

FRP pješački mostovi – mogućnosti oblikovanja i optimizacije

Lucija Stepinac¹, doc. dr. sc. Ana Skender², izv. prof. dr. sc. Josip Galic³, izv. prof. dr. sc. Domagoj Damjanović⁴

¹Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, lstepinac@arhitekt.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, askender@grad.hr

³Sveučilište u Zagrebu, Arhitektonski fakultet, jgalic@arhitekt.hr

⁴Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, domagoj.damjanovic@grad.unizg.hr

Sažetak

Gradnja pješačkih mostova u FRP-u u novije vrijeme sve više dobiva na značenju zbog povoljnih karakteristika toga materijala i sustava. Kroz postojeće sustave na tržištu, načine njihovog spajanja i načine proizvodnje izdvojeno je 12 različitih tipova ploča. Provedena je FEM analiza na modelima različite geometrije ispune poprečnog presjeka te su uspoređeni rezultati. Analiza je provedena u programu Simscales, a modeliranje u Rhinocerosu u kombinaciji s Grasshopperom. Preliminarne analize su rađene u vidu odabira najpogodnijega sustava te će poslužiti za daljnja istraživanja u pogledu optimizacije materijala na mjestima manjih naprezanja ili povećanja i dodavanja elemenata na mjestima gdje je to potrebno.

Ključne riječi: FRP, pješački mostovi, geometrija, spojevi, proizvodnja, 3d ispis

FRP pedestrian bridges – design and optimisation possibilities

Abstract

Construction of FRP pedestrian bridges has recently become increasingly interesting due to favourable mechanical and visual characteristics of the material and possible structural systems. Twelve different types of slabs are analysed based on systems available on the market, their connections and manufacturing process. FEM analysis is performed on models of various cross-section geometries, and the results are compared. The analysis is performed using the Simscales software, and modelling is done by means of Rhinoceros and Grasshopper. Preliminary analysis provides indications for future system optimization by removing material in the location of lower stresses or by placing additional material or whole members where needed.

Key words: FRP, pedestrian bridges, geometry, connections, construction, 3d printing

1 Uvod

Prije gotovo 80 godina Henry Ford upoznao je svijet s novim materijalom kroz slogan "Deset puta jači od čelika" [1] i taj materijal još i dandanas smatramo nedovoljno istraženim, a naziva se FRP (Fiber Reinforced Polymers) ili vlaknima ojačani polimeri. FRP je dvokomponentni materijal koji se sastoji od 30 do 70 % vlakana, odnosno 50 % ukupne težine i ostatka što čini matrica. Vlakna smatramo glavnom komponentom koja je zaslužna za nosivost, krutost, čvrstoću i otpornost na temperaturu. Matrica obavija vlakna, štiti ih u proizvodnom procesu i za vrijeme uporabe, osigurava ravnomjernu raspodjelu opterećenja do pojedinih vlakana, ali također ima ulogu u osiguravanju trajnosti kompozita [2, 3].

Na tržištu postoji velik broj vrsta vlakana, a odabir i njihova primjena ovise o sugestiji investitora, arhitekta ili konstruktora (statičara) čiji bi odabir trebao biti optimalan u pogledu zahtijevanih karakteristika i ekonomičnosti. Najčešći tipovi anorganskih vlakana su staklena vlakna (GFRP), karbonska (CFRP), aramidna (AFRP) i bazaltna (BFRP). Neka od korištenih organskih vlakana su sisal, banana, kopriva, konoplja, lan itd.

Kompoziti imaju visok modul elastičnosti i nosivost, a malu gustoću što ih čini idealnim izborom za konstrukciju nosača ili hodne ploče mostova, ne samo za ojačanje postojećih konstrukcija nego i za primjenu u hibridnim ili čisto kompozitnim konstrukcijama mostova [4, 5]. Brza ugradnja, otpornost na koroziju, vodootpornost, izgled, postojana boja, nosivost, otpornost na umor, dobre seizmičke karakteristike i potencijal za gradnju većih raspona neke su od prednosti primjene FRP-a u mostovima [6].

Brza proizvodnja i jednostavna montaža FRP mostova neki su od razloga njegove sve češće primjene, a i dugoročno se očekuje smanjenje troškova održavanja u odnosu na tradicionalne materijale [7]. Jedna od prednosti FRP-a koja također ide u prilog održivosti jest i brza ugradnja, čime se manje utječe na društveno okruženje, a i jednostavniji je i lakši prijevoz jer je težina kompozitnih elemenata manja, pa i održiva. Uzevši sve to u obzir, emisija CO₂ je reducirana za 20 % u odnosu na betonske ploče. Novost na tržištu su prirodna vlakna i prirodne smole čiji cilj je postaviti ovaj materijal na višu razinu održivosti [8].

Problem s kojim se susreće svaki novi materijal je i pronalaženje optimalnog sastava, odnosno forme, pri čemu prolazi kroz različite faze kopiranja tradicionalnih materijala. Zato bi arhitekti i inženjeri trebali biti bolje upoznati s estetskim i mehaničkim karakteristikama koje taj materijal nosi te iskoristiti sve prednosti u svim aspektima građevinarstva [1]. Kada govorimo o pješačkim mostovima ili pločama, u prvom redu treba definirati optimalnu geometriju.

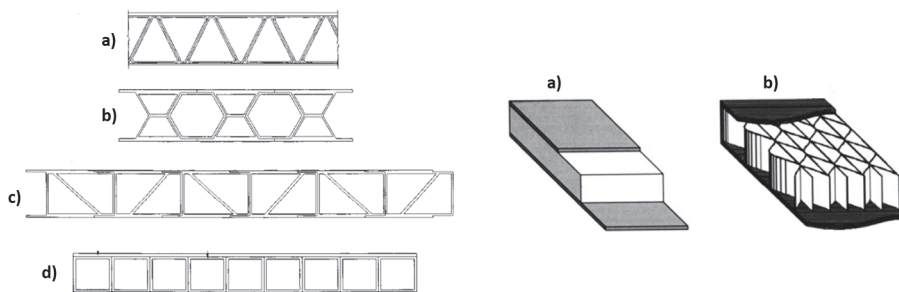
Cilj je ovog rada prikazati prednosti i nedostatke gradnje pješačkih mostova u FRP-u, dati osvrt na sadašnje stanje te prikazati mogućnosti oblikovanja ovakvih sustava.

Budući da su istraživanja tek u pripreмноj fazi, izrađena su preliminarna FEM modeliranja kako bi se dobio uvid te odredile smjernice za daljnja istraživanja.

1.1 Statički sustavi

Godine 1991. Plecnik i ostali su napravili analizu različitih plošnih sustava za ploče mostova [9]. Najučestaliji tipovi se nisu znatno promijenili do danas, sendvič-paneli i ekstrudirani profili i dalje su najčešći u proizvodnji FRP-a.

Za konstrukcijske svrhe, tehnologija ekstrudiranja je najpoznatija od svih proizvodnih procesa, pa su i najčešći sustavi ploča napravljeni upravo adhezivnim spajanjem ekstrudiranih profila (slika 1.): EZSpan (Atlantic Research); Superdeck (Creative Pultrusions); DuraSpan (Martin Marietta Materials); kvadratne cijevi (Strongwell). Ostali sustavi su sendvič: pjenasta ispunjena ili profilirana visokovalna ispunjena (KSCI) [10]. Sendvič-paneli s pjenastom ispunjenom se sastoje od vanjskih ploča koje preuzimaju opterećenje i pridonose fleksijskoj krutosti elementa, a pjenasta ispunjena male težine povezuje vanjske krute ploče i ima ulogu u raspodjeli opterećenja između njih. Otpornost na UV zračenje i vanjske vremenske utjecaje postiže se posebnim površinskim premazima.



Slika 1. Ploče nastale spajanjem vučenih komponenti (lijevo): a) EZSpan (Atlantic Research); b) Superdeck (Creative Pultrusions); c) DuraSpan (Martin Marietta Materials); d) kvadratne cijevi (Strongwell). Sendvič-paneli (desno): a) pjenasta ispunjena; b) profilirana visokovalna ispunjena (KSCI)

Opće je poznato da je zbog relativno malog modula elastičnosti granično stanje uporabivosti odnosno progibi, vrlo često mjerodavno za proračun i dimenzioniranje, a ako se veza između elemenata ostvaruje mehaničkim spajalima, onda ta mjesta postaju kritična, a ne nosivost elementa. Pločasti elementi izrađeni od vučenih profila, međusobno lijepljenih, konstante su visine, a ovisno o proizvodnji, ograničeni su na 80 do 225 mm. Maksimalan raspon takvih ploča je oko 2,7 m što znači da je potrebno i po nekoliko grednih nosača za oslanjanje. Kod ostalih sustava način je proizvodnje sendvič-elemenata u prilagođenom vakuumski potpomognutom po-

stupku prijenosa smole (VARTM – proces ručnog lameliranja). Takvi sustavi imaju nekoliko prednosti u odnosu na ekstrudirane: debljina ploče može varirati i može biti prilagođena rasponu ili nagibu ploče. Najveći dostignuti raspon iznosi oko 10 m. Tijekom proizvodnje moguća je ugradnja spojnih čeličnih pločica. Za površinski sloj ploča najčešće se koristi tanki sloj polimernog betona 6-20 mm. Uz navedene sustave ploča od vučenih profila ili sendvič-panela, također imamo i kabelske FRP hibridne mosne konstrukcije. Primjeri pločastih sustava navedeni su u tablici 1.

Tablica 1. Pločasti sustavi

Pločasti sustavi	Proizvodni proces	Debljina [mm]	Težina [kN/m ²]
Hardcore	VARTM	200 - 700	1,2 - 1,6
Superdeck	pultruzija i lijepljenje	203	1,1
DuraSpan	pultruzija i lijepljenje	130 i 190	0,8 i 0,9
EZSpan	pultruzija i lijepljenje	216	1,0
Strongwell	pultruzija i lijepljenje	170	-

Nosiva konstrukcija od FRP-a može biti izvedena kao plošna ravna ili trodimenzionalna odnosno zakrivljena forma. Savijanjem FRP sendvič-panela u trodimenzionalnu formu znatno se povećava krutost takvog elementa. Negativna činjenica za zakrivljenih formi je ta da se uslijed zakrivljenosti pojavljuje i moment savijanja koji zahtijeva dodatni materijal na uglovima. Primjer takvog mosta [1] razvijen je u suradnji s tvrtkom FiberCore. Kako se moment savijanja povećava prema sredini, tako se povećava i visina ploče. Posebnost ovakvih konstrukcija je dodatna krutost. Cilj svakog projektanta je zadovoljiti tražene uvjete nosivosti i uporabivosti uz najmanji utrošak materijala. Danas za iznalaženje optimalne forme imamo softvere kao što su Grasshopper, Karamba i Kangaroo [10].

1.2 Proizvodnja

Ovisno o željenoj formi ili zahtijevanim karakteristikama postoji više vrsta tehnologija za proizvodnju FRP elemenata za konstrukciju mosta. Jedan od prvih načina bilo je ručno laminiranje. Kao što samo ime kaže, uključuje ručni rad, a time i ograničen broj proizvedenih elemenata. Pozitivna činjenica je što ovisi o kalupu koji može biti neograničene forme, a to znači da je i orijentacija vlakana slobodna. Druga metoda je nanošenje prskanjem u kojem su pomiješana vlakna i matrica. Također je potreban kalup za izradu elemenata. Treći najpoznatiji proces je pultruzija. Tada se najprije potope vlakna u posudu u kojoj se nalazi matrica, a onda ta vlakna ulaze u zagrijani kalup gdje profil dobiva oblik. Profil se automatizirano izvlači iz kalupa i reže na zadanu dužinu. Metoda strojnog namatanja oko cijevi, vlakna u obliku rovinga prethodno namočena u matricu se namataju oko rotirajuće osovine, a konačni

proizvodi su uglavnom kružnog poprečnog presjeka. Međutim, orijentacija vlakana može biti višesmjerna, ovisno o mehanizmu i kutu namatanja, što može pridonijeti poboljšanju željenih karakteristika FRP elementa. Elementi proizvedeni pultruzijom pokazali su bolje karakteristike od onih u sendvič-panelu proizvedenih VARTM procesom ručnog laminiranja [10].

Kada je zahtjev trodimenzionalne geometrije za manji broj proizvoda, tada proizvodnja oplata postaje neekonomična, pa je sada područje interesa nekolicine istraživača i razvoj pametnih i fleksibilnih oplata. Postoje kalupi za betonske konstrukcije [11, 12] ili prilagodljive oplata za proizvodnju zakrivljenih staklenih panela [13] koji bi se mogli primijeniti i u proizvodnji FRP-a, a time omogućiti veću arhitektonsku slobodu.

Još jedna rastuća industrija je dobila svoju primjenu u gradnji pješačkih mostova - tehnologija 3d printanja. Primjer 3d printanog pješačkog mosta iz 2020. godine [14] ukupnih je dimenzija 15,5 x 3,8 m i projektiran je na opterećenje od 250 kg/m² i na očekivano trajanje 30 godina (slika 2.). Materijal koji je korišten je ASA (acrylonitrile styrene acrylate), a ojačan je staklenim vlaknima. Ukupna težina mosta iznosi 5,8 t, od čega udio vlakana iznosi 12,5 % u ukupnoj težini. Gradnja mosta je trajala 30 dana na 3d printeru čiji je kapacitet 8 kg/h, a volumen 24 x 4 x 1,5 m.



Slika 2. Prvi 3d printani most u Kini, Shanghai [14]

1.3 Spojevi

Dimenzije poprečnih presjeka ograničene su proizvodnim procesom, pa je potrebno spajati više njih kako bi se dobila zahtijevana dimenzija elementa. Prema Eurocomp normi i priručniku [15], postoje tri vrste spojeva: spojevi koji bi trebali opstati cijeli životni vijek konstrukcije i čiji bi kolaps značio opasnost za cijelu konstrukciju; spojevi čije otkazivanje utječe na lokalna oštećenja bez značajnijeg utjecaja na glavnu konstrukciju i ne-konstrukcijski spojevi koji uglavnom služe za spajanje sekundarne zaštitne konstrukcije.

Glavne spojeve možemo podijeliti u tri skupine [16]: komponenta-komponenta spoj (CLC), a služi za spajanje vučenih elemenata u FRP ploču, panel-panel spoj (PLC) služi za povezivanje više FRP ploča i spojevi za povezivanje više sustava (SLC), primjerice spajanje ploče na nosače.

Za međusobno spajanje panela ili za spajanje panela za nosače mogu se upotrebljavati ljepila, mehanička spajala ili njihove kombinacije, a glavni je zahtjev da budu

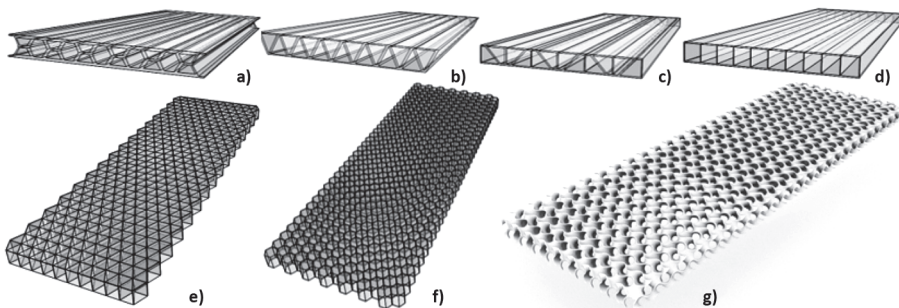
otporni na umor i na vanjske utjecaje. Dominantni spojevi u FRP-u su ljepljiva i mehanička spajala. Jednostavnost spajanja lijepljenjem još u proizvodnji, a time i ušteda novca i vremena, neki su od razloga zašto je češća primjena ljepljiva za spajanje komponenti unutar FRP ploče. Ljepljiva za spajanje su obično epoksidna i poliuretanska [17]. Mehanička spajala imaju prednost jer ih je lako demontirati i zamijeniti što nije slučaj s lijepljenim spojevima.

Kada se bira spoj između ploče i nosača, osnovno je znati treba li ili ne treba demontaža. Na osnovi toga izabrat će se mehanička spojna sredstva ili trajno spajanje pomoću adhezivnih spajala, a mogućnost je izvedbe i hibridnog spoja. Hibridni spoj ima nekoliko prednosti: povećanje globalne krutosti i nosivosti sustava [18] i povećanje duktilnosti konstrukcije [19].

Prema svemu navedenom, spojevi predstavljaju najveći izazov pri projektiranju FRP mostova te je nužno definirati norme za projektiranje spojeva u FRP-u, naročito mehaničkim spajalima.

2 Plan istraživanja

Istraživanje je bilo usmjereno na stanje o FRP pločama odnosno sustavima koje općenito možemo podijeliti u dvije skupine: ploče nastale spajanjem vučenih profila i sendvič-ploče. Prema geometriji, očito je da spajanje elemenata proizvedenih pultruzijom ima orijentaciju pojasnica u smjeru pružanja ploče, a sendvič-paneli imaju okomitu orijentaciju i smjer profilacije je skraćen.

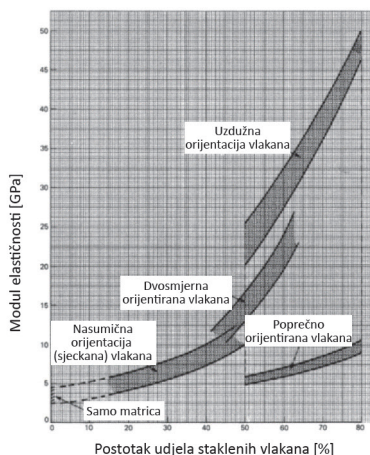


Slika 3. FRP ploče, primjer adhezivno spojenih vučenih profila: a) Superdeck; b) EZSpan; c) DuraSpan; d) Strongwell - Primjeri sendvič-panela s: e) trokutastom ispunom; f) sačastom ispunom i primjeri trodimenzionalne ispune: g) Gyroid

Pregledom ploča koje se nude na tržištu napravljeni su modeli za EZ-Span sustav (87,86 kg/m²), Superdeck (158,57 kg/m²), DuraSpan (11,43 kg/m²) i Strongwell (53,57 kg/m²) od vučenih profila i primjer izgleda sendvič-panela profilirana tro-

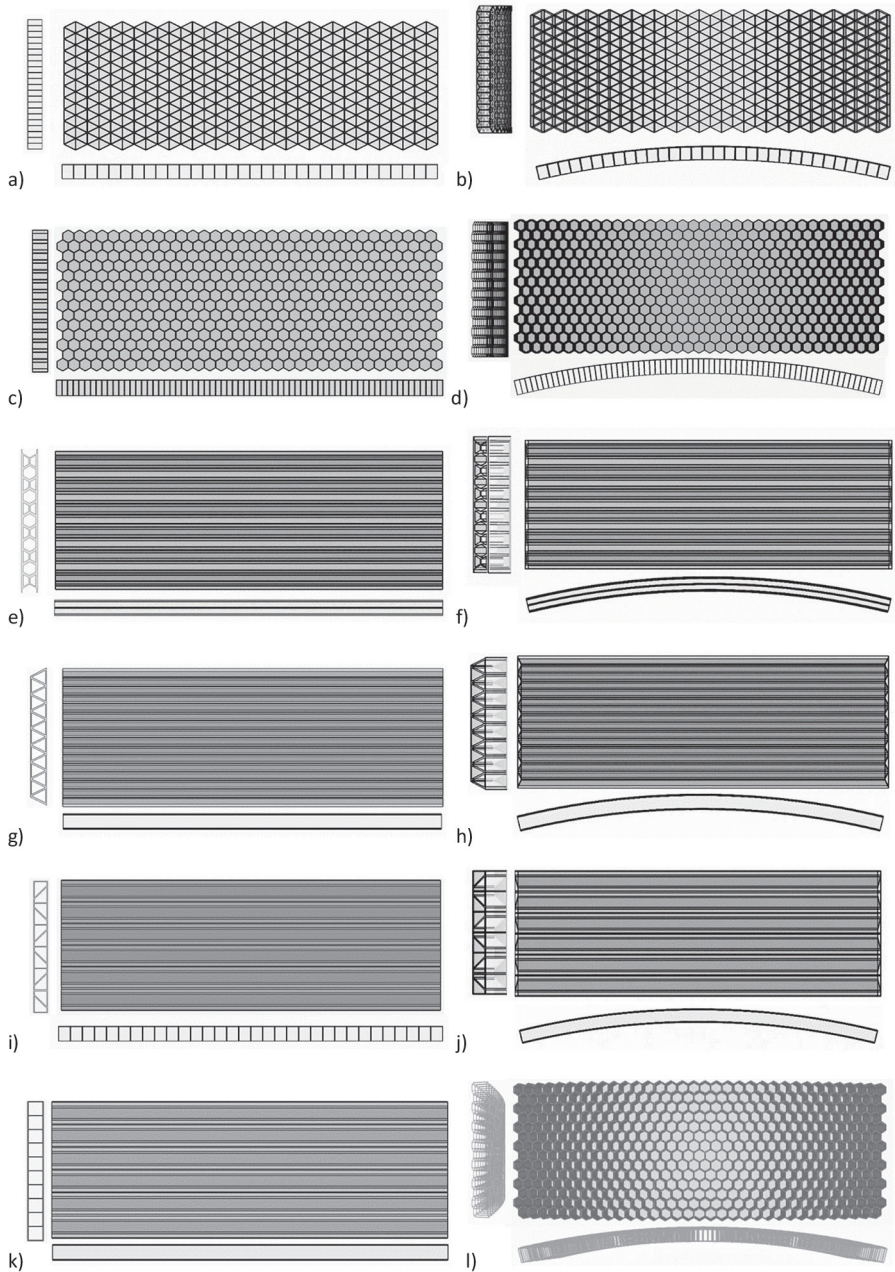
kutastom ispunom ($51,43 \text{ kg/m}^2$) i sačastom ispunom ($60,0 \text{ kg/m}^2$). Gyroid čija je struktura trodimenzionalna, zbog kompleksnosti mreže elemenata nije analiziran u ovoj fazi (slika 3.).

Odabir materijala uvelike ovisi o odabiru vrste vlakana, orijentaciji vlakana, vrsti matrice i postotku pojedine komponente u ukupnom kompozitu. Orijetacija vlakana je, između ostalog, definirana i proizvodnim procesom; usporedno s procesom pultruzije, pri čemu su vlakna orijentirana uzdužno, ili 3d printanja gdje smjer vlakana ovisi o definiranom smjeru printanja odnosno nanošenja slojeva. Za potrebu ovog istraživanja odabrano je ojačanje staklenim vlaknima zbog svoje pristupačnosti i ekonomičnosti. Modul elastičnosti može varirati od 5 GPa do 50 GPa (slika 4.) kod polimera ojačanih staklenim vlaknima [20]. Prema grafu sa slike 4. za udio staklenih vlakana 40 % pretpostavit će se modul elastičnosti kvaziizotropnog materijala u vrijednosti 10 GPa [20]. U daljnjem istraživanju detaljnije će se razmatrati karakteristike anizotropnog materijala te će se proračunski dobiti točna vrijednost za kvaziizotropan materijal.



Slika 4. Modul elastičnosti (kratkotrajni) za ojačanje staklenim vlaknima [20]

Standardne FRP ploče koje se nalaze na tržištu, proizvedene adhezivnim spajanjem komponenti proizvedenih pultruzijom ili sendvič-panela, bit će analizirane za pretpostavljeni modul elastičnosti i geometriju pješačkog mosta manjeg raspona $1,75 \times 5,0 \text{ m}$. Debljine ploča su 200 mm jer je to standardna dimenzija FRP ploča koje se nalaze na tržištu (slika 5.). Rubni uvjeti su definirani kao zglobovi na rubnim ploham ploče. Geometrija svih modela je riješena modeliranjem u programu Rhinoceros 6 uz pomoć alata Grasshoper. Sama FEM analiza je provedena u softveru SimScale, a kao mjerodavno za usporedbu uzet će se rezultati progiba pojedine ploče i prikazati i naprezanja. Opterećenje se uzima nefaktorizirano 5 kN/m^2 za uporabno i dodatno stalno 1 kN/m^2 .



Slika 5. Analizirani sustavi: a) Trokutasta "sendvič" ispunja; b) Trokutasta "sendvič" ispunja – u luku; c) Honeycomb; d) Honeycomb – u luku; e) Superdeck; f) Superdeck – u luku; g) EZSpan; h) EZSpan – u luku; i) DuraSpan; j) DuraSpan – u luku; k) Strongwell; l) Strongwell – u luku

Za svaku geometriju je provedena provjera o zakrivljenosti ploče, s visinom luka u sredini mosta 30 cm, a cilj je prikazati red veličine smanjenja pomaka za ploče u luku. Proizvodnja standardnih ploča nije predviđena za ploče u nagibu, iako u budućnosti s razvojem pametnih oplata ili pristupačnosti 3d printera većih dimenzija, to će biti realnost, što nam već pokazuju izvedeni primjeri u Kini [14].

Tablica 2. Rezultati progiba i napreznja različitih pločastih sustava dobiveni FEM analizom

Sustav	Progib [mm]	Napreznja [MPa]
Trokutasta "sendvič" ispuna	4,90	8,60
Trokutasta "sendvič" ispuna – u luku	3,56	5,50
Honeycomb	9,80	5,30
Honeycomb – u luku	2,38	4,45
Superdeck	3,68	3,25
Superdeck – u luku	0,78	1,43
EZSpan	7,03	5,41
EZSpan – u luku	1,46	2,56
DuraSpan	4,43	6,10
DuraSpan – u luku	1,09	2,53
Strongwell	3,30	8,65
Strongwell – u luku	1,37	3,55

4 Rasprava i zaključak

Tijekom povijesti uporaba naprednih tehnologija vrlo sporo ulazi u građevinski sektor, za razliku od primjerice avioindustrije, autoindustrije, medicine, itd. gdje se itekako iskorištava potencijal ovog materijala.

Mogućnosti modeliranja u Rhinocerosu i Grasshoperu gotovo su neograničene, a softveri za FEM analizu kao što su Simscale, Abaqusa i sl. omogućuju statičku ili dinamičku analizu geometrijski složenih modela na temelju kojih se mogu dimenzionirati elementi. Budućnost je arhitektonskog oblikovanja FRP mostova u primjeni softvera, ali i naprednih tehnologija kao što je 3D printanje. To omogućuje automatiziranu proizvodnju nestandardiziranih elemenata ili cijelih konstrukcija uz minimalan ručni rad kao što bi to bio primjer pločastog elementa sa slike 3.g) te široki spektar mogućih geometrijskih oblika.

Prema rezultatima iz tablice 1., za ravne ploče Superdeck i Strongwell dobivene su najmanje vrijednosti progiba od 3,68 mm i 3,30 mm, a za zakrivljene pločaste elemente najmanji progib je dobiven za Superdeck – u luku s 0,78 mm i za DuraSpan – u luku 1,09 mm. Također najmanja napreznja su se pokazala kod Superdeck

pločastog elementa kako za ravnu tako i za zakrivljenu ploču. Prema preliminarnim podacima dobivenim numeričkim modeliranjem zakrivljenjem se progib smanjio za 1,5 - 5 puta a naprezanja za 1,5 - 2,5 puta. Važno je naglasiti da se zasad na tržištu ne mogu nabaviti zakrivljene FRP ploče, iako bi se njihov proračun mogao dobiti relativno jednostavnim numeričkim modelima i proizvesti pomoću pametnih oplata ili 3D printanje.

FRP ploče koje se mogu naći na tržištu, a analizirane su u ovom radu, relativno su neistražene i dosta ograničene s obzirom na dimenziju koje proizvođači nude, a time i mogućnosti odabira od strane projektanta/investitora. Također pretpostavka je da su to pločasti elementi koji se oslanjaju na uzdužne i/ili poprečne nosače na određenom razmaku. Cilj je ovog rada bio prikazati nosivost takvih ploča ako samostalno nose na rasponu od pet metara te koliko se dodatno poveća nosivost i krutost zakrivljenjem oblika.

Daljnijim modeliranjem i testiranjem na stvarnim modelima dobit će se bolji uvid u mogućnosti oblikovanja pločastih elemenata za potrebe pješačkih mostova od polimernih materijala. Bez obzira na činjenicu da je prvi FRP most u svijetu izveden 1980., i dalje nam je gradnja u ovom materijalu velika nepoznanica. Manjak izvedenih objekata i manjak referentnih ispitivanja konstrukcija u tom materijalu, ujedno je i razlog zašto još uvijek nema definiranih normi za proračun poput primjerice što su Eurokodovi za beton, čelik ili drvo. Trajnost FRP-a je neupitna, ali visoke cijene su i dalje prepreka u odabiru upravo tog materijala za gradnju. Većina arhitekata i konstruktora najčešće primjenjuje poznate tradicionalne materijale koji su im dostupni i čiji im je proračun poznat, a samo nekolicina poznaje i proračun anizotropnog materijala kao što je FRP. Naposljetku, ali ne manje važno, treba spomenuti izvedbu spojeva. Za standardnu primjenu mehaničkih spajala ne vrijede ista pravila kao kod čelika i drva, a primjena adhezivnih spajala i dalje je nedovoljno ispitana [3]. Istraživači su optimistični u pogledu korištenja FRP-a i za veće raspone mostova, uz nužnost određivanja normi za projektiranje i upoznavanje struke s prednostima koje taj materijal nudi.

Daljnje istraživanje na temu FRP pješačkih mostova odnosit će se na konkretnije definiranje karakteristika materijala, iznalaženje novih trodimenzionalnih formi s nosačem ili bez njega te izvedba i testiranje modela u stvarnim dimenzijama.

Literatura

- [1] Smits, J.: Fiber-Reinforced Polymer Bridge Design in the Netherlands: Architectural Challenges toward Innovative, Sustainable, and Durable Bridges. *Engineering* (2016) 2, pp. 518–27.

-
- [2] Tuakta, C.: Use of Fiber Reinforced Polymer Composite in Bridge Structures. Thesis (M. Eng.). Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering, 2005.
- [3] Sonnenschein, R., Gajdosova, K., Holly, I.: FRP Composites and their Using in the Construction of Bridges. *Procedia Engineering* (2016) 161, pp. 477–82.
- [4] Curran, P.: Use of Fibre Reinforced Polymers in Bridge Construction. *Bridge Engineering* (2005) 158:39–39.
- [5] Office of the European Union. Prospect for New Guidance in the Design of FRP. Report (2016).
- [6] Jin, F., Feng, P., Ye, L.: Study on dynamic characteristics of light-weight FRP footbridge, 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering CICE Beijing, p. 173–6, 2010.
- [7] Canning, L., Luke, S.: Development of FRP bridges in the UK - An overview, *Advanced Structural Engineering* (2010); 13:823–35
- [8] Nazim, A., Ansari, M.: A Review on Natural Fibre Polymer Composites, *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* (2017), 6, pp. 81–6.
- [9] Gürtler, H., W.: Composite Action of Frp Bridge Decks Adhesively Bonded To Steel Main Girders, Thesis Lausanne, EPFL, 2004.
- [10] Smits, J.: The Art of Bridge Design. PhD Thesis. Delft University of Technology, 2019.
- [11] Schipper, R., Janssen, B.: Curving Concrete – A Method for Manufacturing Double Curved Precast Concrete Panels using a Flexible Mould. *Journal of the IASS* (2011).
- [12] Schipper, R., Janssen, B.: Deliberate deformation of concrete after casting, 2nd International Conference on Flexible Formwork, University of Bath, 132–9, 2012.
- [13] Rietbergen, D; Vollers, K., J.: A method and apparatus for forming a double-curved panel from a flat panel. European Patent Office EP2167435A1, 2007.
- [14] IAAC. 3D printed bridge. iaac 2020. <https://iaac.net/project/3d-printed-bridge/>.
- [15] Clarke, J.L; European Structural Polymeric Composites Group: Structural Design of Polymer Composites: EUROCOMP, 1996.
- [16] Zhou, A., Keller, T.: Joining techniques for fiber reinforced polymer composite bridge deck systems, *Composite Structures* (2005) 69, pp. 336–45.
- [17] Uddin, N.: Developments in fiber-reinforced polymer (FRP) composites for civil engineering. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2013.

- [18] Keller, T., Gürtler, H.: Design of hybrid bridge girders with adhesively bonded and compositely acting FRP deck. *Composite Structures* (2006) 74, pp. 202–12.
- [19] Keller, T., De Castro, J.: System ductility and redundancy of FRP beam structures with ductile adhesive joints. *Composites Part B: Engineering* (2005) 36, pp. 586–96.
- [20] Leggatt, A.: *Grp and Buildings: a Design Guide for Architects and Engineers*. Elsevier Ltd, 1984.