

# OPTIMIZACIJA TRODIMENZIONALNIH DVOSTRUKO ZAKRIVLJENIH AMORFNIH FORMI U ARHITEKTURI

Bratislav Ilić<sup>1</sup>, Jefto Terzović<sup>2</sup>

**Rezime:** Savremeni trendovi u arhitekturi u velikoj meri su posledica razvoja softvera i njihove direktne implementacije u proizvodnom procesu konstruktivnih elemenata u građevinarstvu. Istraživanje forme i strukture amorfnih arhitektonskih objekata podrazumeva, pored uobičajenih metoda, iterativni postupak - specifično ispitivanje međusobno zavisnih varijantnih rešenja kroz naizmjeničnu primenu softvera za geometrijsko modelovanje i softvera za statičko-konstruktivnu analizu. Statičko - konstruktivna analiza se sprovodi pomoću softverskog paketa koji se bazira na metodi konačnih elemenata, pri čemu se uzimaju u obzir svi relevantni slučajevi opterećenja, od kojih se formiraju njihove realne kombinacije. Optimizacija konstrukcije se vrši u modulu za dimenzionisanje čeličnih elemenata iterativnim kontrolama napona i kontrolama stabilnosti pojedinačnih štapova, kao i globalne strukture.

**Ključne reči:** amorfnja forma, trodimenzionalna struktura, konstruktivni sistem, naponsko stanje, konačni element

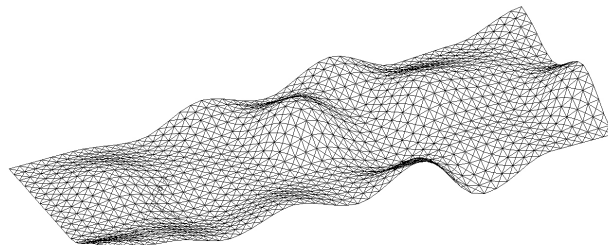
## OPTIMIZATION OF THREE-DIMENSIONAL DOUBLE-CURVED AMORPH SHAPES USED IN ARCHITECTURE

**Summary:** Current trends in architecture are to a largely influenced by new developments in software design and its direct implementation in the production process of construction elements, by the construction industry. Research of the form and the structure of amorph shapes in architecture includes, alongside the usual methods, the iterative process – testing of mutually inter-dependant variety of solutions through alternating application of software for geometric modelling and structural analysis. Structural analysis is carried out with a software package based on the finite element method – FEM, where all relevant load behaviour cases are considered, thus forming their real combinations. Optimization of construction methods is carried out in the module for shaping of steel elements iteratively testing levels of stress and stability of individual rods, including the global structure.

**Key words:** amorph shape, threedimensional structure, structural system, stress spectrum, finite element

### 1. Uvod

Arhitektura akcentovana amorfnim oblicima ima jak vizuelni identitet s obzirom da njene prve pojave nose metaforu progresa svojim futurističkim konceptima. Odlikuje je pre svega odsustvo tipološke segregacije. Ovakvi koncepti razvijaju se veoma intenzivno zahvaljujući razvoju softvera.



Slika 1 – Geometrija amorfnje forme

<sup>1</sup> Asistent, Univerzitet u Beogradu Arhitektonski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73/II , kab. 348a, 11000 Beograd, ilicbratislav@gmail.com, tel. 064/1265900

<sup>2</sup> Asistent, Univerzitet u Beogradu Arhitektonski fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73/II , kab. 348, 11000 Beograd, terzovic@gmail.com, tel. 064/1455237

Trenutni vrednosni kriterijumi ovakve arhitekture utemeljeni su na subjektivnom doživljaju. Ova arhitektura naizgled u sebi sadrži više kreativnosti iz algoritma kompjuterskog procesora nego samog autora. Autor upravlja procesom stvaranja ali ne potpuno svesno o krajnjem cilju (Hensel, Menges, 2008). Iako tehnološki nedovoljno rasprostranjena za izvođenje zbog visoke cene, ova nova arhitektura prenosi jasne ideološke poruke progresa uspostavljajući novu paradigmu. U valorizaciji arhitekture amorfnihi formi nije jasno uspostavljena granica između kreacije umetnika i informatičkog generatora. Drugim rečima, zakoračili smo u novu eru arhitektonskog stvaranja, gde je računar preuzeo deo kreativnog procesa upotrebom velikog spektra modifikatora u grafičkom prikazivanju formi, što se može videti kroz brojne primere u svetu i kod nas (Stojković, 2009).

Ono što je nekada bio eksperiment pop – arta, ili asamblaz kubizma, ima sličnosti sa informatičkom arhitekturom amorfnihi formi. Ono što ih čini različitim jeste diskurs, tj. sredstva stvaranja: nekada nekontrolisani pokreti i boja ili ljudske tvorevine u službi sklapanja intuitivnog mozaika, a danas širok spektar softverskih modifikatora geometrije.

Kriterijum koji svakako jeste odrednica u valorizaciji amorfnihi formi jeste pre svega naponsko stanje konstrukcije. Kod ovakvih formi u velikoj meri optimalna naponska stanja zavise od geometrije (Leslie, 2003). Veoma važan aspekt predstavljaju završni materijali koji se primenjuju kod ovakvih struktura. U slučajevima kada su to polimeri (ETFE)<sup>3</sup> i šatoraste strukture (PVC, PTFE), stalno opterećenje pokrivača je neznatno, čime su mogućnosti u kreiranju formi mnogo veće (Goldberger, 2008).

U ovom radu će biti prikazan jedan korak iterativnog postupka, kojim se jednopojasna biaksijalno zakrivljena čelična konstrukcija optimizuje, na osnovu dobijenih naponskih slika u štapovima strukture, a nakon nanošenja realnog spoljnog opterećenja (pokrivač, sneg). Oslonačke tačke strukture su raspoređene u grupama od po četiri i smeštene su u uvalama jednoslojne mreže.

Ova jednopojasna štapasta struktura je u osnovi dimenzija 35 x 95 m, dok visinske razlike između najnižih i najviših kota zakrivljene površi idu i do 12 m. Maksimalna dužina elemenata - štapova strukture je 2,5 m. Grupe oslonaca nisu postavljene u pravilnom geometrijskom X-Y rasteru, već su locirane u uvalama i to u obodnim zonama, tako da je

njihova najveća udaljenost od ivice strukture 9 m, čime se ne ugrožava funkcionalnost arhitektonskog prostora koji struktura natkriva. Takođe u smislu funkcionalnosti, međusobna udaljenost oslonačkih grupa nije manja od 10 m, a oslonačkih grupa ukupno ima 17.

## 2. Ponašanje jednopojasne strukture i izbor optimalne geometrije

Pored postojećih zahteva za zadovoljenjem projektnog programa, savremene konstrukcije amorfnihi formi veoma često predstavljaju laku i transparentnu jednopojasnu opnu. Proces projektovanja se sastoji od većeg broja iteracija pri uzajamnom istraživanju geometrije (Pottmann, 2006) i naponskih stanja. Uobičajeno je da su ovakve strukture formirane od jednopojasnih trodimenzionalnih mreža koje se pružaju preko velikih raspona. Usled toga neminovno se javljaju i velika naprezanja. Sa druge strane, usled male statičke visine konstrukcije neophodno je omogućiti povoljne uticaje u konstruktivnim elementima.

Dominantna naprezanja u materijalu u najvećoj meri zavise od primenjene geometrije. U slučajevima kada je primenjena *biaksijalna geometrija* (Pottmann, 2004) obezbeđeno je tzv. membransko dejstvo u strukturi, pri čemu se u elementima konstrukcije javljaju složena naprezanja sa dominantnim aksijalnim silama pritiska i zatezanja, naizmenično formirajući integrisani sistem pritisnutih lukova ili zategnutih lančanica.

Prikazana amorfna površina je generisana u programu Autodesk 3ds Max 2008, primenom komande *plane*, a zatim konvertovanjem objekta u *editable patch/ vertex*, promenom položaja tačaka, i primenom modifikatora *tessellate*, kao i konvertovanjem u *editable spline/break* za potrebe formiranja dxf fajla, za kasniju konstruktivnu analizu.

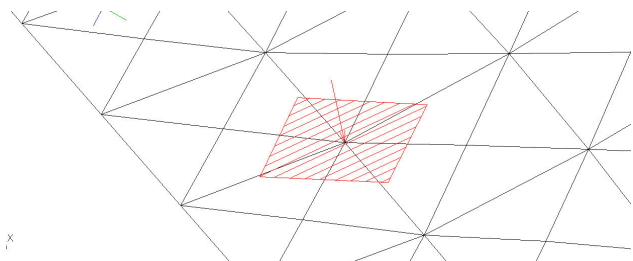
Ovakva geometrija takođe omogućava preraspodelu statičkih uticaja u najmanje dva geometrijska pravca, čime se višestruko povećava krutost strukture i dominantan uticaj aksijalnih sila u štapovima.

## 3. Preraspodela opterećenja i izbor položaja oslonaca

Prilikom proračuna trodimenzionalnih amorfnihi formi neophodno je utvrditi pripadajuća opterećenja za čvorove strukture. Za razliku od standardnih linijskih konstruktivnih sistema, u slučaju trodimenzionalnih struktura nije prisutna hijerarhija u

<sup>3</sup> Ethylene Tetrafluoroethylene

prenošenju opterećenja, tj. svi elementi solidarno prenose opterećenja do oslonaca čime se u okviru same strukture, u zavisnosti od geometrije, stvaraju zone izostatičkih uticaja - dominantnih naprezanja.



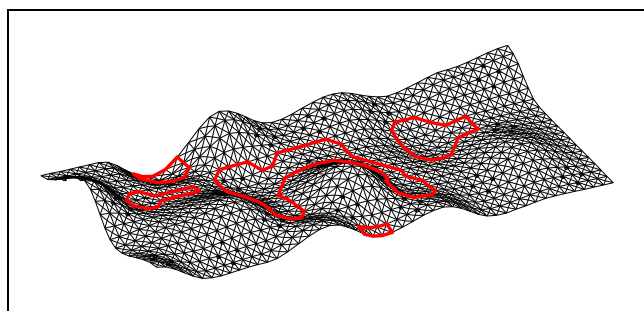
Slika 2 – Pripadajuće opterećenje čvorova

Iz tog razloga, pravilan položaj oslonaca u odnosu na biaksijalno generisanu geometriju može biti presudan u dimenzionisanju štapova strukture.

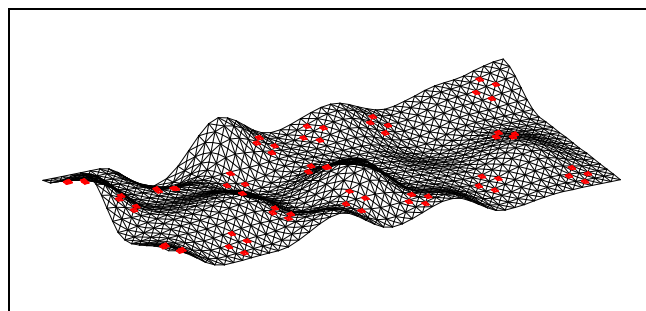
Eksperimentom na primeru biaksijalno zakrivljene amorfne proizvoljne površi prikazaćemo formiranje različitih naponskih stanja i deformacija za dva slučaja, usled različitog izbora položaja oslonaca. Oslonačke tačke jednopojasnih struktura povoljnije prihvataju opterećenja i premošćavaju raspone u slučaju grupisanja većeg broja oslonaca, formirajući „stablo“ sa razgranatim kosnicima. Ovakav sistem smanjuje deformacije u polju, formirajući prostornu geometriju sličnu pečurkastim tavanicama.

#### 4. Prikaz rezultata

Statičko – konstruktivna analiza opitne strukture, sprovedena je pomoću programskog paketa “Tower 6.0”. U predprocesoru, analizom opterećenja su tretirana samo gravitaciona opterećenja. Za krovni pokrivač je uzet polimer, čija je maksimalna težina  $0.12 \text{ kN/m}^2$ . Opterećenje od snega je razmatrano kroz dva osnovna slučaja: kao ravnomerno raspoređeno ( $0.75 \text{ kN/m}^2$ ) i kao nagomilano opterećenje u uvalama krovne površine ( $1.50 \text{ kN/m}^2$ ), što je realna opcija, obzirom na specifičnu geometriju strukture.



Slika 3 – Zone koncentracije snega u uvalama

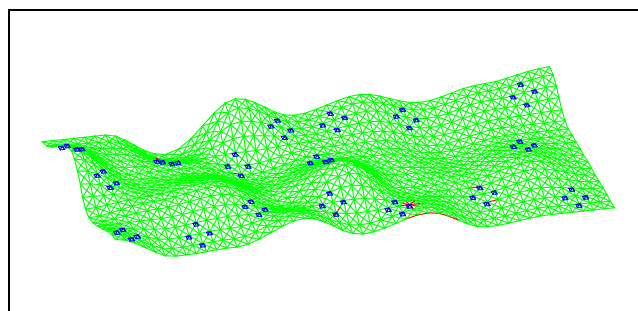


Slika 4 – Dispozicija osloničkih tačaka strukture

Sva površinska opterećenja su svedena na koncentrisane sile koje deluju u čvorovima strukture. U prvoj iteraciji, četvoročlane grupe osloničkih tačaka, kojim se simulira “stablo”, raspoređene su sa ciljem formiranja naizmeničnog sistema lukova i lančanica.

U ulaznim podacima su definisani i poprečni preseći štapova strukture. Za sve štapove su uniformno usvojeni čelični profili “I140”.

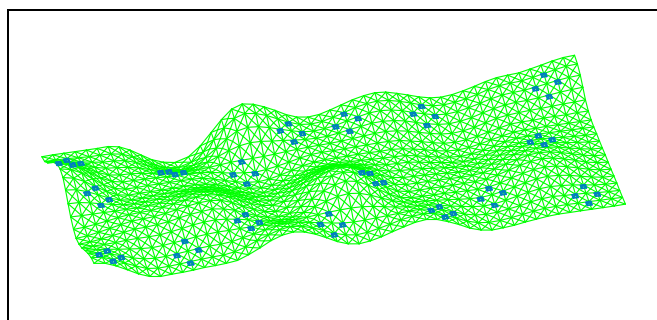
Za strukturu je sprovedena statička analiza, uz kreiranje ekstremne kombinacije osnovnih slučajeva opterećenja. Kao generalni kriterijum za ocenu ponašanja strukture, usvojen je stepen iskorišćenosti poprečnih preseka, u smislu naprezanja - naponskih stanja. Pomoću modula za dimenzionisanje čeličnih elemenata, izvršena je kontrola napona u štapovima.



Slika 5 – Iskorišćenost poprečnih preseka: crvenom bojom su označeni štapovi sa prekoračenim naponima

Analiza strukture u prvoj iteraciji, za ekstremnu kombinaciju opterećenja, je pokazala sasvim zadovoljavajuće ponašanje strukture. Dopušteni naponi su prekoračeni samo u pojedinim zonama osloničkih tačaka, kao i na jednom delu ivice strukture. U cilju eliminisanja prekoračenja napona u štapovima strukture, drugom iteracijom je izvršena intervencija po dva parametra: izvršena je promena položaja kod tri osloničke grupe; i promenjeni su poprečni preseći štapova u zonama osloničkih tačaka,

tako što su usvojeni profili većih dimenzija - "I160". Kao rezultat, dobijena je struktura kod koje su naprezanja svih štapova u granicama dozvoljenih.



Slika 6 – Bez prekoračenja dopuštenih napona

Pregled dobijenih rezultata u prvoj i drugoj iteraciji, može se prikazati tabelarno, upoređenjem relevantnih kriterijuma za opisivanje ponašanja i prirode strukture:

kriterijuma	1. iter.	2. iter.
maksimalno pomeranje strukture po vertikali [mm]	185,66	127,18
maksimalna pritiskujuća sila u najopterećenijem štapu [kN]	338,85	354,78
period oscilovanja u prvom tonu dobijen modalnom analizom [s]	0,617	0,595
utrošak čeličnog materijala [kg/m <sup>2</sup> ]	37,55	38,82

Tabela 1 – Uporedni prikaz relevantnih kriterijuma

Kroz jedan korak, pokazan je princip iterativnog postupka za optimizaciju jednopojasne amorfne forme – krovne čelične strukture – naizmeničnim korišćenjem predprocesora i postprocesora u računarskom modelovanju. Minimalnim prirastom utroška čeličnog materijala, moguće je zadovoljiti kriterijum naprezanja štapova koji čine strukturu, uz povećanje njene globalne krutosti (ilustrovano smanjenjem perioda oscilovanja). Očigledno je da bi sledećim korakom iteracije, najpre bile identifikovane zone na strukturi u kojima je iskorišćenost poprečnih preseka štapova mala, da bi zatim u predprocesoru profili tih štapova bili optimizovani, uz odgovarajući stepen uniformnosti - tipizacije. Na ovaj način, utrošak materijala bi opao ispod nivoa vrednosti koje su se pojavljivale za taj kriterijum u prvoj iteraciji, što je i cilj sprovedenog postupka. Unapređenje ovog istraživanja bi se moglo vršiti uvođenjem dodatnih

ograničenja u generisanju, kao što su tipizacija elemenata ili formiranje minimalnih površina (Velimirović, et.al. 2008) u cilju opimizacije korišćenih materijala. Na kraju, još jednom treba spomenuti da je opterećenje od vetra zanemareno, samo u cilju sažetijeg prikaza postupka.

## 5. Zaključak i buduća istraživanja

Ovim radom prikazana je ukratko metodologija istraživanja prostornih struktura amorfni formi. Istraživanjem je obrađen metod formiranja mreže bez promene geometrije u funkciji standardizacije i tipizacije elemenata (Zloković, 1960), već samo optimizacije naponskih stanja, čime je data prednost stvaranju originalnih oblika slobodnih formi koji ne moraju imati utemeljenje u Euklidovoj geometriji. Krajnji cilj istraživanja je formiranje naučnog metoda rada u oblasti generisanja amorfni formi, sa naglaskom na optimizaciji konstrukcije primenom optimalne geometrije.

## LITERATURA

- Goldberger, P. (2008) Beijing's Olympic Architecture is Spectacular, but What Message Does it Send?. *Abitare*, No. 486 - *The Reader*. No. 12, , originalni tekst *The New Yorker*, June 2, 2008.
- Hensel, M. Menges, A. (2008) *Morpho-Ecologies*. AA Agendas No. 4. Architectural Association London
- Leslie, T. (2003) Form as Diagram of Forces: The Equiangular Spiral in the Work of Pier Luigi Nervi. *Journal of Architectural Education*, Volume 57, No 2, MIT Press, str. 45-54.
- Pottmann, H. et.al. (2006) Geometric modeling with Conical Meshes and Developable Surfaces. *The Association for Computing Machinery, Inc.* No.0730-0301/06/0700-0681
- Pottmann, H. et.al. (2004). Line geometry for 3D Shape Understanding and Reconstruction. *Computer Vision - Lecture Notes in Computer Science*, Volume 3021, Springer, str. 297-309
- Stojković, J. (2009) Metamorfoza prostora – Izložba studenata Arhitektonskog fakulteta u Beogradu (16-30. april 2009) na 31. Salonu arhitekture (26. mart – 30. mart), Muzej primenjene umetnosti, Beograd. *Arhitekt*, Glasnik društva arhitekata Niša, Niš, br.28, str.12-17
- Velimirović Lj. S., Radivojević G., Stanković M. S., Kostić D. (2008) Minimal Surfaces for Architectural Constructions. *Facta Universitatis, Series: Architecture and Civil Engineering* Vol. 6, No 1, pp. 89 - 96
- Zloković, Đ. (1960) *Koordinirani sistem konstrukcija*- doktorska disertacija. Arhitektonski fakultet u Beogradu.