



PARAMETARSKO MODELOVANJE PERGOLE KAO RECIPROČNE RAMOVSKJE STRUKTURE OD DRVETA

PARAMETRIC MODELING OF A PERGOLA AS A WOODEN RECIPROCAL FRAME STRUCTURE

Dušan Stojsavljević, Marko Jovanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast: Arhitektura i urbanizam

Kratak sadržaj – Iako su recipročne ramovske strukture poznate od davnina, razvojem digitalnih alata omogućeno je istraživanje složenijih formi i unapređivanje procesa projektovanja i fabrikacije takvih struktura. U procesu projektovanja koriste se digitalni alati Rajnoseros i Grashoper, uz dodatke Kangaru3D, Engon, Karamba3D i Lejdidag. Projekat primenjuje "top-down" pristup u kome se prvo razvija osnovna forma u vidu minimalne površi, a na tu površ se mapira i postavlja RF struktura. Nakon postavke RF strukture, vrši se strukturalna analiza i analiza insolacije. Uprkos složenosti RF struktura, metodologija pokazuje da one mogu biti pristupačne i praktične za širu primenu u arhitekturi.

Ključne reči: Recipročne ramovske strukture, digitalni dizajn, parametarsko modelovanje, samonosiva struktura

Abstract – Although reciprocal frame structures have been known since ancient times, the development of digital tools has enabled the exploration of more complex forms and the improvement of the design and fabrication processes of such structures. The design process employs digital Rhinoceros and Grasshopper, along with plugins Kangaroo3D, Engon, Karamba3D, and Ladybug. The project uses a 'top-down' approach, where the basic form is first developed as a minimal surface, onto which the RF structure is mapped and placed. After setting up the RF structure, structural and solar analysis are performed. Despite the complexity of RF structures, the methodology demonstrates that they can be accessible and practical for broader application in architecture.

Keywords: Reciprocal Frame Structures, digital design, parametric modeling, self-supporting structure

1. UVOD

Većina građevina ima krovnu odnosno međuspratnu konstrukciju ili svod, a što je raspon veći, to su i sami elementi veći i složeniji za projektovanje.

Recipročna ramovska struktura (RF struktura) nam omogućava da premostimo velike raspone pomoću elemenata koji su znatno kraći od ukupnog raspona.

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Marko Jovanović vanr. prof.

Recipročne strukture imaju dugu istoriju, a prvi primeri se pojavljuju još u neolitskom periodu, gde su korišćene u izgradnji poluzemunica, šatora, indijskih tipija i mandala krovova.

Tokom renesanse, arhitekti poput Leonarda da Vinčija i Sebastiana Serlija istraživali su principe recipročnosti i njihov potencijal u arhitektonskim konstrukcijama [1].

1.1 Predmet istraživanja

Parametarska arhitektura, koja je nekada bila rezervisana za složene projekte i stručnjake u oblasti, danas je, zahvaljujući napretku i većoj dostupnosti digitalnih alata, postala pristupačna široj javnosti.

Uz pomoć računarskih programa kao što su Rajnoseros i Grashoper, i lako dostupnih materijala, poput kratkih drvenih greda, moguće je projektovati složene i inovativne forme poput RF struktura. One omogućavaju da se pomoću takvih elemenata premoste veliki rasponi, i predstavljaju predmet istraživanja u ovom radu.

1.2 Principi RF strukture

Recipročni ram napravljen je od najmanje 3 elementa postavljenih tako da formiraju zatvoreno kolo prenosa opterećenja i naziva se RF jedinica (RF unit). RF jedinica je osnovni element RF strukture, a kombinovanjem više RF jedinica dobija se RF struktura [2]. Svi elementi unutar strukture su jednako važni i ne postoji centralni glavni element [3].

Na svakom elementu tačke primanja i prenošenja opterećenja ne smeju da se preklapaju, odnosno moraju da budu razdvojene. Opterećenje prenose na krajevima, a primaju u središnjem delu. Funkcije prenosa i primanja opterećenja odgovaraju različitim pozicijama i inverzija tih pozicija nije moguća [4].

2. ISTRAŽIVANJE

Istraživanje u ovom radu uključuje analizu procesa projektovanja uz pomoć savremenih digitalnih alata kao što su Rajnoseros i Grashoper, koji omogućavaju parametarsko modelovanje. Rad obuhvata projektovanje pergole sa recipročnom ramovskom strukturom koja će biti postavljena na terasi jednogodišnje kuće. Projektovana je tako da pruži hladovinu, a za njenu izradu predviđene su drvene letve od smrče. Primenom "top-down" pristupa, prvo se generiše osnovna forma, zatim se projektuje RF struktura, nakon čega se vrši strukturalna analiza i analiza insolacije.

Projekat je podeljen u 6 faza:

1. Projektni zadatak
2. Modelovanje osnovne forme
3. Modelovanje RF strukture
4. Strukturalna analiza
5. Analiza insolacije
6. Priprema za fabrikaciju

2.1. Projektni zadatak

Projektni zadatak obuhvata projektovanje pergole sa recipročnom ramovskom strukturom za terasu jednoporične kuće u Subotici. Za konstrukciju su predviđene drvene letve od rezane smrče prve klase, dimenzija 2.4 x 7.0 cm, dok će dužine elemenata biti definisane u fazi 3. Drveni elementi će se obrađivati CNC mašinom ili cirkularom, a za spajanje će se koristiti metalni šrafovi (0.5 cm x 10 cm). Pergola je dizajnirana da obezbedi hladovinu na terasi dimenzija 7.2 m x 4.1 m (29.52 m²), orijentisanom ka severozapadu i izloženoj sunčevim zracima uglavnom popodne (Slika 1).

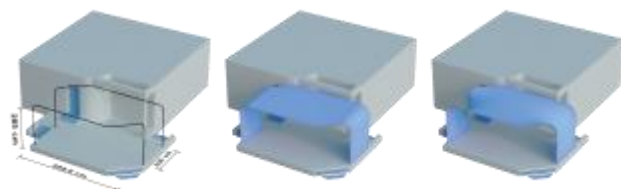


Slika 1: (levo): Fotografija terase; (desno): Prikaz lokacije

2.2. Modelovanje osnovne forme

Na osnovu prethodno definisanih projektantskih uslova, početna forma može da se kreira kao bilo koja geometrija koja zadovoljava zadate kriterijume. U ovom radu, osnovna forma je dobijena primenom loft tehnike u programu Rajnoseros, kojom se dve krive (Slika 2 levo) međusobno povezuju i formira se NURBS površ (Slika 2 sredina).

Dobijena NURBS površ može da se diskretizuje u trougaoni meš, koji primenom Kengaru3d dodatka može da generiše minimalnu površ primenom dinamičke relaksacije, koja predstavlja osnovu na koju će biti postavljena RF struktura (Slika 2 desno).

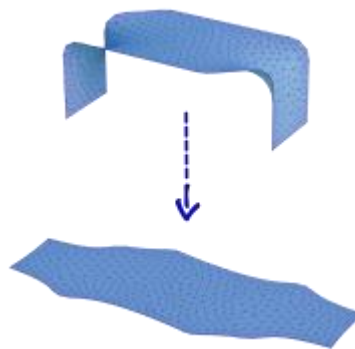


Slika 2: Generisanje osnovne forme (levo): postavka linija; (sredina): dobijena NURBS površ primenom loft alatke; (desno): dobijena minimalna površ primenom dinamičke relaksacije

2.3. Modelovanje RF strukture

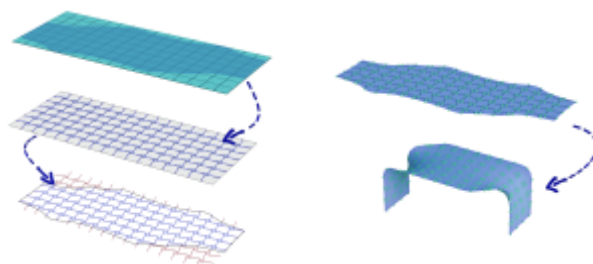
Osnovna forma je već generisana, pa prvi korak u ovoj fazi podrazumeva razvijanje forme u 2D prostor. U tu svrhu koristi se Grashoper dodatak Engon, sa komponentom *Boundary First Flattening*, koja konfor-

malno mapira geometriju u 2D planarnu površ, što služi kao osnova za postavljanje RF mreže (Slika 3).



Slika 3: Rezultat *Boundary First Flattening* komponente - osnovna forma kao razvijena planarna površ

RF struktura se formira tako što se pravilna mreža poligona (mesh) postavlja na razvijenu 2D formu, a linije koje čine mrežu se koriste za konstrukciju RF elemenata (Slika 4 levo, gore). Engon dodatak se koristi za konstrukciju RF mreže (Slika 4 levo, sredina). Linije koje izlaze van okvira osnovne forme se uklanjaju (Slika 4 levo, dole), a pozicije linija se mapiraju u 3D prostoru pomoću lokalnih koordinata (Slika 4 desno). Ovo omogućava rekonstrukciju RF linija u tri dimenzije.



Slika 4 (levo): Prikaz postavljanja mreže poligona preko razvijene površi (gore), konstruisanje RF mreže (sredina) i odsecanje linija koje izlaze van okvira razvijene površi (dole); Slika 4 (desno): Prikaz mapiranja položaja linija na razvijenoj površi i prikaz tih tačaka na 3d površi

Početni rezultat nije idealan jer se elementi ne dodiruju, pa se dinamičkom relaksacijom uz pomoć Kengaru3D komponente njihovi položaji optimizuju (Slika 5). Ispravno postavljanje elemenata je ključno za stabilnost strukture i za dalju strukturalnu analizu. Nakon što su šipke pravilno pozicionirane, daje im se debljina (2.4 x 7.0 cm) kako bi se precizno odredili pravci sečenja. Nakon toga, moguće je pristupiti strukturalnoj analizi.

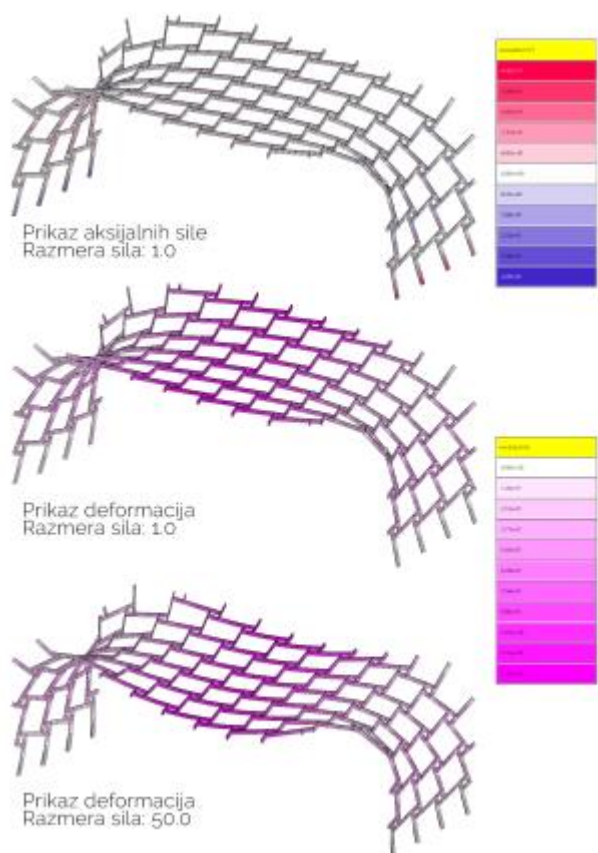


Slika 5: Prikaz korekcije položaja linija dinamičkom relaksacijom pomoću Kengaru3d

2.4. Strukturalna analiza

Za strukturalnu analizu koristi se dodatak Karamba3D za Grashoper. Definišu se svojstva materijala, poprečni presecci (2.4cm x 7.0 cm), položaji i kontaktne tačke elemenata kako bi se dobila precizna procena sila unutar

konstrukcije i stepena deformacije, što je ključno za procenu stabilnosti. Elementi se ne preklapaju već se šrafe na susedne delove, čime se pojednostavljuje montaža i smanjuje složenost čvorova.

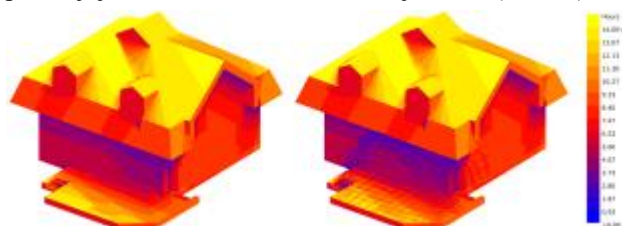


Slika 6: Rezultat Karamba3d analize i prikaz deformacija i sila unutar strukture

Karamba3D vrši analizu naprezanja i deformacija, identifikujući kritične tačke gde su opterećenja najveća. Analiza pokazuje da je deformacija u sredini konstrukcije 1.27 cm, što je unutar dozvoljenih granica (Slika 6). Struktura je stabilna i spremna za dalju analizu osunčanosti.

2.5. Analiza insolacije

Analiza insolacije vrši se pomoću dodatka Lejdibag za Grashoper. Kao ulazni parametri koriste se geometrija stambenog objekta i pergole, pravilno orijentisani prema severu, uz tačne koordinate lokacije. Simulacija prikazuje senke na terasi i objektu, te izračunava stepen osunčanosti. Poređenjem analiza sa i bez pergole, procenjuje se efikasnost obezbeđivanja hladu (Slika 7).



Slika 7: Rezultat Lejdibag analize i prikaz senki u toku jedne godine (levo): bez pergole (desno): sa pergolom

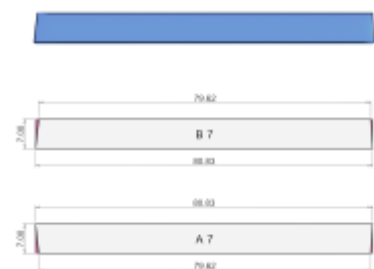
Konstrukcija pergole pruža osnovnu zaštitu od sunca, ali se zaštita može povećati dodavanjem platna ili biljaka

koje rastu preko strukture, čime se otvori popunjavaju i obezbeđuje veći hlad. Nakon uspešne analize, pristupa se pripremi elemenata za fabrikaciju.

2.4. Priprema za fabrikaciju

Priprema za fabrikaciju podrazumeva izradu nacrtu za obradu letvi CNC mašinom ili cirkularom. Svaka letva u strukturi se numeriče, dimenzioniše i postavlja u raster, a ceo proces je automatizovan uz pomoć Grashopera (Slika 8).

Redni brojevi elemenata na nacrtu odgovaraju brojevima na modelu pergole, olakšavajući montažu.



Slika 8: Prikaz kotiranog elementa pripremljenog za fabrikaciju

3. Rezultat

Na osnovu primene svih dosadašnjih digitalnih alata u okviru objedinjenog parametarskog pristupa za generisanje RF struktura dobijena je finalna forma, čiji render je moguće videti na slikama 9 i 10. Dati prikaz RF strukture daje uvid u to kako izgleda kada se cela forma fabrikuje i spoji, uz dodatak belih platnenih elemenata koji mogu dodatno da spreče osunčanost, kao što je i nagovešteno ranije u tekstu.



Slika 9: Računarski generisan prikaz mogućeg izgleda pergole

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad je prikazao da je proces projektovanja recipročne ramovske strukture u obliku pergole moguć, koristeći samo jedan softverski alat, Rajnoseros, zajedno sa besplatnim dodacima Grashoper, Kengaru3d i Lejdibug, kao i plaćenim dodatkom Karamba3d koji su značajno uprostiti proces. Time je omogućen automatizovan i efikasan proces projektovanja i pripreme za fabrikaciju uz ispunjenje estetskih, strukturalnih i performativnih uslova



Slika 10: Računarski generisan prikaz mogućeg izgleda pergole sa dodatnom zaštitom od sunca u vidu platna

Analize su pokazale da struktura pruža adekvatnu zaštitu od sunca, iako postoji mogućnost dodavanja elemenata poput platna za dodatnu zaštitu. Strukturalna analiza je pokazala da su deformacije minimalne i da je struktura stabilna pod predviđenim opterećenjem.

Dostupnost programa i alata pokazao se kao važan faktor. Iako postoje studentske licence sa znatno sniženom cenom, Rajnoseros program zahteva početno ulaganje od €995, i njegova cena može predstavljati glavnu prepreku za širu primenu.

Karamba3d dodatak poseduje besplatnu i plaćenu licencu, ali samo pomoću plaćene je moguće izvršiti potpunu strukturalnu analizu. Kao i Rajnoseros, postoji mogućnost kupovine studentske licence u trajanju od dve godine, čija je cena relativno pristupačna i iznosi €30. Sa druge strane, ostali dodaci za Grashoper koji su korišteni su besplatni.

Što se tiče materijala, drvo, kao glavni izbor za izradu strukture, je lako dostupno i ekonomično, što dodatno olakšava primenu ove metode u praksi kao i odabrani način spajanja koji ne zahteva složene spojnice.

Ovaj rad je pokazao da, uprkos svojoj složenosti, recipročne strukture mogu biti pristupačne široj javnosti. One, takođe, imaju veliki potencijal za široku primenu u savremenoj arhitekturi, uz upotrebu parametarskog pristupa sa dobrom integracijom različitih programa i dodataka, kao i automatizacijom koja može da se postigne njihovom primenom.

5. LITERATURA

- [1] POPOVIC LARSEN O. Reciprocal Frame Architecture, Elsevier, Burlington, 2008.
- [2] MELLADO, N., SONG, P., YAN, X., FU, C. W., MITRA, N. J. Computational Design and Construction of Notch-free Reciprocal Frame Structures. London, United Kingdom, Advances in Architectural Geometry, 2014.
- [3] PUGNALE A., SASSONE, M. Structural Reciprocity: Critical Overview and Promising Research/Design Issues. Kim Williams Books, Turin 2014.
- [4] PUGNALE A., PARIGI D., KIRKEGAARD P.H., SASSONE, M. The principle of structural reciprocity: history, properties and design issues. IABSE-IASS 2011 London Symposium Report, 2011.

Kratka biografija:



Dušan Stojsavljević rođen je u Subotici 1994. godine. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Arhitektura i urbanizam – Digitalne tehnike, dizajn i produkcija u arhitekturi i urbanizmu, odbranio je 2024. godine.

kontakt: stojsavljevicdusan@gmail.com



Vanr. prof. Marko Jovanović bavi se primenom digitalnih tehnika i dizajna u arhitekturi i urbanizmu sa fokusom na primenu industrijske robotike u oblasti arhitektonske fabrikacije.

kontakt: markojovanovic@uns.ac.rs