



**HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA**  
**Dani Hrvatske komore inženjera građevinarstva 2020.**

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

**Tihomir Štefić**  
**Aleksandar Jurić**

mr.sc. Tihomir Štefić, mag.ing.aedif., NOVOpjekt d.o.o. Osijek

izv.prof.dr.sc. Aleksandar Jurić, dipl.ing.građ., Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek

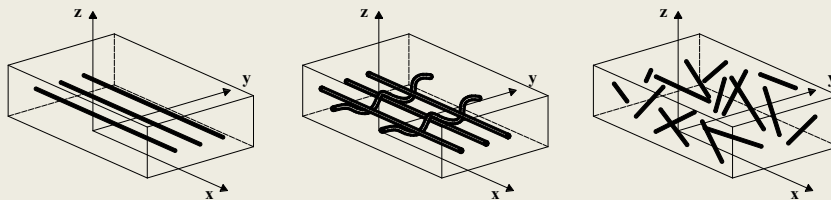
# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

- **Ukratko**

- Kompoziti (ojačani vlaknima, ojačani česticama, strukturni kompoziti - laminati, stanična – čelijska kruta tijela),
- Polimeri (polietilen – PET, polivinililklorid – PVC, poliuretan – PUR, poliester, poliesterske smole)
- Stakloplastika (fiberglas, poliester, GRP) - pločasta stakloplastika – reciklirana stakloplastika, (doktorski rad)
- Ispituje se tip nosača za upotrebu u konstrukcijama, **element proste grede**, napravljen od dvije vrste materijala, reciklirana stakloplastika (RGFRP) i izvorna stakloplastika (GFRP). Ovdje se prvenstveno misli na primjenu pločaste stakloplastike u izradi šupljih nosača, koji primjenu pronalaze u izvedbi raznih **stropnih ili podnih konstrukcija**, kao i nosivih stupova, koji, osim šupljih, najčešće mogu biti **ispunjeni** drvetom, betonom, stiroporom, purpenom i sl.
- Osnovni cilj istraživanja je ukazati na mogućnost reciklaže te tako proširiti upotrebu kompozitnih materijala u konstrukcijama, odnosno, **najraširenijeg kompozita** – stakloplastike.

- **Uvod**

Stakloplastika je spoj najčešće **poliesterske smole** i **prepletenih staklenih vlakana (pletiva)**. Vlakna se najčešće slažu u slojeve, lamele, a čija orijentacija i raspored mogu biti različiti, slika 1.



Slika 1. Načini postavljanja vlakana

U **građevinarstvu** se počela primjenjivati kao **zamjena** (rjeđe) za čelik u armirano-betonskim konstrukcijama, iz razloga veće otpornosti na koroziju kao i nosivosti većih vlačnih naprezanja. Primjena je moguća u spregnutim konstrukcijama, gdje djelomično ili potpuno zamjenjuje čelik, kao **izgubljena oplata** (češće) ili kao vlačna armatura. Koriste se i pri **sanaciji** „klasičnih“ armirano-betonskih i spregnutih konstrukcija čelik beton. U **potpunosti** zamjenjuje čelik ili armirani-beton kod raznih platoa upravo zbog **smanjene težine** konstrukcije, velike **otpornosti na vanjske utjecaje** te mogućnosti dosezanja većih čvrstoća. Veoma česta primjena je i u **hidrotehnici** (revizijska okna i sl.).



# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## **Prednosti:**

- **Smanjena** težina konstrukcije i **velika** nosivost,
- **Otpornost** na vlagu, agresivne tekućine, koroziju, smrzavanje i sl. - visoka trajnost,
- Sposobnost **spajanja** (prijanjanja) s materijalima kao što su čelik, aluminij ili beton,
- **Cjeloživotni ciklus** materijala bitan je za svaku primjenu pa i primjenu u konstrukcijama pa je **naglasak** na ispitivanju nosača izvedenog iz materijala dobivenog **reciklažom** izvornog materijala – pločaste stakloplastike, a paralelno se radi usporedbe istražuje ista konstrukcija iz izvornog materijala.

## **Nedostaci:**

- **Visoka cijena,**
- **Osjetljivost na raslojavanje** (uglavnom uslijed loše interakcije između materijala unutar kompozita), mrvljenje, širenje pukotine uzduž vlakana, mogućnost pojave zaostalih naprezanja tokom i nakon proizvodnje.
- **Oblikovanje i način postavljanja vlakana (pletiva)** unutar kompozita može biti prednost i nedostatak. (Elementi konstrukcija nisu izotropni nego ortotropni ili čak i anizotropni, odnosno, nosivi samo u jednom smjeru).

Pažljivim oblikovanjem ovaj problem može prerasti u prednost konstrukcije - potrebno sagledati sva moguća stanja konstrukcije u cjelini i njezinih pojedinih dijelova - oblikovanjem suziti prostor pogreške.

- **Lokalna nosivost** (drobljenje, gnječenje) – veoma čest problem koji se sprječava povećanjem površine ležajeva i mjesta opterećenja.

## **Zašto recikliranje?**

- I **pored brojnih prednosti**, pojavljuje se **otpad** proizvoda od stakloplastike, zbog veće izloženosti statičkim i dinamičkim opterećenjima, vodi, prljavštini, atmosferskim promjenama i raznim agresivnim sredinama (**plovila, kamp kuće, rezervoari, buradi, bazeni** i sl.),
- Otvaraju se mogućnosti i proizvodnje kvalitetnijeg materijala iz reciklirane stakloplastike,
- Produžava se (ili ograničava) životni ciklus materijala,
- Visoka cijena izvornog materijala - **30-35 %** manji troškovi izrade,
- Reciklirani materijal ponaša se kao **ispuna** i kao **mikroarmatura**,
- **Linearnije ponašanje** recikliranog materijala - manje plastične deformacije.



# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija



Slika 2. Izvori materijala za reciklažu

## **Recikliranje za potrebe ispitivanja**

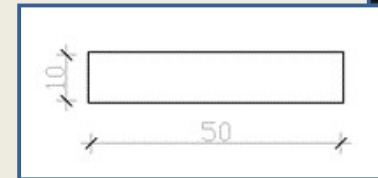
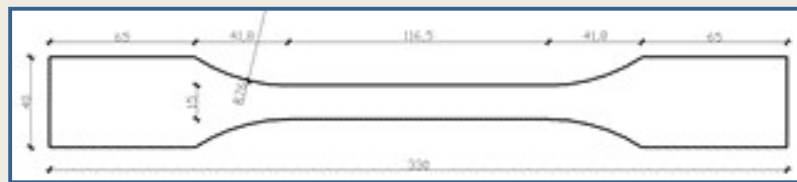
- **Recikliranje** znači svaku **operaciju prerade** otpada kojom se otpadni materijali vraćaju u proizvodni proces u **obliku proizvoda**, materijala ili sastojaka zbog **izvorne ili druge upotrebe**, osim upotrebe kao gorivo. (**mehanički** - vraćanje u izvornu upotrebu, **termalno** – proizvodnja toplinske energije i **kemijski** – proizvodnja plina)
- **Reciklirani materijal** je proizveden postupkom **mljevenja** s oštricama promjera **4 mm** koje proizvode čestice najmanjeg promjera do **2 mm**. Na ovaj način dobijamo do **50 %** sirovine za novi materijal, dok preostalih **50 %** čine izvorna poliesterska smola i staklena vlakna. **Izvorni materijal** (GFRP) od kojeg je rađen reciklirani materijal (RGFRP), rađen je od **2/3** mase poliesterske smole i **1/3** mase staklenih vlakana. U konačnici reciklirani materijal (RGFRP) je oko **15 %** veće specifične težine.
- Postupkom **mljevenja** se može utjecati na veličine čestica reciklirane sirovine, čime se direktno utječe na karakteristike recikliranog materijala. I kako je u ovom slučaju **50 %** materijala reciklirano, dodavanjem novih vlakana i matrice, može se kao i kod izvornog materijala utjecati na konačne karakteristike recikliranog kompozita.
- Što su čestice **manje** veličine to je reciklirani materijal sličniji izvornom, odnosno, što su one **veće**, postoji ograničenje na duljine vlakana. S druge strane, reciklirani materijal pokazuje utjecaj sličan mikroarmiranju, odnosno, veće čestice se ponašaju kao mini armatura što rezultira manje plastičnih deformacija, ali i manju nosivost. U oba slučaja ispunjena čini **kompaktniji** materijal i kompozitniju strukturu otporniju na vanjske utjecaje, ali uz naravno **veću** upotrebu smole.



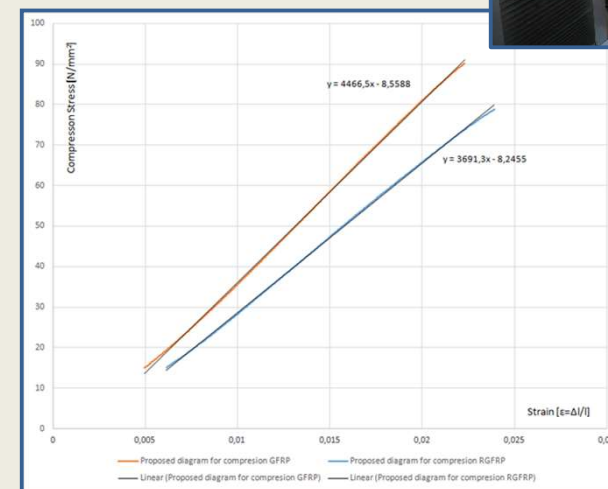
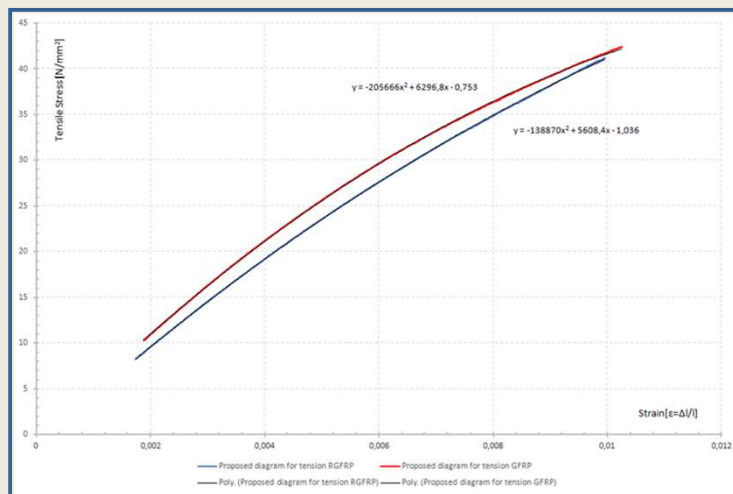
# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## *Određivanje karakteristika materijala GFRP i RGFRP*

- Na slikama 3. i 4. prikazani su **uzorci** materijala za ispitivanje na **vlak i tlak**, dimenzija preuzetih iz literature i uređaj (Shimadzu).
- Dobivene su karakteristike materijala izražene pomoću modula elastičnosti **E** te čvrsoća na vlak i tlak, **f<sub>t</sub>** i **f<sub>c</sub>**.
- **GFRP**:  $f_t=40 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_c=100 \text{ N/mm}^2$ ,  $E=4000\text{-}4500 \text{ N/mm}^2$ ,
- **RGFRP**:  $f_t=32 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_c=80 \text{ N/mm}^2$ ,  $E=3700\text{-}3900 \text{ N/mm}^2$ .



Slika 3. Uzorci za ispitivanje materijala na vlak i tlak

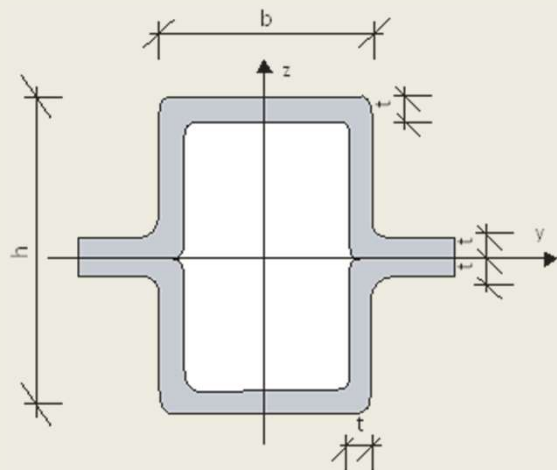


Slika 4. Rezultati za ispitivanje materijala na vlak i tlak

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## **Dimenzije i proizvodnja grednih nosača GFRP i RGFRP** *(Bilje – Marine, čamci, kanui, bazeni za ribu i dr.)*

• Nosači kao i poprečni presjeci odabirani su kako bi se lako mogli uklopiti u najčešće nosače tipa greda, predgotovljenih elemenata, nosača stropova/podova i slično. Odabir je uvjetovan i mogućnostima proizvodnje. Ispitivanje se temelji na modelima nosača koji predstavljaju okvini odnos, odnosno, model 1:5 u odnosu na najčešći ili uobičajno najveći raspon do 5 m. To znači kako su eksperimentalni modeli približnog raspona 1m i poprečnog presjeka, oko  $b/h=3,5-4/6,5-8$  cm. Debljina stijenke je u rasponu oko  $t=4-7$  mm, a spoj dva dijela od oko  $x=2-2,5$  cm izveden je po duljini nosača, kako bi se mogla ubaciti bilo koja vrsta ispune ili pak neki sekundarni nosač kao nastavak konstrukcije.



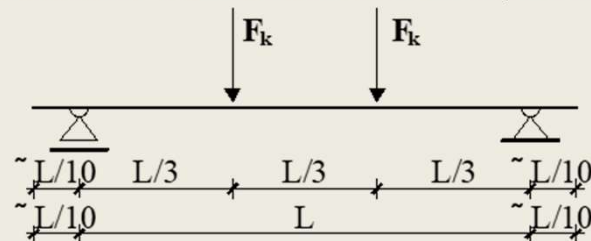
Slika 5. Dimenzije i uzorci grednih nosača



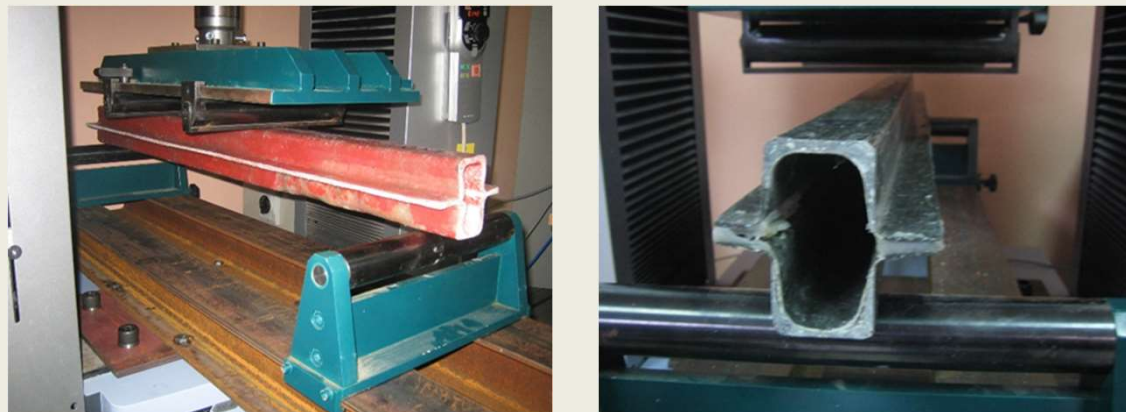
# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## *Ispitivanje nosača GFRP i RGFRP*

• Radi pouzdanijih rezultata ispitana su po **tri** gotovo ista nosača, a ispitivani su **4BPT** (četverotočkovnim savijanjem) metodom s čistim rasponom od **90 cm**, Udaljenost od ležaja do prve sile je **30 cm** i međusobna udaljenost sila **30 cm**. Ovim je postignut unos sile u **1/3** raspona što daje dovoljan dio nosača pod utjecajem **čistog savijanja**. Svi šuplji nosači od GFRP-a su opterećivani s prirastom sile od **100 N/s** pri **opterećivanju** te **250 N/s** pri **rasterećivanju** što predstavlja intenzitet opterećenja od oko **11-13 mm/min** odnosno ispitivanje je trajalo oko **10 min**. Nosači od osnovne stakloplastike su nazvani OŠ1, OŠ2 i OŠ3, a od reciklirane RŠ1, RŠ2 i RŠ3.



Slika 6. Gredni element za ispitivanje na savijanje



Slika 7. Eksperimentalni model grednog elementa

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## *Rezultati ispitivanja nosača GFRP*

- Na slici 8. vide se način popuštanja i sloma ispitivanih nosača OŠ kroz dijagrame sila - pomak. Radijusi tromosti poprečnih presjeka iznosili su  $i_y \cong 2,2\text{cm}$ ,  $i_z \cong 1,6\text{cm}$ ,  $i_x \cong 1,4\text{cm}$ .



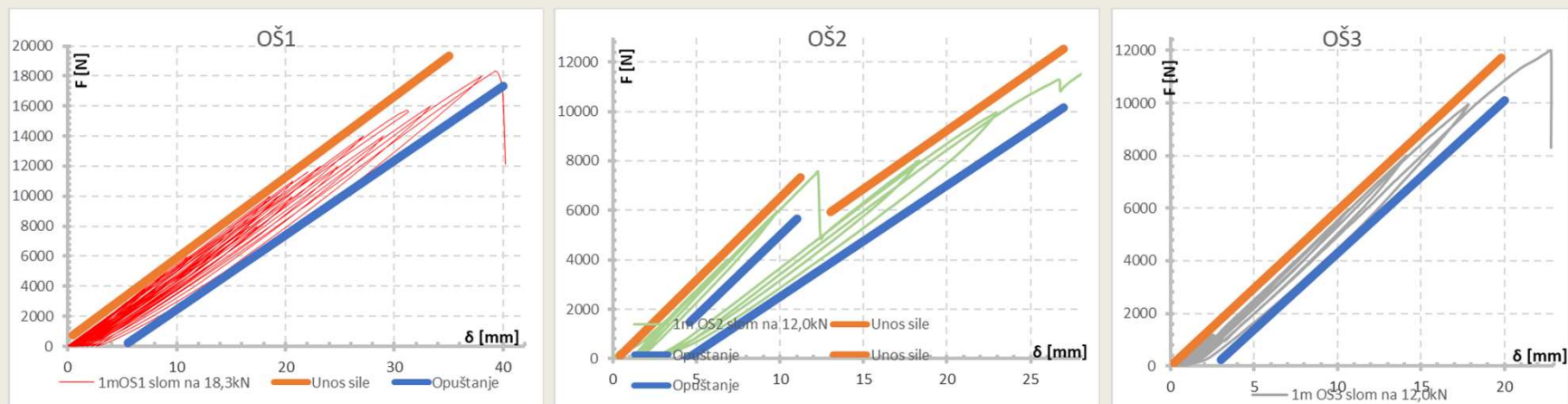
Slika 8. Načini popuštanja elemenata OŠ1, OŠ2 i OŠ3



# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## Rezultati ispitivanja nosača GFRP

- na slici 9. vide se način popuštanja i sloma ispitivanih nosača kroz dijagrame sila - pomak.
- nosač OŠ1 pokazuje gotovo potpuno elastično ponašanje nosača, odnosno gotovo **linearno** prirast krivulje sila/progib.
- Nosač OŠ2 također je pokazao uglavnom **linearno** ponašanje. Bitna razlika u ponašanju od prethodnog nosača vidljiva je u dva različita nagiba krivulje. Nosač je doživio slom u vidu **odvajanja** dvije polovice presjeka na samo jednoj strani, a nakon toga nastavljeno opterećivanje izazvalo je **lokalni** slom.
- Nosač OŠ3 ponaša se **linearno**, a ukupne plastične deformacije prije sloma dosegle iznos od oko 2 mm, što je zanemarivo. Nije pokazao očekivan način sloma nego je ukupni slom, koji je vidljiv u jakom padu sile na dijagramu nakon potpuno elastičnog ponašanja, uzrok stvaranju **plastičnih zglobova** upravo na mjestima unosa sile.
- U sva tri modela potvrđena je deformacija na mjestima koncentriranih opterećenja što ukazuje na potrebu povećanja površina oslonaca i mjestima opterećenja.



Slika 9. Dijagrami popuštanja elemenata OŠ1, OŠ2 i OŠ3

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## **Rezultati ispitivanja nosača RGFRP**

- Na slici 10. vide se način popuštanja i sloma ispitivanih nosača RŠ kroz dijagrame sila - pomak. Radijusi tromosti poprečnih presjeka približno su isti kao i kod prethodno ispitivanih nosača.

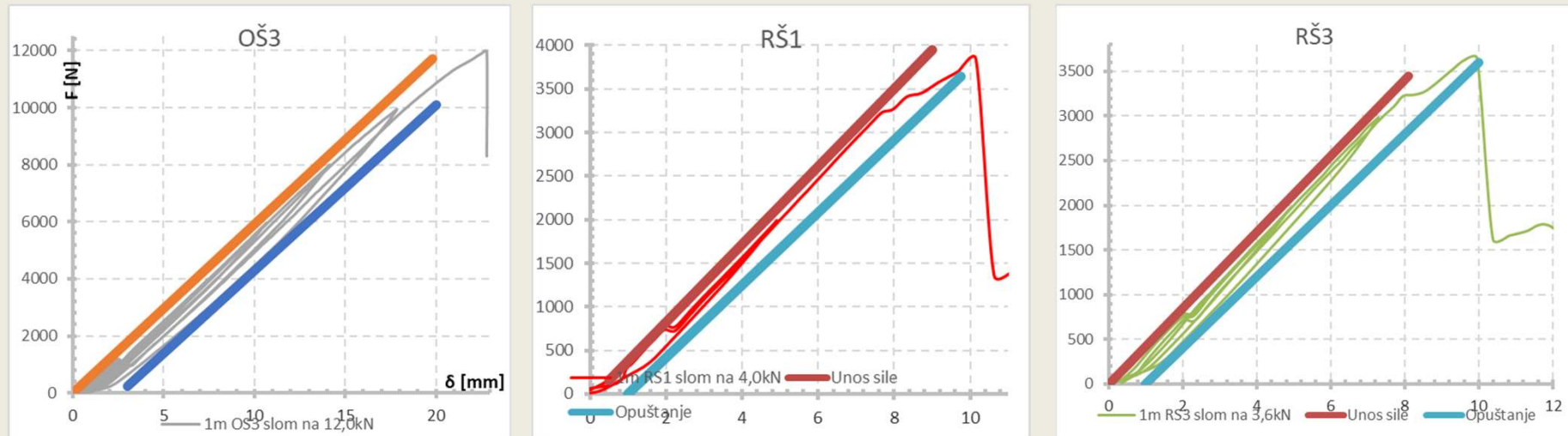


Slika 10. Načini popuštanja elemenata RŠ1, RŠ2 i RŠ3

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## **Rezultati ispitivanja nosača RGFRP**

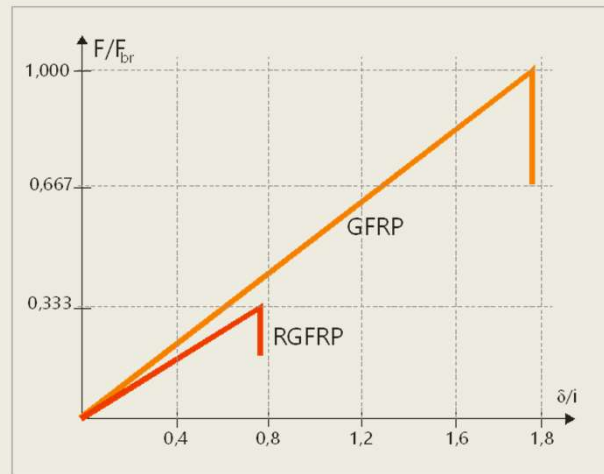
- na slici 9. vide se način popuštanja i sloma ispitivanih nosača kroz dijagrame sila - pomak.
- nosač RŠ1 Nosač je popustio, nakon relativno **kratkog** elastičnog područja, gotovo **krtim** lomom u vlačnoj zoni donje pojasnice te se slom odnosno pukotina proširila na spoj dvije polovice presjeka. Može ga se definirati kao elastičan nosač s krtim slomom.
- nosač RŠ2 pri iznosu sile od oko 75 % nosivosti počinje kroz područje drugačijeg nagiba krivulje pokazivati područje početka sloma te kao i prethodni uzorak RŠ1 nakon **kraćeg** elastičnih područja nastaje gotovo krti i brzi slom.
- nosač RŠ3 pokazuje **slične** karakteristike kao i prethodna dva nosača istog tipa.
- na sva tri modela gotovo je zanemariv udio plastičnih deformacija. Nakon gotovo krtog sloma donje pojasnice unos opterećenja je nastavljen, iako su preuzete sile od okvirno pola vrijednosti i nastavljeno je preuzimanje opterećenja koje je uzrokovalo razdvajanje polovica presjeka.



Slika 11. Dijagrami popuštanja elemenata RŠ1, RŠ2 i RŠ3

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## Usporedba i zaključci



Slika 12. Usporedba rezultata

- Na ispitivanim modelima od **izvorne** stakloplastike jasno je kako su u pravilu **lokalna** naprezanja premašena, odnosno, kako su nosači prije potpunog sloma uglavnom počeli popuštati lokalno, u mjestima koncentriranih opterećenja i ležajeva. To je redovito jedan od većih problema primjene stakloplastike u elementima nosivih konstrukcija te ukazuje na potrebu **istraživanja** lokalne nosivosti kao i povećanja površine na mjestima zadavanja opterećenja i oslanjanja.
- S druge strane, na ispitivanim modelima od **reciklirane** stakloplastike jasno je kako je u pravilu gubitak nosivosti **trenutan**, odnosno usporediv s krtim lomom. Glavni uzrok tome je količina recikliranog materijala umješana s bazom, tj, smolom što ukazuje na **oprez** s količinama reciklaže prilikom proizvodnje.
- **Odnos** nosivosti nosača GFRP i RGFRP vidi se na bezdimenzionalnom dijagramu na slici 12. Na apscisi se nalazi odnos progiba u sredini nosača i radijusa tromosti, a na ordinati odnos sile i slomne sile. Modeli nosača od reciklirane stakloplastike pokazuju bolje karakteristike materijala i povoljniju krivulju nosivosti, ali uz manju ukupnu nosivost u odnosu na nosače od izvorne stakloplastike.

- Primjena ovakvih nosača eventualno je prihvatljiva za lagane i **manje zahtjevne** konstrukcije pokrova i nadstrešnica, gdje opterećenja neće premašiti **kratak** raspon elastičnog područja. Dakle, u tom rasponu nosivosti materijal je postojanih karakteristika, što je jedna od bitnih karakteristika materijala za konstrukcije.
- Primjenjivost grednih elemenata iz ovakvog materijala donekle je **opravdana** i u manjoj cijeni sirovine koja je dobivena recikliranjem izvorne stakloplastike. Prestankom upotrebe i dotrajalosti širokog spektra proizvoda iz stakloplastike u svijetu, kao što su bazeni, kamp kuće, rezervoari, plovila, vozila i sl. stvara se **izvor** velikih količina materijala za recikliranje, što je između ostalog jedan od najvećih razloga opravdanosti proizvodnje ovakvih i sličnih elemenata.
- Generalno, šuplji se nosači od oba materijala ne preporučaju za uobičajenu uporabu u grednim elementima te ukazuju na **potrebu sprezanja** s drugim materijalima.

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija



Slika 13. Neka od daljnjih istraživanja

## **Literatura**

- [1] J.C. Gerdeen, H.W. Lord, R.A.L. Rorrer, *Engineering Design with Polymers and Composites*, CRC Press, Boca Raton, 2006.
- [2] T. Štefić, A. Jurić, P. Marović, Testing of the material characteristics of recycled glass fibre reinforced polymer for the use in bearing structures, 20<sup>th</sup> International Conference on Composite Materials Copenhagen, 19-24<sup>th</sup> July 2015
- [3] "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites," D 3039, *Annual Book of ASTM*, American Society for Testing and Materials
- [4] "Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional or Crossply Fiber-Resin Composites," D 3410, *Annual Book of ASTM*, American Society for Testing and Materials
- [5] D. Walrath and D.F. Adams, "*Iosioescu Shear Properties of Graphite Fabric/Epoxy Composite Laminates*," UWME-DR-501-103-1, University of Wyoming
- [6] S. Junušić, T. Štefić, A. Jurić, 'Deformation in multilayer fiberglass beams at different positions of concentrated load', e-GFOS (8), 2014
- [7] S. Junušić, T. Štefić, A. Jurić, "Numerical model of local kneading of a glass fibre reinforced beam", e-GFOS (10), 2016

# Mogućnost primjene reciklirane stakloplastike u elementima konstrukcija

## Possibilities of application of recycled fiberglass in elements of load-bearing structures

*Hvala na pažnji!*

