

**PRIMENA TEKSTILNIH OPLATA I DIGITALNIH SIMULACIJA PRI DIZAJNU
DEKORATIVNIH BETONSKIH PANELA****APPLICATION OF FABRIC FORMWORK AND DIGITAL SIMULATIONS IN THE
DESIGN OF DECORATIVE CONCRETE PANELS**

Ina Pašić, Marko Jovanović, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ARHITEKTURA

Kratak sadržaj – Beton se obično izliva u rigidne oplata; međutim, primena fleksibilnih oplata otvara nove mogućnosti u oblikovanju arhitektonskih panela. Arhitektonske implikacije fleksibilnih oplata istražuju se korišćenjem perforiranih rigidnih šablona u kombinaciji sa tekstilnim membranama što omogućava kontrolisanu deformaciju tekstila pod težinom svežeg betona. Problem nepodudaranja simuliranog i izvedenog primerka se rešava primenom digitalnih simulacija i izradom fizičkih prototipa i upoređivanjem dobijenih modela kako bi se usaglasile vrednosti parametra simulacije sa izvedenim stanjem i na taj način predvidela forma koju zauzima tekstil pod pritiskom betona.

Ključne reči: tekstilna oplata, fleksibilna oplata, beton, parametarski dizajn, simulacije

Abstract – Concrete is traditionally cast in rigid formwork. However, the use of flexible formwork brings new design possibilities. The architectural implications of flexible formwork are explored by using perforated rigid stencils in combination with textile membranes which allows for controlled fabric deformation under the weight of fresh concrete. The mismatch problem between the simulated and the fabricated model is solved by using digital simulations and prototype fabrication in order to compare them and align the parameter values of the simulation with the state of the finished prototype thus predicting the form of the fabric under the concrete pressure.

Keywords: fabric formwork, flexible formwork, concrete, parametric design, simulations

1. UVOD

Mogućnost betona da se oblikuje i izliva u različite forme, uz njegova strukturna svojstva i dugovečnost, čini ga najzastupljenijim građevinskim materijalom širom sveta. Međutim, ove mogućnosti su često ograničene izazovima u vezi sa proizvodnjom oplata, kao što su troškovi, složenost i generisani otpad. Ova ograničenja dovela su do pretežne upotrebe rigidnih, najčešće drvenih oplata, i proizvodnje prizmatičnih formi.

NAPOMENA:

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

Zamena tradicionalnih oplata fleksibilnim može eliminisati neka od ovih ograničenja i ponuditi nove mogućnosti dizajna.

Oplata od tekstila je građevinska tehnologija koja podrazumeva upotrebu strukturnih membrana kao glavnog materijala za formiranje betonskih kalupa. Za razliku od tradicionalnih oplata, tekstilne su veoma fleksibilne i oblikuju se pod pritiskom svežeg betona, stvarajući zakrivljenje forme sa finom završnom obradom površine, koja nije tipična za betonske strukture [1]. Pored toga, omogućavaju poboljšanu čvrstoću, dugovečnost i održivost betona, kao i niže troškove materijala i radne snage [2]. Iako primena tekstilnih oplata pruža priliku za razvoj složenih formi, takođe postavlja izazov kontroli tekstila kako bi se dobile interesantne i estetski privlačne forme, a pritom zadržala inherentna racionalnost procesa. [3].

2. STANJE U OBLASTI

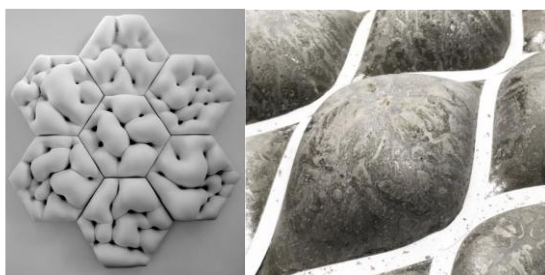
Mnogi aspekti primene tekstilne oplata su proučavani, najviše sa fokusom na strukturnu, a ne arhitektonsku funkciju. Prvi čovek koji je prepoznao arhitektonske mogućnosti tekstilne oplata bio je španski arhitekta Miguel Fisac [1]. U želji da betonu pruži sopstveni izraz i naglasi njegovu fluidnost, umesto da preuzima oblik i teksturu drvenih oplata, Fisac je koristio plastične folije i metalne žice. Tokom 70-ih i 80-ih godina, kreirao je seriju betonskih fasadnih modula, dajući zgradama specifičan izgled (Slika 1 - levo). Ipak, zbog svog neobičnog izgleda, fasade su naišle na kritike, uključujući i opis čuvenog arhitektonskog kritičara Kennetha Framptona kao „groteskno teksturirane plastične površine“ [4]. Slično tome, profesor Mark West je istraživao svojstva tekstilne oplata kako bi postigao složene forme koristeći jednostavne tehnike. Sa studentima u CAST-u, West je izradio više betonskih panela (Slika 1 - desno) pune veličine koristeći zategnute komade geotekstilna i različite unutrašnje potpore [5].



Slika 1. (levo) Fasada Miguel Fisac-a [9]; (desno) Betonski paneli Mark West-a [10]

U skorije vreme, Matsys Design je istraživao korišćenje digitalnih alata u generisanju i izradi prefabrikovanih dekorativnih elemenata. Pri izradi projekta „P_Wall“ (Slika 2 - levo) korišćen je vrlo elastičan tekstil i tačkasta ograničenja. Pravilno postavljanje ograničenja ključno je za formiranje ovih organskih oblika, jer smanjuje rizik od pucanja tekstila pod težinom gipsa ili stvaranje tankih, krhkih delova. Razvijen je računarski kod za kreiranje polja visoke i niske gustine ograničenja na osnovu minimalnih i maksimalnih udaljenosti otkrivenih empirijskim testovima. Upotreba koda nije imala funkciju određivanja forme, već omogućava generalizovanu kontrolu nad proizvodnim procesom [6].

Projekat "tailored flexibility" (Slika 2 - desno) istražuje korišćenje robotskog 3D štampanja plastike u kombinaciji sa fleksibilnom oplatom. Ojačavanje tekstilna 3D štampanom plastikom omogućava stvaranje raznih dekorativnih i teksturalnih efekata. Iako napredni alati digitalne fabrikacije nude brojne dizajnerske mogućnosti, postavljaju ograničenja u pogledu skalabilnosti, pristupačnosti i racionalnosti procesa. Nasuprot tome, upotreba jednostavnijih ograničenja (metalne žice, drvene ploče, šipke) znatno ograničava dizajn i estetiku, dok oslanjanje na intuiciju i prethodno znanje vodi do nepredvidivih rezultata.



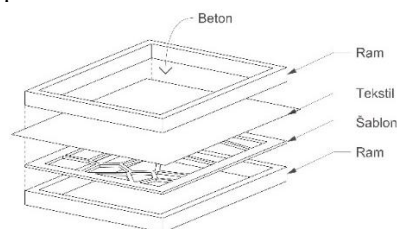
Slika 2. (levo) *P_Wall* - Matsys Design [11]; (desno) projekat "tailored flexibility" [7]

Uprkos mnogim istraživanjima primene tekstilnih oplata, glavni izazovi koji sprečavaju njihovu primenu u praksi su nepouzdanost u predviđanju forme i nestandardizovan proces projektovanja i izrade. Ovi problemi se mogu rešiti primenom tehnika digitalnog dizajna i fabrikacije, mada složenost simuliranja livenih formi, odvrćaju istraživače od upotrebe digitalnog modelovanja [8]. Cilj ovog istraživanja je da se ispituju arhitektonske implikacije tekstilnih oplata korišćenjem krutih šablona u kombinaciji sa tekstilom, i da se ispita primena parametarskog dizajna, digitalnih simulacija i fabrikacije kako bi se razvio proizvodni proces koji nudi inovativne mogućnosti dizajna i osigurava postizanje željenog rezultata.

3. METODE ISTRAŽIVANJA

Istraženi su razni pristupi kontroli oblika tekstilne oplate, ali upotreba rigidnih šablona nije dovoljno istražena. Kombinovanje fleksibilne oplate sa perforiranim rigidnim šablonima pruža zanimljive dizajnerske mogućnosti, jer omogućava kontrolisane, lokalizovane deformacije tekstila pod težinom svežeg betona. Kada se beton izliva horizontalno (Slika 3), neograničeni deo tkanine se rasteže i ugiba nadole, a deformacija je rezultat ravnoteže između pritiska betonske mešavine i zatezanja tekstila.

Različiti efekti mogu se postići u zavisnosti od veličine i oblika perforacija, elastičnosti tkanine i količine betona. Za razliku od drugih metoda, šabloni se mogu izrađivati korišćenjem digitalnih tehnika kao što su lasersko sečenje ili CNC glodanje. Zahvaljujući preciznim tehnologijama, moguće je izraditi složene dezene, a promenom šablona i tkanina moguće je koristiti isti kalup za različite panele. Šabloni se mogu višekratno koristiti, smanjujući otpad. Dizajn šablona mora uzeti u obzir debljinu materijala, količinu betona i veličinu otvora, jer ovi faktori mogu uticati na stabilnost šablona. Tehnika je istražena kroz fizičke prototipe, nakon čega su korišćene digitalne simulacije za oblikovanje i izradu većih dekorativnih betonskih panela.



Slika 3. Prikaz horizontalnog livenja betona u modli sa šablonom

3.1. Izrada fizičkih prototipa

Fizički prototipi korišćeni su za testiranje različitih tekstila, mešavina gipsa i betona, kao i oblika i veličina perforacija na šablonu. Gipsani paneli izliveni su u različitim vrstama tekstila po imenu likra, varirajući u teksturi i elastičnosti. Prvi panel (Slika 4 - levo) je korišćenjem šablona sa Voronoi perforacijama različitih veličina. Najveće perforacije proizvele su najveće deformacije, mada je ovaj efekat pojačan usled pomeranja tekstila pod težinom gipsa, što se može sprečiti privremenim lepljenjem tekstila za šablon, iako se ono javlja samo kada su perforacije blizu i nema dovoljno trenja između tkanine i šablona. Drugi panel (Slika 4 - sredina) pokazuje drugačiji pristup, gde su veće udaljenosti između otvora i postepene promene oblika sprečile pomeranje tkanine, rezultirajući estetski prijatnijim formama. Nakon prototipa od gipsa, izliveni su betonski paneli iste veličine (Slika 4 - desno), što je potvrdilo potencijal metode i omogućilo izbor odgovarajuće tkanine i željene estetike.



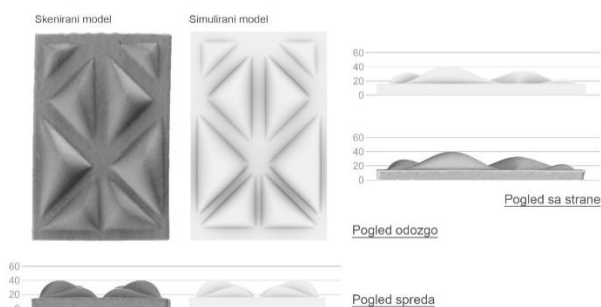
Slika 4. (levo) prvi gips prototip; (sredina) drugi gips prototip; (desno) betonski prototip

3.2. Digitalni dizajn i simulacije

Nedostatak predvidljivosti betonskih formi livenih u fleksibilnim oplatom jedan je od najvećih izazova u

njihovom dizajnu i primeni. Računarske simulacije stoga predstavljaju izuzetno koristan alat za dizajn, a kreirani 3D modeli mogu se koristiti za dokumentaciju i vizualizaciju. Korišćenje softvera Rhino 3d i Grasshopper-a sa Kangaroo dodatkom za fizičke simulacije je istraženo obzirom da su često korišćen alat među arhitektama. Proces dizajna koncipiran je tako da se prvo dizajnira šablon, kao dvodimenzionalni crtež pomoću kog je moguće fabrikovati šablone. Nakon toga, formira se meš geometrija (geometrija sačinjena od trouglova ili/i kvadova), kao reprezentacija tekstila, koja se opterećuje odgovarajućim silama i simulira njihov efekat. Kako bi se obezbedilo da se meš geometrija ponaša analogno tekstu, koristi se fizički prototip kao referenca za određivanje vrednosti parametara. Referentni prototip u ovom slučaju bio je prototip broj tri izliven u betonu, jer će se dalji modeli praviti od istog materijala primenom istog tekstila.

Da bi se olakšalo direktno poređenje fizičkog prototipa i simuliranog modela, formira se trodimenzionalni fotogrametrijski model prototipa (3d model dobijen pomoću serije fotografija predmeta). Meš geometrija pravi se u otvorima šablona, pri čemu je neophodno da topologija meša bude uniformna tj. da ivice meša budu približno jednake dužine nezavisno od veličine otvora. Meš se formira od trouglova, a što više trouglova ima tj. što su kraće ivice meša to je detaljniji model, međutim vreme potrebno za simulaciju se povećava. Takođe, neophodno je postaviti određena ograničenja. Prvo ograničenje tiče se elastičnosti meša, tj. tekstila, dok je drugo u vezi sa fiksiranjem obodnih ivica otvora, kako je pretpostavka pri simulacijama da se tekstil ne pomera. Alat kojim se simulira sila pritiska betona naziva se Inflate, a on radi tako što primenjuje silu normalnu na trougao meša, i proporcionalnu njegovoj površini. Kako bi se odredila jačina sile, korišćena je težina sveže betonske mase upotrebljene za izradu prototipa. Ova vrednost podeljena je sa površinom panela, kako bi se dobila težina mase po jedinici površine, koja se potom srazmerno množi sa površinom otvora. Dobijena vrednost se dodatno koriguje određenim koeficijentom sve dok se simulirani model ne podudara sa skeniranim modelom prototipa (Slika 5). Sve ove vrednosti se razlikuju u zavisnosti od konkretnog dizajna, tekstila i količine betona, zbog čega je povratna sprega između fizičkog i simuliranog modela ključna za uspostavljanje pouzdanog procesa dizajna i fabrikacije.

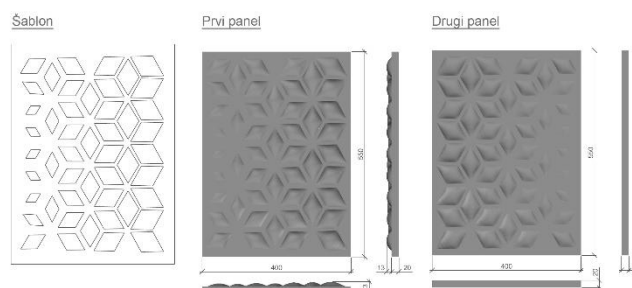


Slika 5. Poređenje skeniranog i simuliranog modela prototipa;

3.2. Proces dizajna dekorativnih panela

Nakon formiranja algoritma za digitalne simulacije, ovaj proces primenjen je na dizajn nešto većih panela. Korišćenjem parametarskog dizajna, moguće je precizno kontrolisati i varirati geometrijske karakteristike šablona, što omogućava kreiranje složenih dezena sa visokom preciznošću. Korišćenje simulacija donosi preciznost i otvara nove mogućnosti koje nisu bile dostupne pri dizajnu inicijalnih prototipa, kao što je korišćenje očvrslog panela kao kalupa za izradu sledećeg. Pre uklanjanja tekstila, preko očvrslog panela izliva se beton, stvarajući negativ prvog. Obzirom da ispušćenja u prvom panelu postaju udubljenja u drugom, digitalne simulacije se koriste kako bi se paneli dimenzionisali i osiguralo njihovo odvajanje.

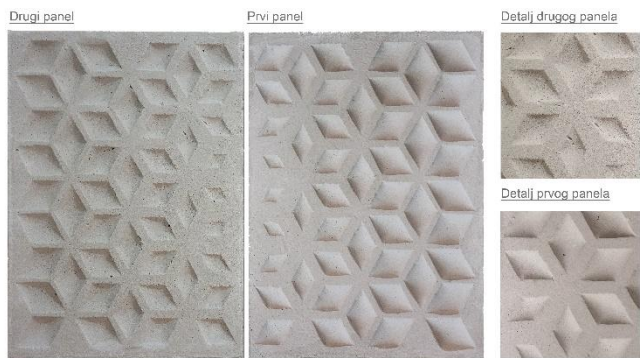
Cilj dizajna panela bio je da se demonstrira potencijal ovog procesa u manjem obimu i ograničenim uslovima livenja. Značajan kriterijum pri dizajnu bio je da izliveni paneli budu iste debljine (ne uzimajući u obzir ispušćenja) da bi se mogli ređati u nizu. Kako bi se utvrdila preciznost simulacija, korišćenje su vrlo male debljine panela od svega 20mm, pri čemu su najtanji delovi panela sa udubljenima debljine svega 7mm. Zahvaljujući preciznosti simulacija, paneli su dimenzionisani spram minimalne težine i upotrebe materijala, kroz brze i jednostavne iteracije. Različiti dezeni perforacija su testirani dok nije postignu finalni dizajn sa rombovima (Slika 6).



Slika 6. Dizajn panela

4. REZULTATI

Paneli su izrađeni na isti način kao i prototipi, korišćenjem istih materijala. Nakon očvršćavanja, šablon je uklonjen iz kalupa, a ram je podešen za izlivanje drugog panela. Očvršli paneli odvojeni su kako bi se otkrili konačni rezultati. Dobijeni paneli precizno odgovaraju simuliranim 3d modelima, uprkos malim tolerancijama; međutim, postoji vizuelna razlika među panelima (Slika 7). Prvi panel ima mnogo finiju završnu obradu površine zbog toga što su mehurići vazduha i višak vode bili potisnuti kroz propusnu tekstilnu membranu. Nasuprot tome, zarobljeni mehurići vazduha su jasno vidljivi na površini drugog panela, što potvrđuje prednosti tekstilnih oplata. Kako bi se dodatno istražio ovaj dizajn i prikazala njegova potencijalna primena, izrađena je vizualizacija većih fasadnih panela (Slika 8).



Slika 7. Fotografije izlivenih panela



Slika 8. Konceptualni dizajn fasade

5. ZAKLJUČAK

Ovo istraživanje pokazuje kako se perforirani rigidni šabloni mogu koristiti u kombinaciji s tekstilom za izradu oplata, omogućavajući kontrolisane deformacije tekstilne membrane i stvarajući dekorativne efekte na betonskim površinama. Ključni problemi u primeni tekstilnih oplata prevaziđeni su uspostavljanjem pouzdanog i zaokruženog proizvodnog procesa, od dizajna do izrade elemenata. Upotreba šablona nudi širok spektar estetskih mogućnosti uz jednostavnu izradu, a s obzirom na to da različiti oblici i veličine otvora daju različite rezultate, digitalne simulacije su se pokazale kao ključni alat za projektovanje i predviđanje forme koji tekstil zauzima.

Upotreba digitalnih alata koji imaju široku primenu u arhitekturi i dizajnu omogućava pristupačnost procesa dizajna i olakšava njegovu integraciju u postojeće procese. Parametarski dizajn šablona i digitalne simulacije omogućavaju brze iteracije dizajna uz interaktivne vizuelne povratne informacije, čime se smanjuje potreba za izradom fizičkih prototipa i omogućava dosta precizno dimenzionisanje odlivaka.

Ipak, fizički prototipi su i dalje potrebni kako bi se utvrdile odgovarajuće vrednosti parametara za specifične uslove i potvrdila tačnost digitalnih simulacija. Povratna sprega između fizičkih i simuliranih modela je ključna jer omogućava dizajnerima da uzmu u obzir uvide prikupljene kroz izradu prototipa. Mogućnost pravljenja negativnog odlivka očvrslag panela pokazala se kao interesantan koncept, mada su različite završne obrade površina vidljive na prototipima nešto što treba uzeti u obzir. Na kraju, kombinovanje dostupnih digitalnih alata za dizajn i efikasnih proizvodnih procesa ima veliki

potencijal za industrijsku integraciju tekstilnih oplata i proširenje arhitektonskog izraza.

6. LITERATURA

- [1] Veenendaal, D., West, M., and P. Block (2011). History and Overview of Fabric Formwork: Using Fabrics for Concrete Casting. *Structural Concrete*, 12 (3), 164-177
- [2] Abdelgader, Hakim & West, M. & Górski, Jarosław. (2008). State-of-the-Art Report on Fabric Formwork.
- [3] Chandler, Alan & Pedreschi, Remo. (2015). *Fabric Formwork*.
- [4] Frampton, K. 2003. *Tectonic talent*. AV Monographs 101.
- [5] Schmitz, Robert. (2018). Fabric-formed concrete panel design.
- [6] Kudless, A. (2011). *Bodies in Formation*. Integration Through Computation: Proceedings.
- [7] Engholt, Jon & Pigram, Dave. (2019). Tailored Flexibility - Reinforcing concrete fabric formwork with 3D printed plastics. 53-62.
- [8] Scherer, Annie Locke. (2019). *Concrete Form[ing]work: Designing and Simulating Parametrically-Patterned Fabric Formwork for Cast Concrete*. 759-768
- [9] *Arquitectura Viva*, 2003
<https://arquitecturaviva.com/works/parroquia-de-nuestra-senora-de-altamira-> (pristupljeno u septembru 2024.)
- [10] *World-Architects*, 2020 <https://www.world-architects.com/en/architecture-news/products/concrete-in-all-its-> (pristupljeno u septembru 2024.)
- [11] *Matsys*, https://www.matsys.design/p_wall-sevenstar (pristupljeno u septembru 2024.)

Kratka biografija:



Ina Pašić rođena je u Novom Sadu 1997. god. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Arhitektura – Arhitektonske vizualizacije i simulacije odbranila je 2024.god.

kontakt: ina.pasic@gmail.com



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

kontakt: markojovanovic@uns.ac.rs