ili alata.

1.3. Cilj istraživanja

Cilj istraživanja je definisanje različitih integriranih pristupa fabrikaciji složenih formi od penastih polistirena primenom industrijskih robota. U savremenoj praksi u ovoj oblasti postoje različiti projekti, koji treba da zadovolje drugačije potrebe, koji imaju drugačije početne uslove i potrebe za fabrikacijom. Svaki projekat, stoga, zavisi od projektantskih kriterijuma (parametara). Generisanjem integriranog pristupa fabrikaciji za projektantske parametre, koji se najčešće javljaju, moguće je olakšati i automatizovati proces fabrikacije takvih formi. Neki od najčešćih projektantskih parametara koji služe za generisanje integriranog pristupa fabrikaciji u ovom istraživanju su:

- a) utrošak materijala i efikasno uklapanje elemenata
- b) veličina elementa, koji se koristi u građenju i
- c) način završne obrade površine elementa

Očekivani rezultati ovakvog istraživanja su izvedene arhitektonske forme različitih veličina fabrikovane pomoću jednog ili dva robota, kao i korišćenjem različitih oblika žice za sečenje.

1.4. Metode primenjene u istraživanju

Ovo istraživanje bazirano je na interdisciplinarnom pristupu i primeni različitih metoda istraživanja:

- a) Metoda modelovanja - bazirana na generisanju digitalnog modela arhitektonske forme. To se postiže kroz analizu određenih parametara, koji utiču na čitav proces. Upotreba parametara u procesu generisanja određene složene forme otvara mogućnosti za postojanje različitih varijacija jednog rešenja digitalnog modela. Međutim, kada je naglasak na razvoju računarsko-projektantske logike (koju čine niz algebarskih, analitičkih i geometrijskih operacija u svrhu manipulacije parametrima) i

njene upotrebe kao arhitektonskog svojstva (Kotnik, 2010), onda se govori o algoritamskom modelovanju, koje je primarno korišćeno u ovom istraživanju. Referentni 3D modeli su na taj način određeni nizom operacija, koji iterativno menjaju geometrijsku formu od početne do finalne, a u zavisnosti od menjanja vrednosti parametara. Kao krajnji rezultat dobija se digitalni model, koji dalje može biti primenjen u integrisanom pristupu fabrikaciji.

Za potrebe ovog istraživanja korišćen je Rhinoceros 3D CAD/CAM softver. Jedan od razloga za izbor ovog softvera je i mogućnost upotrebe dodatnih softverskih alata, koji omogućavaju algoritamski zapis za generisanje, podelu i racionalizaciju strukture, kao i optimalnu pripremu podataka za fabrikaciju. Dodatak za Rhinoceros korišćen u ovom istraživanju je Grasshopper, koji nudi mogućnost tzv. vizuelnog programiranja sa nizom prethodno definisanih funkcija, što olakšava projektantu da koristi softver kao alat za projektovanje.

Za pisanje programa, koji se koristi za upravljanje industrijskim robotom, odnosno za izvršavanje instrukcija i definisanje parametara, korišćen je softverski paket RobotStudio, kompanije ABB, sa integrisanim RAPID programskim jezikom.

Na generisanim digitalnim modelima se vrše simulacije u cilju provere zadovoljavanja određenog projektantskog kriterijuma. Prvo se definiše određen skup projektantskih parametara, koji utiču na određen model. Njihove vrednosti se menjaju i vrši se provera uticaja takvih promena na finalni izgled forme. Na taj način može da se prati i istraži odnos između zadatih projektantskih parametara i digitalnog modela. U ovom istraživanju, primenom dodatka za softverski paket Rhinoceros kao što je RhinoVault, izvršena je simulacija statičke stabilnosti tankih samonosećih, ljuskastih struktura. Upotrebom dodataka Anemone i Kangaroo, izvršena je simulacija zakrivljenosti elastične žice, potrebne za sečenje zakrivljenih formi. Softverski paket RobotStudio poseduje mogućnost za *off-line* simulaciju kretanja robota, kako bi se simulacijom predupredili mogući problemi prilikom procesa fabrikacije, kao što su dostupnost tačke, sudar ili greška u konfiguraciji osa. Kako bi se nakon procesa simulacije dobile optimalne vrednosti parametara, potrebno je uvesti određeni kriterijum, koji digitalni model treba da postigne (konstruktivno stabilna konstrukcija, elastična savitljiva žica, kretanja robota bez sudara). U ovom istraživanju, korišćeni su dodaci koji se odnose na proces optimizacije, gde spadaju EvoluteTools i Galapagos za proces podele na manje elemente i optimizaciju oblika zakrivljene žice, respektivno.

b) Metoda analize - je primenjena tokom rada i na kraju svake od simulacija, kako bi se utvrdilo da li su u dovoljnoj meri zadovoljeni određeni projektantski zahtevi, koje postavlja arhitekta.

c) Komparativna metoda - je korišćena da se uporede dobijeni rezultati matematičkih simulacija i analiza u iterativnom procesu. Rezultati komparativne metode su primenjeni za optimizaciju digitalnog modela, shodno prethodno određenim projektantskim kriterijumima.

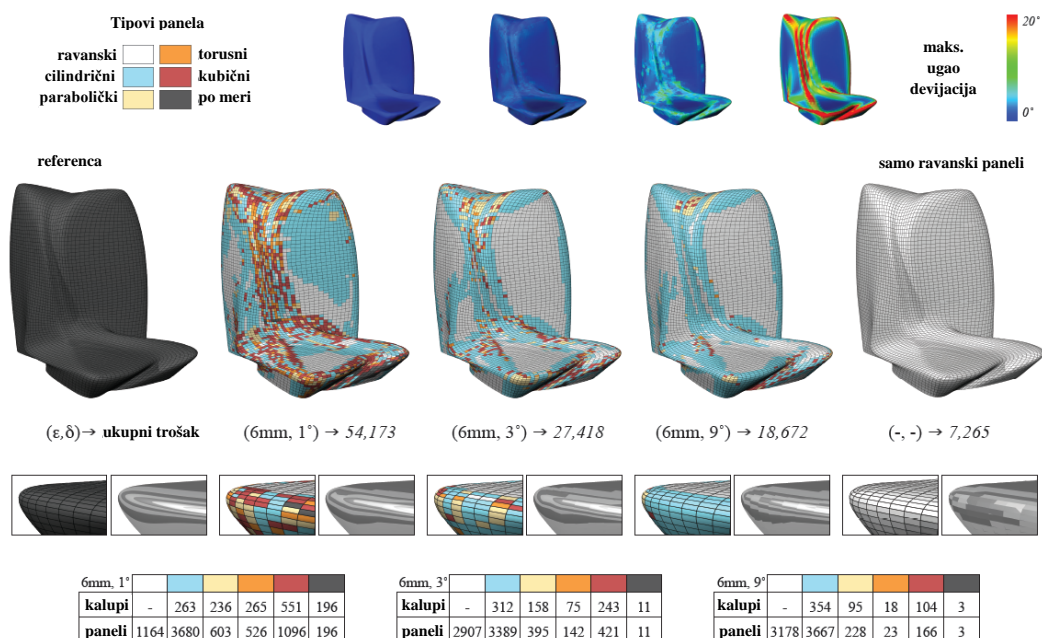
d) Metoda uzorka - je upotrebljena za ispitivanje kvadratnih uzoraka od penastih polistirena, sečenih zagrejanom žicom. Merenjem dužina ivica isečenih kvadratnih komada, i poređenjem sa dužinama ivica u digitalnom modelu, izmerena je vrednost debljine reza. Fabrikovani prototipovi takođe predstavljaju vid uzorka i validacije integrisanog pristupa.

e) Metoda kompilacije, sinteze i indukcije - primenjuje se za određivanje debljine reza, baziranoj na svojstvima žice, snazi struje, brzini kretanja alata i svojstvima materijala koji se seče. Ova metoda uzima u obzir prethodne rezultate istraživanja u oblasti sečenja polistirena zagrejanom žicom, a zatim vrši sintezu sveobuhvatnih podataka i na osnovu analize pojedinačnih činjenica dolazi do zaključka o formuli za određivanje debljine reza.

Kako bi se od početne ideje napravio model, podelio u delove, sračunale putanje i dobio kod za kretanje robota koji te putanje ostvaruje, neophodno je povezati i integrisati Rhinoceros (zajedno sa dodacima Grasshopper, RhinoVault, EvoluteTools, Anemone, Kangaroo, Galapagos) sa RobotStudiom. Drugim rečima, prvo se radi modelovanje i podela modela na delove, koje je moguće fabrikovati, a zatim se formira kod na osnovu kojeg robot vrši fabrikaciju sečenja delova od penastog polistirena. Ovakav integrisani pristup fabrikaciji pomaže u rešavanju zadatih projektantskih kriterijuma i fabrikacije arhitektonskih prototipova. Dati pristup fabrikaciji elemenata od penastih polistirena, može imati i širu primenu u arhitekturi od one istaknute u ovoj disertaciji.

1.5. Pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti

Odabir literature obuhvata više disciplina i oblasti. Potrebno je prvo sagledati bitne osvrte na primenu integrisanog pristupa uopšte. U istraživanju Vu i Kilijana (Wu & Kilian) iz 2016, autori napominju „fabrication-aware design“, gde naglašavaju potrebu za povezivanjem procesa projektovanja i procesa fabrikacije (Wu & Kilian, 2016). Pigram i MekGi (Pigram & McGee) ističu kako je potrebno „ukloniti jaz“, koji postoji između procesa projektovanja i procesa fabrikacije (Pigram & McGee, 2011). Kao bitni aspekti procesa projektovanja složenih formi, uvedeno je uključivanje svojstava materijala i utvrđivanje strukturalne stabilnosti (Rippmann & Block, 2011a; Rippmann et al, 2012). Kako bi se složena arhitektonska forma uspešno sprovedla u delo, potrebno je razviti integrisani proces rada, koji uzima u obzir međupovezanost odlučujućih parametara (Reichert et al, 2014). Kao početni deo takvog procesa, nameće se analiza geometrijske strukture i način generisanja geometrije, u zavisnosti od niza parametara, vodeći stalno računa o ograničenjima, koja nameće finalni proces - fabrikacija.

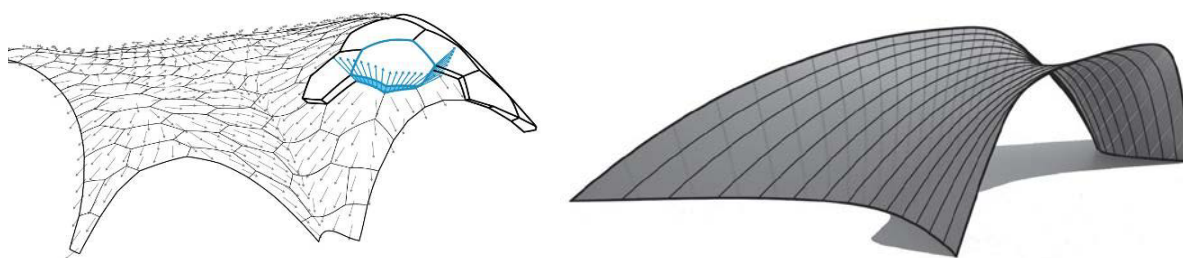


Slika 6 - Prikaz različitih scenarija primene aproksimiranih panela i njihov uticaj na ukupan trošak fabrikacije elemenata (delovi slike preuzeti iz Eigentsatz, 2010)

Arhitektonska geometrija je jedna od novih oblasti primenjene geometrije, koja se između ostalog, bavi i geometrijskom optimizacijom u cilju smanjenja utroška materijala tokom fabrikacije. U tom smislu, geometrijski oblici se mogu optimizovati diskretizacijom inicijalne forme na planarne

elemente ili druge vrste elemenata pogodnih za fabrikaciju. U pojedinim istraživanjima Ajgenzaca (*Eigensatz*) (Eigensatz, 2010), pokazano je koliki učinak na cenu ima takav pristup projektovanju (slika 6). Još jedan od pristupa podrazumeva aproksimaciju složenih formi delovima razvojnih površi koje u celini čine inicijalnu geometriju (Wang & Tang, 2005a; Wang & Tang, 2005b; Kilian, 2003). Ovi vidovi geometrijske optimizacije i pripadajuća literatura utiču na prvi i drugi pristup fabrikaciji, koji su opisani u ovoj disertaciji.

Ako naglasak nije stavljen na fabrikaciju od traka ravanskih elemenata, onda je moguće geometriju aproksimirati i pravoizvodnim, opštim površima. U tom slučaju se pod fabrikacijom podrazumeva sečenje određenim linijskim elementom (Pottmann et al, 2008; Rippmann & Block, 2011b) (slika 7). Za takve potrebe se mora generisati putanja sečenja (Wang & Elber, 2014).



Slika 7 - levo - prikaz jednog načina podele složenih formi na elemente, čije su dodirne strane pravoizvodne površi (preuzeto Rippmann & Block, 2011b); desno - složena forma podeljena na 14 pravoizvodnih traka, optimizovanih da omogućavaju gladak prelaz i refleksiju između elemenata (Preuzeto Flory & Pottmann, 2010)

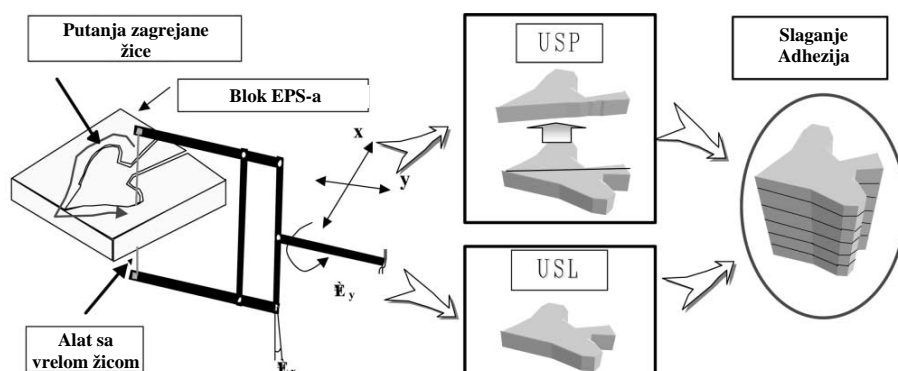
Dobra strategija za primenu različitih načina aproksimacije i fabrikacije elemenata složenih formi se najviše odražava na ekonomskom i estetskom planu. Tu spada i primena kalupa za dvostruko zakrivljene elemente (Eigensatz et al, 2010; Smartgroup, 2016). Bitno je uvesti i svojstva primenjenih materijala kako bi se moglo pristupiti prilagođavanju geometrije procesu fabrikacije.

Kako bi se adekvatno pretpostavilo ponašanje materijala prilikom fabrikacije, potrebno je ispitati ponašanje materijala prilikom promene u zavisnosti od uticaja velikog broja parametara. Još 2002. godine je An (*Ahn*) sa svojim istraživačkim timom ispitivao kako se debljina reza, prilikom sečenja ploča polistirena 2mm debljine, menja u zavisnosti od brzine kretanja zagrejane žice, ugla sečenja, kao i jačine struje koja zagreva žicu (Ahn et al, 2002; Ahn et al, 2003) Ovaj pristup je testiran prilikom primene VLM⁵ procesa fabrikacije elemenata (slika 8). Rezultat istraživanja čini formula na osnovu koje može da se proračuna širina reza, a samim tim i potpuno definiše putanja sečenja.

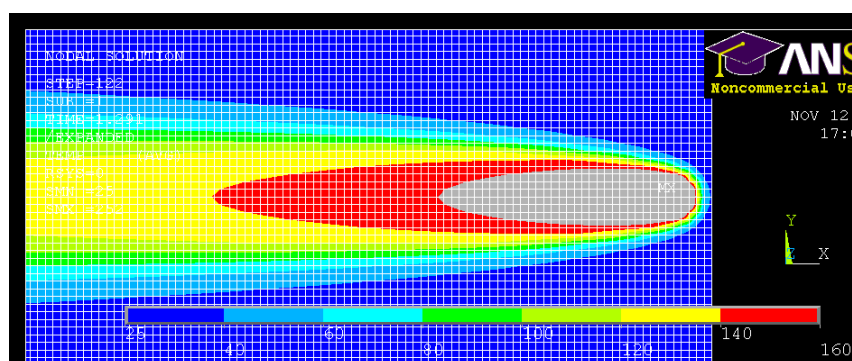
Druga istraživanja su se usmerila na vrste obrade pri kojima se javlja i sila reakcije (kao što je slučaj kod termomehaničkog sečenja), proveravanje kvalitativnih merenja teksture površi prilikom uticaja brzine i sile sečenja (Broek et al, 2002a; Broek et al, 2002b; De Smit et al, 1999; De Smit et al, 1999). Primećene su neregularnosti u pravolinijskom rezu u uzorcima od penastog polistirena, te je istraživanje usmereno ka promenljivoj brzini kretanja zagrejane žice tokom procesa fabrikacije (Galina et al, 2005; Galina, 2006). Prateći ovakav tok istraživanja, dalja istraživanja su usmerena ka promenljivoj jačini struje, koja zagreva datu žicu, u cilju ujednačavanja debljine reza (Brooks & Aitchison, 2010a). Dodatna istraživanja koja uključuju i proračun metodom konačnih elemenata, mogu upotpuniti prethodno izneto istraživanje (Brooks & Aitchison, 2011), prateći temperaturnu raspodelu na sve elemente tokom procesa sečenja (slika 9). Promena oblika žice prilikom sečenja

⁵ VLM - variable lamination manufacturing - procedura fabrikacije u kojoj se forma podeli na određen broj horizontalnih slojeva, koji se fabrikuju posebno, i na kraju spajaju u jednu celinu

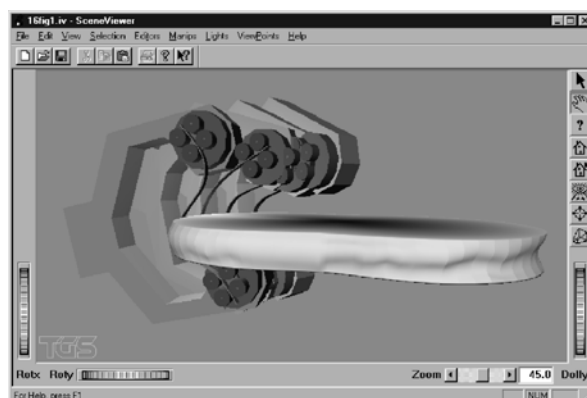
omogućila je generisanje i složenijih geometrijskih struktura (Horvath et al, 1998; Broek et al, 2002) (slika 10).



Slika 8 - Konceptualni prikaz upotrebe alata sa vrelom žicom za isecanje komada polistirena nepravilnog oblika (delovi slike preuzeti iz Ahn et al, 2003)



Slika 9 - Raspodela temperature u svim elementima prilikom sečenja polistirena zagrejanom žicom (Preuzeto Broks & Aitchison, 2011)

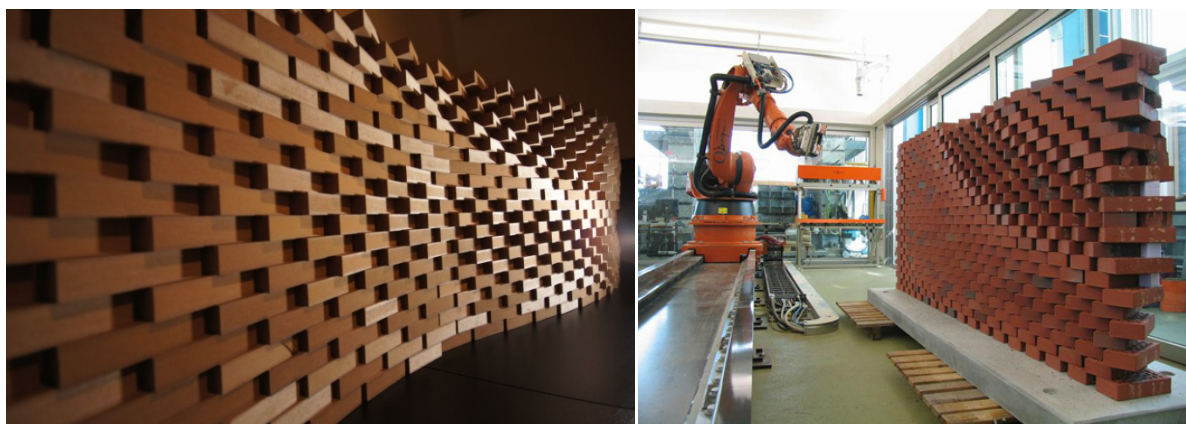


Slika 10 - CAD model mehanizma za držanje i rotiranje krajeva žice, koja usled svoje krutosti menja svoj oblik i omogućava promenu profila elementa koji se iseca (Preuzeto Broek et al, 2002)

Značajan pregled stanja u oblasti ispitivanja uticaja različitih parametara u procesu obrade penastog polistirena može se naći u preglednom radu istraživačkog tima Bruks i Ajčison o sečenju elemenata od penastih polistirena velikih dimenzija (Brooks & Aitchison, 2010b). U svim radovima koji su pomenuti u ovom poglavlju se govori o sečenju tankih ploča od polistirena, bez osvrta na mogućnost upotrebe volumetrijskih elemenata (McGee et al, 2013). U oblasti primene industrijskog robota za pomeranje alata sa zagrejanom žicom, postoje i istraživanja koja se bave i optimalnim putanjama sečenja (Aitchison et al, 2011). Te putanje je moguće uraditi na dva načina - manuelnim provođenjem

robotu kroz pozicije kroz koje treba da se kreće ili pisanjem programa u softveru za upravljanje robotom, dok robot nije povezan sa softverom - *off-line programming* (Bottazzi & Fonseca, 2006). Generisanjem programa, koji mogu da interpretiraju podatke o putanji kojom robot treba da se kreće prilikom fabrikovanja elementa, ostvaren je značajan iskorak u procesu automatizacije procesa projektovanja i fabrikacije (Schwartz, 2013; Simunic, 2016). Prethodno pomenuta istraživanja iz ovog paragrafa su iz domena drugih inženjerskih disciplina i odnose se na probleme koji nisu iz oblasti arhitekture. Stoga je potrebno na adekvatan način prepoznati mogućnosti primene industrijske robotike u arhitekturi i njihove dobre osobine iskoristiti pri fabrikaciji složenih formi od penastih polistirena.

Kiting i Oksman (Keating & Oxman) su samo neki od istraživača, koji su prepoznali prednosti industrijskog robota kao automatizovane mašine, koja može da se programira i pomera u dve ili više osa (Keating & Oxman, 2013). Robotska fabrikacija u arhitekturi predstavlja vezu između fizički fabrikovanih formi i njihovih digitalnih modela (Budig et al, 2014). Ona uokviruje prostor onih formi, koje su geometrijski moguće i fizički izvodljive (Menges, 2013). U oblasti arhitekture, industrijska robotika ima široku primenu, od slaganja zidova od modularnih elemenata (Raković et al, 2014; Jovanović et al, 2016a) (slika 11), preko generisanja slika od linearnih ili površinskih elemenata (Jovanović et al, 2016b; King et al, 2014) do primene glodala kao alata za substraktivni proces fabrikacije (Chu & Chen, 2006; Wu et al, 2008; Brell-Cokcan & Braumann, 2010, Nedcam; Jung et al, 2016) (slika 12).



Slika 11 - Upotreba industrijskog robota za slaganje modularnih elemenata, u cilju generisanja određene slike ili šablona (levo *Robowall*, projekat) istraživačke grupe Centar za digitalni dizajn (Digital Design Center); desno *Robotic Fabrication of Non standard Brick Wall*, istraživačkog tima Gramazio&Kohler)

Mogu se naći i upotrebe industrijskih robota za generisanje betonskih elemenata, direktnim izlivanjem elementa (Lloret et al, 2015) ili fabrikovanjem kalupa (Schipper et al, 2014; Schipper & Janssen, 2011; Stavric & Kaftan, 2012; Veenendaal et al, 2011; Gramazio Kohler Research). Savijanje kao formativni način fabrikacije je korišćen pri savijanju čeličnih ploča (RoboFold) i armature za zakrivljene betonske elemente (Cortsen et al, 2014). Iz prethodnih primera, može se uočiti da se industrijski robot može primenjivati u procesu fabrikacije za raznovrsne projektantske probleme, prvenstveno zbog mogućnosti izmene alata.



Slika 12 - Glodanje penastog polistirena primenom industrijskog robota a) simulacija b) prvi prelaz obrade elementa - gruba obrada, c) drugi prelaz obrade elementa - fina obrada, d) glodanje žljeba za povezivanje (Preuzeto Jung et al, 2016)

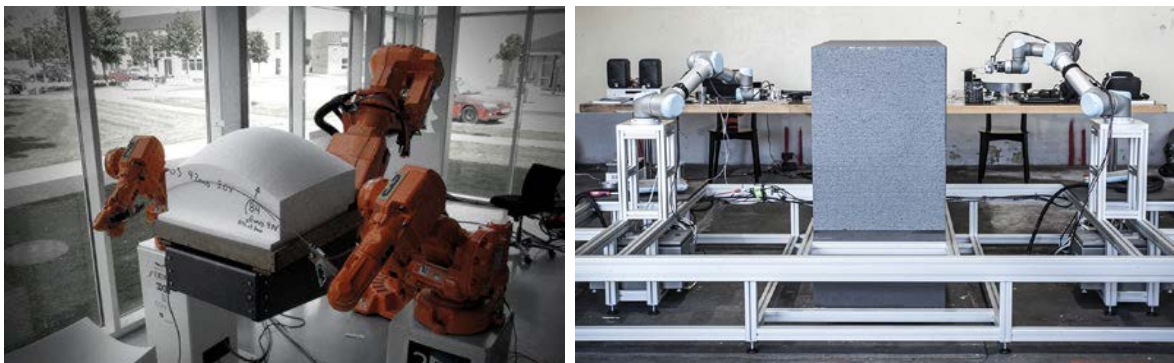
U oblasti sečenja polistirena, za realizaciju složenih arhitektonskih formi, obično se primenjuje pravolinijska, zagrejana žica kao alat industrijskog robota. Takav pristup uslovljava primenu pravoizvodnih formi čija je racionalizacija opisana u istraživanju Florija (Floryja) (Flory & Pottmann, 2010). Na ovaj način, uz postojanje projektantskih kriterijuma kao vodilja dizajnerskog procesa, integrisani pristup fabrikaciji složenih formi od polistirena se može uočiti na primerima Lajt Volta (Light Vaulta) (Yuan et al, 2014), tavanice Šinsa Taun (Shinsa Town) (Li et al, 2016), projekta Hajperbodi (Hyperbody) (McGee and Feringa, 2013), FomDoum (FoamDome) (Agid and Morin, 2012) i Pazl Vol (Puzzle Wall) (Jovanovic et al, 2017) (slika 12).



Slika 13 - a) Prikaz izvedenog projekta *Light Vault* u istraživačkom radu Yuan et al, 2014; b) Izveden projekat *Foam Doam* od istraživačkog tima Agid i Morin iz 2012; c) Sečenje penastog polistirena upotrebom zagrejane žice kao alatke industrijskog robota (Preuzeto Jovanović et al, 2017); d) izvedeni projekat generisanja složene forme od elemenata nalik slagalicama (Preuzeto Jovanović et al, 2017), e) projekat *Hyperbody*, nastao primenom većeg industrijskog robota i alata za generisanje manjeg broja većih elemenata (Preuzeto McGee & Feringa, 2013)

Međutim, u prethodnih nekoliko godina, došlo je do velikih pomaka u povećavanju mogućnosti fabrikovanja upotrebom zagrejane žice. Menjajući oblik savitljive žice pomoću dve sile koje deluju na njenim krajevima, Brander i saradnici su (Brander et al, 2016a i 2016b) iskoristili ovaj metod i primenili ga u fabrikaciji dvostruko zakrivljenih formi. Krajevi žice su pričvršćeni za vrhove dva robota. Kretanje robota dovodi do promene oblika žice. Kako bi eliminisali nekontrolisano kretanje zagrejane žice u prostoru prilikom procesa sečenja, žica je zamenjena flahom čija se debljina može zanemariti. Oblik žice je aproksimiran primenom matematičkog modela Ojlerove (Euler) elastične linije⁶ (Farin, 2002; Levien, 2009; Bruckstein et al, 1996) i optimizacionih algoritama (Wachter & Biegler, 2006) koji pronalaze rešenje u odnosu na datu geometriju (Brander et al, 2016a) . Dva robota se koriste da generišu ravansku Ojlerovu elastičnu krivu, dok treći robot pomera element iz kojeg se iseca finalna forma (Brander et al, 2014; Sondergaard et al, 2016; Brander et al, 2016b) (slika 14 levo).

⁶ Ojlerova elastična linija (Euler elastica) je matematički model elastične zakrivljene linije



Slika 14 - levo - Prikaz fabrikovanja elementa od penastog polistirena primenom tri industrijska robota i tankog flaha promenljivog oblika kao alata za sečenje (Preuzeto Brander et al, 2016b), ; desno - prikaz postavke dva industrijska robota i platforme na koju se postavlja element za termomehaničko sečenje (Preuzeto Rust et al, 2016a).

U svim prethodno navedenim primerima iz oblasti primene industrijske robotike za proces sečenja penastog polistirena, materijal se topi pod uticajem zagrejanje žice, bez direktnog kontakta (termalno sečenje). Kako bi se proširile mogućnosti fabrikovanja složenih formi Romana Rast je sa svojim timom istraživala sečenje zagrejanom žicom, gde postoji kontakt sa materijalom (termo-mehaničko sečenje), ali i proces topljenja, kao posledica toga (Bain, 2011). Ovakvo istraživanje je urađeno sa osvrtom na svojstva materijala tokom procesa fabrikacije. Sile koje se javljaju u žici prilikom fabrikacije se iterativno proveravaju i koriste za podešavanje brzine sečenja. Primenjena je tanka žica, čiji su krajevi pričvršćeni na vrhove dva robota. Kao ulazni podatak zadata je putanja sečenja, a generisan je digitalni model koji prikazuje kako će fabrikovana površ da izgleda (Rust et al, 2016a), na osnovu kojeg je izvršeno i sečenje (slika 14 desno). Trenutna ograničenja ovog istraživanja postoje i primetna su u neslaganju digitalnog i fabrikovanog modela do 42mm (Rust et al, 2016b).

1.6. Očekivani rezultati istraživanja i mogućnost njihove primene

Rezultati istraživanja su dvojaki: prvi rezultat disertacije obuhvata automatizovani algoritamski model integrisanog pristupa fabrikaciji, a drugi rezultat prikazan je kroz fizički izvedene prototipove elemenata, sečene i sklapane u zavisnosti od ranije navedenih projektantskih kriterijuma.

Prvi prototip ukazuje na rešavanje problema generisanja složenih formi sastavljenih unijom manjih elemenata specifičnog oblika koji omogućavaju dalje sklapanje bez primene adheziva ili drugih spojnih sredstava. Ovakvi prototipovi mogu dati odgovor za brzo građenje struktura koje se mogu više puta sklopiti i rasklopiti, a koje imaju nestandardnu arhitektonsku formu.

Drugi prototip ukazuje na rešavanje problema fabrikacije elemenata, koji su znatno veći od radnog prostora mašine. Istovremeno, izrada drugog prototipa treba da ponudi odgovore za realizaciju velikih struktura od penastog polistirena, nastalih diskretizacijom na manje elemente koji se mogu dalje fabrikovati pomoću dva robota.

Treći prototip ukazuje na rešavanje problema generisanja elemenata od penastog polistirena koji sadrže glatke, kontinualne površi. Odgovor na ovaj problem je naročito važan sa stanovišta projektovanja elemenata enterijera, konstrukcija ili fasada, jer omogućava oblikovanje dvostruko zakrivljenih površi sa visokim estetskim zahtevima obrade materijala metodom koja je mnogo brža i

efikasnija u odnosu na CNC glodanje. Treći tip, takođe, podrazumeva primenu dva robota, ali sa oblikom žice za sečenje, koji je zakrivljen i promenljiv u procesu sečenja.

Upotreba ovakvog integrisanog pristupa u svakom od predloženih scenarija pokriva širok dijapazon projektantskih problema prilikom fabrikacije, a samim tim dokazuje svoju upotrebljivost u procesu projektovanja složenih formi od ravanskih, pravoizvodnih i dvostruko zakrivljenih elemenata.

1.7. Struktura doktorske disertacije

Doktorska disertacija sastoji se od šest poglavlja.

U uvodnom poglavlju prikazani su predmet i problem istraživanja. Predstavljen je cilj istraživanja sa naglaskom na primenjene naučno-istraživačke metode i obrazložen je naučni doprinos disertacije. Kroz sagledanu potrebu za istraživanjem i osvrt na relevantnu literaturu, prikazano je aktuelno stanje u oblasti fabrikacije arhitektonskih formi primenom industrijskih robota.

U drugom poglavlju je definisan termin - integrisani pristup fabrikaciji. Izvršena je analiza različitih projektantskih scenarija i odabrana su tri scenarija, kroz koja je prikazan integrisani pristup fabrikaciji. Odabir scenarija je izvršen na osnovu projektantskih kriterijuma. Svaki scenario je opisan kroz proces projektovanja i proces fabrikacije. Na osnovu toga, drugo poglavlje je podeljeno u dve celine.

U prvoj celini je istaknut proces projektovanja. Prikazane su analize parametara i njihove međusobne zavisnosti. Primenjen je algoritamski pristup projektovanju. Korišćene su numeričke simulacije i metoda modelovanja. Ove metode su odabrane u cilju generisanja digitalnog modela formi, panelizacije⁷ i pripreme arhitektonskih formi za fabrikovanje primenom industrijskih robota. Rezultat ovog procesa su podaci koji su upotrebljeni za proces fabrikacije. Oni istovremeno zavise od svojstava materijala koji će se koristiti kao i od zadatog projektantskog scenarija.

Druga celina čini deo disertacije koji je posvećen digitalnoj fabrikaciji. Objašnjen je način upravljanja i *off-line* simulacije industrijskog robota⁸. Opisana je procedura generisanja programa i povezanosti procesa fabrikacije sa podacima iz prethodne celine. Rezultat digitalne fabrikacije čine fabrikovani prototipovi za svaki od zadatah projektantskih problema i zahteva.

U trećem poglavlju su opisana svojstva materijala i alata u procesu fabrikacije. Materijali, koji su korišćeni u istraživanju, iz kog je proistekla ova disertacija, su ekstrudirani polistiren (XPS) i ekspanzirani polistiren (EPS). Svojstva su ispitana tokom eksperimentalnog sečenja uzoraka primenom zagrejane žice. Parametri koji su menjani su gustina penastog polistirena, jačina struje i brzina kretanja žice. Tokom sečenja su prikupljeni podaci o debljini reza. Dobijeni podaci služe za generisanje i proveru jednačine za proračun debljine reza sečenja i dopunu podataka za proces fabrikacije.

⁷ Panelizacija - podela površi arhitektonske forme na manje elemente, panele, koji mogu lakše da se fabrikuju

⁸ *Off-line* simulacija u industrijskoj robotici predstavlja metod programiranja robota, gde je program za upravljanje robotom kreiran nezavisno od robotske jedinice i testiran u digitalnom okruženju softvera, gde je robotska jedinica predstavljena kao 3d model u simulaciji. Ovaj metod je suprotan od *on-line* programiranja industrijskih robota, gde program nastaje tako što se robotska jedinica programira primenom upravljačke table robota (*teach pendant*), manualnim pomeranjem robotske jedinice u potrebne pozicije

Četvrto poglavlje je zaključak disertacije u kom je dat osvrt na primenjene metode, njihova ograničenja i analizirane su mogućnosti unapređenja. Na kraju zaključka su predstavljeni mogući pravci daljeg istraživanja.

Poglavlje pet sadrži popis literature korišćene u istraživanju. Literatura je popisana abecednim redom, uz primenu hardvardskog načina referenciranja radova.

Poglavlje šest sadrži popis tabela i ilustracija.

2. Integrirani pristup fabrikaciji

Integrirani pristup fabrikaciji je oduvek postojao u arhitekturi. Zahteva zajednički rad više stručnjaka iz različitih oblasti. Takav tim stručnjaka usmerava dati proces projektovanja i izvođenje određene arhitektonske forme. Među njima, arhitekte su bili ti koji su postavljali ograničenja, vršili evaluaciju i samim tim oblikovali objekat do konačnog izgleda. Međutim, takav proces je linearan i teče relativno sporo. Na primer, nakon završetka crtanja određene arhitektonske forme, projekat se prosleđuje na proračun strukturalne stabilnosti i u slučaju nemogućnosti zadovoljavanja prvobitne ideje, projekat se iterativno vraća na doradu, dok god se ne postigne izvodljiva forma. Povezivanjem dodatnih oblasti, kao što su instalacije i primena specifičnih materijala, proces projektovanja postaje složeniji.

Sa pojavom računara i razvojem digitalnih alata, postalo je moguće efikasno evaluirati zadovoljenost određenog kriterijuma digitalnog modela. Evaluacija može biti izvršena u zavisnosti od niza uslova, koji su definisani kao ulazni podaci. Na taj način, jednom generisan digitalni model može da bude evaluiran u odnosu na projektantske zahteve i usmeravan tokom procesa projektovanja mnogo preciznije i brže nego ranije. Pod pojmom integrirani pristup, danas se podrazumeva ovakav način rada, gde primena digitalnih alata omogućava uvođenje projektantskih zahteva, kao ulaznih parametara u ranoj fazi projektovanja. Zahtevi koji se uvode se odnose na strukturalnu stabilnost modela, ekonomičnost i efikasnost gradnje i izrade elemenata, proces fabrikacije i kvalitet završne obrade i slično.

Kao što je ranije napomenuto, u ovom istraživanju, integrirani pristup odnosi se na oblasti projektovanja arhitektonskih formi, ali uključujući u razmatranje i proces fabrikacije kao i svojstva od kojih će se data forma izraditi. Za eksperimentalnu proveru, definisana su tri projektantska scenarija, sa fabrikovanim prototipovima kao rezultatima. Definisanje i odabir scenarija je urađen uvođenjem tri projektantska kriterijuma:

- Prvi projektantski kriterijum je minimalni utrošak materijala i efikasnost uklapanja elemenata prilikom procesa fabrikacije⁹
- Drugi projektantski kriterijum je veličina elementa, koji se koristi u građenju
- Treći projektantski kriterijum je način završne obrade površine elementa

Pomenuti kriterijumi su ujedno i najčešći i najznačajniji kriterijumi koji se javljaju u procesu projektovanja i fabrikacije, zbog čega su i primenjeni u projektantskom i eksperimentalnom radu. Tekst koji sledi u ovom poglavlju je podeljen u potpoglavlja, a na osnovu datih projektantskih kriterijuma. U okviru svakog potpoglavlja opisani su procesi projektovanja i fabrikacije, koji su svojstveni svakom scenariju. Deo teksta o projektovanju opisuje različite načine generisanja složenih formi, njene panelizacije i pripreme podataka za proces fabrikacije. Sa ovakvim podacima pristupa se opisu procesa fabrikacije, što uključuje off-line simulaciju i programiranje procesa sečenja. Na kraju svakog scenarija dati su i rezultati takvog pristupa. Primena penastog polistirena kao materijala i zagrejane žice kao alata nepromenljiva je u svakom pristupu, te su njihova svojstva opisana u zasebnom poglavlju.

⁹ Fabrikacija predstavlja proces tokom kojeg se prave pojedinačni elementi, koji se na kraju spajaju u konačnu arhitektonsku formu

2.1. Projektantski scenario 1 - Integrisani pristup fabrikaciji uz minimalni utrošak materijala i efikasnost uklapanja elemenata

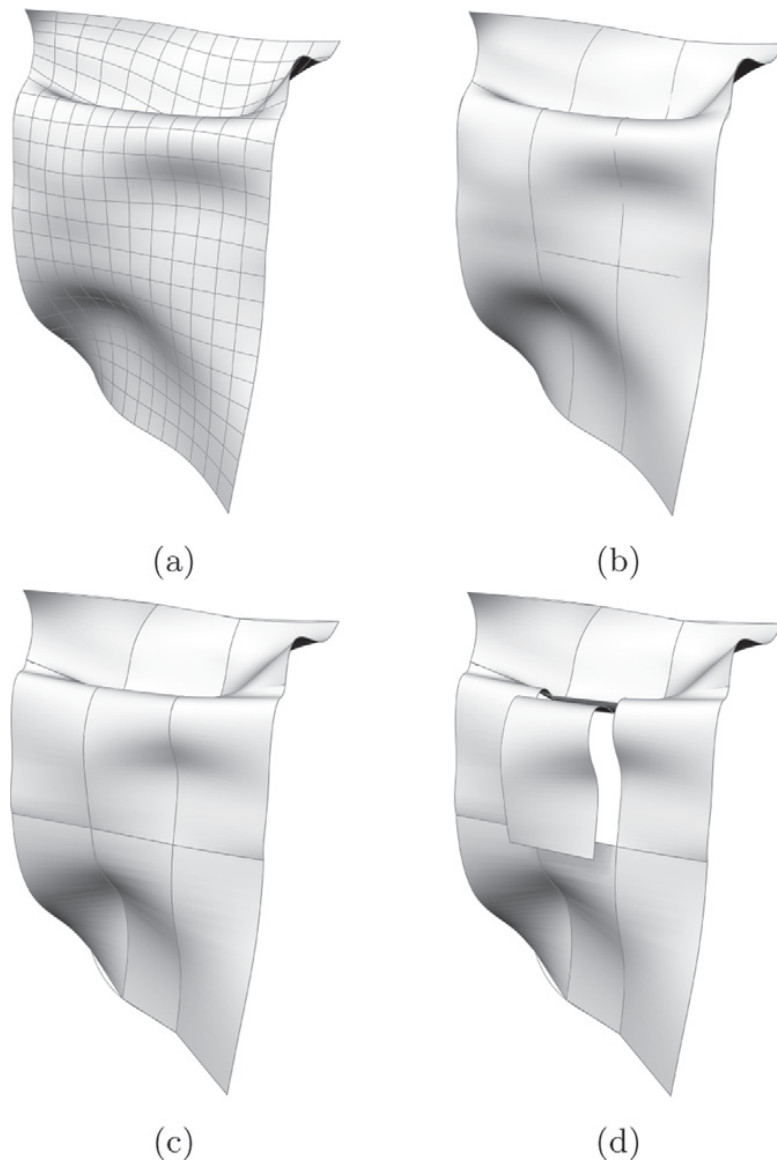
2.1.1. Projektantski kriterijumi i proces projektovanja

Jedan od bitnih aspekata fabrikacije svake forme je ekonomska isplativost. Uvođenjem dimenzija materijala i specifičnosti procesa fabrikacije moguće je generisati i pripremiti elemente koji treba da se fabrikuju na takav način da se dobije što manje otpadnog materijala. Nadalje, prilikom uklapanja elemenata potrebno je koristiti određenu vrstu adhezivnih sredstava, kako bi se elementi pričvrstili jedan za drugi. Uvođenjem oblika elemenata kao parametra, moguće je menjati način spajanja preko samoukloplivih oblika i potpuno izostaviti primenu adhezivnih sredstava. Na taj način, troši se manje materijala, procesi pripreme i fabrikacije traju kraće i ne koriste se dodatna sredstva za spajanje.

2.1.1.1. Generisanje forme

U ovom projektantskom scenariju, za formu je odabrana jedna pravoizvodna površ, izdvojena iz neke složene forme, kako bi bilo moguće primeniti i testirati proces na fizičkom modelu. U tu svrhu korišćen je softverski paket Rhinoceros sa svojim dodatkom Grasshopper za algoritmaski proces projektovanja. Ova kombinacija softverskih paketa omogućava veliku kontrolu nad procesom generisanja pravoizvodnih formi, posebno pregibnih uglova (kink angle) između susednih elemenata. Na ovakvoj formi urađena je optimizacija utroška materijala i analizirana efikasnost uklapanja elemenata.

Složena forma je generisana iz mreže međupresečnih NURBS krivih (slika 15a). Zatim su dva skupa izoparametarskih krivih (u daljem tekstu izokrive) izvučena iz oba pravca deleći složenu formu na manje segmente (u ovom slučaju na 9 segmenata) (slika 15b). Izokrive iz jednog skupa su pretvorene u polilinije, sa tačkama pozicioniranim na presecima sa izokrivim iz drugog skupa. Nova mreža linija je upotrebljena za generisanje pravoizvodnih segmenata, koji zajedno aproksimiraju inicijalnu složenu formu (slika 15c). Na kraju, izabrana je jedna od generisanih pravoizvodnih površi za dalji digitalni proces integrisanog pristupa (slika 15d). Data površ se potom deli na manje elemente u skladu sa ograničenjima koje nameće proces fabrikacije.

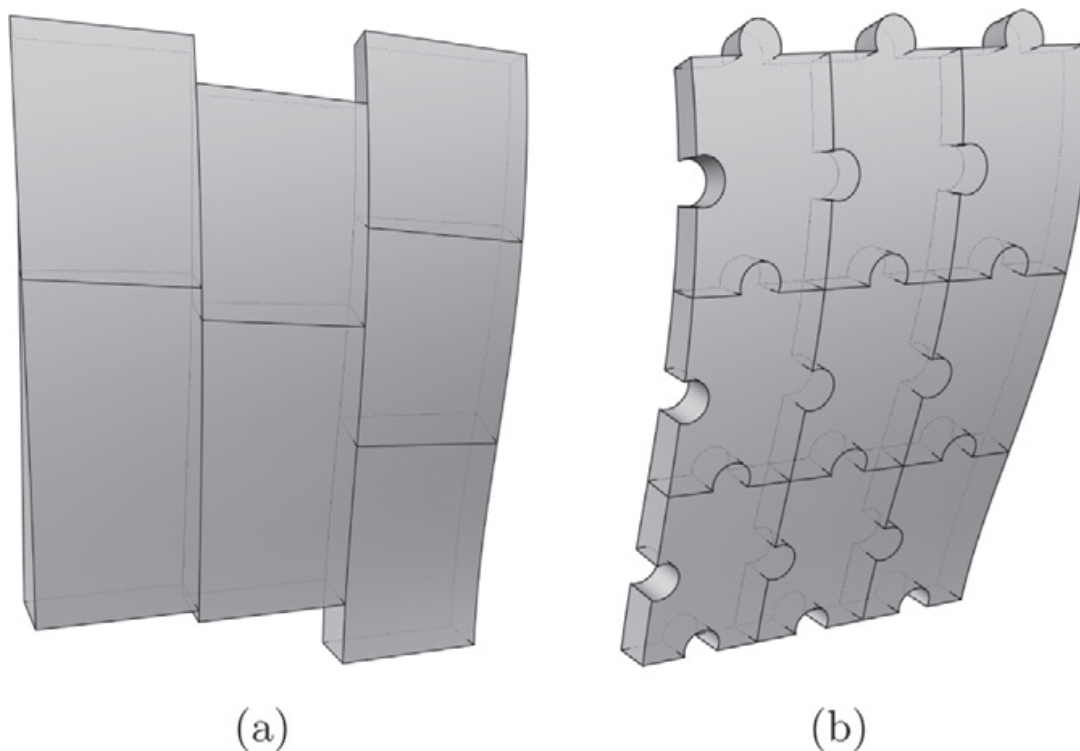


Slika 15 - a) složena forma generisana iz mreže međupresečnih NURBS krivih; b) dva skupa izoparametarskih krivih izvučena iz oba pravca deleći složenu formu na manje segmente; c) Izokrive iz jednog skupa pretvorene u polilinije, sa tačkama pozicioniranim na preseccima sa izokrivim iz drugog skupa i generisanje pravoizvodnih segmenata; d) izabrana jedna od generisanih pravoizvodnih površi

2.1.1.2. Panelizacija površi na elemente

Panelizacija zavisi od dva parametra - od oblika i od veličine konačnih elemenata.

U ovom slučaju su korišćena dva različita oblika: kutijasti elementi i elementi u obliku slagalice (slika 16). Prvi oblik je približan kvadru i baziran je na minimalnom utrošku materijala kao projektantskom ograničenju, uz primenu adheziva i dodatnih sredstava ili dodataka za spajanje. Drugi oblik je baziran na efikasnom uklapanju elemenata i podrazumeva generisanje elemenata sličnih slagalici koji ne zahtevaju dodatna sredstava za spajanje, ali koriste nešto više materijala prilikom fabrikacije usled specifičnosti svog oblika. Oba pristupa su u nastavku teksta detaljnije objašnjena.

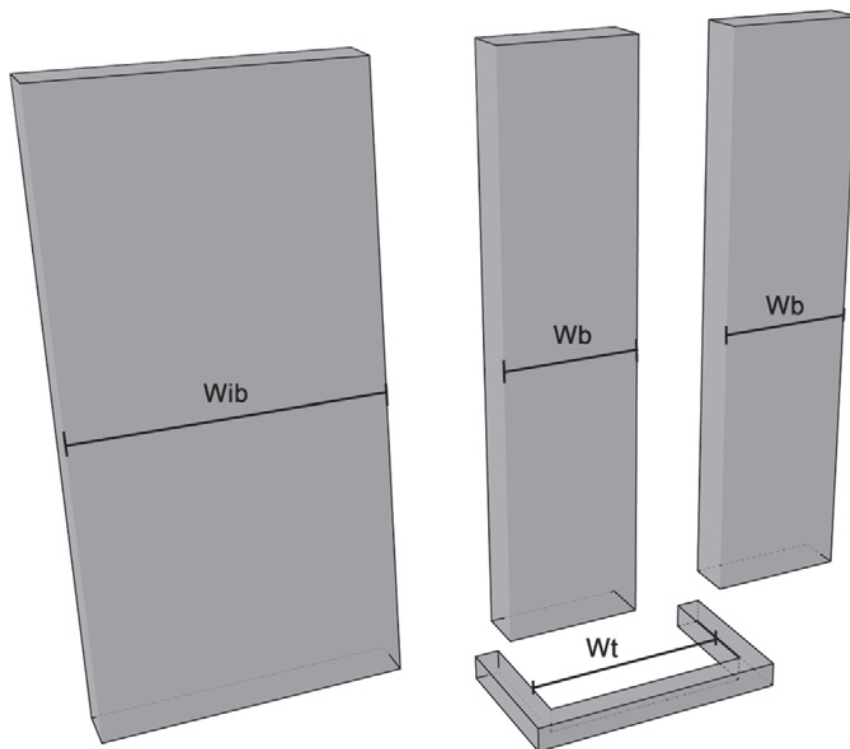


Slika 16 – Dva primera podele jednostruko zakrivljene površi – a) kutijasti elementi, b) elementi u obliku slagalice

Veličina elemenata koji treba da se fabrikuju zavisi od dva parametra. Prvi je dimenzija bloka iz kojih se elementi isecaju, a koji zavise od inicijalnog bloka penastog polistirena. Drugi parametar je veličina alata, kojom se vrši sečenje. Pored ova dva parametra bitan je i radni prostor i dohvat industrijskog robota koji nosi alat, što je uzeto u obzir u procesu fabrikacije (potpoglavlje 2.1.2.). U zavisnosti od tih vrednosti, a težeći da se maksimalno iskoristi dostupni i smanji otpadni materijal, uveden je uslov koji određuje maksimalnu širinu bloka iz kojih se elementi isecaju:

$$\begin{aligned}
 W_t \geq W_{ib} &\Rightarrow W_b = W_{ib} \\
 W_t < W_{ib} &\Rightarrow W_b = \frac{W_{ib}}{\text{round}\left(\frac{W_{ib}}{W_t}\right)} - \delta
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

U jednačini (1) W_t je širina alatke, δ je debljina reza (zavisi od svojstva materijala i alata i opisana je u poglavlju 3), W_{ib} je širina inicijalnog bloka i W_b je širina bloka iz kog se elementi isecaju u finalnom procesu fabrikacije. Na konkretnom primeru, inicijalni blok, koji ima širinu 60cm (slika 17 levo), se može podeliti na dva bloka, širine približno 30cm, primenom alata, sa širinom 40cm (slika 17 desno). Sve vrednosti se izražavaju u metrima. Kada je određeno kolika je širina bloka W_b , analiziraju se dva pristupa podeli pravoizvodne površi na elemente.



Slika 17 – Prikaz inicijalnog bloka penastog polistirena (levo) i dva bloka penastog polistirena sa alatkom za isecanje (desno)

Definisanje geometrije kutijastih elemenata

Podelom na kutijaste elemente generisani su segmenti sa oblikom koji je približan kvadru. Prvo se utvrdi širina elementa. Širina elementa se određuje na osnovu dužine generatriše¹⁰ pravoizvodne površi (izvodnica) i širine bloka iz koje se elementi isecaju na osnovu jednačine (2):

$$W_{box} = \frac{W_s}{\left\lceil \frac{W_s}{W_b} \right\rceil} \quad (2)$$

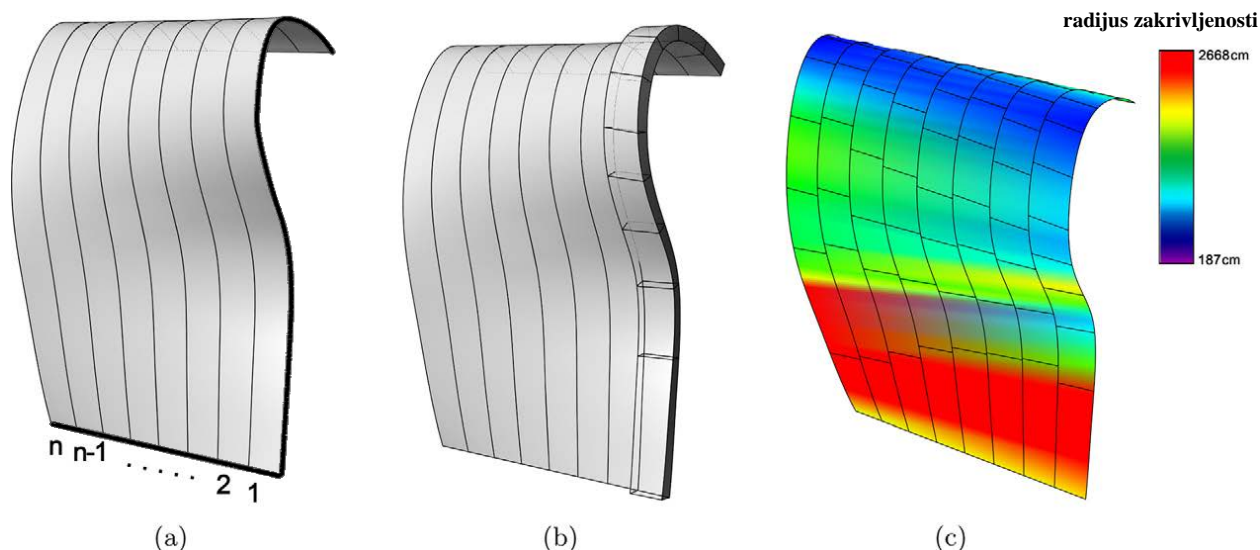
gde je W_s dužina generatriše pravoizvodne površi [m]. Površ je podeljena na trake širine W_{Box} [m]. Trake su zatim podeljene na elemente, tako da se pri odgovarajućoj visini i debljini elementa oni mogu fabrikovati iz blokova.

Za utvrđivanje visine elemenata $H_{i,j}$ (gde je i indeks trake, a j indeks elementa u trenutnoj traci) primenjena je sledeća procedura. Selektuje se i -ta traka, gde je i određeno iz skupa $i \in [1, n]$, a n je ukupan broj traka (Slika 18a). Sa jedne strane direktrise¹¹, meri se dužina, koja predstavlja inicijalnu visinu elementa $H_{i,j}$, a koja je podešena da bude jednaka visini bloka iz koje se elementi isecaju. Nadalje, željena debljina elementa se uvodi kao parametar i vrši se evaluacija date vrednosti radi provere da li takav element upada u zapreminu bloka. Ako se element ne uklapa, visina elementa $H_{i,j}$ se iterativno smanjuje za unapred definisanu vrednost h , dok god se ne uklopi u zapreminu bloka. Što je manja vrednost h , količina otpadnog materijala teži minimalnoj vrednosti, ali proces panelizacije traje duže. Kada je utvrđena visina elementa, taj segment se ukida iz date trake. Od ostatka i -te trake, ostali elementi (njihova visina i debljina) se iterativno određuju, dok se ne stigne do kraja direktrise

¹⁰ Generatriša, izvodnica - geometrijski entitet (prava ili ravan), ograničen na određenu meru (duž ili ravansku figuru) koji, pomerajući se po nekoj putanji generiše novu geometriju

¹¹ Direktrisa, vodilja - putanja, koja definiše kretanje generatriše

(slika 18b). Procedura se ponavlja za svaku od traka, dok svi segmenti ne budu generisani tj. dok cela površ nije podeljena. Bitno je primetiti da su elementi manji ukoliko je radijus zakrivljenosti površi manji (tj. zakrivljenost veća). Odnos ova dva parametra je prikazan putem boja na slici 18c, i to crvena boja prikazuje najmanju zakrivljenost, plava boja najveću zakrivljenost, a zelena međuvrednositi, za ovako odabranu površ.



Slika 18 – Podela površi na kutijaste elemente – a) Podela površi na trake; b) Određena veličina kutijastih elemenata na jednoj traci; c) Prikaz zavisnosti minimalnog radijusa zakrivljenosti i veličine kutijastih elemenata putem boja, gde crvena boja prikazuje najmanju zakrivljenost, plava boja najveću zakrivljenost, a zelena međuvrednositi

Definisanje geometrije elemenata u obliku slagalice

Glavna prednost podele na elemente nalik slagalici (postoje delovi za povezivanje sa susednim elementima) je jednostavnost povezivanja elemenata prilikom sklapanja. Oblici slagalice su definisani na delu ravni i zatim mapirani na željenu pravoizvodnu površ. Kako bi se ovo postiglo, neophodno je da se izmeri svaka ivica inicijalne pravoizvodne površi. Zatim se dimenzije dve najduže susedne ivice, direktrise i generatriše (zadebljane krive na slici 18a), uzimaju kao vrednosti za širinu i dužinu dela ravni.

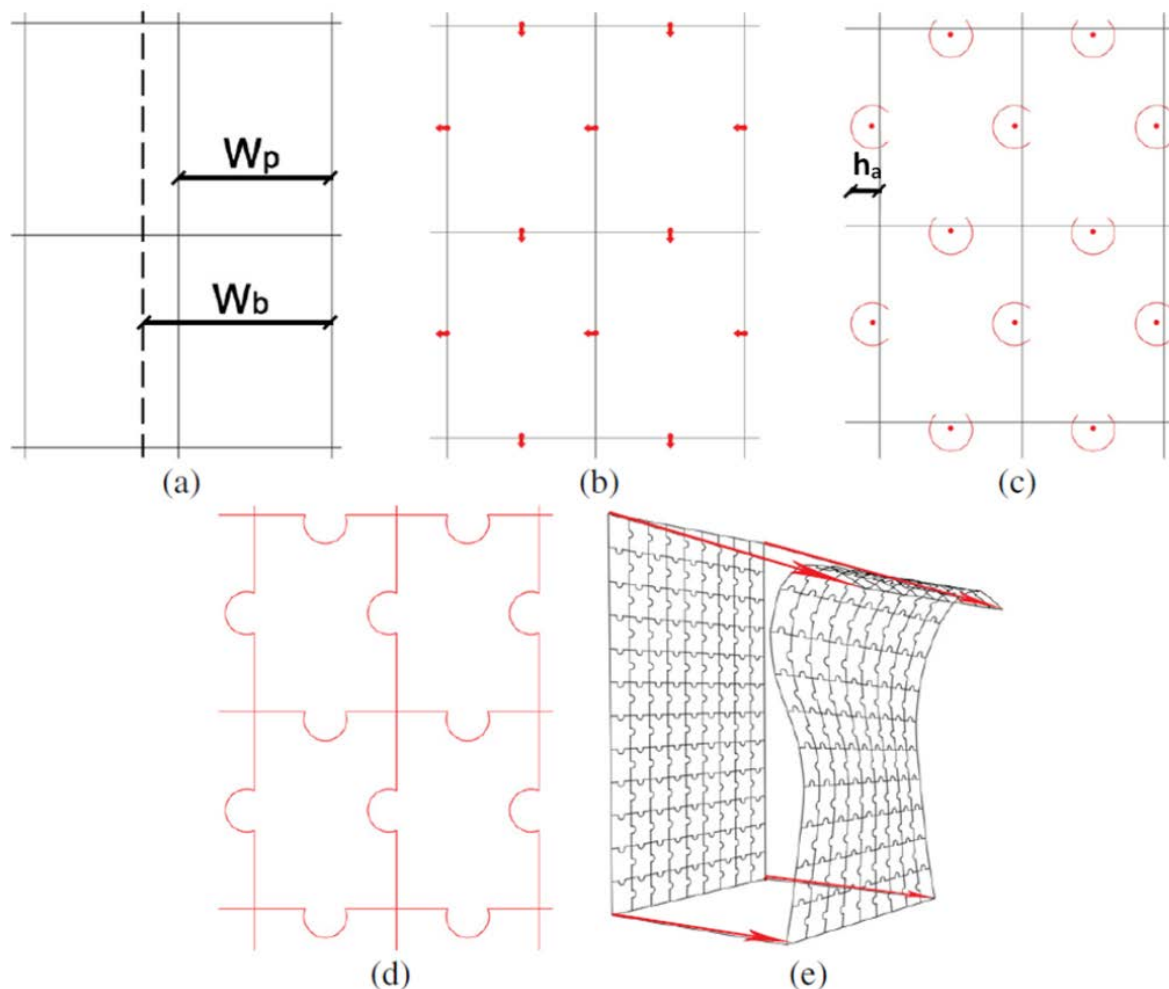
Kako bi se definisali oblici slagalice na ravnoj površini ona je prvobitno podeljena na četvorougaoone segmente (slika 19a). Širina četvorougla W_p se proračunava iz jednačine (3):

$$W_p = \frac{W_s}{\left| \frac{W_s}{W_b} \right|} - h_a \quad (3)$$

gde je h_a zbir poluprečnika kružnog luka i udaljenosti centra luka od ivice segmenta, izražene u metrima (slika 19c). Visina četvorougla je određena u odnosu na visinu bloka i uvodi se u proračun kao parametar.

Stoga, visina konveksnog luka određuje smanjenje širine elementa. Kada su četvorouglovi generisani, središnja tačka svake ivice je pomerena bliže ili dalje od centra četvorougla za vrednost poluprečnika i tipa luka - konveksni ili konkavni (slika 19b). Ove tačke služe kao centri kružnih lukova (slika 19c). Skraćene ivice i lukovi su spojeni u jednu zatvorenu krivu (slika 19d) i mapirane su na pravoizvodnu površ (slika 19e) koristeći već postojeću alatku u Grasshopper programskom okruženju. Alat mapira

UV koordinate¹² tačaka krivih iz ravanske na pravoizvodnu površ iste veličine. Usled zakrivljenosti pravoizvodne površi na koju se mapira, dolazi do iskrivljenja mapiranih krivih, ali to ne utiče na proces fabricacije elemenata.



Slika 19 – proces generisanja elemenata sličnih slagalici – a) generisanje ravanskih četvorougaoanih elemenata; b) Pomeranje polovina ivica; c) Generisanje lukova upotrebom tačaka kao centara; d) odsecanje viška linija; e) mapiranje krivih na površ

Na kraju je dodeljena željena debljina elemenata, nakon čega se vrši provera da li svi elementi mogu da stanu unutar zapremine bloka. U slučaju da to nije moguće, algoritam ispisuje vrednost debljine, koja bi zadovoljila taj kriterijum. Na taj način svi elementi za fabricaciju su generisani. Nakon završenog generisanja elemenata vrši se numeracija i pakovanje elemenata u grupe, kako bi moglo da se iseče više elemenata iz jednog bloka polistirena.

2.1.1.3. Numeracija i proces pakovanja elemenata

Proces numeracije je izvršen u odnosu na visinu ograničavajućeg kvadra¹³, od kvadra sa najmanjom do kvadra sa najvećom zapreminom. Visina je uzeta kao glavni faktor. Smatra se da su širina i

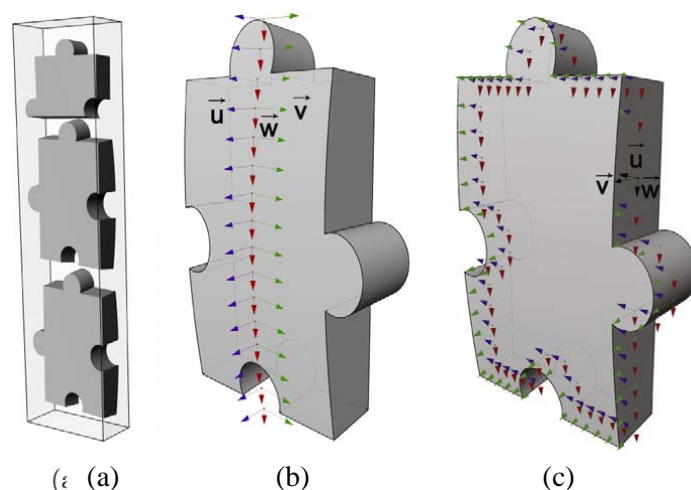
¹² UV koordinate - tačke na određenoj površi, određene udaljenostima od generatriše i direktise, kao U i V vrednost, respektivno

¹³ Ograničavajući kvadar (*bounding box*)- kvadar najmanje zapremine, koji uokviruje određeni element, tj. ograničava ga u svojoj zapreminu

debljina elemenata određeni u odnosu na blok polistirena iz kog se isecaju elementi. Proces numeracije je takođe bitan zbog kasnijeg procesa sklapanja.

Priprema za fabrikaciju podrazumeva proces pakovanja elemenata iz prostora modela u prostor blokova materijala za sečenje. Radi toga je kreiran algoritam, koji raspoređuje elemente, na osnovu visina ograničavajućeg kvadra, tako da može što više elemenata da stane u jedan blok. Razlog je bolja iskorišćenost bloka polistirena i smanjenje otpadnog materijala. Prosečan broj elemenata u jednom bloku je određen kao cela vrednost količnika visine bloka i prosečne visine svih elemenata za sečenje. Nakon određene vrednosti prosečnog broja elemenata u bloku (n), pristupa se odabiru elemenata. Algoritam prvo pronalazi $n-1$ (n minus jedan) broj najviših elemenata i traži poslednji element, koji može da se uklopi sa prethodnim u određenu visinu datog bloka. Ako algoritam ne može da pronađe nijednog kandidata za poslednji element, onda se n -prvi (pretposlednji) element zamenjuje prvim kraćim. Ceo proces se ponavlja dok svi elementi nisu grupisani u skupove od po n elemenata.

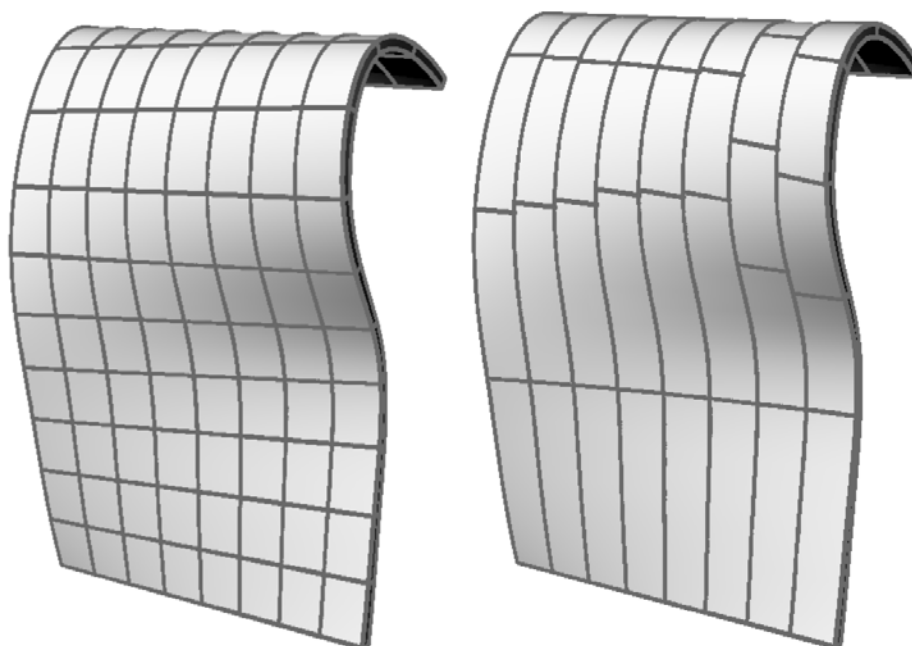
Za fabrikaciju prototipa, odabran je oblik elemenata nalik na slagalicu. U slučaju upotrebe ovakve panelizacije i za odabranu površ, visina elemenata je takva da se može do tri elementa iseći iz jednog bloka polistirena (veličine 1250x298x100mm). Primer jednog skupa od tri elementa je prikazan na slici 20a.



Slika 20 – Putanja sečenja: a) Pozicija i orijentacija elemenata sličnih slagalici pripremljeni za proces generisanja putanje unutar bloka; b) Vektori orijentacije u tačkama na prvoj putanji sečenja tj. za sečenje segmenata pravoizvodne površi; c) Putanja sečenja kontura slagalice i vektori, koji predstavljaju orijentaciju alatke sa vrelom žicom

U cilju poređenja, isti proces pakovanja elemenata je ponovljen za kutijaste elemente. Primenom gore objašnjenog postupka pakovanja elemenata bilo bi moguće rasporediti do dva kutijasta elementa po bloku polistirena, ali uz čak dva puta manje otpadnog materijala za dati slučaj površi, u poređenju sa elementima nalik na slagalice. Razlog tome je postojanje kružnih lučnih delova kod elemenata nalik na slagalice. Njihovo postojanje povećava dimenzije ograničavajućih kvadrova, ujedno stvarajući dodatni, neiskorišćen materijal unutar bloka, koji čini otpadni materijal nakon sečenja. Primenom kutijastih elemenata, pored postojanja manje otpadnog materijala, učinjena je i ušteda prilikom panelizacije tj. generisanja manjeg broja elemenata u odnosu na elemente nalik na slagalice (duplo manje). Kako bi se dodatno proverila validnost podele na kutijaste elemente u odnosu na zakrivljenost forme, urađen je primer podele forme na kutijaste elemente uniformnog oblika. U tom slučaju, uzimajući njihovu visinu, može da stane četiri elementa u jedan blok (slika 21 levo), pri

čemu je potrebno 8% manje materijala za fabrikaciju u odnosu na primenu oblika u odnosu na poluprečnik zakrivljenosti površi (slika 21 desno).



Slika 21 - levo - prikaz primene uniformnog oblika kutijastih elemenata za panelizaciju; desno - prikaz primene oblika kutijastih elemenata na osnovu poluprečnika zakrivljenosti površi

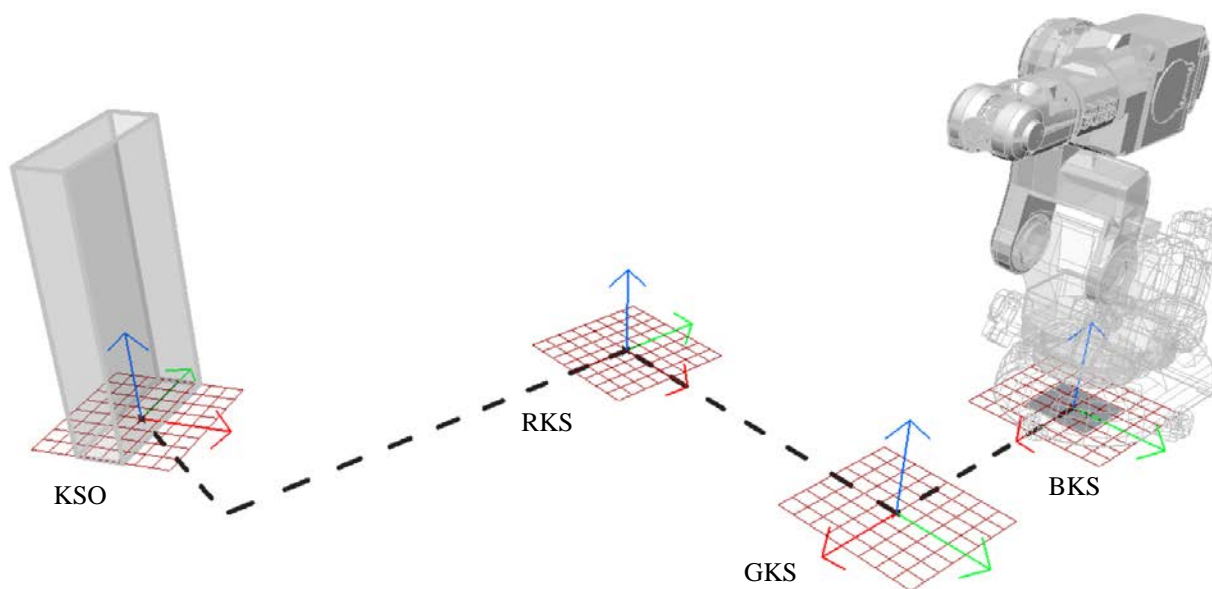
Ovakva razlika ne predstavlja veliku prednost za primenu uniformnog oblika kutijastih elemenata. Pritom povećava se njihov broj (u ovom slučaju duplo u poređenju sa podelom u odnosu na zakrivljenost forme) što ima uticaja na kasniji proces fabrikacije. Iz tog razloga je podela na kutijaste elemente u odnosu na zakrivljenost forme bolji način podele u odnosu na uniformni oblik. Kako bi se iz bloka isekli elementi, moraju da se odrede i putanje sečenja.

2.1.1.4. Generisanje putanje sečenja

Putanja se sastoji od niza tačaka, gde je svaka tačka određena svojom pozicijom. Data pozicija tačke određuje i poziciju alata robota. Međutim, alat robota u datoj tački može da bude orijentisan na mnogo načina (paralelan sa podom, vertikalno postavljen, pod određenim uglom u odnosu na površ, koja se obrađuje, pod određenim uglom u odnosu na robota i slično). Kako bi se na adekvatan način definisala i pozicija i orijentacija alata robota, u ovoj disertaciji, se koristi pojam target. U putanju sečenja treba uključiti i tačke za bezbedan prilazak i izlaz alata u odnosu na blok. Pre nego što počne proces generisanja putanje sečenja, blok mora da se pozicionira u odnosu na robota, jer se targeti definišu u odnosu na koordinatni sistem robota. Zatim je potrebno simulacijom proveriti da li je blok unutar dohvata alata robota.

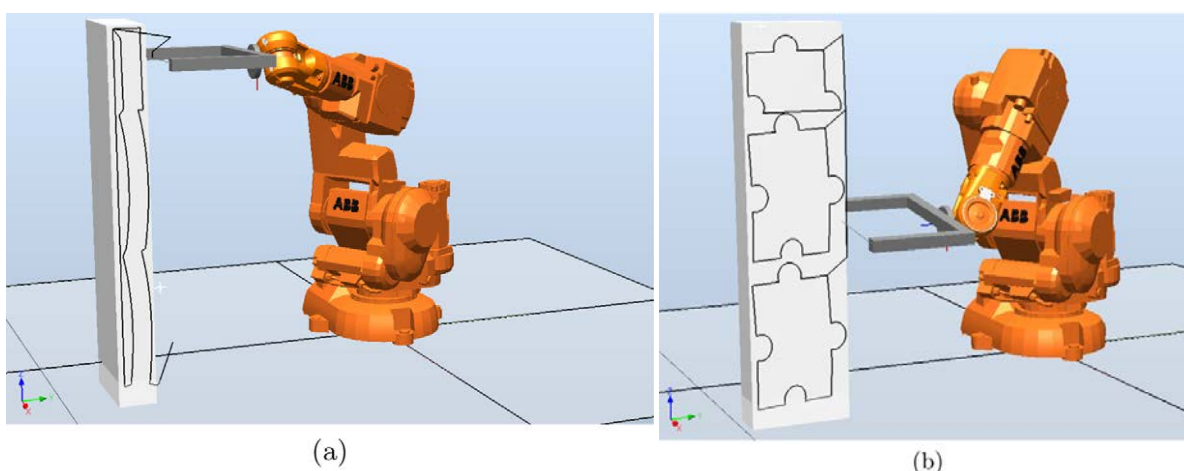
Kako bi se uopšte definisali targeti koji se vezuju za objekat koji se fabrikuje, a treba da budu izraženi u odnosu na bazni koordinatni sistem robota, definisani su sledeći koordinatni sistemi - koordinatni sistem objekta koji se obrađuje (KSO), radni koordinatni sistem (RKS), bazni koordinatni sistem (BKS) i globalni koordinatni sistem (GKS). KSO definiše poziciju i orijentaciju bloka u odnosu na samog sebe. Pozicioniran je u težištu bazisa bloka, a orijentisan tako da su ose paralelne sa pravcima ivica bloka (slika 22). Targete, koji su definisani u odnosu na KSO je potrebno referencirati u odnosu

na GKS i BKS, kako bi bili primenjeni za putanju sečenja. Stoga, pozicije i orijentacije ova dva koordinatna sistema su poklopljena. Kako bi se ostvarila veza između KSO i GKS, uvodi se RKS (slika 22). Njegova pozicija je određena udaljenošću od koordinatnog početka GKS (slika 22), a sa kojim treba da se poklopi BKS (slika 22), dok se orijentacija podešava shodno potrebama dohvata alata i procesa fabrikacije. Poklapanjem KSO sa RKS sistemom, svi targeti su direktno definisani u odnosu na GKS. Orijetacija GKS je prethodno definisana u softveru. Nakon definisanih koordinatnih sistema, mogu da se definišu i putanje sečenja.



Slika 22 Prikaz koordinatnih sistema potrebnih za određivanje targeta u odnosu na bazni koordinatni sistem robota: GKS - globalni koordinatni sistem, BKS - bazni koordinatni sistem robota, RKS - radni koordinatni sistem, KSO - koordinatni sistem objekta

Postoje dve putanje sečenja za svaki blok (slika 23), koje se nalaze u međusobno upravnim ravnima. Prva putanja odseca deo inicijalne pravoizvodne površi, za element koji se fabrikuje (slika 23a). Druga prati konture elemenata (slika 23b). Određeni su ekstremi konture pravoizvodnih površi u odnosu na ravni u kojima leže. Najniža i najviša tačka su time definisane, na taj način omogućavajući da ceo element bude isečen, uključujući i kružni luk za spajanje sa susednim elementom.



Slika 23 – Pozicija bloka penastog polistirena a) za sečenje prednjeg i zadnjeg dela svakog od elemenata nalik slagalice; b) za sečenje kontura slagalice

Vodeći se ovim tačkama (ekstremima kontura), na datoj površi je generisana geodezijska kriva¹⁴ (slika 20b). Ona predstavlja putanju koju alat sa zagrejanom žicom treba da pređe. Kako bi se sečenje precizno izvršilo, potrebno je na datoj krivoj odrediti poziciju i orijentaciju alata sa zagrejanom žicom. Kako bi se odredile pozicije, kriva je podeljena na niz manjih segmenata (kriva pretvorena u poliliniju), gde je broj segmenata parametar koji određuje preciznost sečenja. Krajnje tačke svakog segmenta su uzete kao pozicije i u njima su postavljeni koordinatni sistemi kako bi se definisala orijentacija alata (uzimajući da i koordinatni sistem ima poziciju, koordinatni početak, i orijentaciju, tri međusobno upravne ose). Jedna osa ovog koordinatnog sistema je upravna na površ, a druge dve ose leže u tangentnoj ravni površi u datoj tački. Ovakav odabir koordinatnih sistema bi uticao na orijentaciju alata robota tako da je alat uvek upravan na površ, koju seče. To bi prouzrokovalo poteškoće u postizanju kretnji, moguće sudare kao i nemogućnost izvršenja putanja. Stoga, predlaže se sledeći način generisanja osa, objašnjen na primeru jedne tačke. Tangenta ravan u datoj tački je definisana pomoću dva vektora, od kojih se jedan poklapa sa generatrisom (važno je za pozicioniranje vrele žice tokom procesa sečenja). Taj vektor je definisan kao vektor \vec{v} . Jedinični vektor $[0 \ 0 \ 1]^T$ sa početkom u datoj tački je zatim uveden u odnosu na GKS robota. Pravac pružanja visine elemenata (i bloka) je kolinearan sa pravcem vektora $[0 \ 0 \ 1]^T$. Vektorskim proizvodom između \vec{v} i $[0 \ 0 \ 1]^T$, generiše se vektor \vec{u} , koji čini drugu osu koordinatnog sistema. Poslednji korak je da se proračuna vektorski proizvod vektora \vec{v} i \vec{u} , koji generiše vektor \vec{w} (Slika 20b). Na taj način, svi podaci za datu orijentaciju alata su određeni. To uključuje tri koordinate u RKS bloka i tri vektora, koji definišu orijentaciju alata sa vrelom žicom. Primenom ovakvog pristupa za svaku tačku geodezijske krive, dobijaju se sve tačke prve putanje sečenja. Vrela žica je kolinearna sa vektorom \vec{v} koji zajedno sa vektorom \vec{u} generiše ravan za orijentaciju alata koji drži zagrejanu žicu. Orijetacija alatke je bitna zbog izbegavanja sudara robota i alata i u ovom slučaju je tako određena da je što približnija horizontalnoj ravni. Horizontalna orijentacija alata ne dovodi do sudara sa robotom i smanjuje nepotrebne promene, fokusirajući se samo na pravac zagrejanje žice. Treći vektor tj. vektor \vec{w} se bira tako da formira desni koordinatni sistem. S obzirom da postoje tri elementa vertikalno poredana jedan na drugi unutar jednog bloka, tačke između susednih elemenata su spojene linijom, kako bi se generisala jedinstvena putanja za celu prednju i zadnju stranu. (slika 23a).

Za generisanje druge putanje, konture površinskog segmenta svakog elementa su prvo podeljene na sastavne delove - kružne i pravolinijske segmente. Svaki od tih delova je zatim podeljen u određen broj segmenata, čije su krajnje tačke referencirane. To uključuje i početne i krajnje tačke kružnih i pravolinijskih sastavnih delova i poklapanje susednih krajnjih tačaka. Referenciranje tačaka na ovaj način garantuje precizan proces sečenja. Kroz date tačke je interpolirana zatvorena kriva (polilinija), koja predstavlja drugu putanju, pri čemu treba odrediti i orijentaciju alata sa vrelom žicom za svaku tačku. Koordinatni sistem, pridružen svakoj tački je određen na isti način kao i za tačke u prvom putanji (slika 20c).

Na kraju, pozicije tačaka obe putanje su modifikovane u odnosu inicijalne pozicije (ofsetovane, pomerene upravno na ravan u odnosu na koju se vrši sečenje za vrednost $\delta/2$) kako bi se uzela u obzir debljina reza. Na taj način, svi podaci o putanji alata su generisani. Nakon definisanih putanja, može da se počne sa pripremom podataka i kalibracijom za deo programa, koji se radi u softveru za upravljanje robotom što će biti objašnjeno u narednom potpoglavlju - procesu fabrikacije.

¹⁴ geodezijska kriva predstavlja najkraće rastojanje između dve tačke na nekoj zakrivljenoj površi

2.1.2. Proces fabrikacije

Kako bi se omogućilo potrebno kretanje robota u procesu sečenja zagrejanom žicom, potrebno je generisati program za upravljanje robotom. Dati program je sačinjen od dva programa: jedan unutar okruženja softvera za upravljanje robotom - RAPID i drugi unutar okruženja softvera za projektovanje (Rhinoceros i Grasshopper) - C# skripta za generisanje tačaka i vektora, kao dopuna programa u RAPID-u.

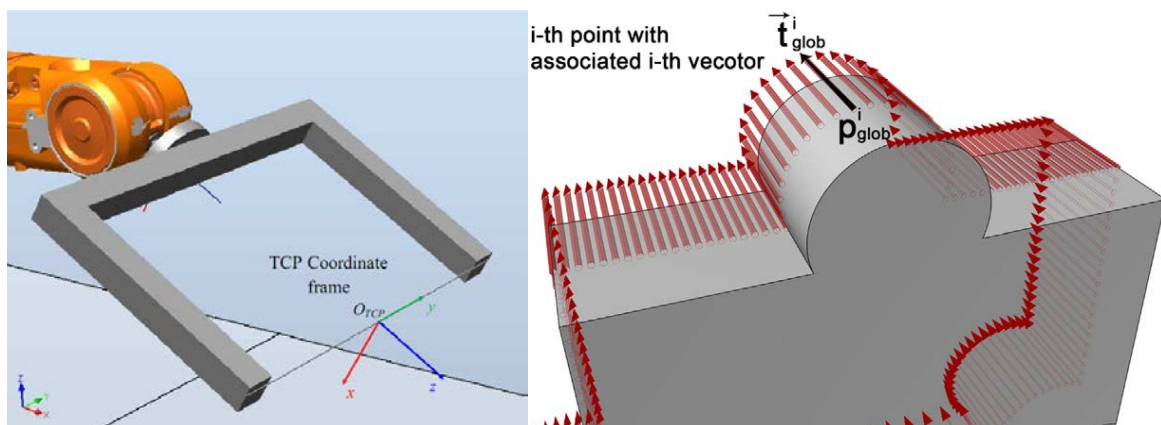
2.1.2.1. Program napisan u Rapidu

Za simulaciju putanje sečenja, testiranje dostupnosti tačaka unutar putanje sečenja i proveru sudara prilikom fabrikacije se koristi RobotStudio, koji podržava rad sa ABB robotima. Uzimajući u obzir da je alat i da postoji mogućnost sudara alata sa okolinom pa čak i sa robotom targeti u putanji su odabrani tako da im je orijentacija što više približna horizontalnoj.

RAPID programski jezik je organizovan po modulima. U ovoj disertaciji, u RAPID delu programa se koriste tri modula:

- modul gde su smešteni podaci o poziciji bloka (RKS) i TCP¹⁵-a alata - CalibData
- modul gde je smešten glavni program - Module1
- modul za definisanje niza targeta, koji treba da se koriste za putanju sečenja - Targets

U prvom modulu su definisani podaci, koji se tiču TCP-a alata (slika 24 levo) i pozicije bloka iz kojeg se isecaju elementi. Obe vrste podataka predstavljaju koordinatne sisteme sa pozicijom i orijentacijom. Koristeći flex pendant¹⁶ za robota sa montiranim alatom, TCP alata se određuje iz realnih uslova okruženja. Postupak počinje generisanjem podatka o poziciji i orijentaciji TCP-a i njemu pridruženog koordinatnog sistema pomoću flex pendants. Zatim se odredi pozicija TCP-a na alatu i definiše pomoću najmanje tri targeta, dovođenjem željene pozicije realnog TCP na alatu robota u jednu jedinstvenu tačku u prostoru, ali pod različitom orijentacijom. Nakon toga, flex pendant ispisuje podatke o TCP-u, definisan kroz poziciju i orijentaciju. Ovakav postupak daje mnogo preciznije rezultate od običnog merenja pozicije TCP alata u realnim uslovima. RKS bloka iz kojeg se isecaju elementi se može definisati u RAPID programskom okruženju u sličnom formatu kao i TCP.



Slika 24 - Levo - pozicija i orijentacija TCP koordinatnog sistema za alatku sa vrelom žicom; desno - detalj jednog elementa nalik na slagalici sa pridonatim vektorima (crvene strelice), koji se koriste za proračun targeta za RAPID programski jezik

¹⁵ TCP - *Tool Center Point* - centralna tačka alata, u koju se postavlja koordinatni sistem čijom pozicijom i orijentacijom se određuju putanja i orijentacija alata tokom fabrikacije. Najčešće se traži da se koordinatni sistem TCP-a poklopi sa željenim targetima tokom procesa isecanja

¹⁶ Flex pendant - uređaj za ručno navođenje robota

Algoritam glavnog programa (Algoritam 1) je generisan tako da je nezavistan od oblika elemenata, koji se isecaju, veličine alatke, pozicije bloka i slično.

Algoritam 1 RAPID program

Input

Read CalibData data;
Read Targets data;

Output

Write target data string;

initialization;

Read NUMBER_OF_TARGETS for path_1;

while n < NUMBER_OF_TARGETS **do**

Move TCP to Target_1_path_1;

Wait_for_confirmation_1;

Move TCP along path_1;

Safe_exit_path_1;

Move TCP to Target_1_path_2;

Wait_for_confirmation_2;

Move TCP along path_2;

Safe_exit_path_2;

Wait_for_confirmation_3;

end

Po algoritmu 1, na početku, robot će pozicionirati svoj TCP u inicijalnu poziciju. Zatim je potrebno da korisnik potvrdi da je alatka dobro pozicionirana i da je blok penastog polistirena postavljen tako da se iseče prednja i zadnja strana elemenata.

Nakon potvrde, robot će započeti proces sečenja prednje i zadnje strane zagrejanom žicom. Kada se proces sečenja završi, robot će pomeriti alat van bloka polistirena. Zatim blok treba pomeriti u položaj za drugu putanju sečenja i korisnik treba da potvrdi da je blok pozicioniran za drugu putanju sečenja. Nakon izvršavanja i druge putanje sečenja, robot će pomeriti alatku na određeno odstojanje od bloka polistirena kako bi omogućio njegovo uklanjanje i pozicioniranje novog komada.

Slika 20 pokazuje poziciju bloka polistirena za isecanje površi prednje i zadnje strane elemenata, kao i za finalno isecanje kontura elemenata nalik na slagalicu, gde crna linija predstavlja putanju TCP-a, odnosno putanju zagrejanog žice. Ovaj program predstavlja osnovu za isecanje svih ostalih elemenata date složene forme.

S obzirom da je svaki element unikatan, svaki put kada je potrebno fabrikovati novi element, tačke i vektori za putanje sečenja moraju da se ažuriraju. Targeti su deo posebnog modula unutar RAPID-a, zajedno sa podatkom o ukupnom broju targeta. Za automatizovano prebacivanje podataka o putanjama sečenja, iz Grasshopper programskog okruženja u RAPID programsko okruženje, napisana je skripta u Grasshopperu koristeći C# programski jezik.

2.1.2.2. Dopuna programa u RAPIDU - C# skripta za generisanje targeta

Data skripta služi da generiše RAPID modul za targete, tako da sadrži informacije o targetima i putanjama. Ulazni podaci, koji se koriste za skriptu određuju poziciju i orijentaciju alata sa zagrejanom žicom tokom procesa sečenja.

Pozicija i orijentacija novih targeta je određena na osnovu tačaka i njihovih odgovarajućih vektora za svaki element, kao što je prikazano na slici 24 desno. Koristi se KSO bloka, koji je poklopljen sa RKS bloka. Pozicija i orijentacija RKS je označena kao p_{ref} i o_{ref} , respektivno.

Struktura podataka za čuvanje informacija o targetima unutar RAPID programskog okruženja se sastoji od sledećih polja:

- vektor pozicije p (x,y i z) TCP-a
- vektor orijentacije o TCP-a zapisan u formi kvaterniona (q_{xt} , q_{yt} , q_{zt} and q_{wt})
- konfiguracija osa robota (RAPID Reference Manual)

Za svaki target, pozicija je izračunata na osnovu $p_t = p_{glob} - p_{ref}$, dok je orijentacija o_t određena u obliku kvaterniona (q_{xt} , q_{yt} , q_{zt} and q_{wt}) po sledećoj proceduri. Prvo su jedinični vektori \vec{t}_i , \vec{t}_j i \vec{t}_k izračunati kao:

$$\vec{t}_j = \vec{t}_{glob}^i, \vec{t}_i = \frac{\vec{k}_{ref} \times \vec{t}_{glob}^i}{|\vec{k}_{ref} \times \vec{t}_{glob}^i|}, \vec{t}_k = \vec{t}_i \times \vec{t}_j$$

što obezbeđuje matricu transformacije T:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} = [\vec{t}_i \quad \vec{t}_j \quad \vec{t}_k]^{17}$$

Nakon toga, kvaternioni su proračunati koristeći algoritam dat u Prilogu A. Konfiguracija osa robota i eksterne ose su podešene na određene vrednosti i ne menjaju se. Nakon što su sve strukture podataka koje se traže poznate, proračunate vrednosti su spojene sa ostatkom koda u RAPID-u. Takva struktura čini modul za targete, spreman za implementaciju u RAPID program.

2.1.2.3. Realizacija složene forme

Prethodno objašnjena metodologija je implementirana za realizaciju prototipa 1,7m širine, 2,1m dužine i 5cm debljine, pri čemu su direktrise duge 3,2m. Inicijalni blok polistirena je 60cm širok, 125cm dugačak i 10cm debeo. Inicijalna složena forma je podeljena u 108 delova nalik na slagalicu u rasporedu 9x12 elemenata, na osnovu procedure objašnjene u potpoglavlju 2.1.1.2. (slika 25 levo). Elementi su numerisani u rastućem nizu po visini ograničavajućeg kvadra, gde je 0 dodeljena najnižem elementu, dok je 107 dodeljen najvišem elementu. Ovakav način numerisanja obezbeđuje fabrikaciju po 3 elementa iz svakog bloka polistirena.

Prvo se inicijalni blok polistirena deli u blokove za sečenje, na osnovu veličine alatke (Odeljak 2.1.1.2.). Odabrana širine alatke, koja drži zagrejanu žicu je 40cm, dok je debljine žice 0,4mm. Na osnovu jednačine (1) (što uključuje i debljinu reza), širina bloka iz kog se iseca je određena da bude 29,8cm, što znači da su svi inicijalni blokovi polistirena presečeni na pola i da je njihova veličina 29,8cmx125cmx10cm.

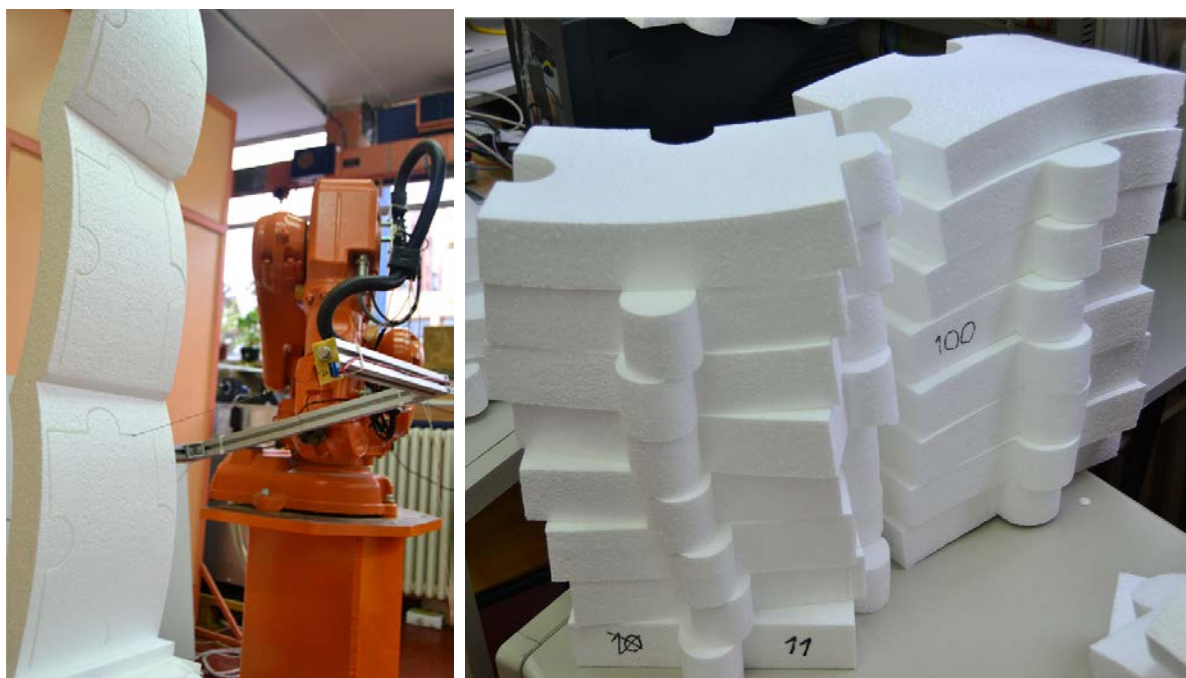
Blok iz kog se iseca treba da bude pozicioniran i orijentisan u okviru radnog prostora robota, kako bi elementi mogli da se isecaju. Kada se inicira program za sečenje, robot pozicionira alatku sa zagrejanom žicom u prvi target prve putanje sečenja. Blok se postavlja ispred alatke i započinje se sa procesom sečenja (slika 25 desno).

¹⁷ Objašnjeno u prilogu A na kraju disertacije



Slika 25 - Levo - pravoizvodna površ podeljena na numerisane elemente; desno - pozicija alatke za sečenje na početku prve putanje sečenja

Nakon što je završena prva putanja sečenja, alatka sa zagrejanom žicom se pozicionira na početak druge putanje sečenja. Shodno tome, potrebno je blok zarotirati za 90° u smeru kazaljke na satu oko vertikalne ose, poklapajući stranu bloka iz kog se iseca sa zagrejanom žicom. Nakon toga, druga putanja započinje, koja i generiše finalne elemente (slika 26 levo).



Slika 26 - Levo - procedura sečenja elemenata nalik na slagalicu tokom druge putanje sečenja; desno - numerisani elementi nakon isecanja

Druga putanja započinje isecanjem gornje slagalice i dalje se ide na dole. Kako bi se smanjila greška prilikom sečenja, alatka se kreće u smeru kazaljke na satu, na takav način da se gornji delovi elemenata iseku tek na kraju. Na ovaj način elementi se neće pomerati pod uticajem gravitacije, dok

god se ne završi proces isecanja datog elementa. Nakon što su tri elementa isečena iz bloka, oni su numerisani na osnovu svoje pozicije u strukturi (Slika 26 desno).

Kada su svi elementi isečeni, započinje se sa procesom sklapanja. Uzimajući da se proces sklapanja bazira na samouklapajućim elementima, potrebno je ostvariti čvrstu konekciju između slagalica. Problem prilikom sklapanja složenih formi na ovaj način je način ubacivanja elemenata. Složena forma ima promenljivu zakrivljenost. Shodno tome, jedan element nalik na slagalicu je lakše uklopiti kada je manje okolnih elemenata prisutno. Uklapanje jednog reda slagalica nije problematično, jer pravac uklapanja treba da se ostvari samo za jedan lučni deo slagalice. Zbog postojanja mnogostrukih pravaca uklapanja elemenata i lučnih delova slagalice, koje treba simultano uraditi, pravljenje više redova i pokušaj uklapanja se čini kao neadekvatna strategija sklapanja.

Najbolji način rada je sklapati deo po deo. To znači da nakon sklopljenog jednog reda, dodavanje još jednog elementa ne predstavlja problem, jer zahteva da se omogući samo jedan pravac ubacivanja elementa. Međutim, svaki naredni element zahteva barem dva pravca uklapanja i dva lučna dela slagalice treba da se spoje. Uzimajući da su elementi generisani tako da im je dodirna strana upravna na generisanu površ, a da se zakrivljenost naglo ne menja na nivou cele složene forme, uklapanje elemenata na ovaj način je moguće. Sa povećanom zakrivljenošću površi, vektor pravca uklapanja lučnih delova slagalica može drastično da se razlikuje. Problem kod sklapanja može da se desi prilikom postojanja velike negativne Gausove zakrivljenosti¹⁸. U takvim slučajevima, dodirne strane mogu biti generisane nepravilno na površ, već tako da su sve dodirne strane slagalica paralelne sa jednim pravcem ubacivanja elementa. Takođe, elementi od polistirena, sa svojim svojstvima, mogu da podnesu blaga krivljenja ili pritisak, kako bi se uklopile u svoje mesto u formi. Sličan pristup je korišćen i prilikom sklapanja slobodne forme sa rigidnim elementima od penastog polistirena (Rippmann & Block, 2011).

Takođe, potrebno je ustanoviti strategiju sklapanja kako bi se smanjio proces šmirglanja i oštećivanja elemenata tokom sklapanja. Strategije zavisi od konkretnog slučaja, koji se rešava. Ako je cilj da se struktura složi na jednom mestu, gore opisati pristup se čini validnim. U ovom slučaju, cilj je bio laka rasklopivost i mogućnost transportovanja. Zato je osmišljena strategija da se složena forma sklopi od tri velika dela. Spojnice čini red elemenata, koji imaju najveću Gausovu zakrivljenost. Ovo se razlikuje od gore istaknute strategije, ali je i krajnji cilj drugačiji. Kao posledica, elementi treba da se spajaju na takav način da moraju da zadovolje i do tri pravca uklapanja. Međutim, uzimajući svojstvo tih elemenata da su većinom ravanski, pravac uklapanja je sveden na jedan (slika 27 levo).

¹⁸ Gausova zakrivljenost u određenoj tački predstavlja količnik poluprečnika zakrivljenosti principijalnih krivih, koje sadrže datu tačku. Principijalne krive predstavljaju normalne preseke površi u datoj tački, takve da su poluprečnici zakrivljenosti takvih krivih minimalni i maksimalni, respektivno.



Slika 27 - Levo - Tri dela spojena u jednu strukturu sa nedostajućim pretežno ravanskim elementima nalik na slagalicu, koji se uklapaju duž jednog pravca; desno - završena struktura sa sporadično izostavljenim elementima, kako bi se naglasila podela

Takođe, podela cele forme na tri velika dela olakšava prenošenje. Na kraju, potrebno je da se struktura ošmirgla, kako bi se uklonili tragovi nepreciznog procesa fabrikacije. Takve greške mogu da se jave najviše zbog ručnog rotiranja blokova između dve putanje sečenja. Manje greške prilikom okretanja mogu dovesti do nepoklapanja u zakrivljenosti, neadekvatnom uklapanju, kao i smanjenju veličine elementa. Zbog bele boje i neprimetnog šava između dodirnih strana elemenata, nekoliko elemenata je uklonjeno iz finalne strukture, kako bi se pokazao i sam gradivni element (slika 27 desno). Zbog svoje forme i oblika, struktura je stabilna čak i bez elemenata, koji nedostaju.

Primenom metode, koja je predložena u ovom slučaju, verifikovano je da se može fabrikovati prototip od penastog polistirena u vidu složene forme, koji ne zahteva dodatna spojna sredstva.

2.2. Projektantski scenario 2 - Integrisani pristup fabrikaciji sa nestandardnom veličinom i oblikom elementa

2.2.1. Projektantski kriterijumi i proces dizajna

Mogućnost fabrikovanja nekog elementa najčešće zavisi od veličine radnog prostora mašine, koja se koristi, kao i od odabira alatke. Troosna CNC mašina ima na raspolaganju zapreminu kvadra iznad radne ploče stola na kom se nalazi i time ograničava veličinu elemenata, koji mogu da se fabrikuju na njoj. Pritom, zbog linearnih osa, način prilaska određenim tačkama je ograničen upravno na ravan stola. Industrijski robot sa šest stepeni slobode, antropomorfne konfiguracije ima radni prostor koji je sferni kao i mogućnost prilaska tačkama na više načina (konfiguracija osa¹⁹). Odabir alatke može da utiče na veličinu radnog prostora, odnosno spretnost (*dexterity*)²⁰ prilikom fabrikacije. U cilju povećanja mogućnosti fabrikovanja većih elemenata, nego što omogućava radni prostor jednog industrijskog robota, u ovom projektantskom scenariju je predložena upotreba dva robota, čije kretanje je koordinisano (u ovom primeru oba robota se upravljaju pomoću zajedničkog kontrolera). Za proces sečenja je usvojen scenario gde jedan robot drži element i adekvatno ga pozicionira, dok ga drugi robot, koji nosi alat za fabrikaciju, obrađuje. Kao i u prethodnom slučaju, to će biti pravolinijska zagrejana žica. Na taj način je značajno povećana veličina elemenata, koji mogu da se fabrikuju.

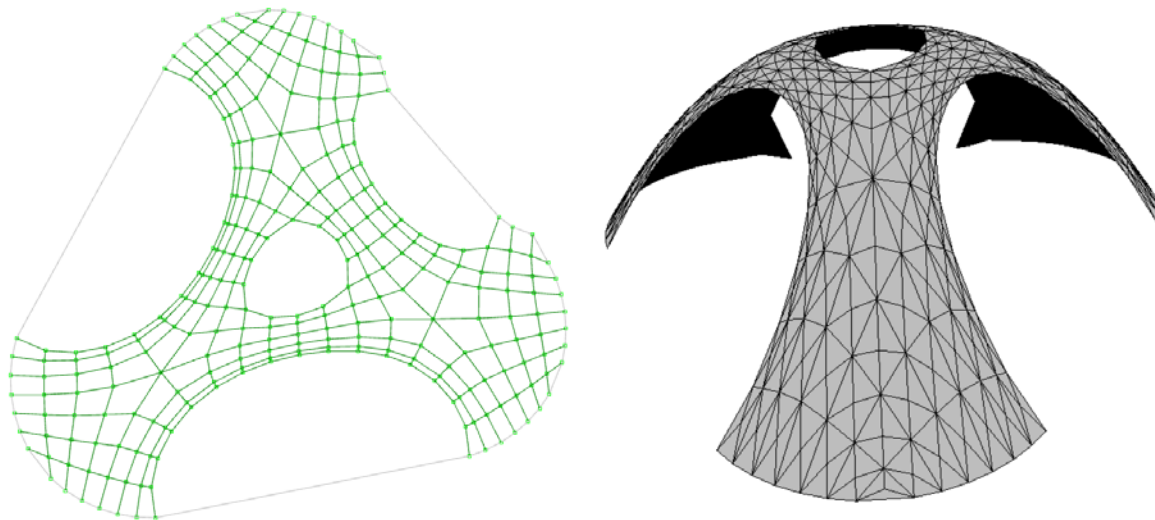
2.2.1.1. Generisanje forme

Kao primer arhitektonske forme, za slučaj korišćenja dva robota u procesu fabrikacije, odabran je paviljon prikazan na slici 27. Projektantski zadatak za scenario 2 je bio da se generiše velika, samonoseća, tanka, ljuskasta struktura, sa debljinom ljuske ispod 20cm, nalik na iglo. Prostor koji je bio na raspolaganju ima dimenzije 8x8m u osnovi, sa visinom do 2,5m. Struktura je bila fabrikovana u okviru međunarodne manifestacije „Noć istraživača“, koja se održala 30. septembra 2016. godine u Novom Sadu. Uslovi su bili: da se spoji u veoma kratkom vremenskom periodu (manje od 10 sati), da bude stabilna tokom održavanja manifestacije i da se efikasno rasklopi i spoji na drugom mestu. Kako bi se istražile i druge vrste generisanja složenih formi, osim onih baziranih na prostim matematičkim geometrijskim entitetima, kao što je bilo u prethodnom slučaju, za ovaj slučaj odabrana je primena principa „digitalnog traženja forme“ (*form-finding*). Za generisanje samonosive strukture korišćen je softverski dodatak RhinoVault. Kako bi se ispitao slučaj fabrikovanja većih elemenata nego u prethodnom slučaju, odabrano je da se fabrikuje paviljon srazmeran čovekovim merama.

Generisanje forme počinje crtanjem željenog oblika forme u osnovi. Kako bi bio omogućen prolaz kroz paviljon, generisana je forma sa Y oblikom osnove, odnosno sa tri kraka. Postavljen je otvor na vrhu, da se stvori dodatni osećaj otvorenosti (slika 28 levo). Za definisan oblik osnove, generisana je samonosiva struktura RhinoVault (slika 28 desno).

¹⁹ Konfiguracija osa predstavlja niz od četiri broja, koja definišu u kom kvadrantu pune rotacije se određene ose rotacije zglobova industrijskog robota nalaze

²⁰ Spretnost (*dexterity*) je sposobnost robota da se neometano kreće unutar svog radnog prostora i pristupi svakoj tački objekta koji obrađuje sa potrebnom orijentacijom



Slika 28 - levo - prikaz željenog izgleda osnove pre generisanja forme; desno - prikaz digitalnog modela nastalog kao posledica primene metode „traženja form“ (*form-finding*) metode generisanja slozene forme

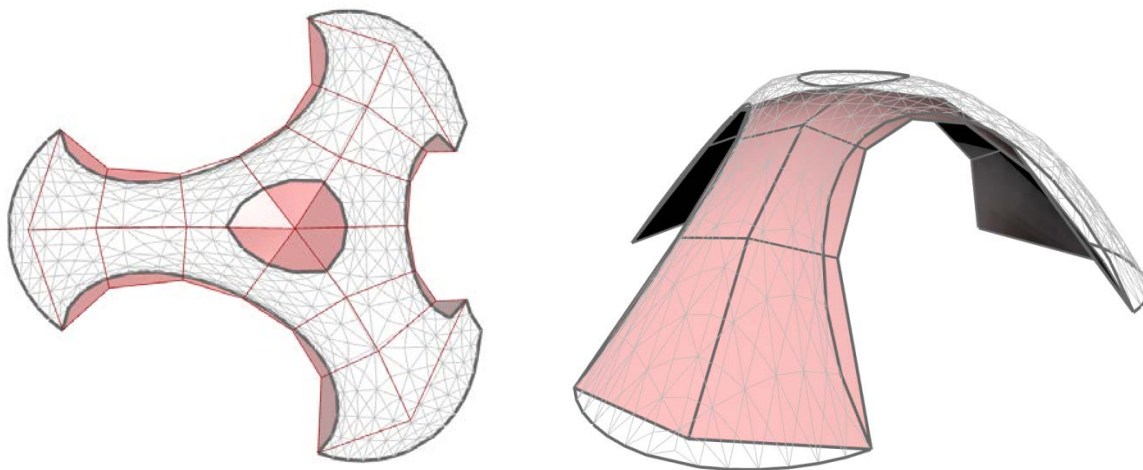
Za razliku od procesa generisanja slozene forme prethodno opisanog scenarija, koji je baziran na alatima NURBS modelovanja, ovaj projektantski scenario je baziran na primeni poligonalnog modelovanja. Poligonalni modeli su sačinjeni od spojenih trouglova ili četvorouglova, koji aproksimiraju određenu površ ili formu. U nastavku teksta će biti opisana procedura za podelu generisane forme na elemente, koji mogu da se fabrikuju, a da se minimizuje broj elemenata i nepreciznost prilikom fabrikacije.

2.2.1.2. Panelizacija površi na elemente

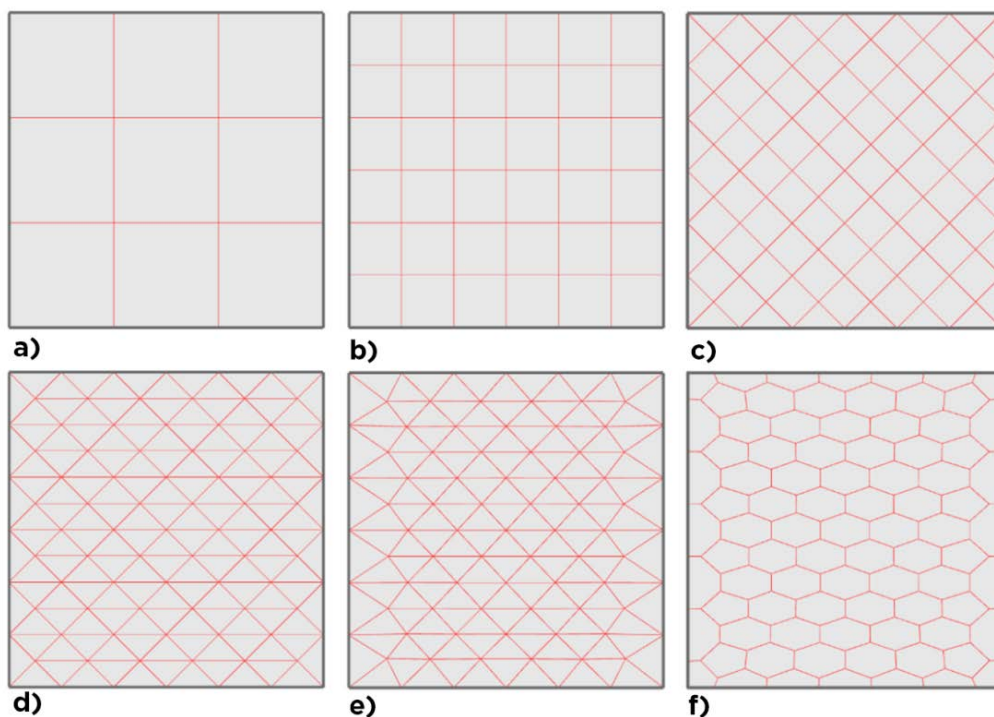
Kao što je napomenuto u prethodnom scenariju, proces podele zavisi od oblika i od veličine elemenata. U ovom slučaju odabran je oblik približan pravilnom šestouglu. Razlog odabira šestougla je njegova konveksnost, što olakšava uklapanje, koje je bilo otežano u prethodnom projektantskom scenariju. Kako bi se pristupilo podeli ovakve slozene forme na šestougaonike, korišćen je dodatak EvoluteTools, kao plug-in za Rhinoceros. EvoluteTools je alat za geometrijsku optimizaciju i ima dvostruku funkciju:

- podelu određenog poligonalnog modela koristeći niz alati
- optimizaciju forme i izgleda poligonalnog modela u odnosu na željenu formu i određene kriterijume optimizacije

Dakle, primenom ovog dodatka, moguće je izvršiti željenu podelu poligonalnog modela na elemente određenog oblika, kao što su trougaoni, četvorougaoi, šestougaoi i slično. Zatim je moguće manipulirati takvim modelom i njegovim elementima. Jedan način manipulisanja predstavlja prilagođavanje izgleda i forme poligonalnog modela željenoj formi, na osnovu skupa određenih uticajnih faktora. Uticajni faktori mogu biti bliskost površini ili konturama željene forme. Drugi način je modifikovanje oblika elemenata kroz težnju ka njihovoj samosličnosti. Kako bi mogao da se primeni EvoluteTools za generisanje podele na šestougaonike u ovom projektantskom scenariju, odlučeno je da se napravi uprošćen poligonalni model od jednostavnih četvorougaoih segmenata (slika 29). Dati model, sačinjen od četvorougaoih površi, je mnogo lakše podeliti na elemente nalik na pravilne šestouglove.



Slika 29 - Usporedni modeli inicijalne složene forme od trouglova, dobijene pomoću RhinoVault dodatka (bela struktura) i sličan model generisan od velikih četvorouganih površi, koji služi za podelu i prilagođavanje (crvena struktura)



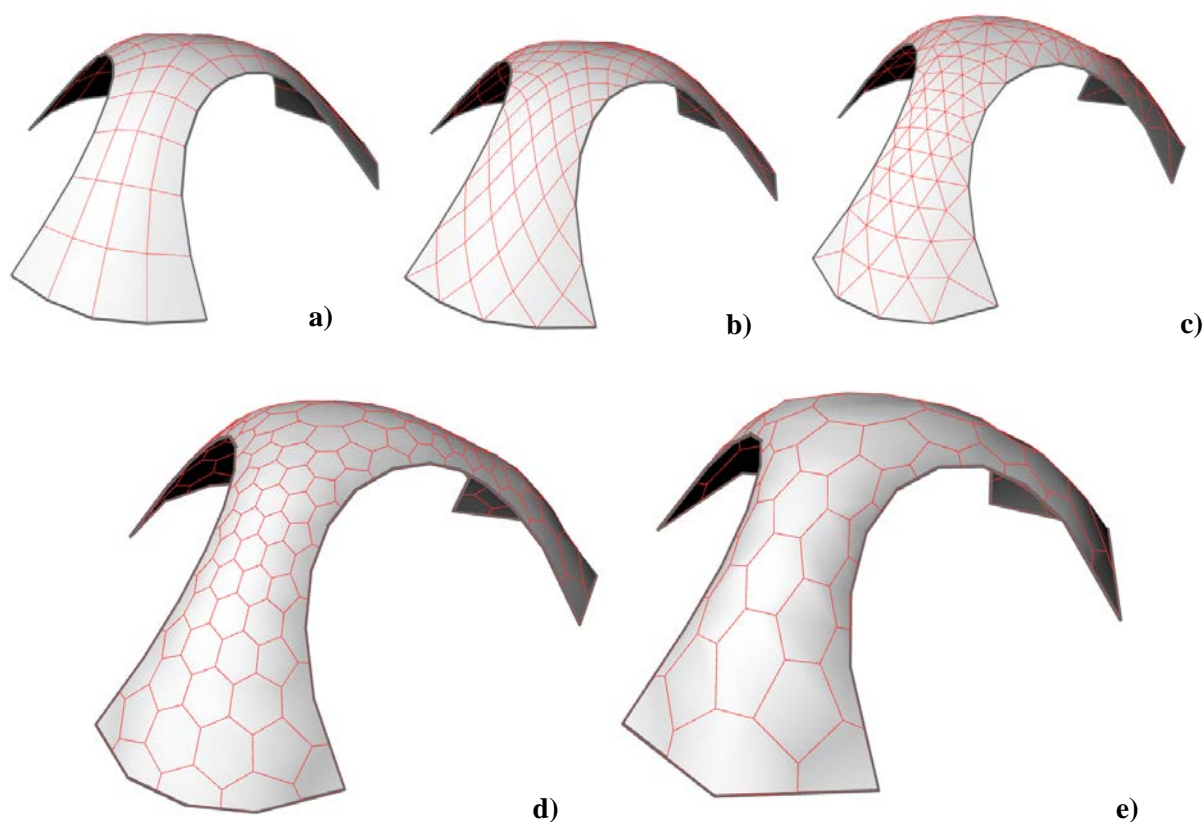
Slika 30 - Prikaz načina podele modela sačinjenog od četvorouganih površi a) inicijalna podela b) usitnjena podela na osnovu polovina ivica c) dodavanje dijagonala četvorouglova i brisanje ivica kvadrata, podela na rombove d) generisanje dodatnog skupa paralelnih linija koje spajaju naspramna temena rombova e) optimizacija sa ciljem generisanja trouglova što sličnijih jednakostraničnom f) primena dualnog svojstva i generisanje šestougona sa centrom u temenima trouglova

Kako bi se proces izveo na takav način da generiše što pravilnije šestouglove, primenjen je sledeći pristup: nakon generisanja osnovne mreže četvorouganih površi (slika 30a), primenjen je proces usitnjavanja upotrebom Katmul Klark (*Catmull Clark*) algoritma²¹ (slika 30b). Na taj način dobijena je odgovarajuća veličina elementa za dalji proces rada. Zatim je izvršena „dijagonalizacija“ takve podele, odnosno generisanje dijagonala svakog četvorougla, gde se, nakon brisanja prvobitnih ivica, dobija podela na rombove ili kvadrate zavisno od dimenzija inicijalnih četvorouganih površi (slika

²¹ Catmull Clark algoritam je primenjena tehnika u računarskoj grafici za panelizaciju površi, u cilju dobijanja glatkih površina. Dobija se usitnjavanjem postojećih poligona poligonalnog modela, dodajući ivice, koje spajaju sredine naspravnih strana

30c). Takva podela je dodatno usitnjena nizom paralelnih linija, koje spajaju jedan par naspramnih temena rombova, kako bi se dobili trouglovi (slika 30d). Korišćenjem svojstva dualnosti²², iz trougaone podele je generisana šestougona podela (tako što sredina svakog trougla čini teme novog šestougla). Kako bi šestouglovi bili što sličniji pravilnom šestouglu, trouglovi treba da budu što bliži jednakokraničnim, zadržavajući tačke na obodu u okviru svoje prvobitne pozicije (slika 30e). Na kraju je iz tako prilagođene mreže trouglova dobijena podela na šestouglove (slika 30f).

Isti princip podele i prilagođavanja korišćen je i na uprošćenom poligonalnom modelu arhitektonske forme. Prvobitno je model usitnjen na manje četvorougone površi (slika 31a). Zatim je napravljena mreža rombova, koristeći dijagonale četvorouglova, kao ivice (slika 31b). Spajanjem jednog para temena rombova generisane su dodatne paralelne linije. Tako dobijena trougaona podela je prilagođena željenom izgledu forme, kao i uslovu da trouglovi budu što sličniji jednakokraničnim (slika 31c). Koristeći svojstvo dualnosti, realizovana je i podela na šestouglove (slika 31d). U slučaju da se ne primenjuje prvobitno usitnjavanje četvorouglova, dobijaju se znatno veći šestougona paneli (slika 31e).



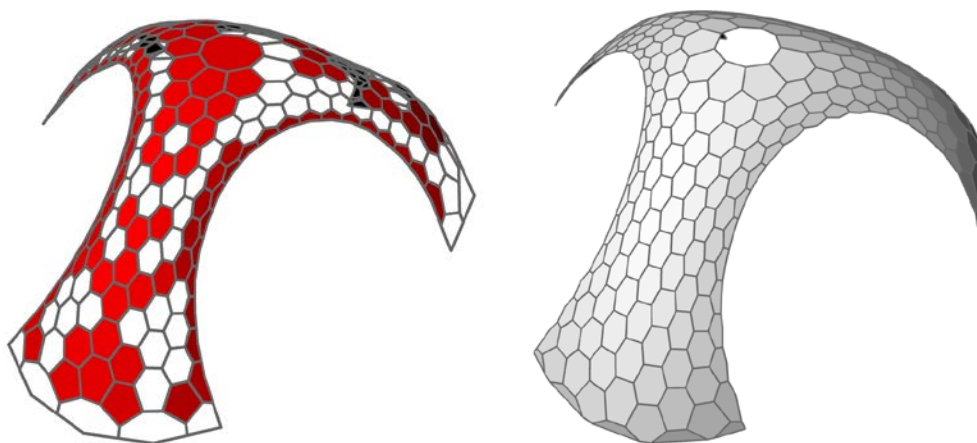
Slika 31 - Princip podele i prilagođavanja složene forme a) usitnjavanje modela na manje četvorougone površi; b) generisanje mreže rombova, upotrebom alatke za crtanje dijagonala; c) dodavanje paralelnih linija, koje spajaju dva naspramna temena rombova i prilagođavanje željenoj formi; d) primenom dualnosti, izvlačenje šestougona podele; e) prikaz šestougona podele, za slučaj izostavljanja prvobitnog usitnjavanja četvorougona površi

Podela složene forme, pored oblika, zavisi i od veličine elemenata. Potrebna veličina elemenata zavisi od veličine alata za fabrikaciju, veličine uzoraka materijala na tržištu kao i od radnog prostora mašina, koje se koriste. Usled nepostojanja dovoljno velikih uzoraka materijala na tržištu, koji bi mogli da podrže velike panele, čija je dužina i do 1,4m u slučaju kao na slici 30e, kao i zbog primene ABB IRB

²² Dualnost je pojam iz projektivne geometrije i predstavlja uokvirivanje koncepta međusobne promenljivosti uloga tačaka i linija - npr. geometrijska središta inicijalne mreže poligona postaju temena nove mreže poligona

140 industrijskih robota (koji su relativno mali) za fabrikaciju, odabran je slučaj kao na slici 31d za dalju fabrikaciju i biće korišćen nadalje za ovaj scenario.

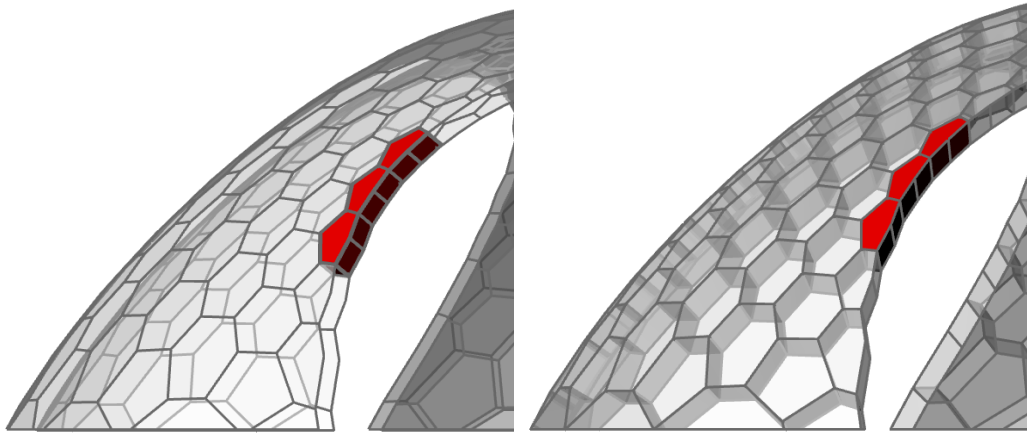
Sagledavajući formu u celosti, može se uočiti da temena ovako nastalih šestouglova nisu koplanarna. Zakrivljenost svakog šestougla je različita, prateći formu koju aproksimiraju. Stoga, nije moguće izvršiti sečenje ni pravolinijskom ni krivolinijskom žicom istog oblika. Kako bi se rešio dati problem, primenom alata za optimizaciju EvoluteTools, uvedena je planarizacija, odnosno težnja ka aproksimaciji zakrivljenih površi ravanskim na nivou elemenata („digitalno traženje forme“ elemenata šestougla, tako da su su temena koplanarna) (slika 32).



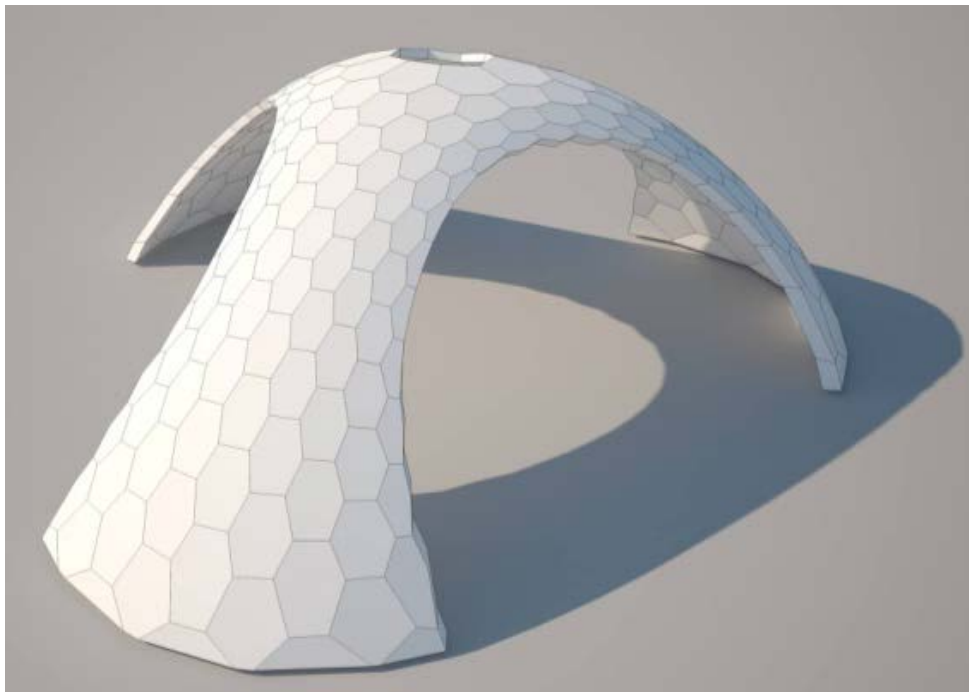
Slika 32 - levo - prikaz procesa aproksimacije šestouglaonih elemenata složene forme ravanskim površima, primenom dodatka EvoluteTools; crveni šestouglaoni elementi su ravanski; desno - Optimizovana mreža ravanskih elemenata složene forme

Nakon toga bilo je potrebno, u zavisnosti od veličine materijala iz kog će se isecati elementi, dodati debljinu ovako generisanim ravanskim šestouglaonicima. To je značilo generisanje naležućih površi, tj. strana, kojima će se elementi dodirivati i spajati. U cilju očuvanja strukturalne stabilnosti, potrebno je generisati dodirne strane elemenata upravno na šestouglaone površi, tako da ne dolazi do njihovog smicanja pod uticajem sopstvene težine. Stoga, nije moguće jednostavno skalirati datu formu sa šestouglaonom podelom i napraviti pravoizvodnu površ prateći konture svakog od para šestouglaonika (slika 33 levo).

Svaka tačka je kategorisana u zavisnosti od pripadnosti određenom šestouglaoniku. Zatim, je izvršeno pomeranje tačke u pravcu vektora normale svake od ravanskih šestouglaonih površi. Ovo je rađeno kako bi se što više ispoštovao uslov generisanja dodirnih strana upravno na šestouglaonu površ. Uzimajući da se u svakoj tački sustiču tri šestouglaonika, svaka tačka je pomerena u odnosu na rezultantu tri vektora normale tih površi. Na osnovu prethodne kategorizacije, pomerene tačke su iskorišćene kao temena novih šestouglaonika za generisanje ofsetovanih ravanskih površi i dodirnih strana (slika 33 desno). Ofsetovani šestouglaonici su planarizovani na isti način kao i prvobitni šestouglaonici. Vrednost pomeranja je određena da bude ista kao i debljina polistirenskih blokova, čime se smanjuje potreba za dodatnim sečenjem u toku fabrikacije. Spajajući dodirne strane, inicijalne i ofsetovane šestouglaone površi za svaki element respektivno, dobijena je finalna podela, sačinjena od 267 elemenata nalik na pravilne šestouglove, koja prati željenu složenu formu (slika 34).



Slika 33 - Uporedni prikaz dodavanja debljine šestougaonicima - levo - forma sa šestougaonom podelom skalirana faktorom 1.05 i izvršeno generisanje - dodirna strana nije upravna na šestougaonu površ; desno - generisanje ravanskih šestougaonika putem pomeranja svake tačke duž pravca rezultante tri vektora normale, dodirne strane upravne na datu površ



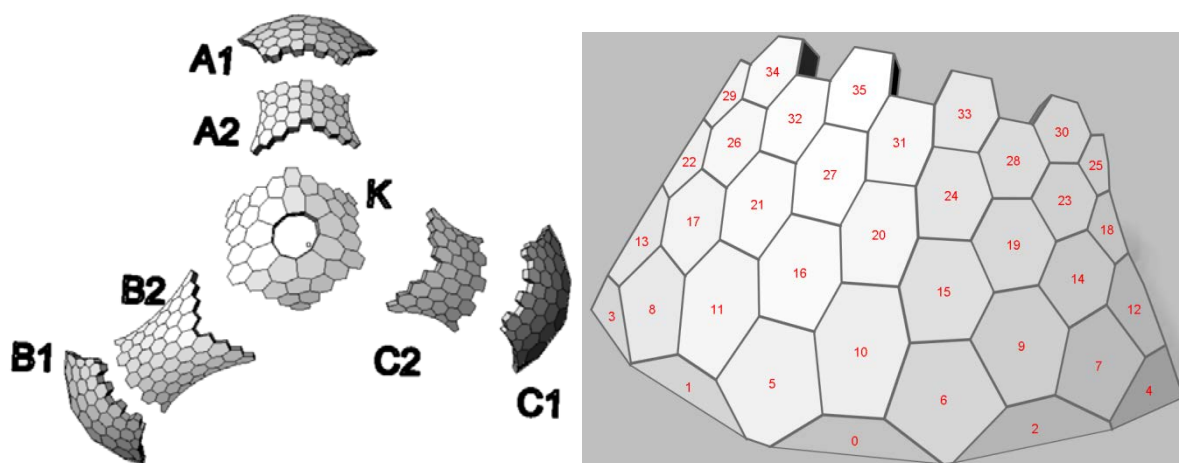
Slika 34 - Finalna podela složene forme na šestougane elemente sa debljinom

Veličina elemenata za ovakvu podelu varira. Elementi pri dnu, kao i oni pri vrhu su veći nego oni koji se nalaze na polovinama krakova. Uzrok tome je veća dimenzija krakova pri dnu (u osloncima), kao i pri vrhu, gde se susstiču. Manji komadi, mogu da se urade prateći metode iz prethodnog scenarija, dok veći komadi zahtevaju nov način pripreme za fabrikaciju. Naredni korak podrazumeva numerisanje i smeštanje elemenata unutar zapremine blokova iz kojih se elementi isecaju, na takav način da jedan robot drži polistirenski blok, dok drugi robot, iseca dodirnu stranu pravolinijskom zagrejanom žicom.

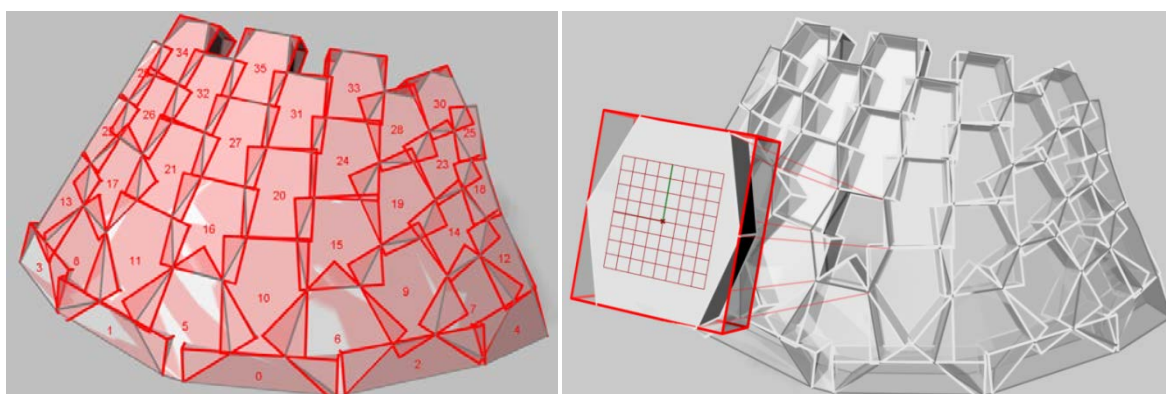
2.2.1.3. Generisanje putanje sečenja

Nakon završetka generisanja elemenata, izvršena je numeracija, kako bi proces fabrikacije i sklapanja kasnije mogao da se izvrši na precizan i brz način. Da bi se omogućilo lakše rasklapanje, transport i ponovno sklapanje arhitektonske forme, cela struktura je podeljena na 7 delova (slika 35 levo). Svi

elementi unutar delova su numerisani (slika 35 desno). Delovi sa indeksom 2 (A2, B2 i C2) imaju manje elemente i mogu biti pripremljeni za proces fabrikacije, kao što je objašnjeno u prethodnom scenariju. Delovi pri dnu i pri otvoru (A1, B1, C1, K), su veći elementi i za njih je proces pripreme za sečenje urađen na sledeći način.



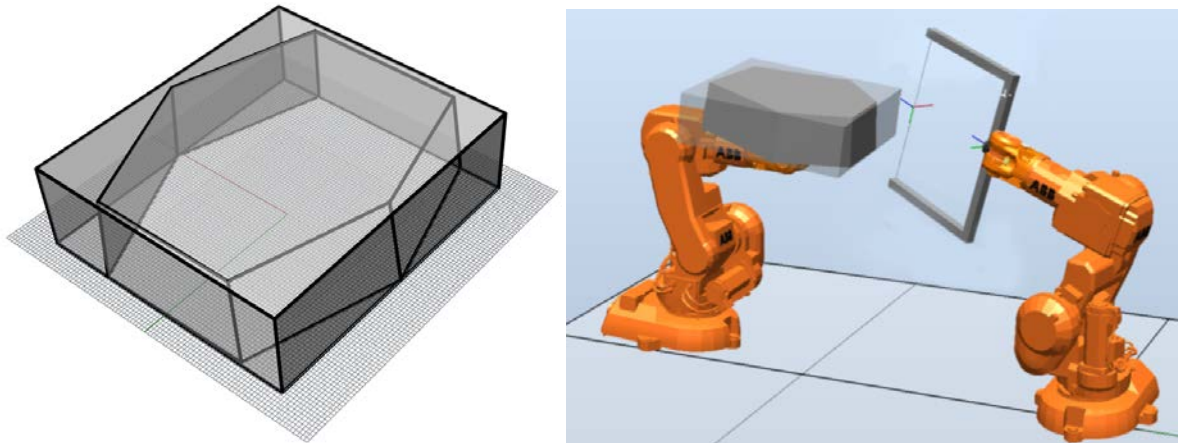
Slika 35 – levo -podela elemenata složene forme na delove radi olakšanog transporta i sklapanja arhitektonske forme; desno - prikaz C1 dela sa numerisanim elementima u odnosu na udaljenost od podloge



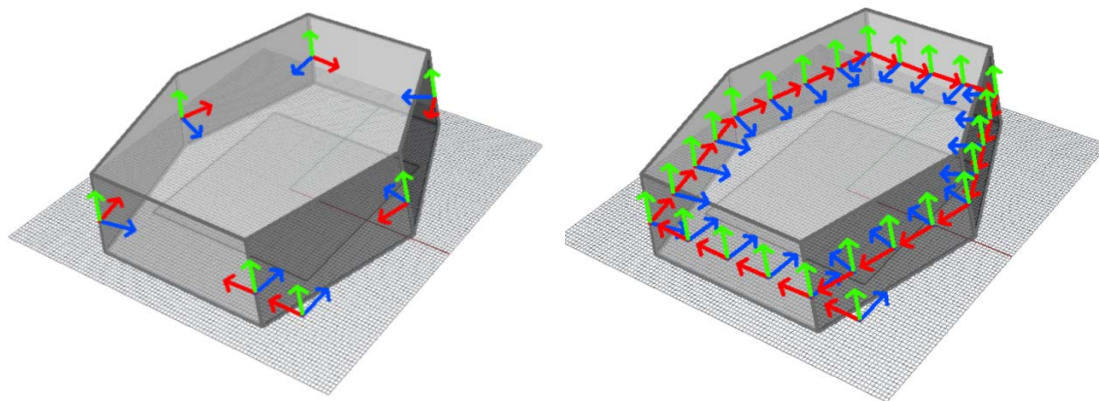
Slika 36 – levo - prikaz numerisanih elemenata zajedno sa svojim ograničavajućim kvadrata; desno - generisan koordinatni sistem za jedan izdvojen element zajedno sa svojim ograničavajućim kvadratom

Za svaki od elemenata ovih delova je prvo pronađen minimalni ograničavajući kvadar (*bounding box*), koji simulira veličinu bloka polistirena iz se može deo iseći (slika 36 levo). Na osnovu podataka o veličini kvadra, kreirani su blokovi polistirena. Kako bi svaki element bio adekvatno pripremljen za sečenje, potrebno je pozicionirati svaki od elemenata, zajedno sa odgovarajućim kvadratom na određen način, koji je dalje u tekstu opisan.

Prvo je generisan koordinatni sistem (KSO), čiji je početak postavljen u težište gornje strane elementa (one strane kvadra, koja će postati ofsetovana šestougaona površ nakon sečenja) (slika 36 desno). Dva vektora, koja određuju osnovnu XY ravan takvog koordinatnog sistema su paralelna sa dva sistema ivica ograničavajućeg kvadra (slika 36 desno). Taj koordinatni sistem, zajedno sa svojim elementom i ograničavajućim kvadratom, se zatim poklapa sa RKS (slika 37 levo). Ovaj korak je izuzetno bitan za kasniji proces koordinisanog sečenja pomoću dva robota. Element pozicioniran na ovakav način, se zajedno sa svojom putanjom sečenja može precizno pozicionirati u odnosu na koordinatni sistem alata robota, koji drži dati element (slika 36 desno).



Slika 37 – levo - prikaz pozicioniranog elementa i njegovog ograničavajućeg kvadra, spremni za generisanje putanje; desno - prikaz planirane postavke za fabrikaciju primenom koordinisanog rada dva industrijska robota



Slika 38 - Generisanje targeta za putanju sečenja prvog robota levo - na krajevima strana elementa, koji se seče; desno - duž strana elementa, koji se seče

Kao što je ranije istaknuto, putanja se sastoji od niza tačaka, koje su određene svojom pozicijom i orijentacijom koordinatnih sistema koji su u njih postavljeni (*targeti*). U ovom scenariju, targeti treba da imaju poziciju na polovini visine strana elementa, koji se iseca. Putanju sečenja treba upotpuniti i tačkama za prilazak i izlazak alata iz elementa koji se iseca. Stoga, potrebno je definisati i odgovarajući kvadar kao referencu.

Orijentacija treba da bude takva da je Z osa (plavi vektor) usmerena ka unutrašnjosti elementa, upravno na odgovarajuće strane elementa (slika 38 levo). Y osa (zeleni vektor) se poklapa sa izvodnicom strana elementa, koji se iseca (slika 38 levo). Preostala osa se dobija kao vektorski proizvod ova dva vektora, formirajući desni koordinatni sistem. Uzimajući da su strane vitoperi četvorouglovi, upotreba samo krajnjih tačaka kao pozicija, ne bi dalo precizne rezultate. Potrebno je, u zavisnosti od željene preciznosti, uvesti veći broj tačaka po svakoj strani elementa (slika 38 desno).

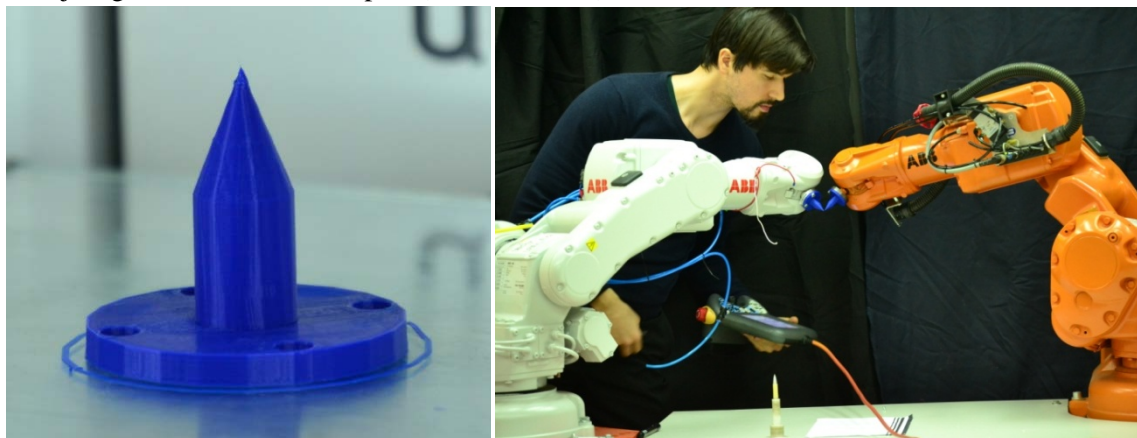
Kao i u prethodnom slučaju, pozicije targeta je potrebno *offsetovati*. Nakon provere da su tačke dobro poredane, može da se počne sa pripremom podataka i kalibracijom za deo programa, koji se radi u softverskom okruženju za upravljanje robotom. Pozicija i orijentacija koordinatnih sistema koji su u njih postavljeni duž putanje čine dovoljan podatak za nastavak rada. Na osnovu poznate putanje jednog robota, generiše se putanja drugog robota, što će biti dalje u tekstu opisano.

2.2.2. Proces fabrikacije

Pre svega, potrebno je generisati identičnu scenu u RobotStudio-u sa rasporedom industrijskih robota, kao što zaista diktiraju uslovi rada. Nakon toga, dovoljno je generisati tačke za putanju sečenja elemenata samo za jednog robota, dok će se putanja drugog robota, koji drži dati element, generisati u programskom okruženju RobotStudio-a na osnovu toga. Iako ovaj projektantski scenario uključuje koordinisani rad dva industrijska robota, generisanje programa, kao i njegova struktura, su identični kao i za prethodni projektantski scenario.

2.2.2.1. Generisanje scene sa dva industrijska robota

U koordinisanom radu gde postoji više od jednog industrijskog robota, bitno je odrediti položaj BKS svakog robota ponaosob i u odnosu na GKS cele scene. Najlakši pristup je poklopiti BKS jednog robota sa GKS, a zatim odrediti položaj BKS drugog robota. Podatak o BKS drugog robota se određuje iz konfiguracije radnog mesta. To se postiže je poklapanjem TCP-ova oba industrijska robota u najmanje tri tačke u prostoru. Kako bi se to što preciznije uradilo, napravljena su dva alata sa konusnim završetkom za dovođenje dva robota u istu tačku u prostoru (slika 39 levo). Na osnovu tri tačke u prostoru u koje su dovedeni vrhovi alata robota, proračunava se položaj BKS drugog industrijskog robota u odnosu na prvi (slika 39 desno).



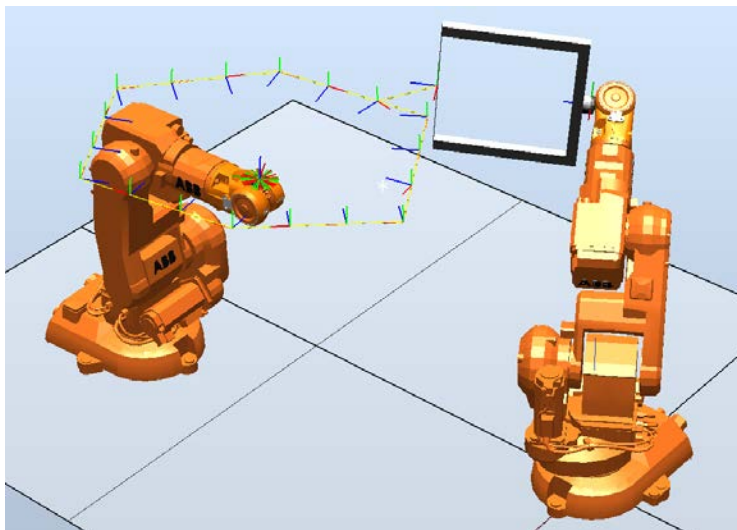
Slika 39 - levo - prikaz alatke robota za određivanje TCP; desno - poklapanja TCP-ova oba alata industrijskih robota u jednoj tački u prostoru

Na kraju, dobijaju se podaci o poziciji i orijentaciji BKS drugog industrijskog robota u odnosu na prvi, koji služe da se generiše scena u RobotStudio-u (Slika 40) sa identičnim relativnim položajem robota kao u realnom okruženju. Nakon toga, pristupa se generisanju putanja za oba industrijska robota.

2.2.2.2. Generisanje programa za fabrikaciju

Pošto u ovom projektantskom scenariju postoji koordinisani rad dva industrijska robota, potrebno je usaglasiti program prvog robota, koji seče element od polistirena, sa programom drugog robota, koji ga drži i tokom sečenja ga okreće. RobotStudio poseduje digitalnu alatku, kojom se postiže ovakvo kretanje robota - Multimove alatka.

Priprema simulacionog okruženja počinje definisanjem TCP-a alata prvog robota (viljuška sa zagrejanom žicom), i poklapanjem pozicije i orijentacije koordinatnog sistema elementa, koji se iseca (Slika 36 desno) sa koordinatnih sistemom, koji se nalaze na kraju šestog zgloba robota. Na taj način se postiže da element prati promene pozicija šestog zgloba robota. Potom se referenciraju targeti za putanju sečenja prvog robota (Slika 40). Na kraju se proračunaju tačke za putanju drugog robota.



Slika 40 - Prikazivanje tačaka sa odgovarajućim vektorima za element, koji se iseca, na koordinatnom sistemu, koji je fiksiran na kraj drugog industrijskog robota (na slici levi robot)

U primeru koordinisanog rada za izradu elemenata koji su opisani u ovom radu dovoljno je da drugi robot samo rotira objekat oko ose upravne na šestougaonu konturu elementa tako da bi alat bio u stanju da izvrši sečenje sa svih strana. Za robota koji nosi element to podrazumeva samo rotiranje šestog zgloba, a samim tim i elementa, kako bi se TCP alatke poklopio sa novim targetima putanje sečenja.

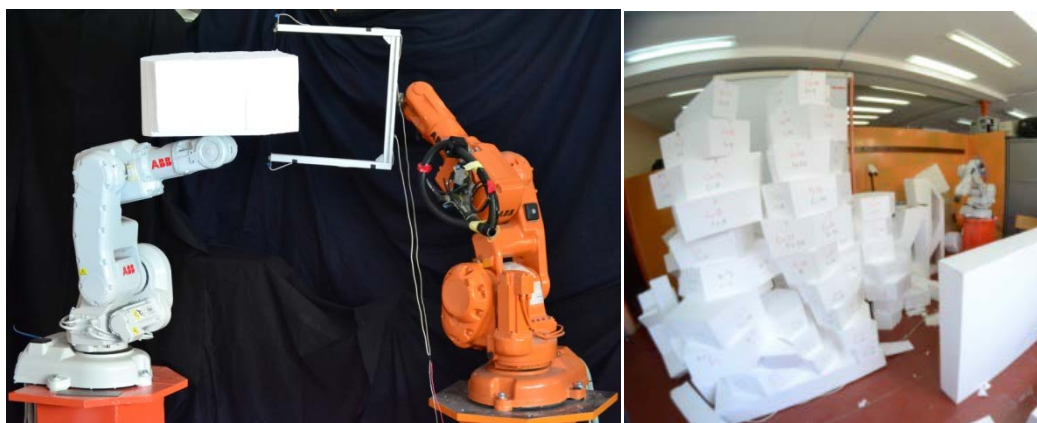
2.2.2.3. Realizacija složene forme

Prethodno objašnjena metodologija je implementirana za realizaciju arhitektonske forme, koja je podeljena na 267 šestougaonih elemenata različite veličine. Veličina elementa se posmatra u odnosu na veličinu ograničavajućeg kvadra koje se kreću u rasponu od 30cmx30cmx20cm do 100cmx60cmx20cm. Manje šestougaone elemente, (koji pripadaju delovima sa indeksom 2 - A2, B2 i C2, Slika 33 levo), je moguće fabrikovati prateći metodologiju iz prethodnog scenarija. Postupak je olakšan time što je potrebno uraditi samo jednu putanju sečenja, onu koja iseca šestougaoni oblik elementa, jer su prednja i zadnja strana planarne površi i element je debljine 20cm. Preostali, veći šestougaoni elementi (koji pripadaju delovima A1, B1, C1 i K) su fabrikovani na način opisan u ovom poglavlju (poglavlje 2.2.2.). Ukupno je fabrikovano 133 takva elementa.

Za sečenje većih šestougaonih elemenata prvo je potrebno obezbediti blokove iz kojih će se vršiti isecanje. Stoga, korišćena je veća dimenzija viljuške - 65cmx65cm. Primena većih viljuški utiče na radni prostor robota i smanjuje preciznost pozicioniranja žice za sečenje usled dužih segmenata viljuške. Zbog potrebe da se prostor unutar viljuške ne ograničava, dugački segmenti viljuške nisu dodatno ukrućeni (poduprti dodatnim elementima - kosnicima). Pri naglim promenama ubrzanja (pri promenama pravca sečenja) su javljaju vibracije, koje utiču na poziciju žice tokom sečenja, a samim tim i preciznost. Takva viljuška je neadekvatna za isecanje većih elemenata i primenjena je samo za

vertikalno isecanje inicijalnog bloka na blokove odgovarajuće veličine. Svaki inicijalni blok polistirena je podeljen u zavisnosti od veličine ograničavajućih kvadara elemenata, koji se isecaju. Svaki tako generisan blok je sečen da bude veći od ograničavajućeg kvadra svog elementa kako bi se olakšao kasniji proces fiksiranja elemenata i sam proces fabrikacije.

Nakon dobijanja manjih blokova, izvršeno je njihovo pričvršćavanje na drugog robota (Slika 41 levo). Kako bi se olakšao proces pravilnog pozicioniranja, postavljanje bloka se vrši kada su roboti u svojim početnim pozicijama. Važno postaviti težište donje strane bloka na centar prirubnice drugog robota i adekvatno ga orijentisati. Činjenica da su blokovi veći nego što je minimalno potrebno, omogućava da greška pri poklapanju težišta donje strane bloka sa centrom prirubnice možda da bude i do 5cm. Adekvatno orijentisanje blokova je urađeno tako da se u početnom položaju jedna strana bloka poravna sa sa vertikalnom žicom za sečenje. Blok se fiksira ili mehaničkim fiksatorima ili vakuumskom sisaljkom, u zavisnosti od svojstava materijala ili veličine. Uslov koji je potrebno ispuniti je da fiksatori ne izlaze van površine donje strane elementa koji se iseca, jer bi u suprotnom oštetili žicu i/ili viljušku tokom procesa sečenja. Nakon što je element isečen, numerisan je na prethodni opisani način i pripremljen za dalje sklapanje (Slika 41 desno).



Slika 41 - levo - pozicioniranje bloka na kraj drugog robota; desno - numerisanje i priprema isečenih elemenata za spajanje

Kada su svi elementi isečeni, započinje se sa procesom sklapanja. Ranije opisana strategija sklapanja bazirana je na sklapanju sva tri kraka, van mesta postavke (Slika 42 levo).



Slika 42 - levo - sklapanje jednog kraka van mesta postavke; desno - primene poliuretanske pene kao spojnog sredstva elemenata kraka

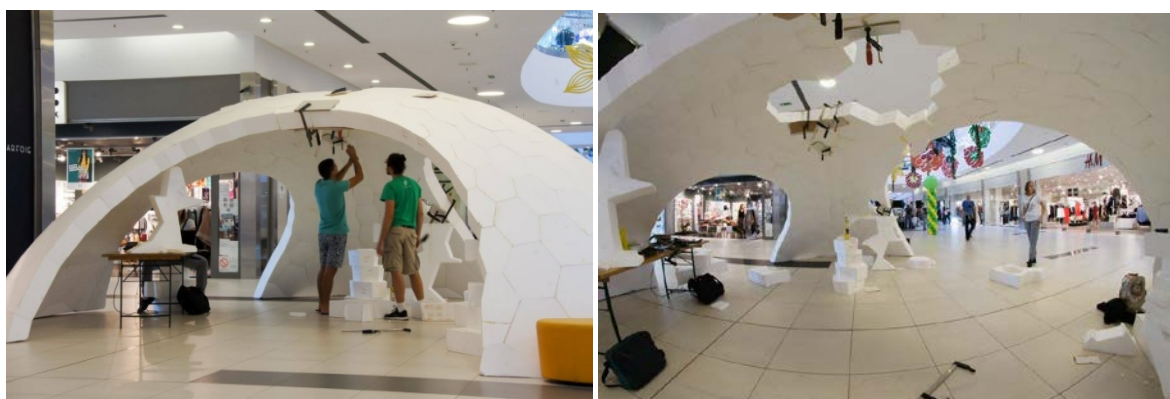
Kao spojno sredstvo koristi se poliuretanska pena (Slika 42 desno), koja ostvaruje čvrst spoj, ali zahteva duže vreme fiksiranja elementa u datoj poziciji. Stoga, nepraktično je povezati veliki broj elemenata odjednom, jer elementi u takvoj nezavršenoj strukturi, nemaju čvrstu spojnicu. Usled delovanja sile gravitacije, elementi bi se pomerali van svoje pozicije u strukturi.

Nakon sklapanja, raspon finalnih krakova nije prelazio 3,2m u dužini, odnosno 2,2m u širini, te je bilo moguće lako manervisati delovima prilikom iznošenja sa lokacije sklapanja, odnosno, unošenja u prostor postavke (Slika 43 levo), kao i transportovanja do željene destinacije. Nakon donošenja krakova i K elemenata na mesto postavke (Slika 43 desno), bilo je potrebno spojiti ih u jednu strukturu.



Slika 43 - levo - prikaz veličine završenog kraka, kao i mogućnost manevrisanja prilikom unošenja u prostor postavke; desno - prikaz tri završena kraka i K elemenata na mestu postavke

Na mestu montiranja nije bilo moguće ankerovati niti fiksirati strukturu tokom građenja, te su dodatni elementi korišćeni da se fiksiraju kraci u osloncima, kako ne bi došlo do sleganja lukova (Slika 44 levo). Primena stega i dodatnih sredstava za fiksiranje elemenata na određenoj poziciji je bilo bitno tokom procesa sklapanja, kako bi se ostvario dobar spoj (Slika 44).



Slika 44 - levo - Prikaz procesa sklapanja strukture i obezbeđivanja fiksne pozicije oslonaca; desno - primena stega i spojnih sredstava za spajanje krakova i K elemenata u gotovu strukturu

Uklapanje svih elemenata nije bilo problematično, kao u prethodnom slučaju, jer svi elementi imaju bočne strane kao omotač zarubljene piramide, čiji je vrh u unutrašnjosti strukture. Stoga, primenjujući pravac uklapanja sa gornje strane strukture omogućava glatko uklapanje. Takođe, elementi su

približni pravilnom šestouglu, što znači da je uklapanje moguće izvršiti i u ravni upravno na bočne strane, ako raspored elemenata to dozvoljava. Iako je cela struktura bele boje, spojnice generišu zanimljivu teksturu, koja je primetna sa spoljne (Slika 45 levo) i sa unutrašnje strane strukture (Slika 45 desno).



Slika 45 - Prikaz finalne forme i teksture spojnice

Na kraju, gotovu strukturu je bilo potrebno rasklopiti i preneti na novu lokaciju. U cilju očuvanja strukturalne stabilnosti i čvršćeg spoja, čak i nakon rasklapanja, struktura je presečena zagrejanom žicom, tako da nastanu samo tri velika kraka. Nakon transporta krakova i ponovnog spajanja u celinu, na slici 46 može se videti finalna struktura na novoj lokaciji.



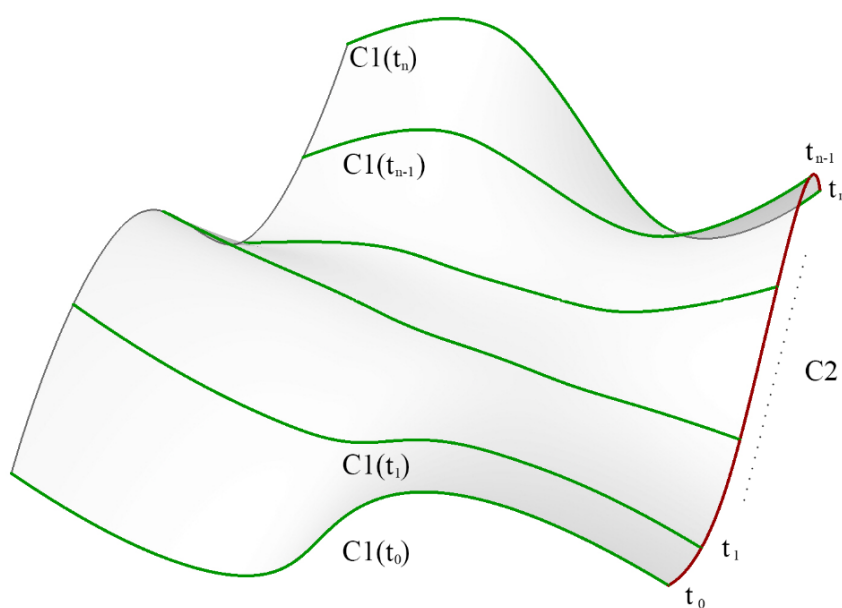
Slika 46 - Struktura na novoj lokaciji, nakon rasklapanja i ponovnog spajanja

Izlaganje ovakvog materijala atmosferskim uticajima bez adekvatne zaštite može dovesti do krтости materijala (penastog polistirena) i pucanja strukture van šavova, uzimajući da poliuretanska pena (koja je unutar šavova) ima stabilnu strukturu i pri ovakvim uslovima.

2.3. Projektantski scenario 3 - Integrisani pristup fabrikaciji sa krivolinijskim sečenjem elemenata

2.3.1. Projektantski kriterijumi i proces dizajna

Pri fabrikaciji složenih formi, data površ se deli i aproksimira na manje elemente, koji mogu lakše da se fabrikuju, a samim tim su ekonomski isplativiji (ušteta materijala i vremena). To obično podrazumeva aproksimaciju sa delovima ravni ili pravoizvodnim površima, koje je moguće izvesti pravolinijskom zagrejanom žicom (kao što je objašnjeno u prethodnim projektantskim scenarijima). Međutim, ako je potrebno izvršiti proces fabrikacije elemenata složenih formi bez velikih odstupanja, obično se pribegava aproksimaciji opštim (*sweep*) površima. Ove površi (opšte površi) predstavljaju geometrijsko mesto tačaka krive C1, koja se vodi po određenoj krivoj (vodilji) C2, gde u svakoj poziciji krive C2 (t_0, t_1, \dots, t_n) kriva C1, može da menja oblik, veličinu i/ili orijentaciju (Slika 47). Za fabrikaciju ovakvih elemenata, najčešće se koriste glodalice, pri čemu vrh glodala opisuje krivu C1 (generatrisu) u definisanim pozicijama krive C2 (direktrise). Iako proces fabrikacije primenom glodalice kao alata daje visok nivo detalja, proces glodanja je dosta spor. Stoga, da bi se rešio problem fabrikovanja upotrebom zagrejjane žice i omogućio viši nivo detalja završne obrade elementa, u ovoj tezi se predlaže aproksimacija opštim površima, ali primenom zagrejjane žice kao alata. Za razliku od prethodnog istraživanja i rada na ovom problemu, gde se koriste tri industrijska robota za upravljanje oblikom žice (Brander et al, 2016a), u ovoj tezi se predlaže upotreba dva robota, koji drže krajeve zagrejjane žice i utiču na njen oblik, menjajući ga u skladu sa oblikom krive C1 u određenim pozicijama krive C2. U cilju postizanja veće tačnosti oblika i krutosti zagrejjane žice, ona se prethodno uvrće (fiksiranjem jednog kraja žice i uvrćanjem drugog kraja određen broj puta). Oblik žice je na ovaj način definisan pozicijom i orijentacijom vrhova oba robota, koji prate poprečne preseke elementa, koji se obrađuje.

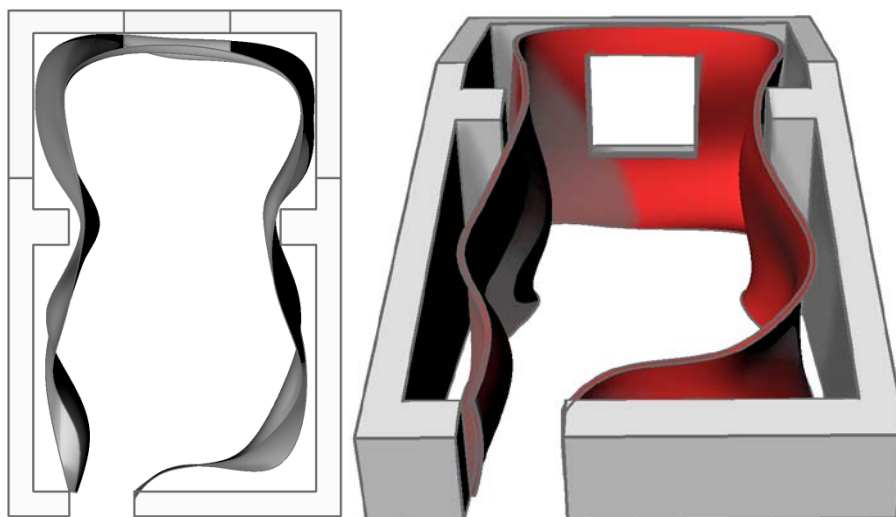


Slika 47 - generisanje opšte površi - pomeranjem krive C1 u različitim pozicijama krive C2, pri čemu kriva C1 može da menja oblik, veličinu i/ili orijentaciju

Time se generiše skup ravanskih krivih, koje predstavljaju promenu oblika krive C1 u zavisnosti od parametra t . Element, koji se seče je postavljen na određeno fiksno mesto u prostoru, dok se roboti kreću sa jedne strane površi koju isecaju ka drugoj. Na taj način, fabrikovani element odgovara zakrivljenosti i geometriji inicijalnog modela.

2.3.1.1. Generisanje forme

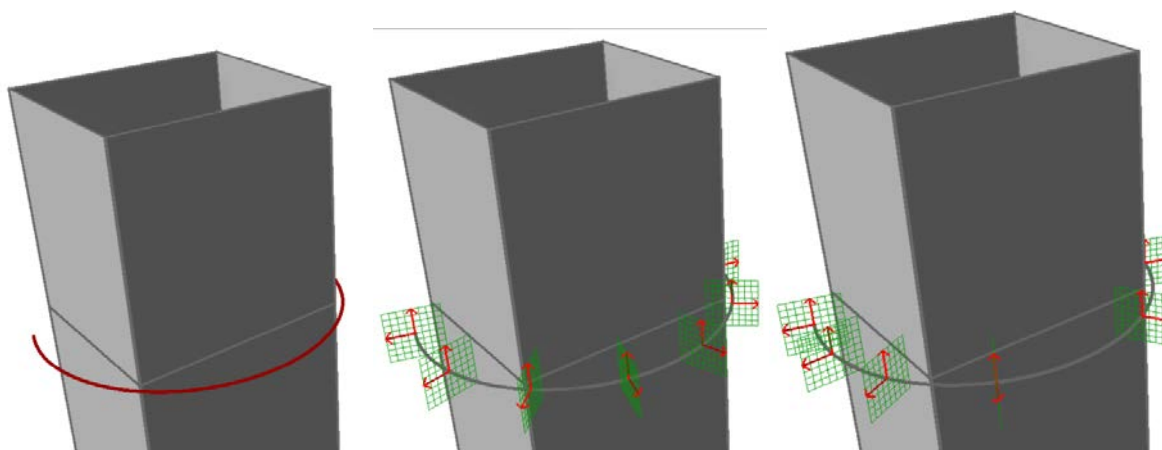
U prethodnim poglavljima ovog rada je za generisanje složenih formi, prikazana primena jednostavnih matematičkih geometrijskih entiteta (prvi projektantski pristup) i metoda „pronalaženja forme“ (drugi projektantski pristup). U ovom poglavlju, složena forma će biti generisana kao slobodna forma. Za slobodnu formu je svojstveno da u procesu dobijanja površi, nema uticaja spoljnih sila („pronalaženje forme“), niti aproksimacije prostim matematičkim geometrijskim entitetima, kao što su konusna površ, cilindrična, hiperbolička, pravoizvodna površ i druge tradicionalne površi. Slobodna forma je formirana od mreže krivih linija, tako da kontinuitet segmenata ostaje neprekinut. Za ovaj pristup istraživanja, odabrano je generisanje slobodne forme, koja može da posluži kao kalup (oplata) za izlivanje krivolinijskih formi fasade ili oblaganje zidova u enterijeru. Ovo se razlikuje od prethodnih slučajeva već prikazanih u ovom istraživanju, kod kojih je svaki element ujedno predstavljao i konstruktivni element. Na ovaj način, se odgovara na širi opseg slučajeva, koji se primenjuju u praksi. Slobodna forma, generisana u ovom pristupu, je urađena za slučaj oblaganja prostora enterijera (slika 48). Prikazan je način generisanja jednog dela ovakve slobodne forme kako bi se slikovitije predstavio metod nastanka takvih površi i lakše uočio uticaj promena vrednosti različitih parametara. U dosadašnjim istraživanjima iz ove oblasti, Brander i ostali (Brander et al, 2016a) su fabrikovali samo panele gde je jedna strana ravna, dok se naspramna strana seče. Za razliku od prethodnog, u ovom pristupu, za fabrikaciju elemenata u procesu sečenja će se podjednako obrađivati i prednja i zadnja strana panela, kao i dodirne strane. Ovakav način obrade je važan u slučaju da elementi ne predstavljaju samo oblogu zidova enterijera, već i strukture ili pregradne zidove unutar prostorija, gde je od značaja sagledavanje iz različitih uglova.



Slika 48 - prikaz slobodne forme u osnovi (levo) i u trodimenzionalnom prikazu (desno) kao način pokrivanja zidova u enterijeru

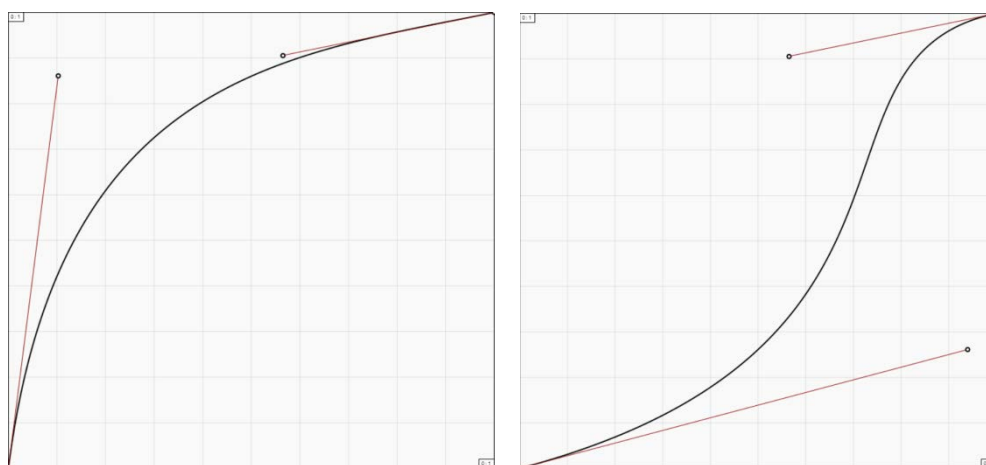
Kao što je pomenuto, slobodna forma, kao površ, generisana je od mreže krivih linija (ravanskih ili prostornih). Kako bi se očuvala neprekidnost segmenata, mreža krivih se sastoji od dva skupa krivih, koje činu ortogonalnu mrežu tj. međusobo se seku pod pravim uglom. Na taj način data

površ sadži sve krive iz date mreže. U ovoj analizi odabrane su ravanske krive. Prvi skup krivih čine horizontalne krive. Drugi skup krivih čine krive postavljene u željene tačke jedne krive iz prvog skupa a koje se nalaze u normalnim ravnima. Ovako generisana slobodna forma je geometrijski jednoznačno određena. Kako bi slobodna forma imala veći broj varijacija, što je moguće iskoristiti za različite vrste evaluacija u daljem toku rada, uvedeni su određeni parametri. Oni utiču na različite aspekte procesa generisanja skupa krivih, a samim tim i slobodne forme. Generisanja slobodne forme je ilustrovano formiranjem „kapitela“ stuba. Proces počinje generisanjem krive, del kružnog luka (slika 49). Uvođenjem parametara poluprečnika, kao i veličine centralnog na osnovu kog je i definisan kružni luk, povećana je mogućnost dobijanja različitih rešenja (varijacija kružnog luka).

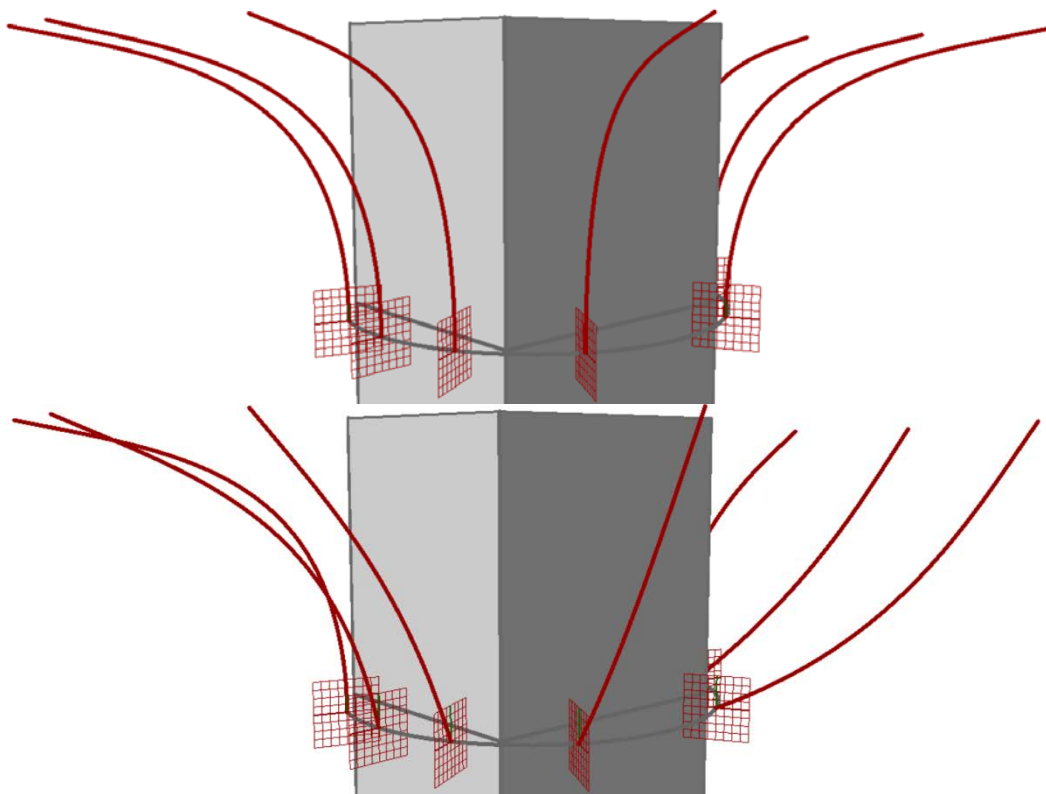


Slika 49 - levo - Generisanje kružnog luka, koji oivičava osnovu stuba; sredina - podela kružnog luka na segmente uniformne dužine; desno - podela kružnog luka na segmente, uz primenu parametra koji utiče svakog od prethodno podeljenih segmenata

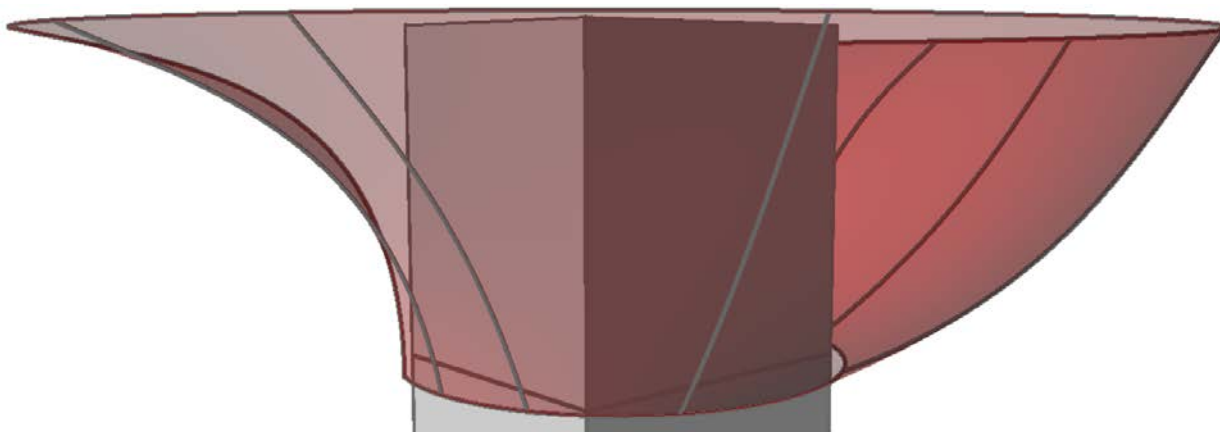
Nadalje, izvršena je podela kružnog luka na željeni broj segmenata, pri čemu krajnje tačke segmenata služe za pozicioniranje normalnih ravni (normalne ravni su one ravni određene vektorom normale i binormale u određenim tačkama krive) (slika 49 sredina). Pored broja segmenata, uvedena je i mogućnost da se menja dužina svakog segmenta (slika 49 desno). Nakon toga su određene normalne ravni u krajnjim tačkama svakog segmenta. One služe za određivanje orijentacije i pozicije krivih, čiji izgled može da se menja. Koristi se Bezijeova kriva, koja ima mogućnost pomeranja krajnjih tačaka krive, kao i menjanje nagiba tangenti u krajnjim tačkama (slika 50).



Slika 50 - Prikaz konstrukcije Bezijeove krive, čije ponašanje zavisi od pozicije krajnjih tačaka i pravaca tangenti u tim tačkama

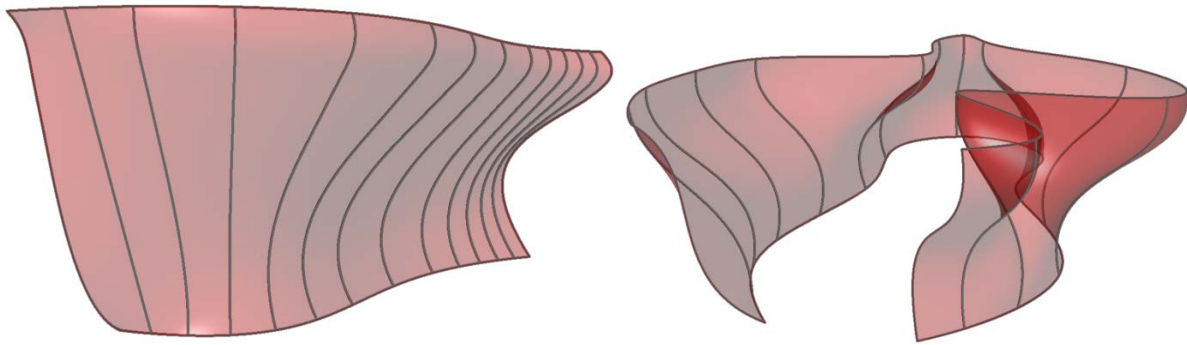


Slika 51 - gore - prikaz generisanja drugog skupa krivih, na osnovu jednog odabranog izgleda Beziijeove krive; dole - prikaz generisanja drugog skupa krivih, na osnovu više odabranih izgleda Beziijeovih krivih



Slika 52 - Prikaz generisane slobodne forme od dva skupa krivih, koje se međusobno seku pod pravim uglom

Promene ponašanja krivih su odmah vidljive i na digitalnom modelu, što olakšava ceo proces generisanja željene površi. Dodatnim parametrima se menja dužina date krive, kao i izduženost u vertikalnom pravcu (slika 51 gore). U cilju povećanja broja oblika krivih iz drugog skupa, postavljena je Beziijeova kriva za svaku krivu (slika 51 dole). Koristeći krajnje tačke ovako generisanih profilnih krivih, kao vodilje, formirana je jedna interpolirana horizontalna kriva koja leži u ravni paralelnoj sa ravni prvobitne krive i pripada prvom skupu krivih. Sa barem dve krive u svakom skupu, može se generisati slobodna forma od mreže međupresečnih krivih. Pritom, ista metodologija generisanja površi, može se primeniti za bilo koju odabranu inicijalnu krivu, koja može da služi za oblaganje dela zida u enterijeru (slika 53 levo) ili ceo enterijer (slika 53 desno).

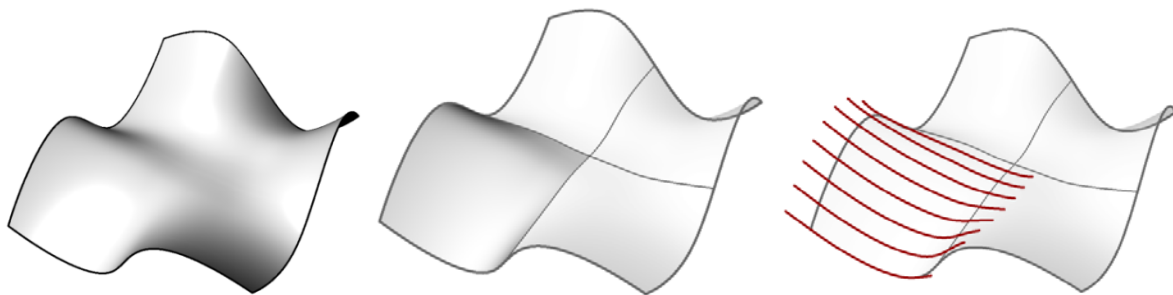


Slika 53 - prikaz primene metodologije generisanja slobodne forme na inicijalnu krivu, koja odgovara zidu u enterijeru (levo) ili celom enterijeru (desno)

Ovakav model baziran je na matematičkim metodama generisanja digitalnih modela površi i krivih. Kao takav, ima mnogo veće mogućnosti za podelu na manje delove - elemente i pripremu podataka za kasniji proces fabrikacije, u odnosu na poligonalni model, te je zato i odabran ovakav pristup.

2.3.1.2. Podela površi na elemente

Kao što je ranije pomenuto, racionalizacija je proces aproksimacije idealno modelovane površi nekom drugom površi, koja je podobna za fabrikaciju. To često podrazumeva panelizaciju ili aproksimaciju pravoizvodnim površima. U ovom pristupu aproksimacija slobodne forme je urađena opštim površima. Podela na elemente ili panelizacija određene slobodne forme (slika 54 levo) treba da se izvrši tako da svaki element čini jedan segment inicijalne slobodne forme, koji se neprekinuto nastavlja na okolne segmente (slika 53 sredina). Svaki takav segment predstavlja digitalni model opšte površi sačinjene od planarnih krivih, koje predstavljaju oblike krive C1 (na slici 54 desno istaknute crvenom bojom), čiji je oblik potrebno postići elastičnim deformacijama žice, koja je fiksirana na krajeve dva industrijska robota.



Slika 54 - levo - slobodna forma, koju treba podeliti na elemente; sredina - izvršena podela na elemente, koji čine segmente slobodne forme; desno - prikaz planarnih krivih, koji aproksimiraju opštu površ

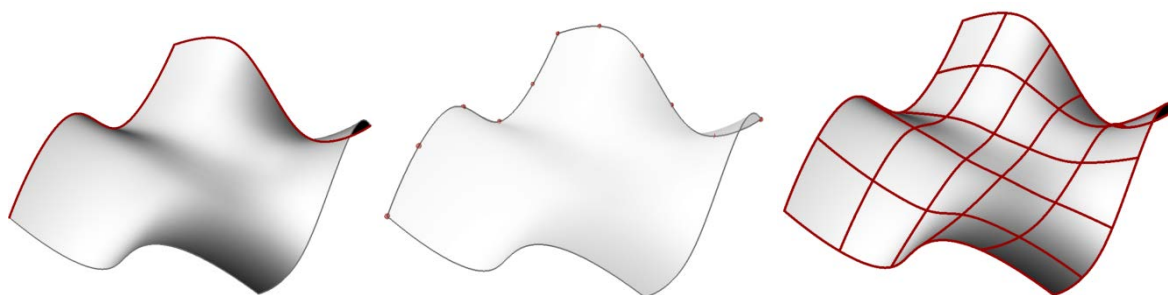
Stoga, podela slobodne forme zavisi od tri uslova:

- širine alatke kojom se seče, odnosno dužine elastične žice
- debljine bloka iz kog se element iseca

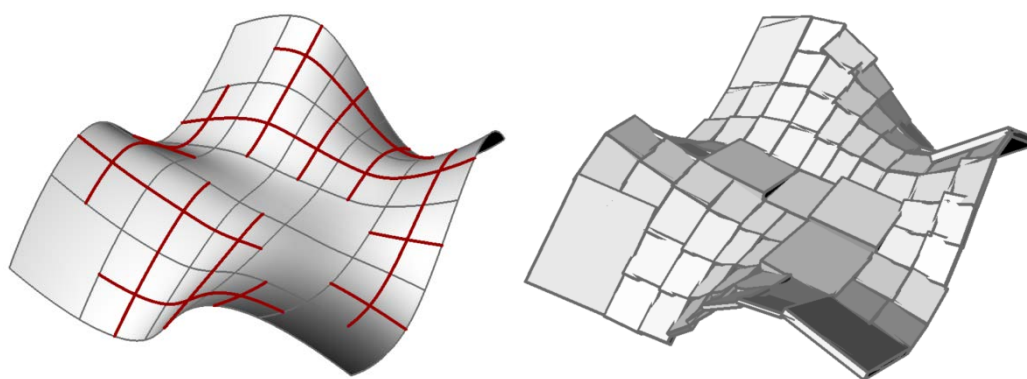
- ograničenosti menjanja i podešavanja oblika žice, koji se mogu postići primenom elastičnih deformacija²³

Na osnovu datih uslova, može se uočiti da je proces podele slobodne forme sličan principima za prvi projektantski pristup (Potpoglavlje 2.1.1.2.), uz dodatak provere ograničenosti oblika žice. Iako je proces podele slobodne forme sličan prvom projektantskom pristupu, potrebno je uvesti određene promene. Proces podele počinje prepoznavanjem najdužih izokrivih u oba izoparametrijska pravca površi (slika 55 levo). Date krive se zatim dele na segmente, čije su dužine manje ili jednake dužini žice, kojom će se vršiti proces sečenja (slika 55 sredina). Krajnje tačke tako dobijenih segmenata služe kao smernice za generisanje izokrivih, kojima se inicijalna slobodna forma deli na manje elemente (slika 55 desno). Time je omogućeno da svi elementi mogu da se fabrikuju koristeći žicu određene dužine.

Uzimajući u obzir željenu debljinu elementa, kao i debljinu bloka penastog polistirena iz kog se vrši isecanje elementa, data podela podleže dodatnom proveravanju. Pronalaskom najmanjeg ograničavajućeg kvadra za svaki element određene debljine, dobijaju se podaci o potrebnoj debljini bloka iz kog se iseca element. Na osnovu toga, moguće je imati uvid u potrebnu debljinu bloka, a na osnovu debljine elementa i obrnuto. U slučaju da i element i blok imaju prethodno zadatu debljinu, postoji mogućnost da se element ne može fabrikovati iz takvog bloka pa se vrši dodatno usitnjavanje prvobitnih elemenata (slika 56 levo).



Slika 55 - levo - odabir najdužih izokrivih; sredina - podela krivih na segmente određene dužine; desno - podela površi na elemente

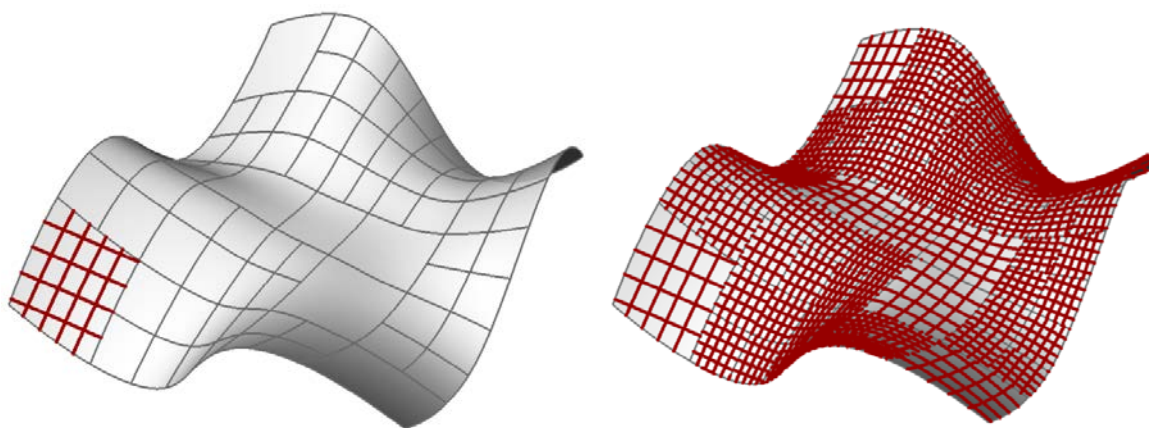


Slika 56 - levo - dodatno usitnjavanje prvobitne podele, kako bi se zadovoljio uslov da elementi mogu da se fabrikuju iz bloka određene debljine; desno - generisanje najmanjeg ograničavajućeg kvadra, koji predstavlja veličinu bloka iz kog se isecaju elementi

²³ ovim uslovom se proverava da li je moguće simulacijom elastičnih deformacija žice (čiji su krajevi fiksirani na krajeve dva robota, a čiju orijentaciju definiše međusobni nagib krajeva robota) postići željeni oblik žice

Proces se ponavlja iterativno sve dok se ne postigne da svi ograničavajući kvadrovi elemenata zadovoljavaju uslov da elementi određene debljine mogu da se fabrikuju iz njihove zapremine (slika 56 desno). Generisanje ograničavajućih kvadrova je bitno za kasniji proces fabrikacije zbog pozicioniranja elemenata za sečenje i dobijanje putanje sečenja.

Na kraju je tako podeljene elemente potrebno aproksimirati nizom ravanskim krivih i potom proveriti da li se takav oblik krivih može dobiti elastičnim deformacijama. U slučaju da to nije moguće, elemente je potrebno dodatno usitniti pa ponoviti proveru. U ovom slučaju, za proveru da li se željeni oblik krivih može dobiti elastičnim deformacijama žice, koristi se Beziјеova kriva podešavanjem položaja krajnjih tačaka žice i nagiba tangenti u njima, kao što je ranije opisano (slika 50). U tu svrhu, koristi se Kangaroo dodatak za Grasshopper. Pomoću ovog dodatka je moguće simulirati elastične deformacije žice. Međutim, menjanje tangenti, dok se ne postigne potreban oblik može biti vremenski dug proces, koji zahteva ručno menjanje parametara. Kako bi se proces olakšao može se koristiti Galapagos, dodatak za primenu genetskih algoritama. Primenom ove komponente, iterativno se vrše promene intenziteta i pravca vektora tangenti, težeći da postigne što veću sličnost simuliranog i željenog oblika ravanske krive. Međutim i ovaj proces može da traje relativno dugo za svaku krivu (pogodan je za precizno određivanje tačaka za putanju sečenja, o čemu će biti reči u narednom potpoglavlju) pa će zbog uštede vremena i efikasnijeg procesa podele, u ovom slučaju biti uvedena provera mogućnosti postizanja oblika krivih na osnovu prevojnih (infleksionih) tačaka²⁴. Može se uočiti da Beziјеove krive mogu imati najviše jednu prevojnu tačku pa se proces provere oblika žice vrši na sledeći način. Najpre se prvi element aproksimira određenim brojem ravanskih krivih u oba izoparametrijska pravca, kako bi se utvrdilo za koji pravac je skup oblika krivih C1 najlakši za postizanje (slika 57 levo). Utvrđivanje se vrši na osnovu broja prevojnih tačaka pa se za svaki skup krivih pronalaze prevojne tačke, ako postoje. Proces se ponavlja dok svi elementi ne budu aproksimirani (slika 57 desno). Rezultati o prevojnim tačkama za svaki element i skup krivih se beleži za dalju evaluaciju. U slučaju da samo jedan skup poseduje krivu sa više od jedne infleksione tačke, element nije potrebno dalje usitnjavati jer će krive iz drugog skupa biti pogodne za elastične deformacije.

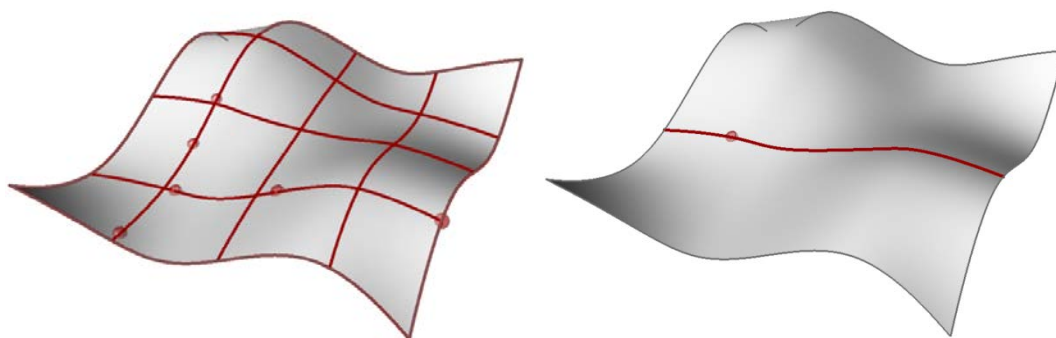


Slika 57 - levo - generisanje izokrivih u oba izoparametrijska pravca za prvi element; desno - završen proces generisanja izokrivih za sve elemente

U slučaju da element poseduje ovakve krive u oba skupa (slika 58 levo), onda se element dodatno usitnjava tako što se jedna od prevojnih tačaka iz jednog skupa koristi kao vodilja za generisanje nove izokrive, koja deli dati element (slika 58 desno). Dakle, cilj je uvek da se izabere prevojna tačka na

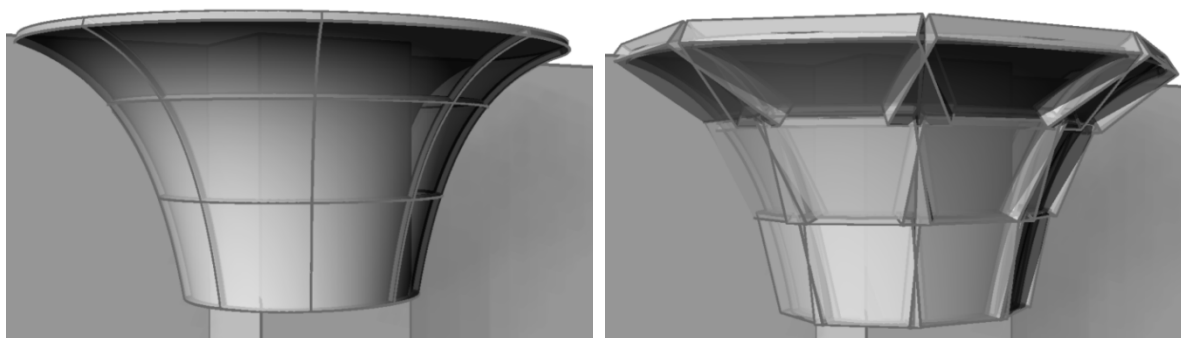
²⁴ Prevojne (infleksione) tačke su mesta na krivoj gde kriva menja predznak zakrivljenosti, odnosno mesto gde kriva prelazi iz konveksnog u konkavni oblik

krivoj, koja je najbliža sredini površi, kako bi elementi imali što jasniju podelu. Usitnjavanje elemenata se vrši sve dok se ne ustanovi da postoji barem jedan skup krivih, za svaki element, koji ima maksimalno 1 prevojnu tačku za svaki krivu.



Slika 58 - levo - prikaz elementa koji ima krive sa više od jedne prevojne tačke u oba skupa krivih; desno - izdvojena prevojna tačka iz jednog skupa, koja se koristi kao vodilja

Ovakva metodologija je primenjena za podelu slobodne forme, koja je opisana u prethodnom potpoglavlju. Za svaki element ovako sprovedene podele se dodaje ista debljina, čija je vrednost ranije korišćena (slika 59 levo). Potom se generišu ograničavajući kvadri (slika 59 desno) koji su potrebni za kasniji proces generisanja putanja i fabrikacije.



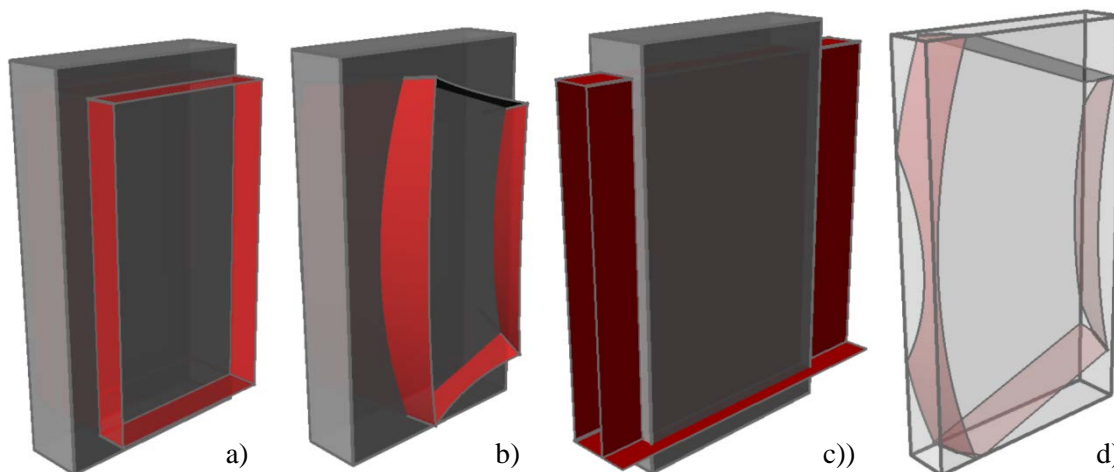
Slika 59 - levo - izvršena podela slobodne forme na odgovarajuće elemente sa debljinom; desno - generisanje najmanjih ograničavajućih kvadrova za kasniji proces generisanja putanja i fabrikacije

Kao i u svakom projektantskom scenariju do sada, naredni korak podrazumeva numerisanje i pripremu putanja za sečenje. Numerisanje može da se izvrši na jedan od načina predloženih u prethodnim scenarijima pa će akcenat narednog poglavlja biti na generisanju putanja sečenja.

2.3.1.3. Generisanje putanje sečenja

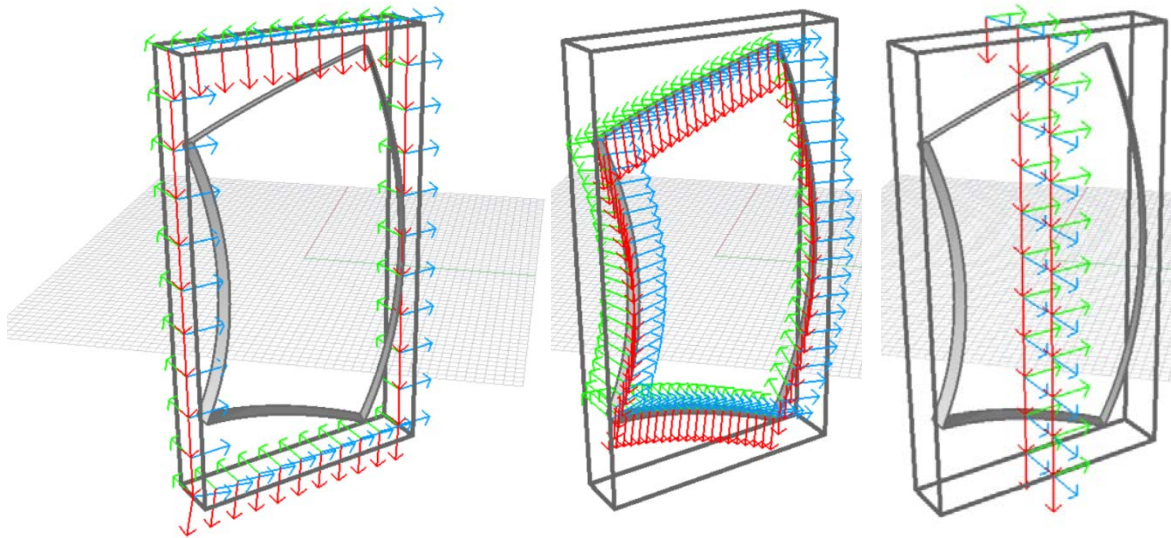
Generisanje putanje sečenja se bazira na dva pristupa. Prvi pristup je sličan pristupu u prvom projektantskom scenariju, gde je alat sa pravom zagrejanom žicom fiksiran na kraj jednog robota, koji seče pravoizvodne površi, odnosno sve strane elementa (slika 60b). U takvom pristupu je moguće da se orijentacija ograničavajućeg kvadra iz kog se iseca element ne poklapa sa onim, koji se koristi prilikom fabrikacije. Iz tog razloga, u ovom slučaju se isecaju i sve strane ograničavajućeg kvadra (slika 60 a i c), kako bi se osigurala preciznost isečenog ograničavajućeg kvadra i elementa unutar njega, gde se krajnji rezultat vidi na slici 60d. Uzimajući da su prednja i zadnja strana elementa opšte površi i da nije moguće fabrikovati ih pravolinijskom zagrejanom žicom, bitno je fabrikovati i

precizno isečen blok, jer predstavlja ulazni model za sečenje prilikom primene drugog pristupa. Drugi pristup je nov i podrazumeva primenu dva industrijska robota, koji drže krajeve zagrejane, elastične žice. Roboti svojim kretanjem vrše elastične deformacije žice kako bi poklopili oblik žice sa aproksimiranom ravanskom krivom opšte površi u određenim pozicijama. Drugi pristup uključuje isecanje prednje i zadnje strane elementa iz prethodno sečenog kvadra,. Uzimajući da se ograničavajući kvadar (kao i njegov odgovarajući element) javljaju kao zajednički faktor u obe putanje, vrlo je bitno adekvatno izvršiti fabrikaciju kvadra, a zatim i pozicioniranje, za obe putanje.



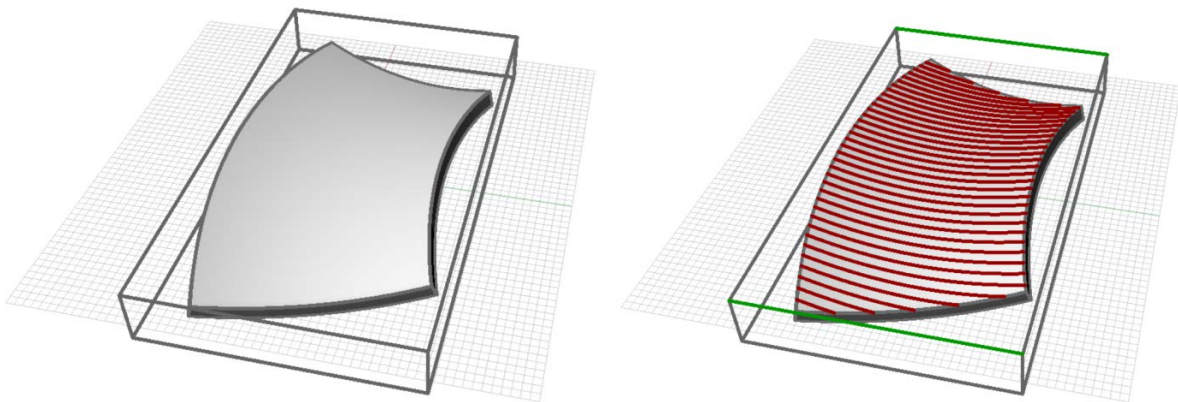
Slika 60 - Prikaz prvog procesa sečenja - a) sečenje dodirnih strana kvadra; b) sečenje dodirnih strana elementa; c) sečenje prednje i zadnje strane kvadra; d) blok sa elementom u sebi, pripremljen za drugu putanju sečenja

Za prvu putanju pozicioniranje se vrši kao i u prvom slučaju, postavljanjem ograničavajućeg kvadra u vertikalni položaj, zajedno sa svojim odgovarajućim elementom, u odnosu na referentni koordinatni sistem kako bi podaci za putanju sečenja bili adekvatno pripremljeni u odnosu na robota. Za razliku od prvog slučaja, gde prva putanja iseca samo sve strane elemenata, ovde prva putanja uključuje tri faze: isecanje dodirnih strana kvadra (slika 60a), isecanje dodirnih strana elementa (slika 60b), i isecanje prednje i zadnje strane kvadra (slika 60c). Ovakve faze su odabrane, kako bi gotov kvadar tj. blok polistirena bio isečen sa svih strana, i samim tim najviše nalikovao svom digitalnom modelu, koji se koristi i u drugoj putanji. Takođe, manuelno rotiranje bloka prilikom fabrikacije, kao što je bila praksa u prvom slučaju može da uzrokuje neadekvatno pozicioniranje i neprecizne rezultate kao i da onemogućiti efikasno uklapanje. Kako bi robot mogao da pristupi svim targetima u prvoj putanji, odnosno uradi sve prelaze, element i kvadar se rotiraju za 45° u odnosu na globalnu Z osu (0,0,1) (slika 61 levo). Targeti se generišu na isti način kao i u prvom slučaju, tako da je Z vektor orijentacije (obebežen plavom bojom) podešen da bude što više horizontalan (slika 61). Za treću fazu (slika 61 desno), gde se robot okreće da seče prednju i zadnju stranu bloka, targete je potrebno pripremiti tako da je Z vektor rotiran za 90° u pozitivnom matematičkom smeru oko X vektora (obebežen crvenom bojom) svake tačke u odnosu na prethodne prelaze. Na kraju, sve targete je potrebno ofsetovati za vrednost polovine debljine reza ($\delta/2$), kako debljina reza ne bi uticala na dimenzije elementa (zavisi od svojstva alatke i materijala i biće objašnjeno u poglavlju 3). Ovakvo pripremljeni podaci su spremni za implementaciju i služe za formiranje prve putanje sečenja.



Slika 61 - levo - prikaz generisanih targeta za isecanje dodirnih (bočnih) strana bloka; sredina - prikaz generisanih targeta za isecanje dodirnih (bočnih) strana elementa; desno - prikaz generisanih targeta za isecanje prednje i zadnje strane bloka

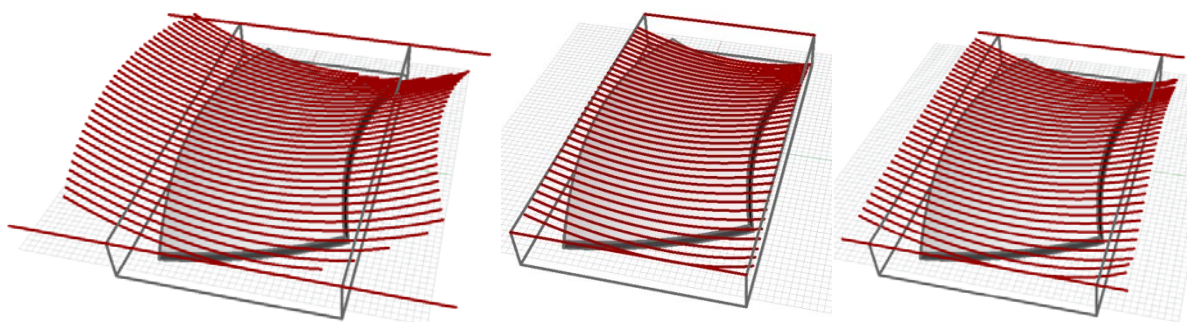
Pozicioniranje za drugu putanju se vrši na sličan način samo što se element i blok (slika 60d) postavljaju u horizontalnu poziciju, tj. tako da su prednja i zadnja strana bloka paralelne sa horizontalnom ravni (slika 62 levo). Uzimajući da se sečenje vrši pomoću dva industrijska robota, koji drže žicu određene dužine, potrebno je generisati targete za oba robota na takav način da dužina žice tokom procesa sečenja ostane stalna, a njen oblik simulira sve ravanske krive, koje aproksimiraju opštu površ elementa (prednju stranu elementa).



Slika 62 - levo - način pozicioniranja elementa i kvadra za drugu putanju sečenja; desno - generisanje ravanskih krivih, koji aproksimiraju opštu površ tj. gornju stranu elementa, zajedno sa ivicama bloka kao početnim oblicima žice

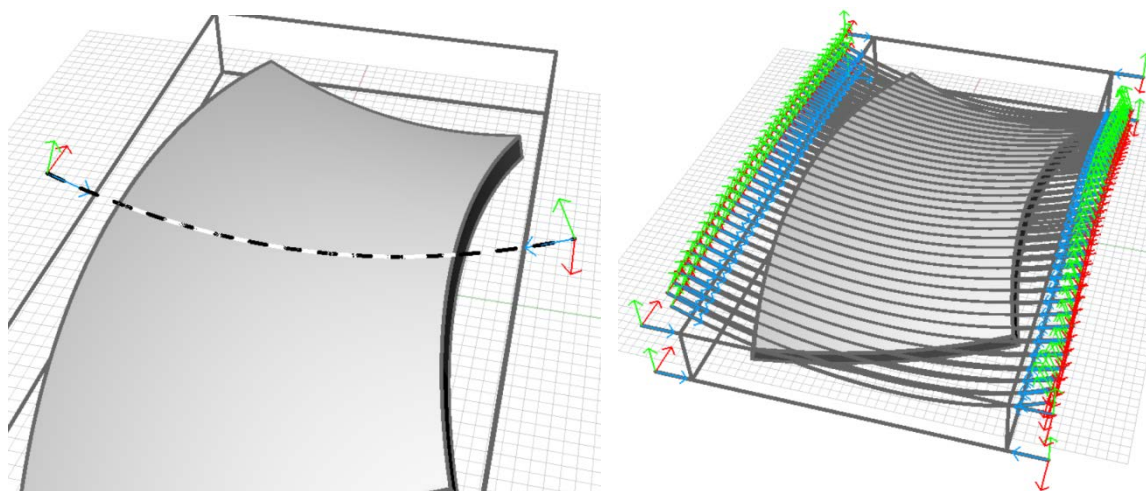
Ravanske krive se generišu na određenom rastojanju i kao takve imaju različite dužine (slika 62 desno obeležene crvenim). Ovde je bitno uvesti i ivice kvadra (obeležene zelenim) kao početne i krajnje oblike krive tokom sečenja, u cilju što preciznijeg pozicioniranja elementa prilikom procesa fabrikacije. Merenjem dužine svake krive, može da se utvrdi za koliko ih je potrebno produžiti, kako bi se dobile iste dužine i kako bi takve krive mogle kasnije da se primene u simulaciji oblika. Produžavanje krive se vrši u odnosu na njenu zakrivljenost i tangente u krajnjim tačkama. Međutim, krajnje tačke svih krivih nisu udaljene od bočnih strana kvadra za istu vrednost. U slučaju produžavanja krivih za istu vrednost sa obe strane, neke pozicije targeta bi ostale unutar kvadra (slika 63 levo), što bi uzrokovalo sudar robota i bloka prilikom fabrikacije. Kako bi se to izbeglo, krive su produžene sa obe strane za vrednosti širine kvadra, a zatim su delovi, koji izlaze van ravni bočnih

strana odsečene (slika 63 sredina). Ovako generisane krive su produžene na oba kraja za polovinu razlike dužina željene i ravanske krive (slika 63 desno) pri čemu svaka kriva ima odgovarajuću dužinu za proces fabrikacije. U ovom delu je potrebno ofsetovati krive za određenu vrednost ($\delta/2$) kako bi se nadomestila debljina reza (Poglavlje 3).



Slika 63 - levo - prikaz generisanih ravanskih krivih nakon produžavanja do vrednosti dužine žice, gde se vidi da krajevi nekih ivica ostaju unutar kvadra; sredina - prikaz generisanih krivih nakon produžavanja i odsecanja delova, koji izlaze van ravni bočnih strana; desno - prikaz generisanih ravanskih krivih nakon produžavanja krajeva za polovinu razlike željene dužine i dužine krivih

Nakon toga, proverava se koje pozicije i orijentacije treba da imaju krajnje tačke ovakvih krivih, da bi se prilikom elastičnih savijanja u realnim uslovima dobili isti oblici kao i u digitalnom modelu. Kao što je ranije pomenuto, za tu svrhu, upotrebljeni su dodatak Kangaroo, za simulaciju elastičnih deformacija i Galapagos, kao genetski algoritam za optimizaciju oblika žice. Proces počinje aproksimacijom ravanske krive polilinijom sa željenim brojem segmenata. Krajnje tačke polilinije kao i tangentni vektori se uzimaju kao podaci za generisanje inicijalnih pozicija i orijentacija tačaka. Pomoću takvih podataka simulira se izgled žice kao polilinije i upoređuje koliko odstupa od date ravanske krive (Slika 64 levo). Ako je odstupanje u granicama tolerancije, proces se ponavlja za ostale krive u skupu na isti način. U slučaju da su odstupanja isuviše velika, primenom genetskog algoritma se pomeraju krajnje tačke ili rotiraju dati vektori u ravni, u cilju pronalaska adekvatnih targeta. Kada se proces ponovi za svaku krivu u skupu, dobijaju se targeti za krajeve krivih, odnosno TCP-ovi za jednog i drugog robota. Isti postupak se ponavlja i za donju stranu, ali samo za obrnut red krivih, kako bi se targeti za gornju i donju stranu mogle spojiti u jedan niz targeta, koji se nastavlja kontinualno i čini targete druge putanje (Slika 64 desno).



Slika 64 - levo - prikaz simulirane polilinije (crna isprekidana kriva), ravanske krive opšte površi (bela kriva) i targeta u krajnjim tačkama polilinije; desno - generisani targeti za krajeve krivih odnosno TCP-ove oba robota

Nakon generisanja obe putanje, targeti mogu da se implementiraju u softversko okruženje za upravljanje robotom, kako bi se pripremili i kalibrisali za dalji proces fabrikacije.

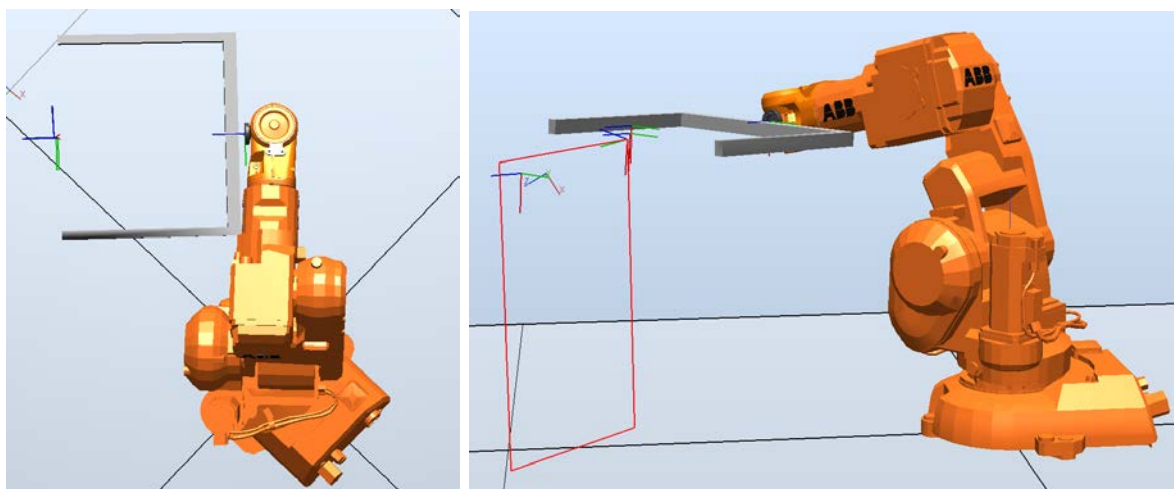
2.3.2. Proces fabrikacije

Ovaj projektantski scenario uključuje i samostalni rad jednog industrijskog robota i koordinisani rad dva industrijska robota, te je generisanje programa, njegova struktura kao i proces fabrikacije baziran na procesima fabrikacije prethodna dva slučaja. Međutim, postoje određene promene kojima treba da se postigne veća preciznost i kvalitet završne obrade, pa će naglasak biti na njima, objašnjen posebno kroz prvu i drugu putanju sečenja.

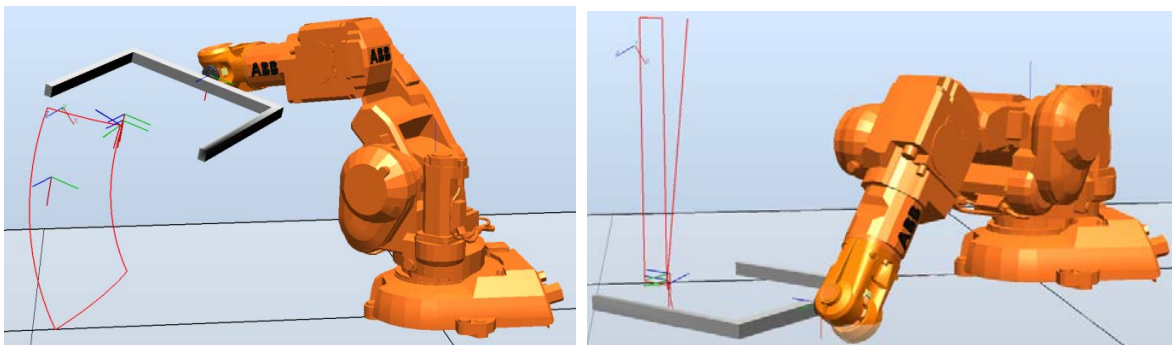
2.3.2.1. Prva putanja sečenja

Za realizaciju prve putanje sečenja koristi se samo jedan industrijski robot i alat sa pravolinijskom zagrejanom žicom, isto kao i u prvom scenariju. Kao što je ranije pomenuto, prva putanja ima tri faze, kojima se u potpunosti iseca ograničavajući kvadar i dodirne strane elementa unutar njega. Ovakav pristup je odabran kako bi se ograničavajući kvadar što približnije i preciznije fabrikovao da nalikuje na svoj digitalni model. Na taj način ivice kvadra predstavljaju dobar orijentir za pozicioniranje elementa (koji je unutar kvadra) za drugu putanju sečenja.

Generisane tačke za prvu putanju sečenja se ubacuju u deo programa za definisanje targeta. Na osnovu definisane pozicije bloka prilikom sečenja, kao i odgovarajućeg TCP-a (modul CalibData, potpoglavlje 2.1.2.1.) i dati targeti za tri faze se unose u program. Zasebno se vrši provera da li robot može da pristupi svim tačkama, a zatim i u okviru jedinstvene putanje za svaki prelaz. Uzimajući da je pri ovakavom način fabrikacije, zbog veličine alata sudar alata sa samim robotom lako moguć (slika 65 levo) u simulaciju sečenja se uvodi i provera sudara. U slučaju da simulacija pokaže da dolazi do sudara, pozicija bloka se modifikuje kako bi se sudar izbegao. Nakon toga se vrši simulaciju za prvi prelaz (slika 65 desno). Prvi prelaz je odabran da bude onaj koji iseca bočne ili dodirne strane kvadra, kako bi na početku bilo lakše pozicionirati blok polistirena na odgovarajuće mesto.



Slika 65 - levo - prikaz orijentacije alata robota, koja može da uzrokuje sudar sa samim robotom zbog postavke elementa u ravan zarotiranu za 45° u odnosu na globalni koordinatni sistem; desno - prikaz praćenja putanje alata tokom prvog prelaza

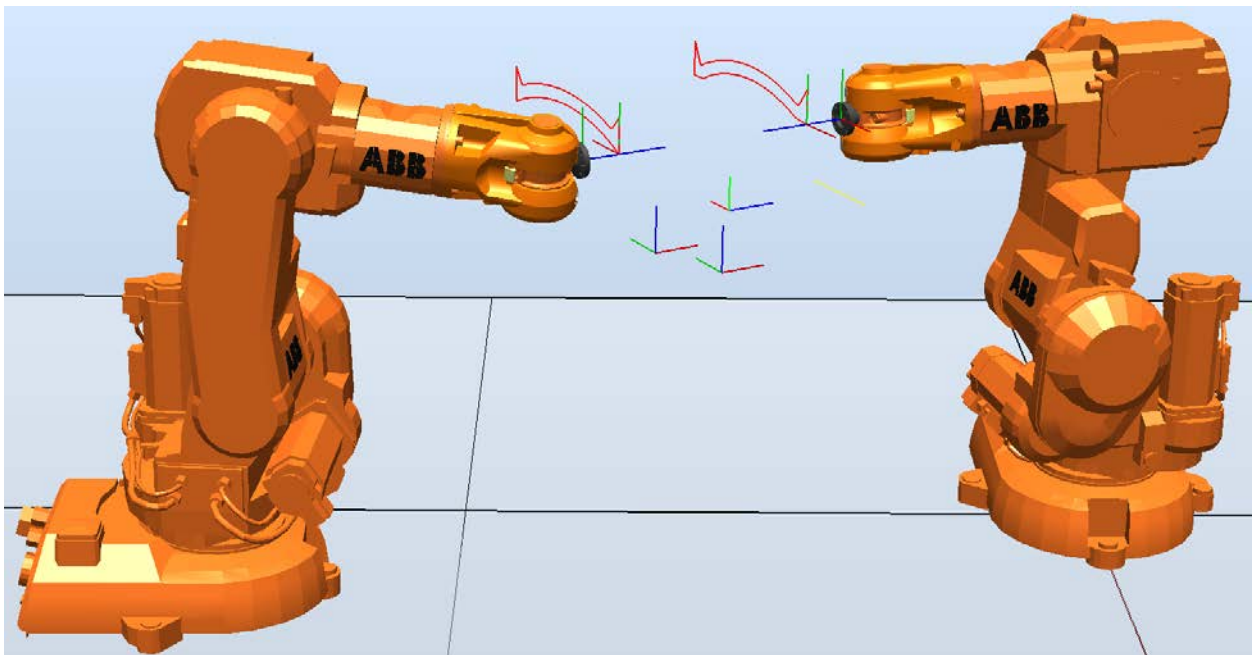


Slika 66 - levo - prikaz praćenja TCP-a tokom drugog prelaza; desno - prikaz praćenja TCP-a tokom trećeg prelaza

Nakon toga se nastavlja sa drugim prelazom, koji iseca dodirne strane elementa (Slika 65 levo), i na kraju se završava sa trećim prelazom, koji iseca prednju i zadnju stranu kvadra, što je momentat kada se alatka robota rotira za 90° (Slika 65 desno). U ovom momentu je bitno usaglasiti brzinu prelaska između drugog i trećeg prelaza, kako se alatka ne bi zadržala u bloku predugo i izazvala topljenje materijala, koje bi dovelo do kasnijih nepreciznih rezultata. Takođe, krajnja tačka trećeg prelaza pokazuje kako bi blok trebalo pozicionirati tako da alatka može da iseče blok i sa ove strane. Priprema bloka za isecanje je ista kao i u prvom pristupu (Poglavlje 2.1.1.2.). Kada su putanje za sve elemente i kvadrove provere, može da se krene sa postavkom za drugu putanju.

2.3.2.2. Druga putanja sečenja

Za drugu putanju sečenja koristi se ista postavka dva industrijska robota i način pripreme scene kao za drugi projektantski pristup (Potpoglavlje 2.2.2.1.). Za razliku od prethodnog slučaja, ovde oba robota dobijaju informacije o svojim targetima. Takođe, oba robota dele informaciju o poziciji bloka iz kog se iseca element, kako bi targeti bili poklopljeni na adekvatan način. Kada bi se programi za fabrikaciju kod svakog robota pustili u rad u ovom momentu, rad ne bi bio sinhronizovan. Oba robota bi uradili svoje putanje kao da vrše samostalno sečenje i vreme rada za oba bi bilo drugačije. Da bi se ovaj problem rešio, koordinisanim radom treba obezbediti da vrhovi robota ostvaruju potrebnu poziciju i orijentaciju tako da zagrejana žica ima željeni oblik tj. da se odgovarajući par targeta sinhronizuje (primenom Sync Ident dodataka na targetima) tako da roboti stignu u svoj target u isto vreme. Na taj način se omogućava da elastične deformacije žice ostanu u jednoj ravni i da dužina žice ostane konstantna tokom procesa sečenja. Nakon toga, vrši se simulacija, kojom se proverava da li je moguće da se putanje izvrše (slika 67). U slučaju da to nije moguće, pozicija elementa se modifikuje i proces se ponavlja dok se simulacijom ne pokaže da je datu putanju moguće izvršiti.



Slika 67 - Prikaz postavke dva industrijska robota u koordinisanom prolasku kroz parove targeta, koji simuliraju oblik žice za sečenje

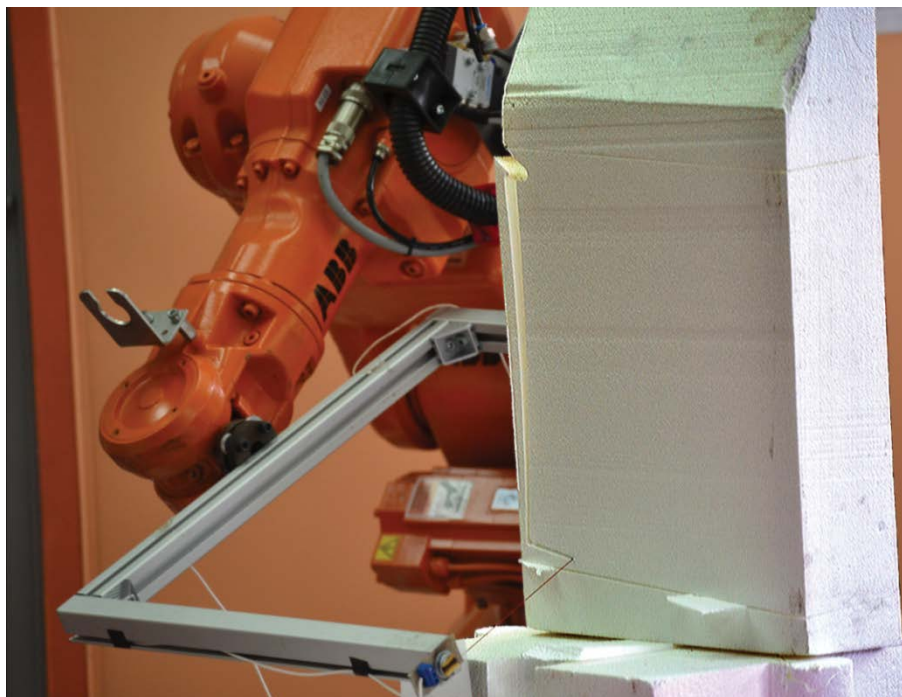
Ovako pripremljena putanja omogućava da se roboti dovedu u prvi target i da se u toj poziciji fiksira žica na alate robota. Žica u toj poziciji treba da bude horizontalna, kako bi mogla da se poklopi sa ivicom bloka polistirena iz kog se iseca element. Kada se druga putanja proveri za sve elemente, može da se krene u realizaciju složene forme.

2.3.2.3. Realizacija složene forme

Prethodno opisana metoda je implementirana za realizaciju elemenata, koji se neprekinuto nastavljaju. Provera kvaliteta neprekidnosti elemenata se vrši u odnosu na neprekidnost zakrivljenosti površi prednje i zadnje strane i po kvalitetu završne obrade dodirnih strana, koje omogućavaju neprimetnu spojnicu. Deo, koji elementi pokrivaju je stub 37x37cm u osnovi (slika 49 levo), što utiče na generisanje kružnog luka od 30cm poluprečnika u osnovi. Visina profilnih krivih je 68cm, sa debljinom elemenata od 2cm i debljinom bloka iz kog se iseca od 10cm.

Uzimajući da je potrebno fabrikovati prototip veoma velike preciznosti, bitno je osvrnuti se na faktore, koji mogu uticati na negativan ishod. Među njima, tu su nepoklapanje ravni baze robota i ravni u koju se pozicionira blok za isecanje sa njihovim ravnima u digitalnim modelima. Takođe, proces fiksiranja alata kao i određivanja TCP-a može da ima svoja odstupanja realnih od digitalnih modela i obrnuto i da utiče na proces sečenja. Na kraju, za isecanje opštih površi pomoću dva robota, bitno je adekvatno fiksirati krajeve žice i pozicionirati element, kako bi rezultati bili precizni. Kako bi se ovakvi problemi prevazišli, odabrano je da se fabrikacija vrši u dve faze. U prvoj fazi, primenom prve putanje, jedan robot iseca dodirne strane elementa i ceo blok sa svih strana (Slika 60). Na taj način, bez obzira na prethodno iznete probleme, krajnji rezultat će biti blok, koji je po geometriji identičan svom digitalnom modelu. Takav blok, kasnije služi za drugu fazu fabrikacije, gde se primenom druge putanje iz bloka i njegovog elementa iseca finalni prototip. Proces realizacije biće objašnjen kroz ove dve faze, koje se odnose na dve putanje sečenja.

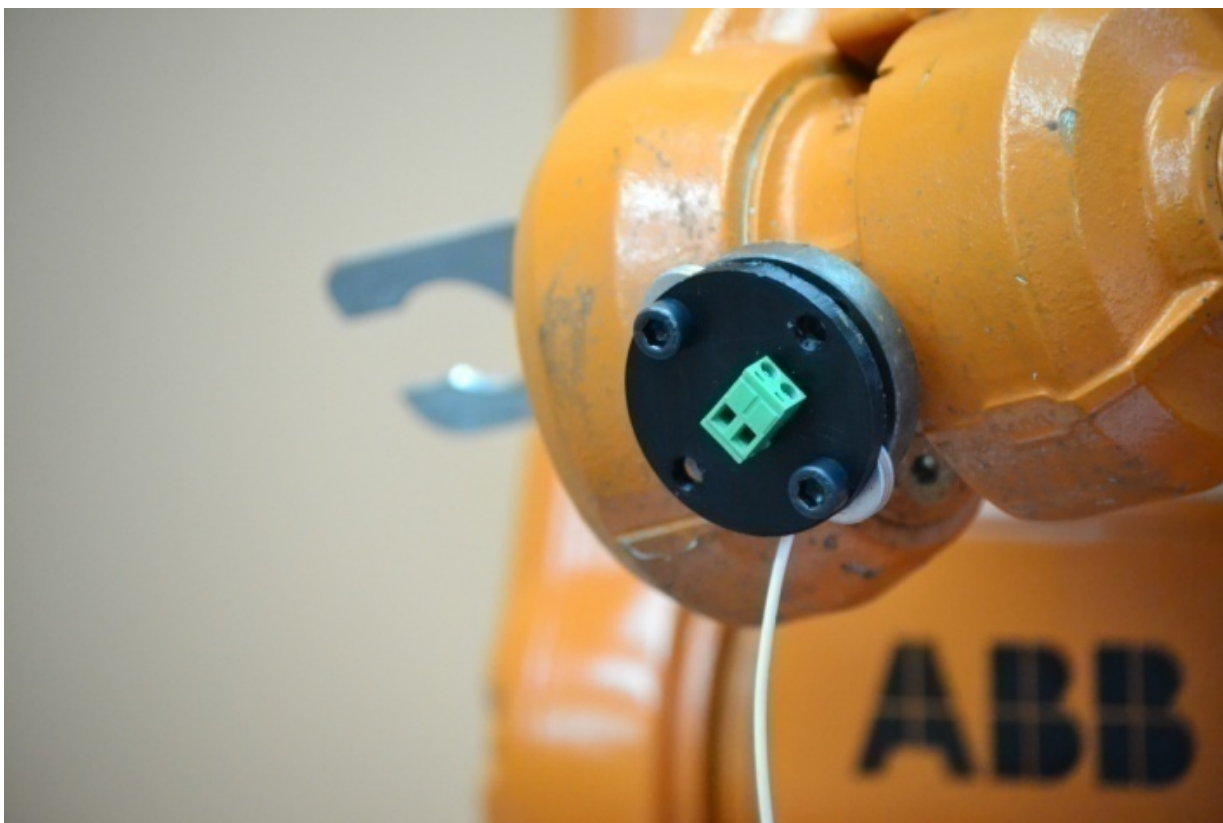
Alat, koji se koristi za prvu putanju je isti kao i u prvom slučaju, viljuška veličine 40x40cm. Kako bi se blok adekvatno pozicionirao za prvu putanju, robot se dovede u početnu poziciju i blok se postavi tako da ravan bočne strane bloka bude paralelna sa žicom, težeći da blok bude pozicioniran što vertikalnije. Data pozicija se zabeleži na osnovi. Blok se zatim ukloni i ceo program se izvrši do kraja putanje, kada se opet blok pozicionira, ali tako da je sada ravan prednje strane bloka poravnata sa žicom. Pozicija se takođe zabeleži na osnovi.



Slika 68 - gore - isecanje dodirnih strana bloka polistirena i elementa unutar njega uz postavku distancera za sprečavanje spuštanja bloka; dole - isecanje prednje i zadnje strane bloka, radi dobijanja identičnog modela bloka za drugu fazu sečenja

Robot se opet dovede u prvu tačku putanje, blok se pozicionira na osnovu zabeleženih položaja na podlozi i pusti u rad. Robot prvo prelazi dodirne strane bloka. Uzimajući da žica u kontaktu sa polistirenom uklanja deo materijala, nakon završenog isecanja prvog prelaza, dolazi do pada bloka za debljinu reza. Kako bi se to rešilo, tokom sečenja se postavljaju tanki komadi polistirena kao distanceri u donji prorez, kako se blok ne bi spustio i kako bi isecanje elementa iz bloka bilo precizno i na odgovarajućem mestu (Slika 68 gore). Nakon završena prva dva prelaza, robot se, bez pomeranja bloka, pozicionira u novu poziciju, zarotran za 90 ° u odnosu na prvobitnu i nastavlja isecanje prednje i zadnje strane bloka (Slika 68 dole). Ovako isečen komad čine i kvadar i element unutar njega i zajedno se uklanjaju. Zatim se adekvatno numerišu. Kao takvi, čine početni element za drugu fazu fabrikacije primenom druge putanje.

Druga faza počinje fiksiranjem alata za pričvršćivanje žice za sečenje na krajeve robota. Alati treba da su takvi da ih je lako fiksirati na krajeve robota, da je omogućen dovod struje i kompenzacija dužine žice usled termalnog izduženja zbog visoke temperature kao i lako fiksiranje žice. Zbog visoke temperature, koju žica razvija prilikom sečenja (približno 600 ° Celsijusa), bilo je potrebno omogućiti dobar kontakt alata i žice, koja neće dovesti do njegovog topljenja. U tu svrhu, jedan deo alata (prirubnica, koja služi da se alat fiksira za robota) je fabrikovana od plastike primenom procesa 3d štampe (crni deo, slika 69), i na nju je dodat blok, koji omogućava dovod struje i fiksiranje žice (zeleni deo), bez problema topljenja dela alata prilikom visoke temperature (slika 69). Stvarajući uzak prorez za blok, omogućeno je kontrolisano pomeranje upravno na prirubnicu, što omogućava podešavanje dužine žice prilikom termalnog izduženja.



Slika 69 prikaz alata robota za drugu putanju sečenja - crni deo je prirubnica, koja služi za fiksiranje na robota, zeleni deo je blok, koji fiksira žicu i omogućava amortizaciju dužine usled termalnog izduženja

Nakon pozicioniranja alata na krajeve robota, roboti se dovedu u prve targete svojih putanja. Zatim se na alate fiksira žica unapred određene dužine (dužina koja je korišćena za određivanje targeta druge putanje), skraćena za vrednost termalnog izduženja, dovodeći je u horizontalnu poziciju. Nakon toga, blok polistirena sa elementom koji se u njemu nalazi se pozicionira tako da se žica poklopi sa gornjom ivicom bloka tako da su rastojanja robota od bloka jednaka. Struja se uključi i termalno izduženje se kompenzuje pomeranjem zelenog bloka. Program se pokrene pa dolazi do isecanja prednje i zadnje strane elementa (Slika 70).



Slika 70 - Prikaz žice razvučene između alata robota u procesu sečenja finalnog prototipa iz bloka polistirena



Slika 71 - sa leva na desno - proces uklanjanja nepotrebnih delova polistirena nakon izvršene druge putanje kako bi se dobio finalni prototip

Na kraju, element se izvlači iz bloka uklanjajući delove, koji nisu potrebni (Slika 71). Element je potrebno opet numerisati, uzimajući da je prethodna oznaka obeležavala blok iz kog je isečen. Nakon što su i ostali elementi fabrikovani na isti način, pristupa se proveru neprekidnosti zakrivljenosti i kvaliteta spojnice dodirnih strana elemenata.

U cilju provere svih elemenata procesa, spojena su tri elementa, koji čine jedan segment složene forme. Debljina elemenata je 2cm. Stoga, bilo koja nepreciznost u isecanju elemenata dovodi do primetne praznine na spojnici dodirnih strana. Takođe, zakrivljenost površi može biti narušena, ako blok nije dobro pozicioniran ili ako dužina žice nije odgovarajuća. Ako se pažljivo primeni opisana metodologija fabrikacije, spojnice su skoro neprimetne, a neprekidnost zakrivljenosti površi prednjih i zadnjih strana je nenarušen (Slika 72).



Slika 72 - prikaz tri spojena elementa, koji pokazuju nenarušenu neprekidnost zakrivljenosti površi i neprimetnu spojnicu između elemenata

U ovom slučaju se desilo da primenom ravanskih krivih u procesu generisanja slobodne forme, kao i načina podele, bočne strane elemenata i ovakav segment imaju ravanske pravoizvodne površi. Po pitanju sklapanja elemenata to omogućava bilo koju strategiju uklapanja ovakvih segmenata obezbeđujući da pravac ubacivanja prilikom spajanja bude upravan na površ. Kroz dati proces fabrikacije, verifikovana je mogućnost korišćenja samo dva industrijska robota za sečenje elemenata slobodne forme. Na taj način, kvalitet završne obrade elemenata može biti visok i detaljan (kao što omogućava primena CNC glodalice) ali uz veliku uštedu vremena. Ograničenja su primetna u mogućnostima postizanja odgovarajućih oblika, koji se svode na Beziijeove krive generisane obezbeđujući tačno pozicioniranje samo krajeva žice (dve tačke) tačan nagib tangenti.

U svim projektantskim scenarijima, koji su izneti u ovom poglavlju, deo koji nedostaje je vrednost debljine reza (δ), koja služi da proces sečenja učini preciznijim, ofsetovanjem targeta u odnosu na inicijalnu poziciju. Debljina reza zavisi od svojstava materijala i dodatnih faktora i biće detaljnije objašnjeni u narednom poglavlju.

3. Svojstva materijala i alata prilikom fabrikacije

Kao što je ranije napomenuto, integrisani prisup fabrikaciji u ovom istraživanju obuhvata oblasti projektovanja, fabrikacije i svojstava materijala. Jedinstvenost svakog projektantskog scenarija, koji je iznet u prethodnom poglavlju, ogleda se u procesu projektovanja i procesu fabrikacije. Materijali, kao i njihova svojstva su nepromenjivi u sva tri scenarija. Zbog toga će, u ovom poglavlju, biti opisani materijali, koji su uzeti u razmatranje kao i njihovi ključni faktori i svojstva, koji utiču na procese projektovanja i fabrikacije. Naglasak je stavljen na određivanje debljine reza tj. vrednosti za koju je potrebno ofsetovati (pomeriti) target u odnosu na inicijalnu poziciju, u cilju dobijanja što preciznijih rezultata sečenja.

Shodno tome, debljina reza zavisi od materijala iz kog se vrši isecanje i materijala koji vrši sečenje. U ovoj disertaciji, materijal iz kog se vrši isecanje je penasti polistiren, dok je materijal koji vrši sečenje zagrejana metalna žica. Zagrejana žica ne vrši sečenje direktnim dodiranjem između materijala, već razvijajući visoku temperaturu, koja zagreva okolni vazduh i topi penasti polistiren oko sebe (termalno sečenje). Temperatura se razvija na osnovu protoka struje kroz žicu, kao i brzine kretanja date žice. Zbog toga, pored svojstava ovih materijala, u razmatranje je potrebno uzeti i ove faktore, koji utiču na razvijanje odgovarajućih uslova za proces sečenja.

3.1. Penasti polistiren

Razlozi odabira penastog polistirena, kao i njegove primene u arhitekturi su izneti u uvodnom delu ove disertacije. Stoga je u ovom odeljku naglasak stavljen na svojstva različitih vrsta penastog polistirena koji se primenjuju u praksi i svojstva, koja je treba uzeti u obzir prilikom određivanja debljine reza u procesu fabrikacije. Penasti polistiren se u arhitektonskoj praksi pojavljuje u dve vrste - ekstrudirani penasti polistiren (XPS) i ekspanzirani penasti polistiren (EPS).

XPS se često primenjuje kao zvučni ili toplotni izolator za podove i zidove podruma, krovova i slično. Zbog načina proizvodnje, poseduje dobru čvrstinu (gustina od 28-45 $\frac{kg}{m^3}$), pretežno homogenu strukturu, sa ćelijama polistirena gusto upakovanim. Zbog nepostojanja vazduha između ćelija, nije moguć prodor vode kroz strukturu, i ima prosečnu toplotnu provodljivost od 0,035 $\frac{W}{mK}$.

Ekspanzirani polistiren se proizvodi u kalupima, gde se ekspanzirane ćelije penastog polistirena pod pritiskom spajaju, ostavljajući prostor između ćelija za prodor vazduha, koji je dobar izolator. Usled toga, njegova čvrstoća je manja u odnosu na XPS (gustina od 15 - 30 $\frac{kg}{m^3}$), ali je toplotna provodljivost i do 0,029 $\frac{W}{mK}$, što pogoduje termoizolaciji fasada i unutrašnjih zidova objekata. Bez adekvatne zaštite, nije dobro izlagati ga uticaju atmosferskih padavina, zbog odsustva vodonepropustljivosti.

Od svih svojstava materijala, ono koje treba uzeti u obzir u procesu projektovanja je toplotna provodljivost, koja zavisi od gustine, vrste i debljine materijala. Stoga, faktori, koji su uvršćeni za proračun debljine reza su gustina i vrsta materijala, koji se primenjuje, uz održavanje debljine materijala kao konstante. Uzimajući u obzir da je potrebno materijal iseći primenom termalnog sečenja zagrejanom žicom, bitno je osvrnuti se i na temperaturu topljenja penastog polistirena, koja iznosi od 210-240 stepeni C. Pri ovoj temperaturi, penasti polistiren prelazi u žitku masu, koja ne isparava, već se zadržava na zagrejanom žici. Kako bi žica mogla da topi materijal oko sebe, tako da penasti polistiren isparava i ne prelazi u žitku masu, temperaturu žice je potrebno povećati do te mere da temperatura vazduha oko žice u proseku bude u domenu od 260-300°C u zavisnosti od gustine

polistirena. Stoga, potrebno je primeniti odgovarajuću metalnu žicu, koja može da razvije potrebnu temperaturu.

3.2. Zagrejana metalna žica

Za proces sečenja penastog polistirena potrebno je koristiti metalnu žicu, kroz koju prolazi struja, pri čemu dolazi do razvijanja visoke temperature. Bakarne žice, koje dobro provode struju, se prilikom velikog protoka struje zagrevaju, ali usled niske tačke topljenja, brzo gube na svojoj čvrstoći, krutosti i postaju mekane, što nije dobro za očuvanje pravolinijskog oblika žice ili održavanje elastičnih deformacija. Čelične žice imaju dobru krutost pri velikom protoku struje, ali se slabije i sporije zagrevaju i mogu uzrokovati krivljenje žice prilikom sečenja ili zadržavanje unutar materijala, usled kontakta žice i polistirena, a kao posledica nerazvijanja potrebne temperature. Iz ovih razloga, u praksi se za potrebe sečenja penastog polistirena koriste žica od legure nikla i hroma (80% Ni, 20% Cr) kao i različitih odnosa ovih materijala sa primesama drugih. Žice ovakvog sastava imaju visoku otpornost, visoku tačku topljenja i mogu duže vreme da budu zagrejane na visokoj temperaturi bez oksidacije i sagorevanja, održavajući pritom odgovarajuću elastičnost (Kanthal, 2017).

Kao prvi korak primene nikel-hromske žice, prvo se odabere žica njen sastav i njena debljina, odnosno prečnik. Sastav žice nije presudan prilikom sečenja polistirena, a debljina bi trebala da bude što manja, kako ne bi bio potreban protok struje većeg intenziteta. Prateći fabričke specifikacije, za određene vrednosti sastava i debljine, moguće je odrediti i ostala svojstva i faktore, koji su potrebni za određivanje debljine reza sečenja. Prvi od njih je termalno izduženje. Kao i kod svakog metala, tako i kod nikel-hromske žice dolazi do termalnog izduženja prilikom povećanja temperature materijala. Na osnovu jednačine (4) moguće je odrediti koliko je termalno izduženje ΔL_c [m]:

$$\Delta L_c = L_c * \alpha_L * \Delta T_c \quad (4)$$

gde su L_c dužina žice [m], α_L koeficijent termalnog izduženja $\left[\frac{1}{K}\right]$ i ΔT_c promena temperature žice [K]. Ovo svojstvo je potrebno da se uzme u obzir prilikom fiksiranja žice kao alata za sve gore pomenute scenarije. U prva dva scenarija, pravolinijska žica se fiksira na krajeve metalne viljuške. Prilikom propuštanja struje, dolazi do termalnog izduženja, pri čemu bi se žica opustila i izgubila svoj pravolinijski oblik. Kao način rešavanja ovog problema, na alat je dodata metalna opruga, koja zateže žicu, vraćajući je u pravolinijski oblik. Međutim, za treći scenario, ranije opisan u disertaciji, nije moguće koristiti ovakav pristup, jer je potrebno da se vrše elastične deformacije na žici. U tom cilju, problem termalnog izduženja se kompenzuje kliznim kontaktom između dva dela alata robota, koji omogućavaju podešavanje dužine žice, nakon propuštanja struje, ujedno omogućavajući elastične deformacije.

Pored termalnog izduženja, potrebno je uzeti u obzir i faktore, koji omogućavaju razvijanje dovoljne temperature žice za zagrevanje okolnog vazduha prilikom procesa sečenja polistirena. Kako bi se povećala temperatura žice od početne vrednosti (kao početna vrednost uzima se 20°C) do dovoljne krajnje vrednosti temperature potrebno je da žica odaje određenu količinu toplote, koja se određuje na osnovu jednačine (5):

$$q = m_c * C_c * \Delta T_c \quad (5)$$

gde je q količina toplote [J], koja se otpusti, m_c masa supstance (žice) [kg], C_c specifični toplotni kapacitet $\left[\frac{J}{kg K}\right]$ i ΔT_c promena temperature žice od krajnje do početne ($T_c - T_{c1}$) (T_c krajnja

temperatura žice, T_{c1} početna temperatura žice pre zagrevanja) [K]. S obzirom da je potrebno odrediti krajnju temperaturu zagrejjane žice, T_c , jednačinu (5) je potrebno napisati kao:

$$T_c = \frac{q}{m_c * c_c} + T_{c1} \quad (5.1)$$

Iz date jednačine, nepoznata je vrednost količine toplote. Po definiciji, količina toplote (energije), koja se oslobodi u jedinici vremena predstavlja određenu snagu (P) [W]. Ako se izračuna za koje vreme se data količina toplote osloboda u jedinici vremena i da se izuzimaju gubici energije prilikom zagrevanja, dobija se da su vrednosti količine toplote i snage međusobno zavisne $(P = \frac{q}{t})$. Na osnovu ove pretpostavke, određivanjem snage i vremena zagrevanja, moguće je odrediti i potrebnu količinu toplote. Uzimajući da se količina toplote osloboda protokom struje kroz žicu, potrebno je snagu odrediti na osnovu otpora prilikom prolaska struje određene jačine, ili određenog napona primenom jednačina (6) ili (7):

$$P = I^2 * R \quad (6)$$

$$P = U * I \quad (7)$$

gde je I jačina struje [A], U napon struje [V] i R otpor žice [Ω]. Kako bi se dobili precizniji rezultati, otpor je potrebno pomnožiti određenim faktorom C_t , u odnosu na temperaturu, koju postiže data žica, što se nalazi u fabričkim specifikacijama materijala. Postavljanjem opruge od drugačijeg materijala, koja kontroliše termalno izduženje (za prva dva slučaja) otpor žice može da varira od date vrednosti dajući neprecizne rezultate (ako je konstrukcija takva da struja prolazi i kroz oprugu). Stoga, prilikom primene izvora napajanja, koje obezbeđuje potreban napon struje, poželjno je imati i očitavanja vrednosti napona, jačine struje i snage, kako bi otpor žice bio izuzet, a vrednost snage direktno očitana.

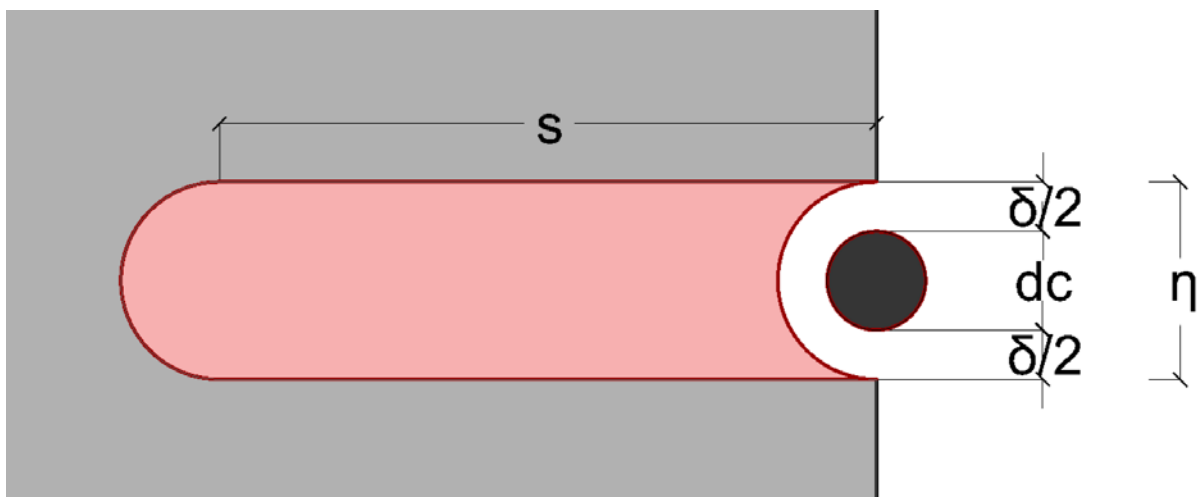
Primenom gore pomenutih jednačina, moguće je na osnovu poznavanja vrednosti napona i jačine struje, vremena zagrevanja, kao i mase i specifične toplotne provodljivosti žice (čitaju se iz specifikacija) odrediti krajnju temperaturu zagrejjane žice - T_c . Na osnovu ove vrednosti, a uključujući i karakteristike vazduha i brzinu kretanja žice (V), tokom procesa sečenja $[\frac{m}{s}]$, moguće je odrediti debljinu reza.

3.3. Debljina reza

Debljina reza čini širinu otopljenog sloja polistirena, merenu upravno na pravac kretanja zagrejjane žice, koja vrši sečenje. Kao što je ranije napomenuto, način sečenja je termalni, što znači da nema kontakta između zagrejjane žice i polistirena, već se određena količina vazduha oko žice zagreva i topi polistiren u svojoj okolini, dok se žica kreće. Na osnovu ovoga, generisana je jednačina (8) za određivanje debljine reza η kao:

$$\eta = d_c + \delta \quad (8)$$

gde je d_c prečnik žice [m], koja vrši sečenje, a δ debljina termalnog sloja vazduha oko žice [m]. Zagrejjani vazduh topi penasti polistiren, prilikom prelaska puta (s)[m] brzinom (V) u jedinici vremena (Slika 73).



Slika 73 - Prikaz poprečnog preseka zagrejjane žice (crni krug), prečnika d_c i otopljene površine (crvena površina) penastog polistirena (siva površina); debljina termalnog sloja δ

Prečnik žice je poznat, ali je potrebno odrediti debljinu termalnog sloja što je u ovom istraživanju postignuto na sledeći način. Na osnovu date slike primetno je da je površina poprečnog preseka otopljenog sloja (A_p) jednaka proizvodu pređenog puta žice (s) i debljine reza (η), što omogućava generisanje još jedne jednačine za određivanje debljine reza kao (9):

$$\eta = \frac{A_p}{s} \quad (9)$$

Izjednačavanjem jednačina (8) i (9) dobija se jednačina (10):

$$d_c + \delta = \frac{A_p}{s} \quad (10)$$

gde su nepoznate vrednosti debljine termalnog sloja (δ) i površina otopljenog polistirena (A_p). Dakle, određivanjem površine otopljenog polistirena, moguće je odrediti debljinu termalnog sloja.

Površina otopljenog sloja zavisi od debljine polistirena (d_p) [m] i njegove gustine (ρ_p) [$\frac{kg}{m^3}$]. Jednačina (11) pokazuje na, koji način:

$$A_p = \frac{m_p}{\rho_p * d_p} \quad (11)$$

Nepoznatu masu otopljenog polistirena (m_p) [kg] moguće je odrediti na osnovu jednačine (5), kao:

$$m_p = \frac{q_u}{\Delta T_p * C_p} \quad (12)$$

gde su specifični toplotni kapacitet polistirena (C_p) i promena temperature polistirena (ΔT_p) poznati (početna vrednost temperature je temperatura vazduha T_c , uzima se da $20^\circ C$, a krajnja vrednost je ona vrednost, T_p , potrebna da istopi polistiren, što je oko $280^\circ C$). Ostaje samo da se odredi ukupna količina toplote.

Ukupna količina toplote, q_u , [W] predstavlja onu količinu toplote, koja može da se prenese kondukcijom (direktan dodir tela), konvekcijom (strujanjem vazduha oko zagrejanog tela) i radijacijom (zračenjem) (Bejan & Kraus, 2003). S obzirom da ne postoji direktan kontakt žice i polistirena, uzima se da se ukupna količina toplote prenosi putem konvekcije i radijacije (13):

$$q_u = q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} \quad (13)$$

Količina toplote, koja se prenosi radijacijom se određuje na osnovu formule (14) i zavisi od svojstava žice (Howell et al, 2010):

$$q_{\text{rad}} = \varepsilon * \frac{d_c^2}{4} * \pi * \sigma * (T_c - T_a)^4 \quad (14)$$

gde ε predstavlja emisivnost žice prilikom odavanja toplote (bezdimezionna jedinica 0-1), σ je Stefan-Boltzmann-ova konstanta $\left[\frac{W}{m^2K^4}\right]$ i T_a temperatura vazduha u prostoriji [K]. Sve vrednosti su poznate i moguće je odrediti količinu toplote, koja se oslobađa radijacijom.

Količina toplote, koja se prenosi konvekcijom, prilikom kretanja vazduha preko geometrije (dok geometrija odaje toplotu), se određuje na osnovu formule (15) i zavisi od svojstava vazduha, kao prenosioca toplote (Bejan, 2013):

$$q_{\text{conv}} = h * L_c * d_c * (T_c - T_a) \quad (15)$$

gde je jedina nepoznata vrednost h , koeficijent konvekcije (koeficijent prenosa toplote) $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$, koji se proračunava na osnovu formule (16) (Whitaker, 1972) kao:

$$h = \frac{N_u k_a}{d_c} \quad (16)$$

gde su k_a toplotna provodljivost vazduha $\left[\frac{W}{mK}\right]$ i N_u Nuseltov (Nusseult) broj²⁵. Za geometriju cilindra, odnosno žice, preko koje prelazi vazduh, dok se žica kreće, primenjena je jednačina (17) (Lienhard & Lienhard, 2002):

$$N_u = 0.3 + \frac{0.62 * R_e^{0.5} P_r^{0.333}}{\left(1 + \left(\frac{0.4}{P_r}\right)^{0.667}\right)^{0.25}} \quad (17),$$

gde su nepoznate vrednosti Renoldsov (Reynold) broj²⁶, R_e , i Prantlov (Prandtl) broj²⁷, P_r , takođe bezdimenzione vrednosti. Ove dve vrednosti se određuju na osnovu jednačina (18) i (19) (Lienhard & Lienhard, 2002):

$$R_e = \frac{V * d_c}{\nu_a} \quad (18),$$

$$P_r = \frac{c_a \rho_a \nu_a}{k_a} \quad (19)$$

²⁵ Nuseltov broj - bezdimenzioni broj, koja zavisi od geometrije, koja prenosi toplotu i brzine kretanja vazduha preko takve geometrije

²⁶ Renoldsov broj - bezdimenzioni broj koja karakteriše relativne uticaje inercijalnih i viskoznih sila u određenoj postavci fluida

²⁷ Prantlov broj - bezdimenzionalni broj koji karakteriše relativne odnose kinematičke viskoznosti i termalne difuznosti

gde su V brzina kretanja žice [m], ν_a kinematička viskoznost vazduha [$\frac{m^2}{s}$], C_a - specifični toplotni kapacitet vazduha i ρ_a - gustina vazduha. Sve vrednosti sa indeksom a (koje se odnose na vazduh) se mere za temperaturu termalnog sloja ($T_f = \frac{T_c + T_a}{2}$) ili preuzimaju iz tabele 1:

Temperatura [C]	Gustina [kg/m ³]	Specifični toplotni kapacitet [kJ/kg K]	Koeficijent toplotne provodljivosti [W/m K]	Kinematička viskoznost [m ² /s]
-150	2.793	1.026	0.0116	3.08
-100	1.98	1.009	0.016	5.95
-50	1.534	1.005	0.0204	9.55
0	1.293	1.005	0.0243	13.3
20	1.205	1.005	0.0257	15.11
40	1.127	1.005	0.0271	16.97
60	1.067	1.009	0.0285	18.9
80	1	1.009	0.0299	20.94
100	0.946	1.009	0.0314	23.06
120	0.898	1.013	0.0328	25.23
140	0.854	1.013	0.0343	27.55
160	0.815	1.017	0.0358	29.85
180	0.779	1.022	0.0372	32.29
200	0.746	1.026	0.0386	34.63
250	0.675	1.034	0.0421	41.17
300	0.616	1.047	0.0454	47.85
350	0.566	1.055	0.0485	55.05
400	0.524	1.068	0.0515	62.53

Tabela 1 - Prikaz relevantnih vrednosti gustine, specifične toplote, koeficijenta toplotne provodljivosti i kinematičke viskoznosti vazduha na određenim temperaturama

Na osnovu ovakve procedure, moguće je odrediti debljinu termalnog sloja, koji zavisi od:

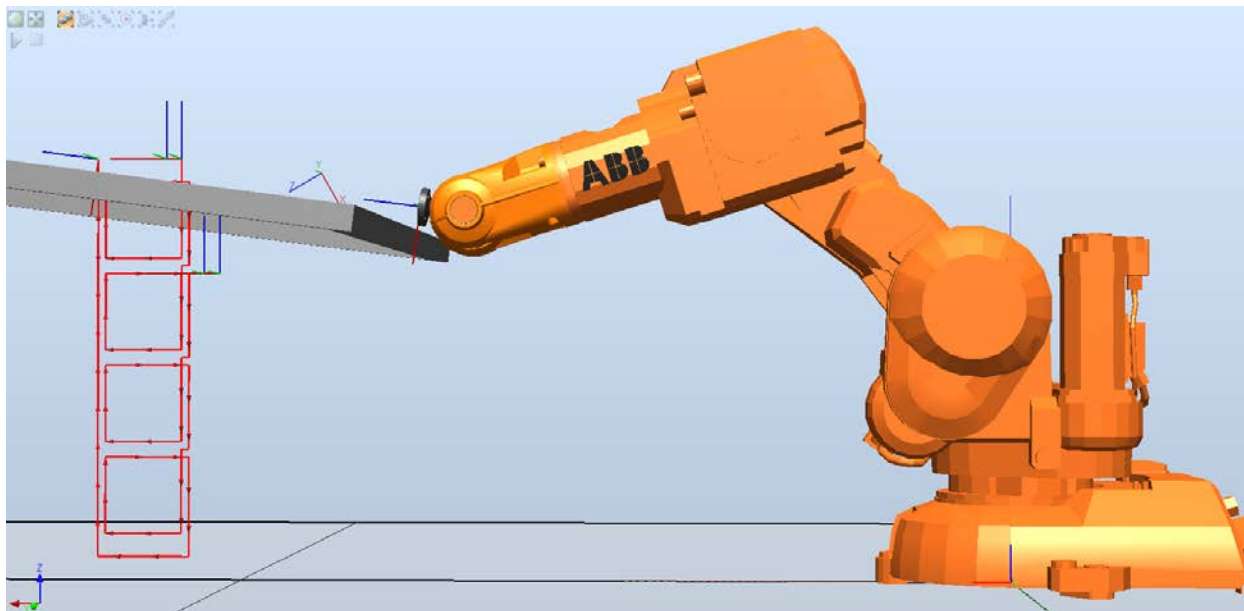
- debljine penastog polistirena d_p
- gustine penastog polistirena ρ_p
- specifični toplotni kapacitet penastog polistirena C_p
- željene temperature topljenja penastog polistirena T_p
- emisivnosti žice ε
- debljine žice d_c
- brzine kretanja žice V
- temperature vazduha T_a
- specifični toplotni kapacitet vazduha C_a
- koeficijenta toplotne provodljivosti vazduha k_a
- gustine vazduha ρ_a
- kinematičke viskoznosti vazduha ν_a

Uticaj svih pomenutih faktora na debljinu reza može se definisati jednačinom (20), koja je izvedena primenom prethodno pomenutih jednačina (5-19) i koja predstavlja originalan doprinos procesu preciznog proračuna debljine reza:

$$\delta = \frac{L_c d_c \left(\frac{I^2 R t}{m_c C_c} + T_{c1} - T_a \right) \left(\frac{0,62 \left(\frac{V d_c}{v_a} \right)^{0,5} \left(\frac{C_a \rho_a v_a}{k_a} \right)^{0,333}}{0,3 + \frac{\left(1 + \left(\frac{0,4 k_a}{C_a \rho_a v_a} \right)^{0,667} \right)^{0,25}}{d_c}} k_a \right)}{(T_p - T_a) C_p \rho_p d_p s} + \varepsilon \frac{d_c}{4} \pi \sigma - d_c \quad (20)$$

gde su δ - debljina reza, L_c - dužina žice, d_c - prečnik žice, I - jačina struje, koja prolazi kroz žicu, R - otpor žice prilikom prolaska struje, t - vreme potrebno za zagrevanje žice, m_c - masa žice, C_c - specifični toplotni kapacitet žice na temperaturi zagrevanja, T_{c1} - početna temperatura žice, pre zarenja, T_a - temperatura vazduha u prostoriji, V - brzina kretanja žice, v_a - kinematička viskoznost vazduha, C_a - specifični toplotni kapacitet vazduha, ρ_a - gustina vazduha, k_a - toplotna provodljivost vazduha, ε - emisivnost žice, σ - Stefan-Boltzmann-ova konstanta, T_p - željena temperatura topljenja polistirena, C_p - specifični toplotni kapacitet polistirena, ρ_p - gustina polistirena, d_p - debljina polistirena, s - pređeni put u sekundi prilikom sečenja. Sve vrednosti, koje se tiču vazduha (sa indeksom a) su određena na temperaturi termalnog sloja pomoću formule $\left(T_f = \frac{T_c + T_a}{2} \right)$.

Za potrebe verifikovanja ovakvog procesa određivanja debljine reza, primenjen je sledeći proces. Na osnovu vrednosti napona, određena je vrednost jačine struje, koja je potrebna da prolazi kroz žicu određenog prečnika kako bi se postigla dovoljna snaga. Vrednosti se dodatno kontrolišu očitavanjem vrednosti na napajanju. Generisan je kod, koji iseca 4 kvadratna segmenta, čije su ivice 10cm (Slika 74). Tokom sečenja, brzina se menja za svaki od kvadratnih segmenata. Nakon toga, vrednosti snage se menjaju i procedura se ponavlja. Na kraju, menja se i vrsta i gustina penastog polistirena. Vrednosti brzine su određene empirijski, osiguravajući u proseku postojanje termalne vrste sečenja.



Slika 74 - prikaz putanje sečenja 4 kvadratna segmenta primenom jednog industrijskog robota

Na taj način, uključeni su svi gore izneti faktori, koji utiču na debljinu reza. Na kraju, svi kvadratni segmenti su izmereni podužno i poprečno na krajevima i na sredinama segmenata, određena je prosečna vrednost dužine i upoređena, koliko odstupa od 10cm.

Vrednosti, koje su korišćene su sledeće:

- materijal iz kog se seče, 5cm debljine, sa željenom temperaturom za topljenje $T_p = 553K$:
 - **XPS 30** - pritiska čvrstoća 300kPa (gustina oko $30 \frac{kg}{m^3}$), sa koeficijentom toplotne provodljivosti $k = 0,035 \frac{W}{mK}$, specifični toplotni kapacitet $C_p = 1500 \frac{J}{kg K}$
 - **EPS A120** - pritiska čvrstoća 120kPa (gustina oko $22 \frac{kg}{m^3}$), sa koeficijentom toplotne provodljivosti $k = 0,036 \frac{W}{mK}$, specifični toplotni kapacitet $C_p = 1450 \frac{J}{kg K}$
 - **EPS AF** - pritiska čvrstoća se kreće 70kPa (gustina oko $14 \frac{kg}{m^3}$), sa koeficijentom toplotne provodljivosti $k = 0,040 \frac{W}{mK}$, specifični toplotni kapacitet $C_p = 1450 \frac{J}{kg K}$
 - **EPS AF PLUS** - slične karakteristike kao i prethodni, ali ima dodatak grafita, omogućavajući mu koeficijent toplotne provodljivost od $k = 0,032 \frac{W}{mK}$, specifična toplotna provodljivost $C_p = 1450 \frac{J}{kg K}$
- materijal koji seče - AB Kanthal D
 - **sastav** - 22% Cr, 4,8% Al, Fe balance
 - **dužina** $L = 0,43m$
 - **prečnik** $d = 0,4mm$
 - **otpor** $R = 10,7 \frac{\Omega}{m}$ (faktor C_t za temperature do 300° je 1,01),
 - **specifična toplotna provodljivost** $C = 460 \frac{J}{kg K}$ na $20 C$, za veće temperature $C = 550 \frac{J}{kg K}$
 - **koeficijent termalnog izduženja** $\alpha_L = 14 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
 - **masa** $m = 9,11 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m}$
 - **emisivnost** $\varepsilon = 0,7$
 - **brzina kretanja žice** od $2 \frac{mm}{s}$, $3 \frac{mm}{s}$, $4 \frac{mm}{s}$ do $5 \frac{mm}{s}$ u jednom prelazu, odnosno od $7 \frac{mm}{s}$, $8 \frac{mm}{s}$, $9 \frac{mm}{s}$ do $10 \frac{mm}{s}$ u drugom prelazu
- vrednosti protoka struje
 - **napon** 16V-13V, dok su jačina struje i snaga struje određeni očitavajući na napajanju, na osnovu otpora žice

U prvom eksperimentalnom testiranju, korišćen je XPS 30 materijal. Uočeno je da pri jako velikim vrednostima brzine i malim vrednostima snage struje, žica ne razvija dovoljnu temperaturu za topljenje. Usled toga, termalno sečenje postaje termo-mehaničko sečenje, što uzrokuje dve stvari. Prva je tekstura odsečenih strana, koja pokazuje znake razvlačenja granula polistirena za razliku od strana odsečenih termalnim načinom (Slika 75 levo i sredina). Drugi uočen problem je pojava zaobljenih ivica na uglovima kvadratnih segmenata usled kasnijeg prolaza središnjeg dela žice u odnosu na krajeve (krivljenje žice) (Slika 75 desno).



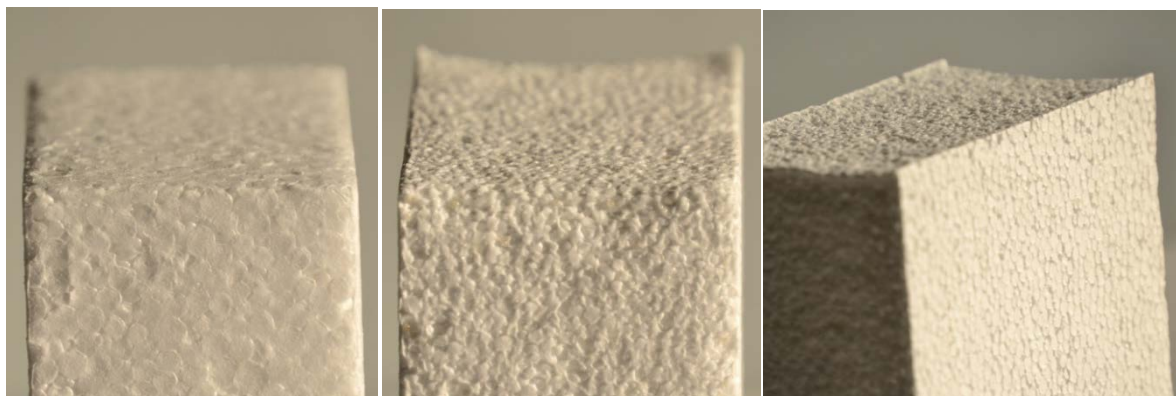
Slika 75 levo - prikaz odsečene strane XPS 30 materijala termalnim sečenjem; sredina - prikaz odsečene strane XPS materijala termo-mehaničkim sečenjem; desno - pojava zaobljenih ivica usled krivljenja žice

Upoređivanjem izračunatih i izmerenih vrednosti (tabela 2), može se uočiti da najmanja odstupanja rezultata debljine reza postoje ako se koristi samo 80 posto vrednosti količine toplote, koja se odaje radijacijom (u jednačini 13).

P [W]	U [V]	v[mm/s] debljina reza	2	3	4	5	7	8	9	10
			54.9	16	Izmerena vrednost [mm]	4.85	3.62	2.7	1.9	1.23
Izračunata vrednost [mm]	4.98	3.28			2.42	1.89	1.29	1.1	0.95	0.83
Razlika [mm]	0.13	0.34			0.28	0.01	0.06	0.13	0.02	0.15
48.2	15	Izmerena vrednost [mm]	4.17	3.12	1.6	1.72	0.92	0.73	0.72	0.9
		Izračunata vrednost [mm]	4.21	2.76	2.02	1.58	1.06	0.89	0.77	0.66
		Razlika [mm]	0.04	0.36	0.42	0.14	0.14	0.16	0.05	0.24
41.9	14	Izmerena vrednost [mm]	3.4	2.18	1.63	1.4	0.68	0.58	0.77	1.32
		Izračunata vrednost [mm]	3.48	2.27	1.65	1.27	0.84	0.7	0.59	0.51
		Razlika [mm]	0.08	0.09	0.02	0.13	0.16	0.12	0.18	0.81
35.9	13	Izmerena vrednost [mm]	2.9	2	0.92	0.85	0.7	0.7	0.7	0.7
		Izračunata vrednost [mm]	2.81	1.81	1.3	0.99	0.64	0.52	0.43	0.36
		Razlika [mm]	0.09	0.19	0.38	0.14	0.06	0.18	0.27	0.34

Tabela 2 - Sečenje XPS 30 materijala, uz prikaz vrednosti snage struje, napona i razlike izmerenih i izračunatih vrednosti debljine reza u zavisnosti od brzine kretanja žice; narandžasta polja pokazuju da usled nedovoljne temperature, žica ne postiže potrebnu kretanju pa dolazi do savijanja žice, nepravilnog sečenja i zaobljenih ivica; vrednost količine toplote prilikom radijacije je uzeta da je 80% od izračunate

U drugom eksperimentalnom testiranju, korišćen je EPS A120 materijal. Primetno je da pri jako malim vrednostima brzine za ovako određene vrednosti snage struje, žica razvija preveliku temperaturu za topljenje. Takva situacija uzrokuje da tekstura odsečenih strana pokazuje znake spaljenih granula polistirena za razliku od ostalih vrednosti (slika 76 levo i sredina). Drugi uočen problem je pojava konkavnih poprečnih preseka na odsečenim stranama, usled veće temperature na središnjem delu žice u odnosu na krajeve (slika 76 desno).



Slika 76 levo - prikaz odsečene strane EPS A120 materijala žicom adekvatne temperature; sredina - prikaz odsečene strane EPS A120 materijala žicom prevelike temperature; desno - pojava konkavnih poprečnih preseka ivica usled veće temperature na sredini žice nego na krajevima

Upoređivanjem izračunatih i izmerenih vrednosti (tabela 3), primećeno je da najmanja odstupanja rezultata debljine reza postoje ako se koristi samo 60 posto vrednosti količine toplote, koja se odaje radijacijom (u jednačini 13).

P [W]	U [V]	v[mm/s] debljina reza	2	3	4	5	7	8	9	10
			53.9	16	Izmerena vrednost [mm]	5.72	2.18	1.82	2.55	1.77
		Izračunata vrednost [mm]	6.3	4.19	3.13	2.48	1.73	1.49	1.3	1.15
		Razlika [mm]	0.58	2.01	1.31	0.07	0.04	0.31	0.07	0.18
47.4	15	Izmerena vrednost [mm]	5.22	2.18	1.9	2.37	1.42	0.78	0.8	1.05
		Izračunata vrednost [mm]	5.38	3.57	2.65	2.1	1.45	1.24	1.08	0.95
		Razlika [mm]	0.16	1.39	0.75	0.27	0.03	0.46	0.28	0.1
41.3	14	Izmerena vrednost [mm]	4.98	2.03	1.82	2.05	1.27	0.6	0.55	0.77
		Izračunata vrednost [mm]	4.62	3.05	2.26	1.78	1.21	1.04	0.9	0.78
		Razlika [mm]	0.36	1.02	0.44	0.27	0.06	0.44	0.35	0.01
35.7	13	Izmerena vrednost [mm]	4.1	1.43	1.32	1.72	0.97	0.62	0.65	0.62
		Izračunata vrednost [mm]	3.87	2.55	1.88	1.46	0.99	0.84	0.72	0.62
		Razlika [mm]	0.23	1.12	0.56	0.26	0.02	0.22	0.07	4E-15

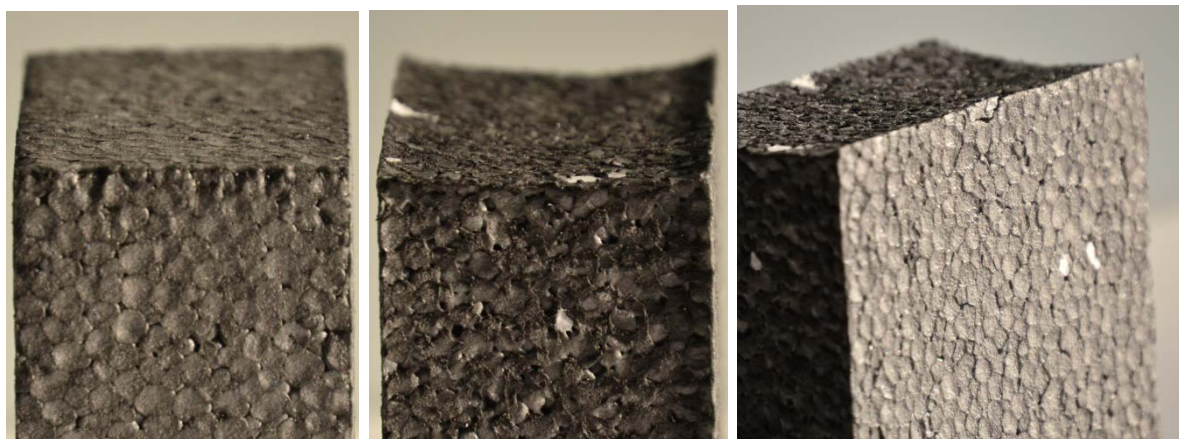
Tabela 3 - Sečenje EPS A120 materijala, uz prikaz vrednosti snage struje, napona i razlike izmerenih i izračunatih vrednosti debljine reza u zavisnosti od brzine kretanja žice; plavom bojom su markirane vrednosti koje pokazuju da je usled previsoke temperature, materijal otopljen tako da su isečene strane konkavnog oblika u preseku i tvrde na dodir od ostatka materijala; vrednost količine toplote prilikom radijacije je uzeta da je 60% od izračunate

U trećem eksperimentalnom testu, korišćen je EPS AF materijal. Materijal se ponaša slično kao i EPS A120 i pokazuje slične probleme usled žice prevelike temperature pri niskim vrednostima brzine. Upoređivanjem izračunatih i izmerenih vrednosti (tabela 4), primećeno je da najmanja odstupanja rezultata debljine reza postoje ako se koristi samo 60 posto vrednosti količine toplote, koja se odaje radijacijom.

P [W]	U [V]	v[mm/s]	debljina reza							
			2	3	4	5	7	8	9	10
53.8	16	Izmerena vrednost [mm]	9.23	4.6	3.9	4.53	3	2.93	2.2	1.88
		Izračunata vrednost [mm]	10.11	6.81	5.13	4.12	2.94	2.56	2.27	2.03
		Razlika [mm]	0.88	2.21	1.23	0.41	0.06	0.37	0.07	0.15
47.5	15	Izmerena vrednost [mm]	8.05	3.68	2.77	3.58	2.83	1.22	1.23	1.78
		Izračunata vrednost [mm]	8.78	5.91	4.45	3.56	2.53	2.21	1.95	1.75
		Razlika [mm]	0.73	2.23	1.68	0.02	0.3	0.99	0.72	0.03
41.4	14	Izmerena vrednost [mm]	7.2	3.23	2.47	3.15	2.43	1.15	0.88	1.37
		Izračunata vrednost [mm]	7.52	5.05	3.8	3.03	2.15	1.87	1.65	1.47
		Razlika [mm]	0.32	1.82	1.33	0.12	0.28	0.72	0.77	0.1
35.8	13	Izmerena vrednost [mm]	6.45	3.37	2.63	2.67	1.97	1.22	0.95	0.48
		Izračunata vrednost [mm]	6.35	4.26	3.19	2.55	1.79	1.55	1.36	1.21
		Razlika [mm]	0.1	0.89	0.56	0.12	0.18	0.33	0.41	0.73

Tabela 4 - Sečenje EPS AF materijala, uz prikaz vrednosti snage struje, napona i razlike izmerenih i izračunatih vrednosti debljine reza u zavisnosti od brzine kretanja žice; svetlo-plava polja pokazuju da je usled previsoke temperature, materijal otopljen tako da su isečene strane konkavnog oblika u preseku i tvrde na dodir od ostatka materijala; vrednost količine toplote prilikom radijacije je uzeta da je 60% od izračunate

U četvrtom testu, korišćen je EPS AF PLUS materijal (materijal identične gustine i specifičnog toplotnog kapaciteta kao EPS AF materijal, ali zbog dodatka grafita, materijal je siv, ima slabija mehanička svojstva i bolje zadržava toplotu). Ponaša se isto kao EPS AF materijal pri niskim temperaturama žice. Zbog boljeg zadržavanja toplote, javljaju se jače spaljeni delovi granula polistirena u odnosu na sečenje adekvatnom temperaturom (slika 77 levo i sredina). Dodatno, luk konkavnog preseka je veći (slika 77 desno).



Slika 77 levo - prikaz odsečene strane EPS AF PLUS materijala žicom adekvatne temperature; sredina - prikaz odsečene strane EPS AF PLUS materijala žicom prevelike temperature; desno - pojava konkavnih poprečnih preka ivica usled veće temperature na sredini žice nego na krajevima

Upoređivanjem izračunatih i izmerenih vrednosti (tabela 5), primećeno je da najmanja odstupanja rezultata debljine reza postoje ako se koristi svih sto posto vrednosti količine toplote, koja se odaje radijacijom (u jednačini 13). Ovakav rezultat ide u prilog činjenici da ovaj materijal bolje zadržava toplotu.

P [W]	U [V]	v[mm/s]	debljina reza							
			2	3	4	5	7	8	9	10
53.8	16	Izmerena vrednost [mm]	9.35	7.3	5.93	4.75	3.47	3.27	2.88	1.98
		Izračunata vrednost [mm]	11.83	7.95	5.99	4.8	3.43	2.99	2.65	2.38
		Razlika [mm]	2.48	0.65	0.06	0.05	0.04	0.28	0.23	0.4
47.5	15	Izmerena vrednost [mm]	8.56	6.57	5.23	4.17	3.13	2.73	2.53	1.9
		Izračunata vrednost [mm]	10.09	6.78	5.1	4.08	2.91	2.53	2.24	2.01
		Razlika [mm]	1.53	0.21	0.13	0.09	0.22	0.2	0.29	0.11
41.4	14	Izmerena vrednost [mm]	7.77	5.85	4.53	3.6	2.5	2.1	1.8	1.62
		Izračunata vrednost [mm]	8.45	5.67	4.26	3.41	2.41	2.1	1.85	1.65
		Razlika [mm]	0.68	0.18	0.27	0.19	0.09	0	0.05	0.03
35.8	13	Izmerena vrednost [mm]	6.77	5.32	3.9	3.32	2.1	1.58	1.53	1.25
		Izračunata vrednost [mm]	7	4.69	3.52	2.8	1.98	1.71	1.51	1.34
		Razlika [mm]	0.23	0.63	0.38	0.52	0.12	0.13	0.02	0.09

Tabela 5 - Sečenje EPS AF PLUS materijala, uz prikaz vrednosti snage struje, napona i razlike izmerenih i izračunatih vrednosti debljine reza u zavisnosti od brzine kretanja žice; svetlo-plava polja pokazuju da je usled velike temperature, materijal otopljen tako da su isečene strane konkavnog oblika u preseku i tvrde na dodir od ostatka materijala; tamno-plava polja pokazuju da je usled previsoke temperature, materijal otopljen tako da su isečene strane tvrde na dodir od ostatka materijala; vrednost količine toplote prilikom radijacije je uzeta da je 100% od izračunate

Na osnovu rezultata prikazanih u tabelama 2, 3, 4 i 5, može se primetiti da su razlike izmerenih i izračunatih vrednosti minimalne. Najveća greška je 0,99mm za slučaj sečenja EPS AF materijala, dok je prosečna greška oko 0,2mm. Pritom se izuzimaju vrednosti, gde je postojala prevelika ili nedovoljna temperature prilikom procesa sečenja (plava i narandžasto obojena polja u tabelama). Time se ujedno postavljaju uslovi pod kojim je moguće koristiti dati proračun i ceo proces sečenja tako da su gotovi elementi upotrebljivi. Ograničavajući domen vrednosti debljine reza je od 0,8mm do 3mm u proseku. To znači da ako se nakon proračuna dobiju vrednosti, koje su van ovog domena, potrebno je modifikovati ulazne podatke (povećati brzinu, smanjiti napon ili obrnuto). Sa ovako određenom vrednošću debljine reza, moguće je kalibrisati i pomeriti targete, koji se koriste u procesu fabrikacije, kako bi gotovi modeli bili precizno isečeni.

4. Zaključak i buduća istraživanja

U ovoj disertaciji istraženi je novi pristup integrisanom procesu fabrikacije složenih formi od penastog polistirena primenom industrijskih robota. Za razliku od drugih istraživanja iz oblasti integrisane fabrikacije, u ovom radu je definisana, istražena i opisana korelacija između procesa projektovanja, fabrikacije i svojstava materijala za generisanje složenih formi od penastog polistirena. Inovativnost pristupa potvrđena je kroz tri eksperimentalna rada u cilju rešavanja različitih projektantskih scenarija, a kao rezultat su fabrikovani modeli složenih formi od penastih polistirena. Nov pristup fabrikaciji čini integrisanje više oblasti, uključujući projektovanje, fabrikaciju i svojstva materijala i karakterišu ga:

- primena algoritamskog načina projektovanja i fabrikacije, što omogućava uvođenje parametara kao projektantskih kriterijuma
- povezanost procesa projektovanja i fabrikacije u smislu evaluacije parametara u ranim fazama projektovanja
- novorazvijeni pristupi za proces podele složenih formi na osnovu svojstava materijala i uslova robotske fabrikacije
- jedinstveni način dobijanja targeta za putanju alata industrijskih robota, koji vrše proces sečenja

Na taj način, veliki broj različitih oblika složenih arhitektonskih formi može biti pripremljen za proces fabrikacije.

Problem koji je postavljen u prvom projektantskom scenariju je odabir adekvatnog oblika, veličine i broja elemenata složene forme u cilju minimalnog utroška materijala i efikasnog uklapanja. Zaključeno je da se podelom na kutijaste elemente dobija duplo manja količina otpadnog materijala u odnosu na podelu dobijenu primenom elemenata nalik na slagalicu. Dodatno, primenom podele na kutijaste elemente uniformnog oblika (podela nezavisno od zakrivljenosti površi), dobija se ušteda od još osam posto u odnosu na potrebnu količinu materijala, ali uz duplo povećanje broja elemenata. Za minimalni utrošak materijala, bez obzira na broj elemenata, bolje je koristiti podelu na kutijaste elemente uniformnog oblika. Međutim, ako je potrebno obratiti pažnju na što manji broj elemenata (manje vremena potrebno za fabrikaciju i spajanje), kao i minimalni utrošak materijala, onda je bolji odabir kutijastih elemenata neuniformnog oblika (čija veličina zavisi od zakrivljenosti složene forme). Za spajanje kutijastih elemenata u složenu formu potrebna je određena vrsta ahezivnih sredstava za razliku od elemenata nalik na slagalicu, što utiče na povećanje količine vremena prilikom spajanja. Takođe, jednom spojeni kutijasti elementi ne mogu da se uklone iz forme, dok druga vrsta oblika elementa to dozvoljava. Za efikasno uklapanje i mogućnost rasklapanja složene forme, bolje je koristiti elemente nalik na slagalicu. Na kraju, ako je potrebno podjednako obratiti pažnju na oba projektantska kriterijuma, bolje je složenu formu podeliti na elemente nalik na slagalicu, usled optimalnog odnosa broja i veličine elemenata kao i mogućnosti efikasnog uklapanja.

Problem koji je postavljen u drugom projektantskom scenariju je problem fabrikovanja elemenata većih od radnog prostora jednog robota. Za tu svrhu, primenjen je koordinisan rad dva industrijska robota. Ravanski elementi su lakši za fabrikovanje, jer je većina materijala iz kojih se isecaju elementi u obliku ploča, odnosno blokova. Zaključeno je da je maksimalna veličina elemenata više ograničena dimenzijama bloka koji se primenjuju u savremenoj praksi, a manje ograničena veličinom radnog prostora industrijskih robota. Manji uticaj veličine radnog prostora na veličinu elementa je usled mogućnosti postavke pozicija robota jednog u odnosu na drugog. Predložena postavka dva

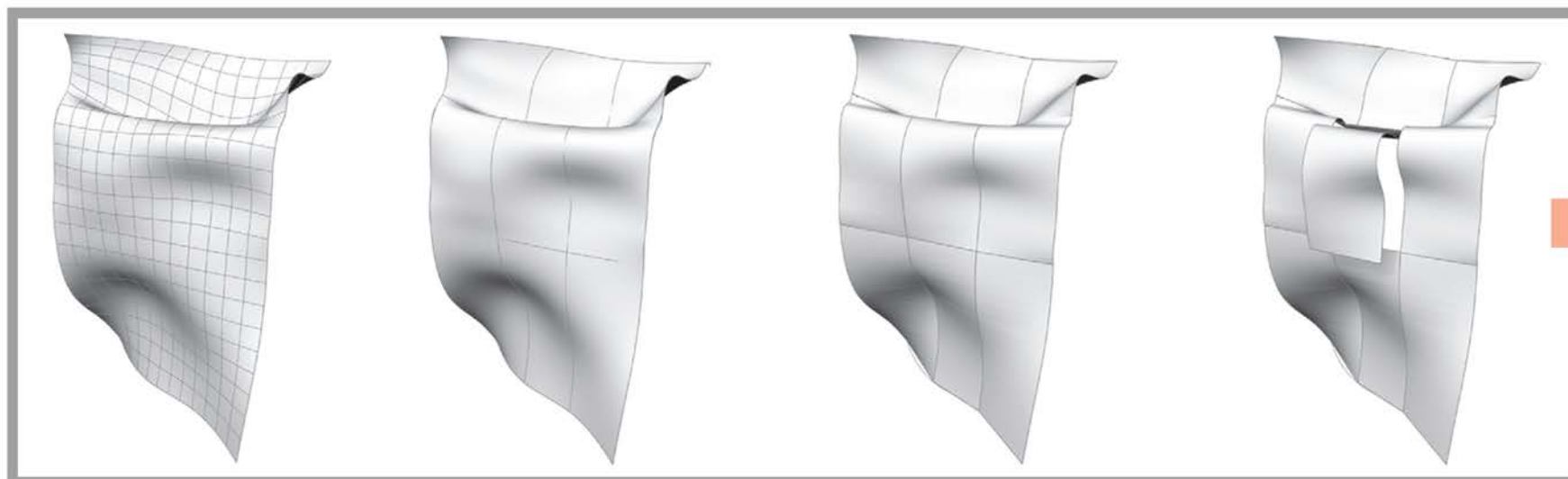
robota (gde jedan robot okreće element, dok drugi seče) je određena tako da rastojanje jednog robota od drugog omogućava dovoljno prostora za manipulaciju blokom materijala iz kog se element iseca. Veličina alata sa zagrejanom žicom treba da bude dovoljna da može da obuhvati celu visinu bloka iz kog se isecaju dodirne strane elemenata. U ovom pristupu je izuzetno bitan integrisani pristup fabrikaciji, jer od svojstava materijala zavisi i broj i veličina elemenata, dok se adekvatnim odabirom parametara za procesu projektovanja i fabrikacije omogućava izvodljivost takve složene forme.

U trećem projektantskom scenariju je postavljen problem kvaliteta završne obrade površina elemenata odnosno neprekidnosti elemenata složene forme. Uzimajući da opšte površi ne moraju da budu pravoizvodne, dat je predlog aproksimacije opštih površi skupom ravanskih krivih i njihove fabrikacije sečenjem žicom promenljivog oblika. Kako bi se to postiglo, krajevi elastične žice su fiksirani na alate dva robota, gde nagib alata u odnosu na žicu doprinosi postizanju odgovarajućeg izgleda žice. Zaključeno je da na ovaj način mogu da se generišu samo Bezijeove krive (određene dvema krajnjim tačkama i tangentama u tim tačkama) odnosno krive sa maksimalno jednom prevojnou tačkom. Primenom algoritamskog načina projektovanja, uvođenjem gore pomenutih činjenica kao parametara, moguće je podeliti bilo koju formu efikasnije nego primenom manuelnog načina. Isecanjem i ograničavajućeg kvadra u prvoj putanji sečenja doprinosi se preciznijoj postavi i fabrikaciji bloka za drugu putanju sečenja. Promena oblika žice tokom procesa sečenja omogućava ogroman potencijal za projektovanje složenih formi od segmenata opštih površi prilikom fabrikacije objekata od penastog polistirena sa glatkim neprekidnim površima.

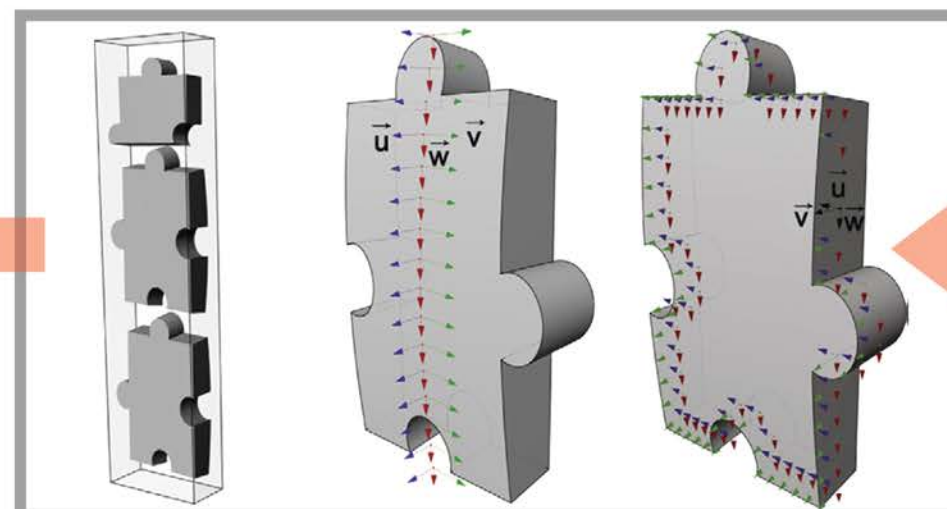
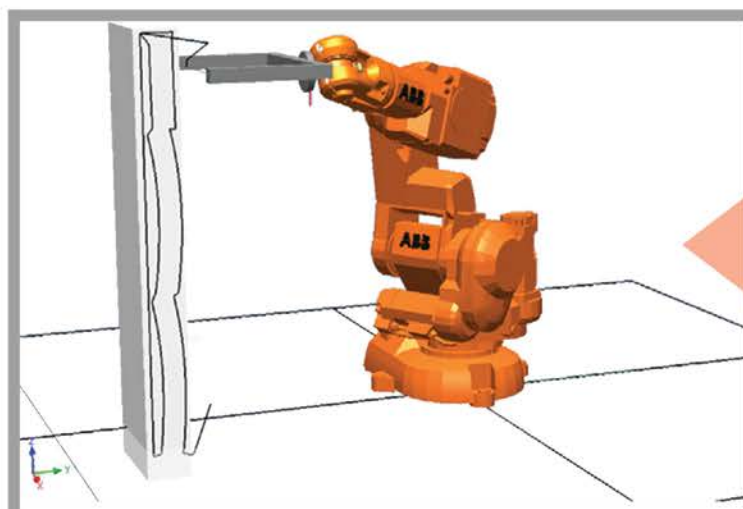
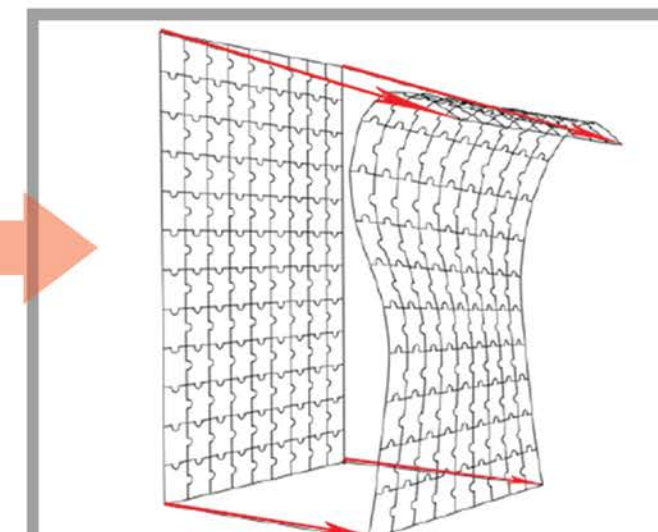
Primena i prednost različitih načina fabrikacije rezimirani su za prvi, drugi i treći projektantski scenario na slikama 78, 79 i 80, respektivno.

Dodatno, u istraživanju je pokazano da postoji veza između debljine reza i drugih parametara bitnih za sečenje zagrejanom žicom kao što su svojstva materijala penastog polistirena (gustina, toplotna provodljivost, debljina, primese drugih materijala) žice kojom se seče (brzina, prečnik, sastav, provodljivost) kao i vazduha u prostoriji (kinematička viskoznost, temperatura, gustina). Zaključeno je da se rezultati debljine reza dobijeni računanjem i merenjem razlikuju u proseku za 0,2mm. Pritom je potrebno koristiti samo određen procenat količine toplote koja se odaje radijacijom, što u velikoj meri zavisi od primesa materijala koje polistiren ima, kao i od njegove gustine. Precizno određivanje debljine reza je naročito važno, pogotovo za projekte u kojima postoji veliki broj elemenata koji trebaju međusobno da se uklapaju, kao što je prikazano u scenariju 1 i 2.

Buduća istraživanja su usmerena prvobitno ka poboljšanju automatizacije integrisanog pristupa fabrikaciji kroz primenu željenih i prethodno definisanih načina podele složenih formi kao jedinstvenih parametara (broj, veličina, oblik, debljina elemenata), odabir parametara dostupnih robota za fabrikaciju (dostupnost targeta sečenja, izbegavanje sudara robota prilikom fabrikacije) kao i definisanja potrebnih promena putanje u zavisnosti od proračunate debljine reza. Takođe, buduća istraživanja su usmerena ka optimizovanju načina uklapanja nestandardnih oblika elemenata složene forme od penastih polistirena izvan onih okvira istraženih na elementima nalik na slagalicu. Na kraju, planirano je i istraživanje mogućnosti sečenja sa različitim profilima žice, u cilju generisanja interesantnih elemenata složenih formi, ali uz upotrebu samo jednog industrijskog robota, time olakšavajući proces fabrikacije.



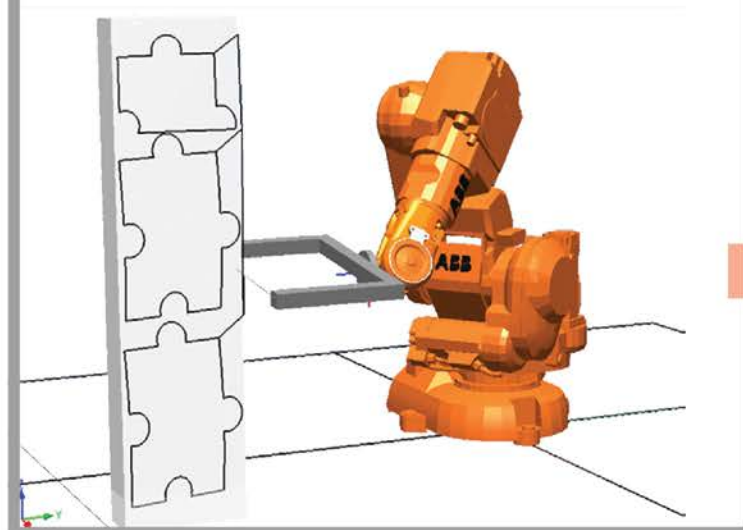
Generisanje složene forme diskretizacijom na proste matematičke, geometrijske entitete - pravoizvodne površi



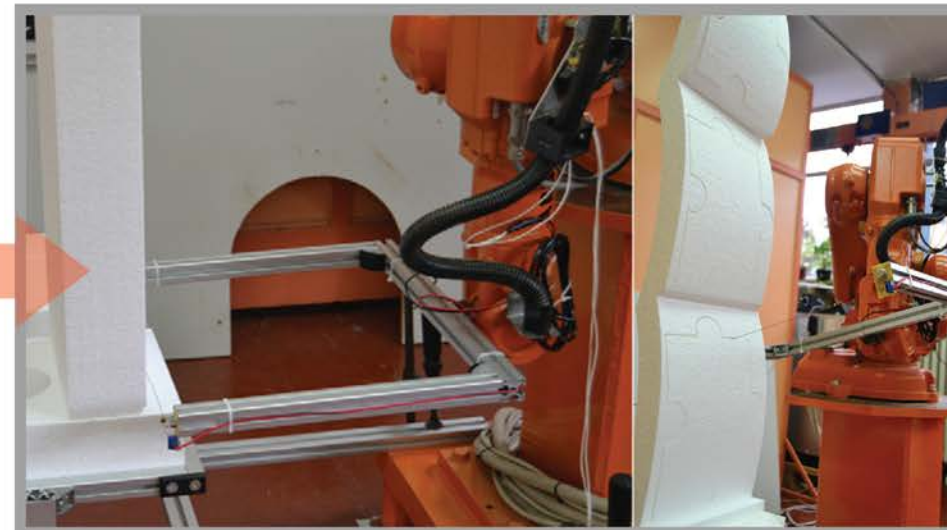
Pakovanje elemenata sličnih puzlama u jedan blok polistirena



Podela površi na elemente slične puzlama



Simulacija sečenja industrijskim robotoma

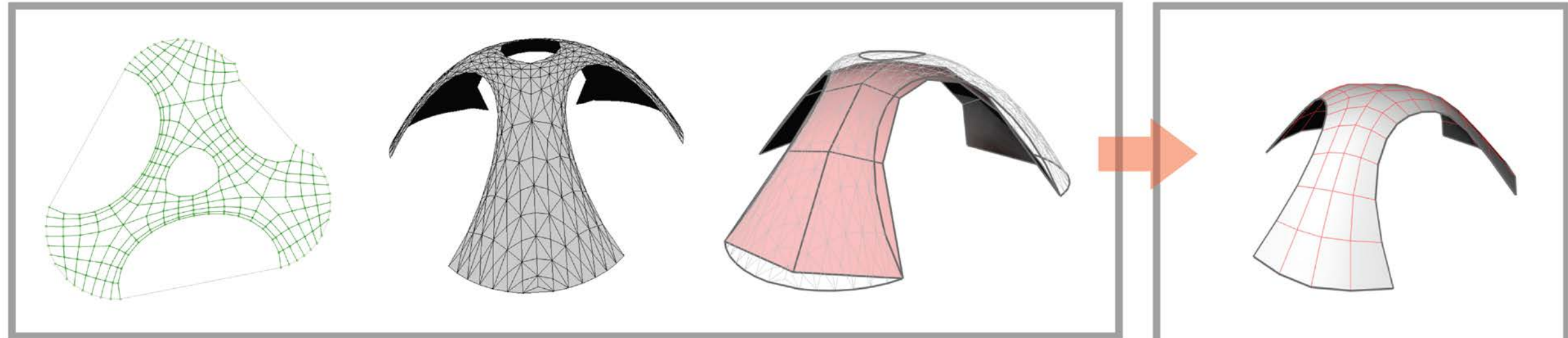


Realizacija procesa sečenja industrijskim robotom

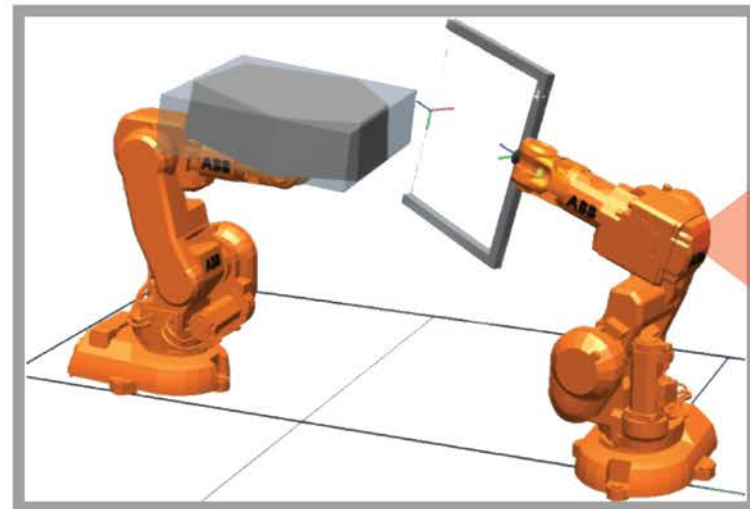


Završeni prototip

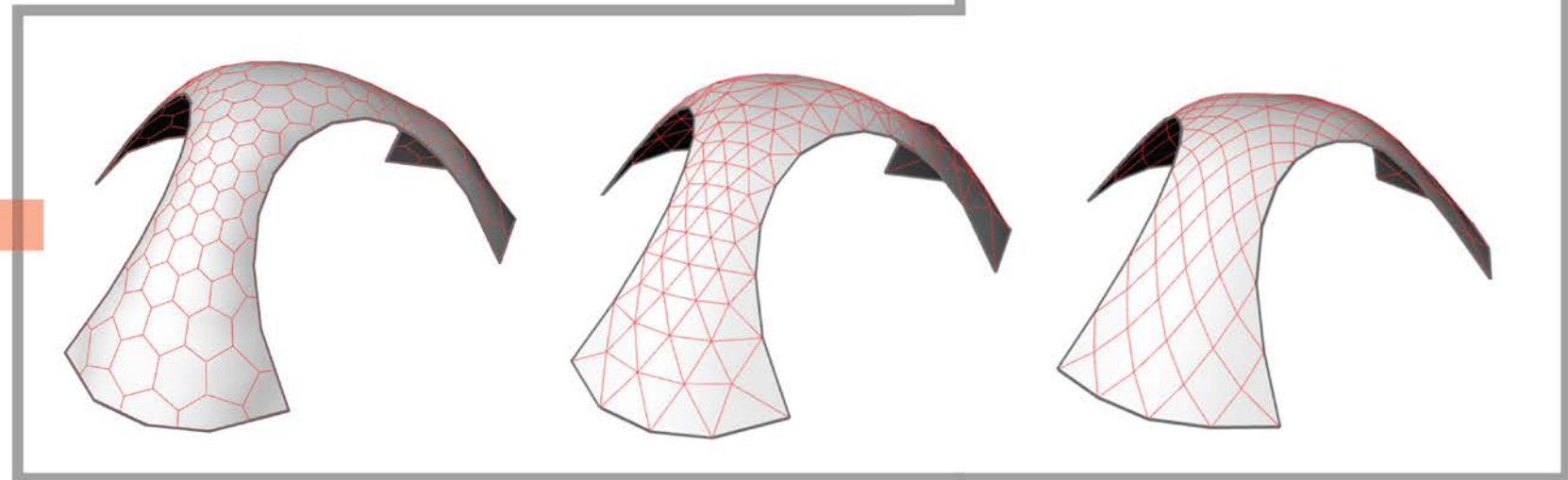
Slika 78 - Rezimiran pregled za prvi projektantski scenario



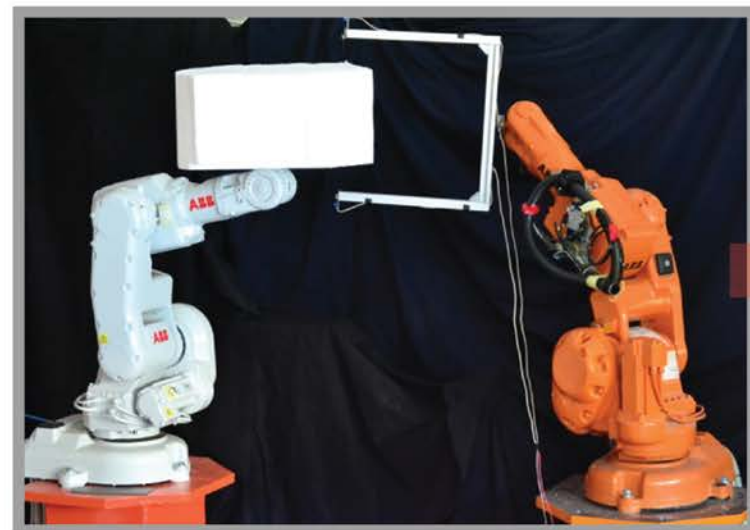
Generisanje složene forme pomoću form-finding metode, primenom EvoluteTools alatke



Simulacija sečenja industrijskim robotoma



Podela forme - od kvadratnih segmenata preko romboidnih segmenata, trougaonih do šestougaonih segmenata



Realizacija procesa sečenja industrijskim robotom

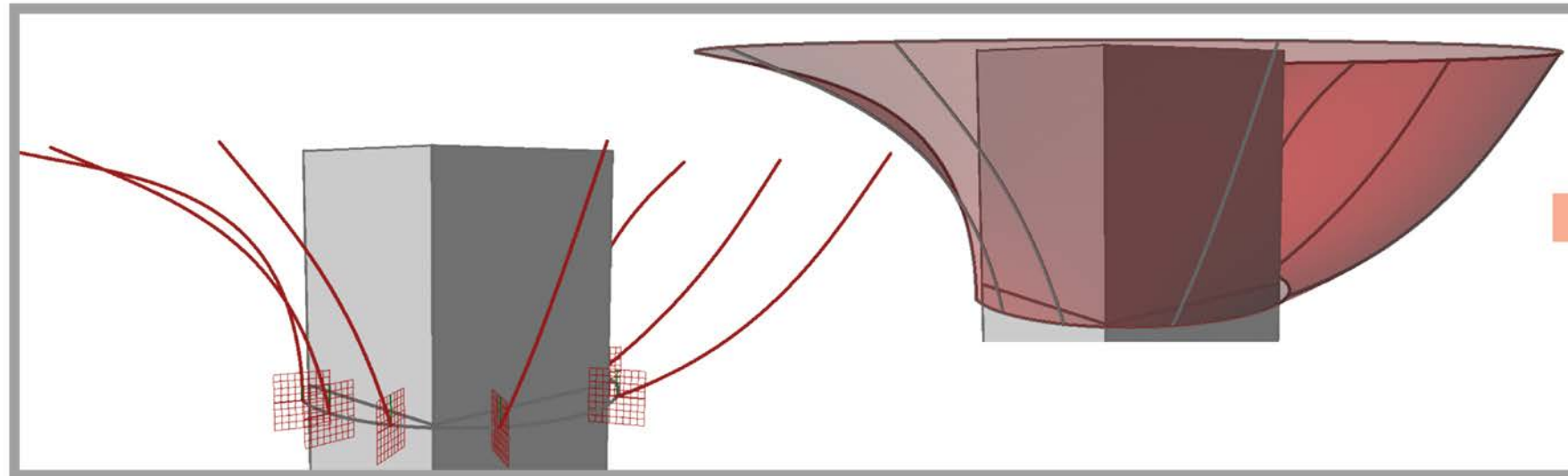


Proces pripreme delova i elemenata i proces sklapanja forme

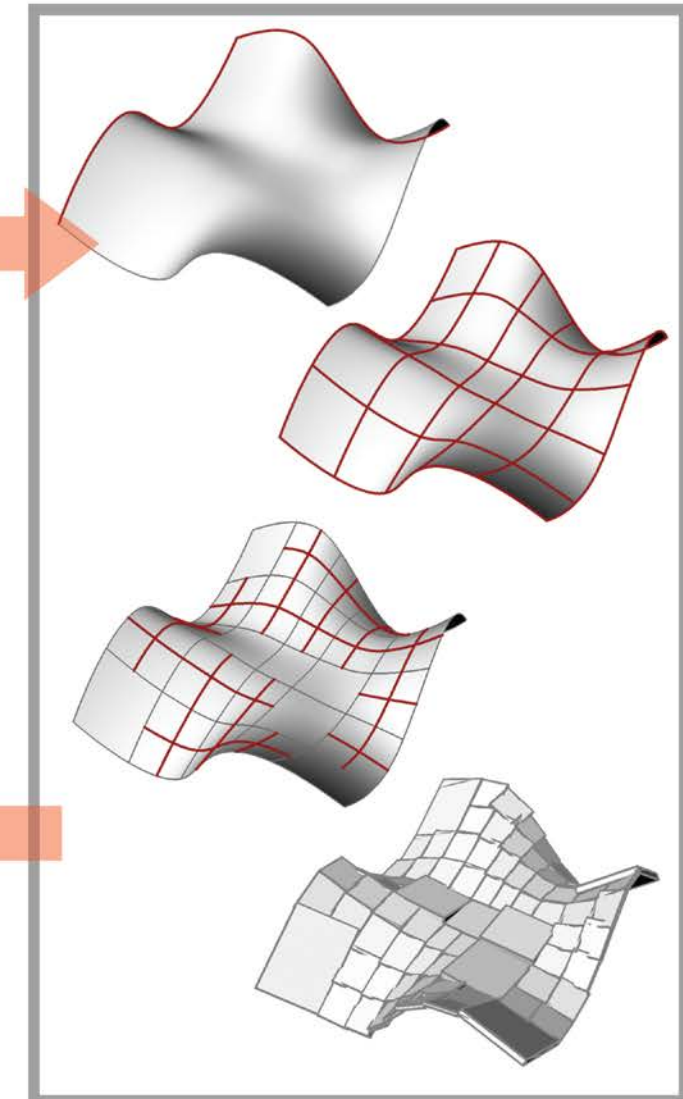


Završeni prototip

Slika 79 - Rezimiran pregled za drugi projektantski scenario



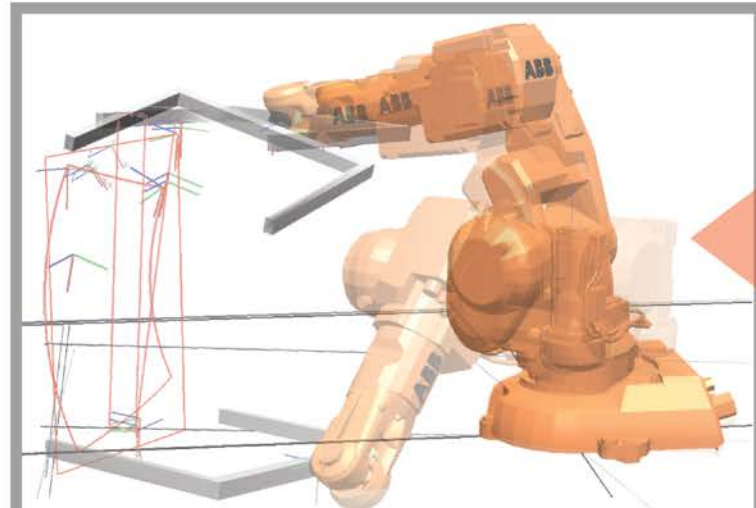
Princip generisanje složene forme kao slobodne forme primenom dva skupa ravanskih krivih, koje se međusobno seku



Princip podela slobodne forme na manje elemente



Finalna podela slobodne forme sa ograničavajućim kvadririma



Simulacija sečenja industrijskim robotoma



Realizacija procesa sečenja industrijskim robotom



Završeni prototip

Slika 80 - Rezimiran pregled za treći projektantski scenario

5. Spisak ilustracija

Slika 1 - TWA Terminal, <https://www.cntraveler.com/stories/2016-08-03/twa-terminal-hotel-construction-begins-at-jfk> u septembru 2017

Slika 2 - Fox Block Products, preuzeto sa <http://www.foxblocks.com/products/fox-blocks/radius-block/> februara 2017; Prekaston, preuzeto sa <http://prekaston.com/ozelurunler.html> oktobra 2017

Slika 3 - MoMA, San Francisco, slika levo preuzeta sa <http://www.archdaily.com/786762/sfmoma-expansion-snohetta> slikda desno preuzea sa <https://www.architecturaldigest.com/story/san-francisco-museum-of-modern-art-snohetta> februara 2017

Slika 4 - Spenser Dock Bridge, <http://www.archdaily.com/96400/spencer-dock-bridge-amanda-levete-architects> februar 2017

Slika 5 - Ghost House, preuzeto sa <http://www.house-crazy.com/ghost-house-for-guests/> februara 2017; Dome House International projekat preuzeto sa <http://www.usadomes.com/> februara 2017

Slika 6 - Delovi slike preuzeti iz Eigentsatz, 2010

Slika 7 - Preuzeto Rippmann & Block, 2011b; Preuzeto Flory & Pottmann, 2010

Slika 8 - delovi slike preuzeti iz Ahn et al, 2003

Slika 9 - Preuzeto Broks & Aitchison, 2011

Slika 10 - Preuzeto Broek et al, 2002

Slika 11 - Robowall, projekat Digital Design Center istraživačke grupe; desno Robotic Fabrication of Non standard Brick Wall, istraživačkog tima Gramazio&Kohler

Slika 12 - Preuzeto Jung et al, 2016

Slika 13 - Yuan et al, 2014; Agid i Morin iz 2012; Preuzeto Jovanović et al, 2017; Preuzeto McGee & Feringa, 2013

Slika 14 - Preuzeto Brander et al, 2016b; Preuzeto Rust et al, 2016a

Slika 15 - 41 - Autorska slika

Slika 42 - 45 - Vesna Stojaković

Slika 46 - Marko Vučić

Slika 47 - 76 - Autorska slika

6. Reference

1. Agid, Felix, and Christian Morin. "Automated Foamdome #2(Synthetic 2012)". http://thibaultschwartz.com/?g1_work=automated-foamdome-2synthetic-2012 Accessed 7 Feb. 2017.
2. Ahn, D.G., Lee, S.H. and Yang, D.Y., 2002. Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(4), pp.427-439.
3. Ahn, D.G., Lee, S.H. and Yang, D.Y., 2003. A study on the influence of the sloped cutting angle on kerfwidth and part quality in the hotwire cutting of EPS foam for the VLM-s rapid prototyping process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(14), pp.1447-1464.
4. Aitchison, D.R., Brooks, H.L., Bain, J.D. and Pons, D., 2011. Rapid manufacturing facilitation through optimal machining prediction of polystyrene foam: The findings reported in this paper provide a model for consistently achieving optimal cutting conditions when shaping foam plastic, such as polystyrene, with an electrically heated wire-based cutting tool. *Virtual and Physical Prototyping*, 6(1), pp.41-46.
5. Bain, J.D., 2011. Thermomechanical Hot Tool Cutting and Surface Quality in Robotic Foam Sculpting.
6. Bejan, A., 2013. Convection heat transfer. John wiley & sons.
7. Bejan, A. and Kraus, A.D., 2003. Heat transfer handbook (Vol. 1). John Wiley & Sons.
8. Bottazzi, V.S. and Fonseca, J.C., 2006. Off-line programming industrial robots based in the information extracted from neutral files generated by the commercial CAD tools. Pro Literatur Verlag.
9. Brander, D., BÆRENTZEN, A., Evgrafov, A., Gravesen, J., Markvorsen, S., Nørbjerg, T.B., Nørtoft, P. and STEENSTRUP, K., 2016. Hot Blade Cuttings for the Building Industries. In *Proceedings of the Komso Challenge Workshop: Math for the Digital Factory (2014)*. Springer.
10. Brander, D., Gravesen, J. and Nørbjerg, T.B., 2016. Approximation by planar elastic curves. *Advances in Computational Mathematics*, pp.1-19.
11. Brander, D., Bærentzen, J.A., Clausen, K., Fisker, A.S., Gravesen, J., Lund, M.N., Nørbjerg, T.B., Steenstrup, K.H. and Søndergaard, A., 2016. Designing for hot-blade cutting. *Advances in Architectural Geometry 2016*.
12. Brell-Cokcan, S. and Braumann, J., 2010, January. A new parametric design tool for robot milling. In *Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture* (pp. 357-363).
13. Broek, J. J., Horvath, I., de Smit, B., Lennings, A. F., Rusak, Z., and Vergeest, J. S. M. Free-form thick layer object manufacturing technology for large-sized physical models. *Autom. Constr.*, 2002, 11, 335–347.
14. Broek, J., Horvath, I., and de Smit, B. Exploration of influential parameters for speed control of the flexible blade cutting process. In *Proceedings of TMCE, Wuhan, China, 2002*
15. Broek, J.J., Horváth, I., de Smit, B., Lennings, A.F., Rusák, Z. and Vergeest, J.S., 2002. Free-form thick layer object manufacturing technology for large-sized physical models. *Automation in Construction*, 11(3), pp.335-347.

16. Brooks, H. and Aitchison, D., 2010. A review of state-of-the-art large-sized foam cutting rapid prototyping and manufacturing technologies. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5), pp.318-327.
17. Brooks, H.L. and Aitchison, D.R., 2010. Force feedback temperature control for hot-tool plastic foam cutting. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(5), pp.709-719.
18. Brooks, H.L. and Aitchison, D., 2011. Using the Finite Element Method to Determine the Temperature Distributions in Hot-wire Cutting.
19. Bruckstein, A.M., Holt, R.J. and Netravali, A.N., 1996, November. Discrete elastica. In *International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery* (pp. 59-72). Springer Berlin Heidelberg.
20. Budig, M., Lim, J. and Petrovic, R., 2014. Integrating Robotic Fabrication in the Design Process. *Architectural Design*, 84(3), pp.22-43.
21. Chu, C.H. and Chen, J.T., 2006. Tool path planning for five-axis flank milling with developable surface approximation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(7-8), pp.707-713.
22. Cortsen, J., Rytz, J.A., Ellekilde, L.P., Sølvason, D. and Petersen, H.G., 2014. Automated Fabrication of double curved reinforcement structures for unique concrete buildings. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(10), pp.1387-1397.
23. De Smit, B., Broek, J., and Horvath, I. Experimental investigation of factors influential for the flexible blade based prototyping process. In *Proceedings of the 1999 ASME Technical Conference on Design engineering Las Vegas, Nevada, 1999* (ASME).
24. De Smit, B., Broek, J., Horvath, I., and Lennings, L. Implementation of the freeform thick layered object manufacturing technology (FF-TLOM), a status review. In *Proceedings of the Ninth European Conference on Rapid prototyping and manufacturing, 2000*, pp. 311–321.
25. Eigensatz, M., Deuss, M., Schiftner, A., Kilian, M., Mitra, N.J., Pottmann, H. and Pauly, M., 2010. Case studies in cost-optimized paneling of architectural freeform surfaces. *Advances in Architectural Geometry 2010*, pp.49-72.
26. Eigensatz, M., Kilian, M., Schiftner, A., Mitra, N.J., Pottmann, H. and Pauly, M., 2010. Paneling architectural freeform surfaces. *ACM transactions on graphics (TOG)*, 29(4), p.45.
27. Farin, G., 2002. A history of curves and surfaces. *Handbook of Computer Aided Geometric Design*, 1.
28. Flöry, S. and Pottmann, H., 2010. Ruled surfaces for rationalization and design in architecture. *LIFE in: formation. On responsive information and variations in architecture*, pp.103-109.
29. Formtexx, Freeform Facades with Automotive Precision, <http://formtexx.com/> Accessed 8 Feb. 2017
30. Gallina, P. Delayed reference control for hotwire cutting of expandable polystyrene foam *Trans. ASME, J. Mfg, Sci Engng*, 2006, 128, 360–365.
31. Gallina, P., Mosca, R., and Pascutto, P. Optimized hotwire cutting robotic system for expandable polystyrene foam. In *Proceedings of the Seventh International Conference on Advanced manufacturing systems and technology, Udine, Italy, 2005*, pp. 377–386
32. GramazioKohlerResearch, TailorCrete, <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html> Accessed 8 Feb. 2017
33. Horváth, I., Kovács, Z., Vergeest, J.S., Broek, J.J. and de Smit, A., 1998. Free-form cutting of plastic foams: a new functionality for thick-layered fabrication of prototypes. *Proceedings of the TCT*, 98, pp.229-237.
34. Howell, J.R., Menguc, M.P. and Siegel, R., 2010. *Thermal radiation heat transfer*. CRC press

35. Jovanović, M., Stojaković, V., Tepavčević, B., Mitov, D., Bajšanski, I., Generating an Anamorphic Image on a Curved Surface Utilizing Robotic Fabrication Process, eCAADe 2016 August 22 - 26, Complexity and Simplicity, Oulu School of Architecture, Oulu 2016, Finland, ISBN 978-94-91207-10-5
36. Jovanović, M., Raković, M., Tepavčević, B., Borovac, B. and Nikolić, M., 2017. Robotic fabrication of freeform foam structures with quadrilateral and puzzle shaped panels. *Automation in Construction*, 74, pp.28-38.
37. Jovanović, M., Tasevski, J., Tepavčević, B., Raković, M., Mitov, D. and Borovac, B., 2016, June. Fabrication of Digital Anamorphic Sculptures with Industrial Robot. In *International Conference on Robotics in Alpe-Adria Danube Region* (pp. 568-575). Springer International Publishing.
38. Jung, A., Reinhardt, D. and Watt, R., 2016. RBDM_Robodome: Complex Curved Geometries with Robotically Fabricated Joints. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 178-189). Springer International Publishing.
39. Kanthal, Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces, Sandvik Heating Technology
40. Keating, S. and Oxman, N., 2013. Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(6), pp.439-448.
41. Kilian, A., 2003, October. Fabrication of partially double-curved surfaces out of flat sheet material through a 3D puzzle approach. In *ACADIA* (Vol. 3).
42. King, N., Bechthold, M., Kane, A. and Michalatos, P., 2014. Robotic tile placement: Tools, techniques and feasibility. *Automation in Construction*, 39, pp.161-166.
43. Kotnik, T., 2010. Digital architectural design as exploration of computable functions. *International journal of architectural computing*, 8(1), pp.1-16.
44. Levien, R.L., 2009. From spiral to spline: Optimal techniques in interactive curve design.
45. Li, X., Shin, D., Park, J. and Ahn, H., 2016. Robotics-Based Prefabrication in Architecture. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 274-283). Springer International Publishing.
46. Lienhard H. J. IV, Lienhard H. J. V, *A Heat Transfer Textbook*, Third Edition, 2002, Phlogiston Press, Cambridge Massachusetts
47. Lloret, E., Shahab, A.R., Linus, M., Flatt, R.J., Gramazio, F., Kohler, M. and Langenberg, S., 2015. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*, 60, pp.40-49.
48. Lloret, E., Shahab, A.R., Linus, M., Flatt, R.J., Gramazio, F., Kohler, M. and Langenberg, S., 2015. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*, 60, pp.40-49.
49. Mangelsdorf, W., 2010, Structuring Strategies for Complex Geometries in New structuralism: design, engineering and architectural technologies. *Architectural Design*, 80(4), edited by Oxman R. and Oxman R. pp.41
50. McGee, W., Feringa, J. and Søndergaard, A., 2013. Processes for an Architecture of Volume. In *Rob| Arch 2012* (pp. 62-71). Springer Vienna.
51. McGee, Wes, and Jelle Feringa., (2012), "Workshops » Rob|Arch 2012 - Robotic Fabrication In Architecture, Art, And Design, Rotterdam, Large Scale Hotwire And Diamondwire Cutting", <http://www.robarch2012.org/workshops#Rotterdam> [Pristupljeno 7 Feb. 2017]
52. Menges, A., 2013. Morphospaces of robotic fabrication. In *Rob| Arch 2012* (pp. 28-47). Springer Vienna.

53. <https://resources.realestate.co.jp/living/dome-houses-of-japan-made-of-earthquake-resistant-styrofoam/>, (2016), Modular homes, DOME HOUSES OF JAPAN: MADE OF EARTHQUAKE-RESISTANT STYROFOAM. <https://resources.realestate.co.jp/living/dome-houses-of-japan-made-of-earthquake-resistant-styrofoam/> [Pristupljeno 9 Feb. 2017]
54. Oxman, N., Duro-Royo, J., Keating, S., Peters, B. and Tsai, E., 2014. Towards robotic swarm printing. *Architectural Design*, 84(3), pp.108-115.
55. Pigram, D. and McGee, W., 2011. Formation Embedded Design. In *Proceedings of the 31st Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA)* (pp. 122-131).
56. Pottmann, H., Eigensatz, M., Vaxman, A. and Wallner, J., 2015. Architectural geometry. *Computers & graphics*, 47, pp.145-164.
57. Pottmann, H., Schiftner, A., Bo, P., Schmiedhofer, H., Wang, W., Baldassini, N. and Wallner, J., 2008. Freeform surfaces from single curved panels. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 27(3), p.76.
58. Raković, M., Jovanović, M., Borovac, B., Tepavčević, B., Nikolić, M. and Papović, M., 2014, September. Design and fabrication with industrial robot as brick-laying tool and with custom script utilization. In *Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD), 2014 23rd International Conference on* (pp. 1-5). IEEE.
59. RAPID Reference Manual, System Data Types and Routines, ABB Robotics, 1-774.
60. Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J. and Menges, A., 2014. Fibrous structures: an integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. *Computer-Aided Design*, 52, pp.27-39.
61. Rippmann, M. and Block, P., 2011. New design and fabrication methods for freeform stone vaults based on ruled surfaces. In *Computational Design Modelling* (pp. 181-189). Springer Berlin Heidelberg.
62. Rippmann, M. and Block, P., 2011. Digital Stereotomy: Voussoir geometry for freeform masonry-like vaults informed by structural and fabrication constraints. In *Proceedings of the IABSE-IASS Symposium*.
63. Rippmann, M., Lachauer, L. and Block, P., 2012. Interactive vault design. *International Journal of Space Structures*, 27(4), pp.219-230.
64. RobotFold, <http://robotfold.com/> Accessed 8 Feb. 2017
65. Rogers, H., 2009, May. Structural Form in History and the Construction of Complex Forms. In *Proceedings of the Third International Congress on Construction History*, Cottbus.
66. Rust, R., Jenny, D., Gramazio, F. and Kohler, M., 2016. Spatial Wire Cutting: Cooperative robotic cutting of non-ruled surface geometries for bespoke building components, *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, *Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016) / Melbourne 30 March–2 April 2016*, pp. 529-538
67. Rust, R., Gramazio, F. and Kohler, M., 2016. Force Adaptive Hot-Wire Cutting. *Advances in Architectural Geometry 2016*.
68. Schipper, H.R. and Janssen, B., 2011. Manufacturing double-curved elements in precast concrete using a flexible mould: First experimental results. *Czech Concrete Society and fib–International Federation for Structural Concrete*.
69. Schipper, R., Grünwald, S., Eigenraam, P., Raghunath, P. and Kok, M., 2014, June. Optimization of the flexible mould process for the production of double-curved concrete elements. In *Proceedings of CIC*.
70. Schwartz, T., 2013. HAL. In *Rob| Arch 2012* (pp. 92-101). Springer Vienna.

71. Simunic, R., 2016. PowerMILL Robot: Simplifying the Complex Issue of Robotic Programming. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 468-472). Springer International Publishing.
72. Søndergaard, A., Feringa, J., Nørbjerg, T., Steenstrup, K., Brander, D., Graversen, J., Markvorsen, S., Bærentzen, A., Petkov, K., Hattel, J. and Clausen, K., 2016. Robotic hot-blade cutting. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 150-164). Springer International Publishing.
73. Stavric, M. and Kaftan, M., 2012. Robotic fabrication of modular formwork for non-standard concrete structures.
74. Tang, K. and Wang, C.C., 2005. Modeling developable folds on a strip. *Transactions of the ASME-S-Computing and Information Science in Engineering*, (1), pp.35-47.
75. <http://www.i-domehouse.com>, (2017) The superior characteristics of the Dome House, <http://www.i-domehouse.com/characters.html> Pristupljeno 6th September 2017
76. Veenendaal, D., West, M. and Block, P., 2011. History and overview of fabric formwork: using fabrics for concrete casting. *Structural Concrete*, 12(3), pp.164-177.
77. Wächter, A. and Biegler, L.T., 2006. On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Mathematical programming*, 106(1), pp.25-57.
78. Wang, C.C. and Elber, G., 2014. Multi-dimensional dynamic programming in ruled surface fitting. *Computer-Aided Design*, 51, pp.39-49.
79. Wang, C.C. and Tang, K., 2005. Optimal boundary triangulations of an interpolating ruled surface. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 5(4), pp.291-301.
80. Whitaker, S., 1972. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE Journal*, 18(2), pp.361-371.
81. Wu, K. and Kilian, A., 2016. Developing Architectural Geometry Through Robotic Assembly and Material Sensing. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2016* (pp. 240-249). Springer International Publishing.
- Rippmann, M. and Block, P., 2011. New design and fabrication methods for freeform stone vaults based on ruled surfaces. In *Computational Design Modelling* (pp. 181-189). Springer Berlin Heidelberg.
82. Wu, P.H., Li, Y.W. and Chu, C.H., 2008. Optimized tool path generation based on dynamic programming for five-axis flank milling of rule surface. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11), pp.1224-1233.<http://nedcam.com>
83. Yuan, P.F., Meng, H. and Devadass, P., 2014. Performative Tectonics. In *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* (pp. 181-195). Springer International Publishing.

Prilog A.

Proračunavanje kvaterniona na osnovu matrice transformacije. Oznake su date na stranici 31.

Prema van Waveren [41], kvaternioni q_{xt} , q_{yt} , q_{zt} i q_{wt} su proračunati na osnovu matrice rotacije T na sledeći način:

- if $(t_{11} + t_{22} + t_{33}) > 0$

$$s = 2 \cdot \sqrt{t_{11} + t_{22} + t_{33} + 1}$$

$$q_{wt}^i = 0.25 \cdot s$$

$$q_{xt}^i = (t_{32} - t_{23}) / s$$

$$q_{yt}^i = (t_{13} - t_{31}) / s$$

$$q_{zt}^i = (t_{21} - t_{12}) / s$$

- else if $(t_{11} > t_{22} \text{ and } t_{11} > t_{33})$

$$s = 2 \cdot \sqrt{t_{11} - t_{22} - t_{33} + 1}$$

$$q_{wt}^i = (t_{32} - t_{23}) / s$$

$$q_{xt}^i = 0.25 \cdot s$$

$$q_{yt}^i = (t_{12} - t_{21}) / s$$

$$q_{zt}^i = (t_{13} - t_{31}) / s$$

- else if ($t_{22} > t_{33}$)

$$s = 2 \cdot \sqrt{t_{22} - t_{11} - t_{33} + 1}$$

$$q_{wt}^i = (t_{13} - t_{31}) / s$$

$$q_{xt}^i = (t_{21} + t_{12}) / s$$

$$q_{yt}^i = 0.25 \cdot s$$

$$q_{zt}^i = (t_{32} + t_{23}) / s$$

- else

$$s = 2 \cdot \sqrt{t_{33} - t_{22} - t_{11} + 1}$$

$$q_{wt}^i = (t_{21} - t_{12}) / s$$

$$q_{xt}^i = (t_{13} + t_{31}) / s$$

$$q_{yt}^i = (t_{32} + t_{23}) / s$$

$$q_{zt}^i = 0.25 \cdot s$$