

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ

M85 – Ново техничко решење у фази реализације, тестирано у овлашћеној институцији

ОЈАЧАЊЕ ДРВЕНИХ НОСАЧА У ЗОНИ РЕДУКЦИЈЕ ВИСИНЕ ПРЕСЕКА ПОМОЋУ GFRP ШИПКИ

АУТОРИ:

доц. др Марија Тодоровић, маг. инж. грађ, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

в. проф. др Иван Глишовић, дипл. грађ. инж, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж., професор у пензији, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

Београд, децембар 2022.

1. АУТОРИ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

доц. др Марија Тодоровић, маг. инж. грађ, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

в. проф. др Иван Глишовић, дипл. грађ. инж, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж., професор у пензији, Универзитет у Београду, Грађевински факултет, Булевар краља Александра 73, Београд

2. НАЗИВ ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Ојачање дрвених носача у зони редукације висине пресека помоћу GFRP шипки

3. КЉУЧНЕ РЕЧИ

дрво, носач, редукација висине пресека, ојачање, GFRP шипке

4. ЗА КОГА ЈЕ РЕШЕЊЕ РАЂЕНО

Пирамида д.о.о.

Паланка 78, 22000 Сремска Митровица

5. ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ КОМПЛЕТИРАНО

2022.

6. ГОДИНА КАДА ЈЕ РЕШЕЊЕ ПОЧЕЛО ДА СЕ ПРИМЕЊУЈЕ И ОД КОГА

Планирана примена – 2023. година (техничко решење у реализацији)

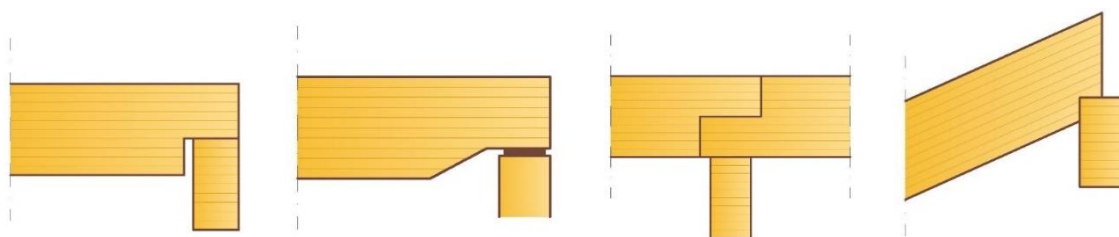
7. ОБЛАСТ И НАУЧНА ДИСЦИПЛИНА НА КОЈОЈ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Грађевинарство, ужа научна област Дрвене конструкције

8. ПРОБЛЕМ КОЈИ СЕ ТЕХНИЧКИМ РЕШЕЊЕМ РЕШАВА

Глобални тренд одрживог развоја који подразумева примену еколошких и обновљивих материјала диктира све већу потребу за применом дрвета у грађевинској индустрији која је један од највећих произвођача отпада и загађивача животне средине. Дрво представља важан грађевински материјал због карактеристика као што су: велика чврстоћа наспрам мале тежине, лака обрада, велика могућност обликовања, једноставна монтажа и атрактиван изглед. Поред тога, дрво је рециклажан и биоразградив материјал са минималним енергетским захтевима у процесу производње, обраде и примене. Захтеви савременог грађевинарства као што су трајност, енергетска ефикасност и естетика изискују оптимално коришћење традиционалних грађевинских материјала и употребу савремених материјала, уз примену нових технологија у процесу производње и техничких иновација у процесу изградње. Како би се постигла захтевана својстава конструктивних елемената, данас је све чешћа појава комбиновања дрвета са различитим савременим материјалима.

Редукција висине дрвених носача се врши из разлога ограничења висине код ослонаца, ради остваривања веза, побољшања бочне стабилности, вођења инсталација итд. (слика 1) Носивост дрвених носача на местима нагле промене висине пресека, на засеченим деловима, знатно је умањена, уз појаву велике концентрације напона. Редукција висине попречног пресека дрвених носача не препоручује се без адекватног ојачања. За постизање жељене носивости дрвених носача на местима редукције висине пресека могу се користити како спољашње постављени конструктивни елементи ојачања, тако и они који се постављају унутар попречног пресека. Циљ овог техничког решења је био да анализира могућност примене савремених композитних материјала у комбинацији са дрветом.



Слика 1. Примери редукције висине пресека дрвених носача

Поред мале сопствене тежине и врло високих механичких карактеристика, примена FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) композита нуди доста погодности као што су: једноставност, изузетна многостраност, велика могућност обликовања, погодан и лак транспорт, примена и у ограниченом простору, изузетна трајност, као и минимално ремећење објекта и његових корисника у току интервенције. Успешна примена композитних материјала у комбинацији са дрветом је изводљива захваљујући компатибилности и комплементарности њихових карактеристика. На пример, мала тежина дрвета, што је једна од најзначајнијих карактеристика, није угрожена применом композитних ојачања. Поред овога, најочигледнији недостатак дрвета, какав је изразита механичка хетерогеност услед присуства бројних дефеката, може се умањити повезивањем са другим конструктивно ефикасним материјалом какав је FRP композит.

У оквиру овог техничког решења, за ојачање редукованог попречног пресека дрвених носача су изабране GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) шипке (слика 2), које се првенствено користе као арматура плочастих елемената од бетона, јер представљају доступно и економски исплативо средство за ојачање. Примена GFRP шипки као ојачања дрвених носача у зони редукције висине пресека се односи како на нове објекте,

тако и на санацију и реконструкцију постојећих дрвених конструкција, у циљу побољшања њихове носивости и употребљивости.



Слика 2. GFRP шипке

9. СТАЊЕ РЕШЕНОСТИ ПРОБЛЕМА У СВЕТУ

У прошлости, ојачање дрвених носача изложених савијању је најчешће вршено применом челичних елемената, било шипки или плоча. Спрегнутим дејством дрвета и челика добијани су добри резултати, али главни недостатак оваквих интервенција на побољшању носивости и дуктилности дрвених елемената је некомпатибилност ова два материјала (велика сопствена тежина, различито понашање у односу на варијације влажности и температуре, као и понашање при пожару). Зато се у последње време прибегло испитивању могућности ојачања и санације дрвених носача применом савремених материјала попут различитих типова FRP (*Fibre Reinforced Polymer*) композита. Постоји велики број испитивања, као и примера употребе ових материјала у пракси. Као ојачање користе се траке, тканине и шипке на бази FRP композита са карбонским, стакленим, арамидним, базалтним и са другим природним влакнима. У радовима више различитих аутора [1–10], до сада је испитано понашање при савијању монолитних и лепљених ламелираних дрвених носача ојачаних FRP шипкама. Испитивања су доказали ефикасност ових материјала за ојачање дрвених носача изложених савијању.

Различите технике ојачања, са различитим степеном ефикасности, тестиране су са циљем повећања носивости и крутости дрвених носача на месту редуције висине попречног пресека. Истраживања су углавном била фокусирана на примену завртњева за дрво и профилисаних шипки од челика постављених унутар пресека, као и челичних и дрвених плоча постављених са спољашње стране пресека. Све ове технике ојачања постижу значајне и корисне резултате, али само неке од њих су развијене и/или комерцијализоване и скоро ниједна није достигла статус да буде универзално препозната и прихваћена. Резултати интервенције ојачања зависе од врсте дрвета, величине и облика редуције висине попречног пресека носача, начина постављања ојачања итд.

Möhler & Mistler [11,12] су испитивали различите технике ојачања дрвених носача на месту редуције висине попречног пресека. Користили су завртњева, челичне шипке, металне плоче и дрвене плоче (закуцане ексерима и лепљене). Прелиминарном анализом, предвиђено је да се постављањем ојачања носивост засеченог дела носача повећа 1,7 до 2,2 пута. Међутим, ојачани носачи су достигли лом много раније, достижући само вредност носивости на смицање у ослабљеном попречном пресеку. Најлошије резултате су дали завртњеви.

Coureau и група аутора [13] су испитивали отварање пукотина на месту редукције висине носача услед концентрације напона. Носачи су ојачани FRP тканинама и испитани на савијање. Закључци донети овим испитивањем су следећи: ојачање премошћава пукотину и значајно повећава капацитет носивости носача; при лому ојачаних носача дошло је до одлепљивања примењених тканина, али не и до њиховог цепања; примена ојачања није променила облик лома услед прекорачења чврстоће дрвета на затезање управно на влакна и чврстоће дрвета на смицање, у лом услед достизања носивости на савијање.

Blaß & Bejtka [14] у свом раду су испитивали носаче са редукованом висином попречног пресека код ослонца ојачане завртњевима. Лом ојачаних носача је уследио услед прекорачења чврстоће на затезање управно на влакна и чврстоће на смицање. Дошло је до иницијалног отварања пукотине, а затим до њене стабилне пропагације све до лома када је дошло до извлачења завртњева.

Gomez & Svecova [15] су вршили испитивања старих носача дрвених мостова ојачаних и на смицање и на савијање. Два слоја GFRP тканина на доњој затегнутој страни, постављена целом дужином и ширином елемената, су представљала ојачање на савијање. Ојачање на смицање, на местима редукције висине носача, су биле такође GFRP тканине. Примена ојачања на савијање је довела до повећања крутости носача од 5,5 до 52,8% у односу на контролну серију, а у зависности од степена оштећења самих узорака пре интервенција. У случају носача са пукотинама позиционираним близу средине висине елемента, дужине веће од висине носача, долазило је до лома услед смицања и одлепљивања ојачања на смицање. Када су пукотине ближе ивицама, овакав лом код ојачаних носача је мање вероватан.

Jockwer [12] је у оквиру своје докторске дисертације дао резултате испитивања спроведених на *ETH Zurich*, *LNU Växjö*, и *Empa Dübendorf*. Испитане су различите димензије носача, затим различите геометрије редукованог дела пресека, као и типови ојачања. Као спољашње ојачање су коришћене шперплоче и тканине на бази карбонских влакана, док су се за унутрашње ојачање користили самоуграђујући завртњеви са целом дужином у навоју и челичне шипке са навојем. При томе су варирани и углови под којима је постављено ојачање – 45°, 60° и 90° у односу на подужну осу носача. Евидентирано је значајно повећање носивости ојачаних у односу на неојачане носаче, али постоје разлике у зависности од врсте и положаја ојачања. Крти лом на месту засека је уочен и код ојачаних носача, а коначни лом је изазван смицањем. Најбоље резултате је дало ојачање постављено под углом од 45°. Што се тиче испитивања са спољашње постављеним ојачањем у виду тканина на бази карбонских влакана, при лому је долазило до одлепљивања и одвајања ојачања од дрвета.

Постојећа испитивања су показала ефикасност примењених техника ојачања носача са редукованом висином пресека. Међутим, ниједна техника ојачања не обезбеђује носивост носача као када нема редукције висине пресека. И поред постојања одређеног броја испитивања, системи ојачања применом савремених FRP композита су недовољно истражени, а нарочито употреба FRP шипки.

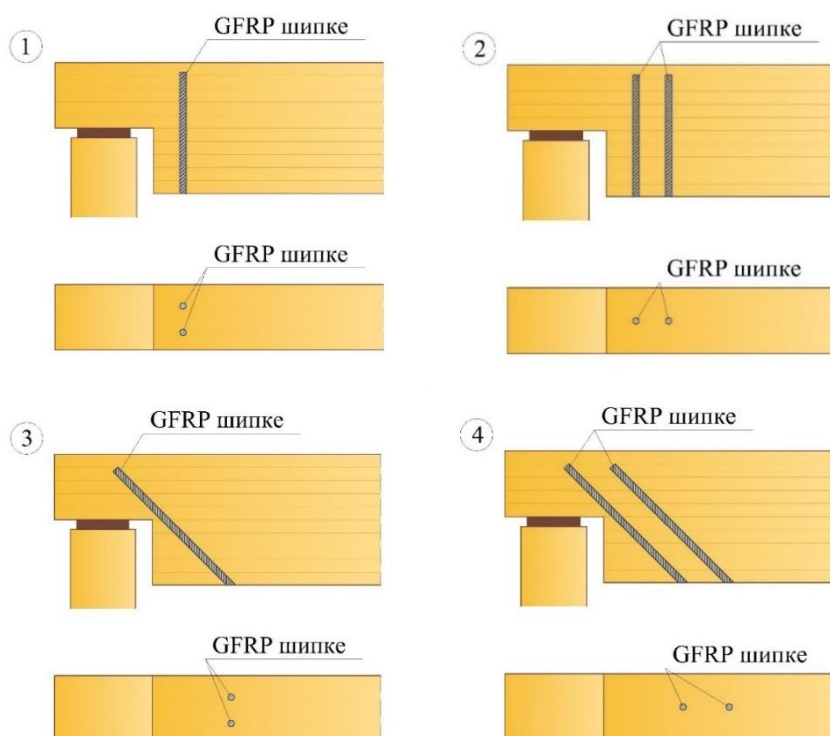
Како би се превазишли проблеми везани за редукцију висине носача над ослонцима предложено је техничко решење ојачања дрвених носача у зони редукције висине пресека помоћу GFRP шипки. Предност примене овог решења је компатибилност дрвета и композитног материјала на бази стаклених влакана, као и велика носивост GFRP шипки која може обезбедити носивост носача као да не постоји редукција висине попречног пресека.

10. ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

10.1. Приказ решења ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека помоћу GFRP шипки

Техничко решење се састоји из постављања GFRP шипки у претходно избушене рупе испуњене лепком. Техничко решење је предложено у четири варијанте (слика 3): 1) постављање шипки под углом од 90° , једна поред друге у попречном пресеку; 2) постављање шипки под углом од 90° , једна иза друге; 3) постављање шипки под углом од 45° , једна поред друге у попречном пресеку; 4) постављање шипки под углом од 45° , једна иза друге.

Како би се остварио спој између дрвета и шипки користи се лепак који је компатибилан са примењеним композитним материјалом и дрветом, у складу са препорукама произвођача. Рупе се буше већег пречника од шипки, како би остало довољно простора за остваривање слоја лепка довољне дебљине да се обезбеди адхезија између шипки и лепка, као и лепка и дрвета. Минимална ивична и међусобна растојања средстава за ојачање треба да су у складу са препорукама датим за штапаста спојна средства у Еврокоду 5 [16]. Рупе треба припремити тако да буду чисте и суве, како би се остварила правилна и потпуна веза између дрвета и ојачања. GFRP шипке се постављају у пројектовани положај лаганим увртањем, тако да се вишак лепка истисне из рупе. Ојачане носаче треба оставити неоптерећене минимално 7 дана да би лепак постигао потребну чврстоћу.



Слика 3. Ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца помоћу GFRP шипки

Овако предложено техничко решење се може применити како за ојачање нових конструктивних елемената и решавање проблема концентрације напона у ослабљеном делу пресека, тако и за ојачање и санацију постојећих греда и носача од дрвета. Ојачање постављањем шипки у припремљене рупе не мења изглед нити димензије носача док

истовремено штити шипке од спољашњих утицаја, чинећи овај метод оптималним како са аспекта механичког понашања, тако и са естетске стране.

Да би се предложено техничко решење успешно примењивало у пракси неопходно је утврдити механичко понашање ојачаних носача са редукавном висином пресека, затим начин извођења процедуре ојачања и одговарајуће аналитичке методе прорачуна. Са тим циљем извршена су одговарајућа експериментална и нумеричка испитивања ојачања дрвени носача са редукованом висином пресека.

10.2. Експериментално испитивање ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека помоћу GFRP шипки

Сва експериментална испитивања су спроведена у лабораторијама Грађевинског факултета Универзитета у Београду. Испитане су физичке и механичке карактеристике свих употребљених материјала (дрво и GFRP шипке), а затим је извршено главно експериментално испитивање на неојачаним и ојачаним носачима од лепљеног ламелираног дрвета са редукованом висином пресека код ослонаца. Неојачани носачи су испитани како би се извршила процена ефикасности ојачања. Испитано је укупно 25 носача – 5 неојачаних, 10 ојачаних GFRP шипкама постављеним под углом од 90° у односу на подужну осу носача и 10 ојачаних GFRP шипкама постављеним под углом од 45° у односу на подужну осу носача. Табела 1 приказује програм експерименталних испитивања, док су димензије носача, са шемама ојачања дате на сликама 4 - 6.

Табела 1. Програм експерименталног испитивања

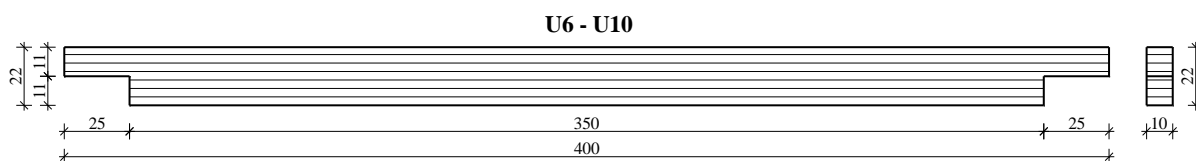
| Серија | Опис | Ојачање | Број узорака |
|--------|---|--------------|--------------|
| U | Неојачани носачи | / | 5 |
| R-f90 | Носачи ојачани GFRP шипкама под углом од 90° | 2 x 2Ø10x220 | 2 x 5 |
| R-f45 | Носачи ојачани GFRP шипкама под углом од 45° | 2 x 2Ø10x311 | 2 x 5 |

Серија U представља неојачане носаче. Серија R-f90 представља носаче ојачане са по две GFRP шипке код оба ослонаца, постављене под углом од 90° у односу на подужну осу носача, с тим што је вариран положај шипки, као што је приказано на слици 5. Серија R-f45 обухвата носаче ојачане са по две GFRP шипке код оба ослонаца, постављене под углом од 45° у односу на подужну осу носача, где је такође вариран положај шипки, као што је приказано на слици 6. Све димензије носача на сликама од 4 до 6 су дате у cm, док су димензије ојачања дате у mm.

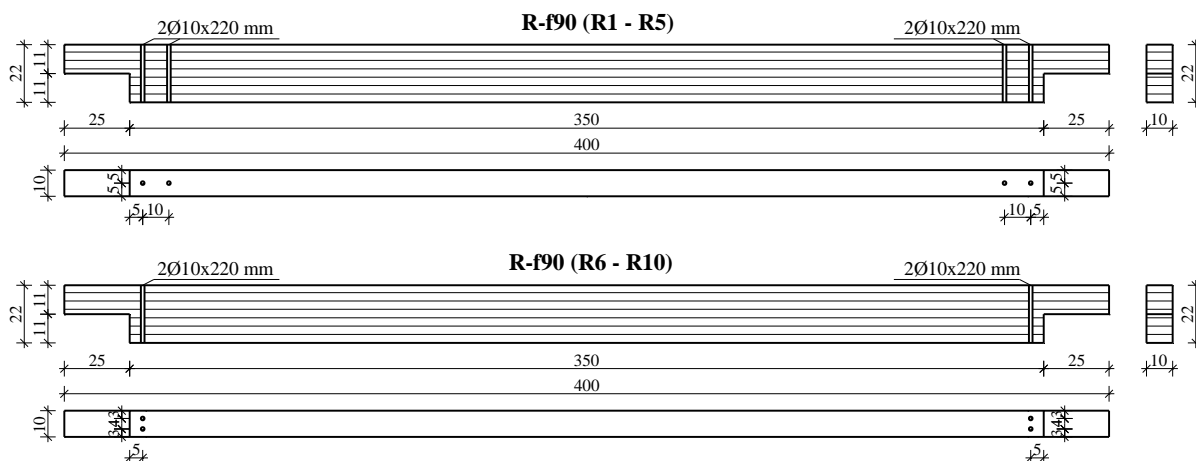
Носачи су произведени у фабрици „Пирамида“, док је процес ојачања носача извршен на Грађевинском факултету Универзитета у Београду. Сви носачи су израђени од четинара (смрека), а према произвођачу су класирани као GL22h у складу са EN 14080 [17]. У фабричким условима, дрвена грађа је сушена до достизања процента влажности од 12%.

Носачи су испитани према стандарду EN 408 [18]. Укупна дужина свих носача је била 4 m, а попречни пресек 10 x 22 cm. На крајевима носача висина је редукована на пола, па је висина овог дела била 11 cm, а дужина редукованог дела пресека 25 cm. Коефицијент α , који представља однос редуковане висине $h_{ef} = 11$ cm и пуне висине носача $h = 22$ cm, износи $\alpha = 0,5$. Носачи су формиран од 7 ламела ширине 10 cm и дебљине 32 mm. Последње ламеле са горње и доње стране носача су обрађене на дебљину од 30 mm како би висина носача била 22 cm. Ламеле нису имале попречне наставке, већ су све биле из комада, како би се избегао утицај ових наставка на резултате експеримента. У зонама највећих напона су претежно стављене ламеле бољег квалитета да би се избегао утицај дефеката дрвета на носивост носача. Ламеле су

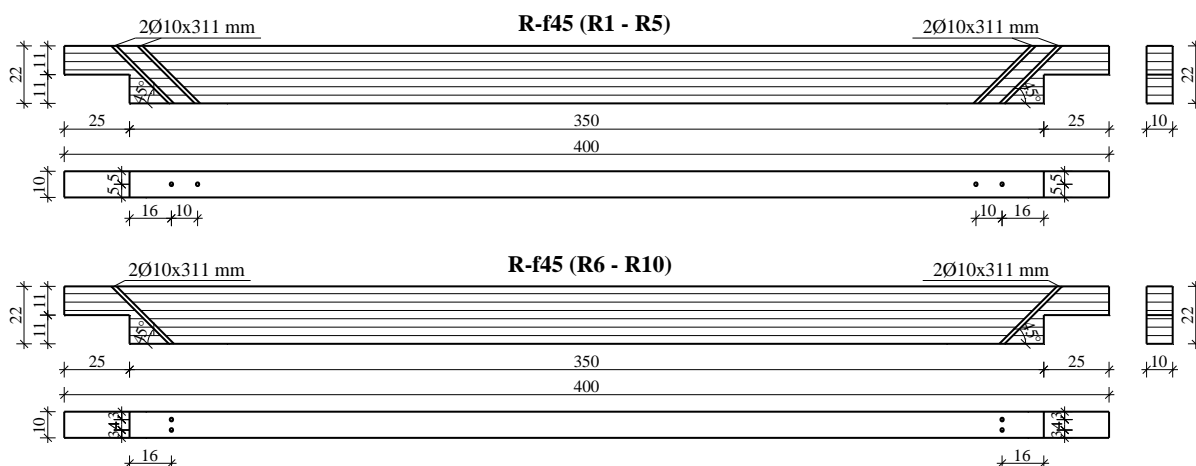
међусобно спојене фенол-резорцин лепком. Спајање је извршено под притиском од 0,5 - 0,8 МПа током 12h, на температури од око 20°C.



Слика 4. Диспозиција носача – Серија U



Слика 5. Диспозиција носача – Серија R-f90



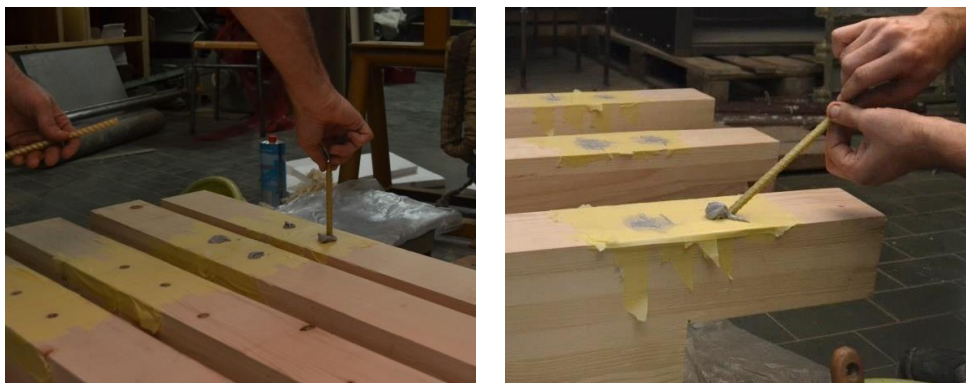
Слика 6. Диспозиција носача – Серија R-f45

Као ојачање коришћене су ребрасте GFRP шипке Ø10 произвођача „Композит Арматура“ из Крагујевца. Ове шипке представљају полимере армиране стакленим влакнима са епоксидном матрицом. Механичке карактеристике GFRP шипки дате од стране произвођача су: чврстоћа на затезање 800 МПа и модул еластичности 45 GPa.

Рупе за средства за ојачање су избушене у фабрици у складу са датим диспозицијама на сликама 4 до 6. Рупе за GFRP шипке су биле пречника Ø14 како би остало довољно простора за остваривање слоја лепка дебљине 2 mm, чиме је била обезбеђена адхезија између шипки и лепка, као и лепка и дрвета. Усвојена минимална ивична и међусобна растојања средстава за ојачање су у складу са препорукама датим у Еврокоду 5 [16] и Немачком националном анексу Еврокода 5 [19].

Пре постављања GFRP шипки рупе су пажљиво припремљене тако да буду чисте и суве, како би се остварила правилна и потпуна веза између дрвета и ојачања. Чишћење

рупа је извршено продувавањем помоћу ваздушног млаза. GFRP шипке су исечене на потребну дужину од 22 cm за носаче са ојачањем постављеним управно на подужну осу носача и на дужину од 31 cm за носаче са ојачањем под углом од 45° у односу на подужну осу носача. При постављању GFRP шипки носачи су заштићени око рупа у случају да дође до процуривања лепка. Лепак који је коришћен за постављање шипки унутар пресека носача је био епоксидни лепак *Sikadur-30* произвођача „Sika“. Пошто се ради о двокомпонентном лепку, његове компоненте А и В су помешане у тежинском односу 3:1, како је наведено у техничком листу произвођача. Након тога је извршено мешање у трајању од 3 минута, док материјал није постао гладак и једнообразне сиве боје. У складу са препоруком произвођача, ова мешавина је затим пресута у чисту и суву посуду и мешана 1 минут малом брзином како би се избегао улазак ваздуха. Отворено време лепка на температури од око 20°C је 90 минута, па се водило рачуна да увек буде измешана само она количина која се може употребити у предвиђеном року. За потребе испуњавања рупа *Sikadur-30* епоксидним лепком коришћене су празне тубе за силикон - картуше, које су након завршеног процеса мешања напуњене лепком до врха. На картуше је постављено PVC цево како би се обезбедило уједначено и потпуно испуњавање рупа. Користећи пиштољ за силикон, епоксидни лепак је утиснут до отприлике $2/3$ висине припремљених рупа. Након тога су шипке постављене у најкраћем могућем року, пре почетка очвршћавања лепка. GFRP шипке су постављене у пројектовани положај лаганим увртањем, тако да је вишак лепка истиснут из рупе и уклоњен шпаклом. Процедура постављања правих и косих шипки је приказана на слици 7. По завршетку процеса, ојачани носачи су остављени да одстоје 7 дана на температури од $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ да би лепак постигао своју потребну чврстоћу.

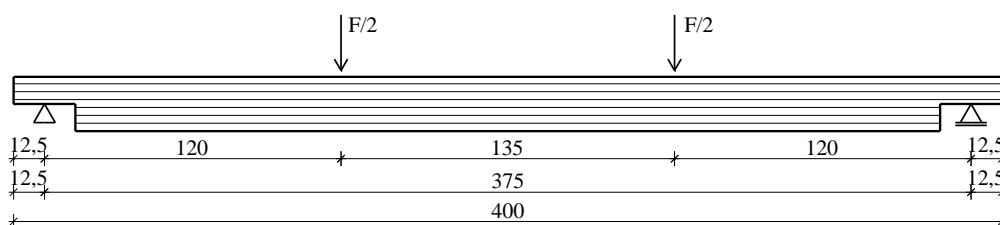


Слика 7. Постављање GFRP шипки

Експериментално испитивање је извршено у Лабораторији за испитивање конструкција, на Грађевинском факултету Универзитета у Београду. Сви носачи су испитани као просте греде распона 375 cm, што одговара препоруци стандарда EN 408 да распон носача буде $18h \pm 3h$, где је h висина попречног пресека носача. У овом случају је распон носача био једнак $17h$. Носачи су оптерећени приближно у трећинама распона, такође у складу са стандардом EN 408. При томе се водило рачуна да растојање између концентрисаних сила буде $6h$, што је приближно 135 cm у случају овог испитивања. Ослонци су постављени на 12,5 cm од крајева носача, тј. у средини дужине редукованог дела пресека. Коefицијент β , којим се дефинише зависност пуне висине носача и дужине редукованог дела пресека до ослонаца, износи $\beta = 0,568$. Испитивање је извршено у челичном раму како је приказано на слици 8. Диспозиција експерименталног испитивања на савијање неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца представљена је на слици 9.



Слика 8. Носач постављен у рам за испитивање



Слика 9. Диспозиција експерименталног испитивања носача

Оптерећење је нането преко хидрауличке пресе капацитета 350 kN, које је затим разложено са једне у две концентрисане силе помоћу челичног профила НЕВ 160. Како би се обезбедило концентрисано оптерећење постављена су два челична лежаја пречника 26 mm. На местима уношења силе на носач су стављене две челичне плочице димензија 10 x 100 x 160 mm, са удубљењем у средини за поменуте челичне лежајеве. Ове плочице имају улогу да спрече локална оштећења дрвених носача услед концентрације напона на местима уношења силе. Ослањање носача је обезбеђено помоћу челичних лежајева пречника 28 mm. На местима ослонаца су на дрвене носаче постављене челичне плочице димензија 5 x 100 x 160 mm, које имају улогу да спрече локална оштећења дрвета услед утискивања лежајева.

Ради утврђивања глобалне крутости носача при савијању потребно је нанети оптерећење максимално до 40% од силе при којој долази до лома, према EN 408 . За неојачане носаче је усвојено да то буде 5 kN, док су ојачани носачи оптерећени до 10 kN. Након тога су носачи растерећени, да би се приступило испитивању на савијање. Брзина наношења оптерећења при испитивању носача на савијање до лома је усвојена 4 kN/min, како би до лома неојачаних носача дошло за максимално 5 минута. Иста брзина наношења оптерећења је задржана и код носача који су ојачани завртњевима и GFRP шипкама да би добијени резултати били упоредиви са резултатима неојачаних носача. У случају ојачаних носача до лома је долазило за 8 - 12 минута.

При експерименталном испитивању, сила је мерена помоћу дозне *HBM С6А* носивости 2 MN и тачности 0,05 kN. Угиб у средини носача је мерен угибомером *HBM 1-WA/200mm-L* са ходом ± 100 mm и тачношћу од 0,01 mm. Размицање тачака на местима редуције висине пресека (засека), где је долазило до отварања пукотина, мерено је обострано са по два угибомера код оба ослонаца. Дакле, на местима засека су коришћена четири угибомера *HBM 1-WA/20mm-L* са ходом ± 10 mm и тачношћу од 0,01 mm. Мерна база угибомера за размицање тачака је била 60 mm. Подаци мерења деформација са

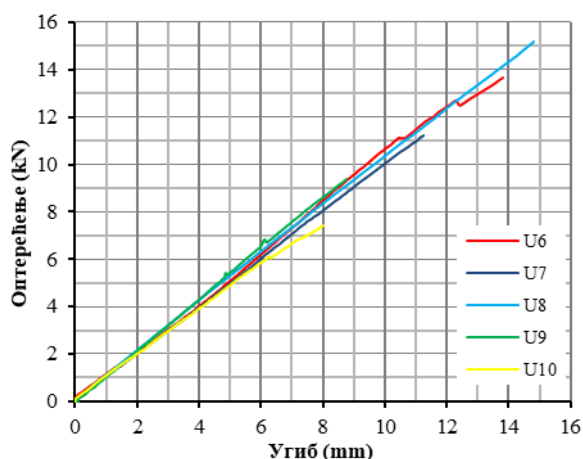
угибомера и нанетог оптерећења са дозне су прикупљени помоћу аквизиционог система (*HBM MGC*), са фреквенцијом од 1 Hz.

Влажност дрвета испитаних носача одређена је помоћу влагомера *Gann Hydromette HTR 300*, са одговарајућим електродама за дрво. Сви носачи су пре испитивања чувани на температури од $20\pm 2^\circ\text{C}$ и релативној влажности ваздуха од $45\pm 5\%$. Процент влажности дрвета је утврђен тако што је на сваком од узорака измерена влажност на произвољно изабрана четири места, а затим је одређена средња вредност. Измерена средња вредност за све узорке је износила 11,5%, са коефицијентом варијације 3,4%.

10.3. Резултати експерименталног испитивања

Неојачани носачи

Неојачани носачи су показали линеарно еластично понашање до лома, као што се види са дијаграма оптерећење - угиб приказаних на слици 10. Лом је био крте природе и наступио је нагло, без претходних упозорења. До лома неојачаних носача је дошло услед достизања чврстоће на затезање управно на влакна на местима редуције висине пресека (слика 11). Доминантан лом код неојачаних носача је отварање пукотине као последица затезања управно на влакна. Након отварања пукотине код свих носача ове серије дошло је до њеног неконтролисаног раста, скоро до половине носача, чиме је он подељен на два дела – горњи и доњи.



Слика 10. Дијаграма оптерећење - угиб за Серију U

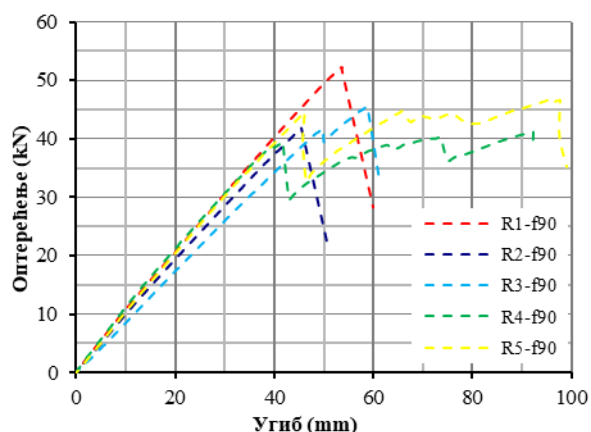


Слика 11. Карактеристичан лом неојачаних носача – Серија U, носач U6

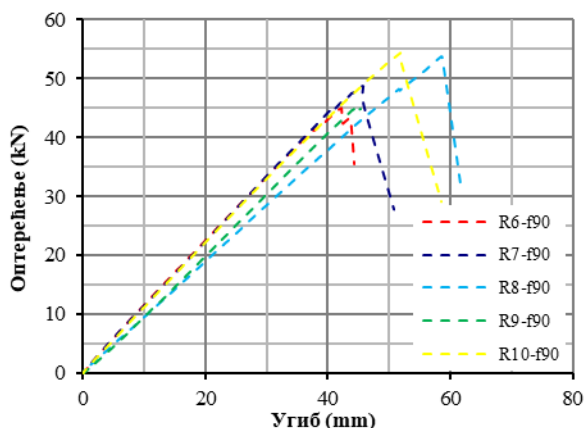
Ојачани носачи

Носачи са редукованом висином пресека ојачани GFRP шипкама (Серија R-f) су достизали како лом услед смицања, тако и лом услед савијања. У случају већине носача понашање до лома је било линеарно еластично, док је код пар носача долазило до пластификације притиснутих влакана и нелинеарног понашања пре лома.

Дијаграма оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене вертикално једна иза друге дуж подужне осе носача (узорци од R1-f90 до R5-f90) приказани су на слици 12. Дијаграма оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене вертикално једна до друге у попречном пресеку (узорци од R6-f90 до R10-f90) приказани су на слици 13. Дијаграма су приказани засебно за носаче R1-f90 до R5-f90 и носаче R6-f90 до R10-f90 како би се анализирао утицај различитих диспозиција постављања вертикалних GFRP шипки на механичко понашање носача. Оваква анализа има за циљ доношење закључка о оптималном положају ојачања носача са редукованом висином пресека код ослонаца.



Слика 12. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R1 - R5)



Слика 13. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R6 - R10)

У случају носача R1-f90, R2-f90 и R3-f90 лом се догодио услед савијања, у доњој затегнутој зони (слика 14), док се у случају носача R4-f90 и R5-f90 лом догодио услед смицања, са извлачењем GFRP шипки (слика 15). Поред тога што је знатно повећана носивост у односу на неојачане узорке, понашање носача је било дуктилније. Као што је већ речено, у случају три од пет носача је облик лома промењен из локалног, услед затезања управно на влакна и смицања, у глобални лом услед савијања. И код носача ојачаних GFRP шипкама је долазило до иницирања пукотина на местима нагле промене висине, али су шипке успешно спречиле прекомерно отварање истих. Носачи R1-f90, R2-f90 и R3-f90, чији се лом догодио услед савијања, имали су линеарно еластично понашање и нису показали знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони. Лом у случају ових греда је претежно инициран на местима дефеката и кврга у дрвету.



Слика 14. Лом услед савијања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90



Слика 15. Лом услед смицања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90

Лом услед савијања се догодио код носача R6-f90, R9-f90 и R10-f90 у доњој затегнутој зони (слика 16), док се код носача R7-f90 и R8-f90 догодио лом, односно губитак носивости, услед смицања, без извлачења GFRP шипки (слика 17). Дакле, у случају три од пет носача је постигнута промена облика лома у зони засецања у глобални лом услед савијања. Поред тога, код свих пет носача је знатно повећана носивост и деформабилност у односу на неојачане носаче. Међутим, носивост је повећана и у односу на носаче са две GFRP шипке постављене вертикално једна иза друге (R1-f90 до R5-f90), што говори да је овакав распоред ојачања повољнији. У случају лома носача

услед смицања није дошло до прекомерног отварања пукотине, већ само до њене пропагације целом дужином греде. Носачи R6-f90, R9-f90 и R10-f90, чији се лом догодио услед савијања, нису показали знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони, па је и у овом случају понашање носача у еластичној области. Такође, и код ових носача је лом претежно био инициран на местима дефеката у дрвету, у доњој затегнутој зони.

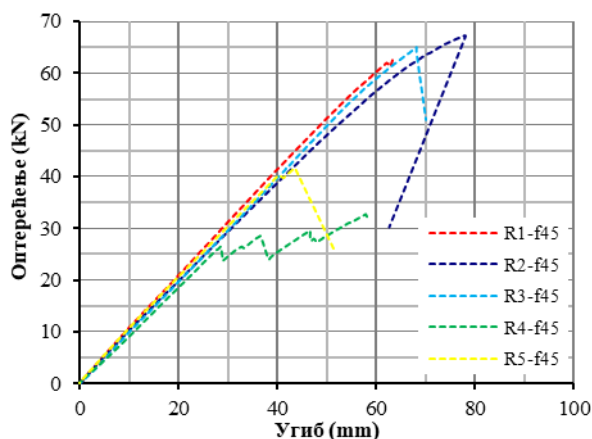


Слика 16. Лом услед савијања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90

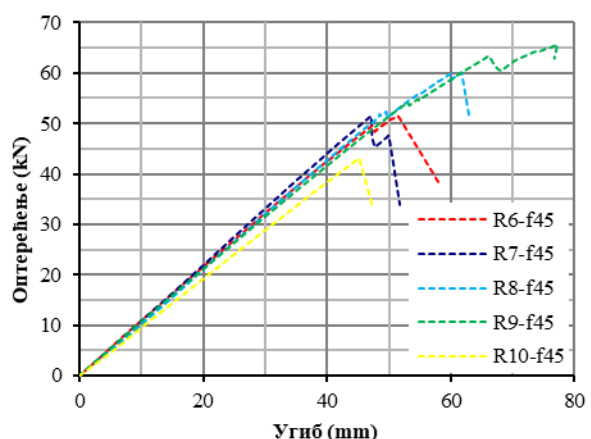


Слика 17. Лом услед смицања носача ојачаних вертикалним GFRP шипкама – Серија R-f90

На слици 18 су приказани дијаграми оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене косо (под углом од 45°) једна иза друге дуж подужне осе носача (узорци од R1-f90 до R5-f90). Дијаграми оптерећење - угиб за ојачане носаче код којих су по две GFRP шипке постављене косо једна до друге у попречном пресеку (узорци од R6-f45 до R10-f45) приказани су на слици 19. Као и код вертикално постављених шипки, дијаграми су приказани засебно како би се разматрао утицај распореда GFRP шипки на механичко понашање носача, а тиме и донео закључак о оптималном положају ојачања.



Слика 18. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R1 - R5)



Слика 19. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R6 - R10)

У случају носача R1-f45, R2-f45 и R3-f45 лом се догодио услед смицања и приказан је на слици 20. Носач R5-f90 је достигао лом услед савијања, у доњој затегнутој зони (слика 21). Носач R4-f45 је имао пад оптерећења услед лома последње ламеле узрокованог затезањем влакана у доњој зони пресека (савијање), да би наставио да носи оптерећење до коначног лома услед смицања. Носачи ојачани шипкама постављеним под углом од 45° су показали највећу носивост од свих носача. Поред побољшања носивости у односу на све претходне серије узорака, повећана је и деформабилност

носача. И у случају ових носача долазило је до иницирања пукотина на местима нагле промене висине, али су шипке успешно спречиле њихово прекомерно отварање. У случају носача код којих се лом десио услед смицања, дошло је до неконтролисаног раста пукотине и извлачења шипки. На дијаграму за носач R4-f45 уочавају се скоковите промене силе што представља постепено извлачење ојачања. Носач R5-f45, код ког се лом догодио услед савијања, није показао знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони, те је понашање носача било линеарно еластично до лома. Код овог носача је лом био инициран на местима дефеката у дрвету у доњој затегнутој зони.



Слика 20. Лом услед смицања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45



Слика 21. Лом услед савијања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45

Што се тиче друге половине Серије R-f45, код носача R6-f45, R7-f45, R8-f45 и R10-f45 је до лома дошло услед савијања (слика 22), док се код носача R9-f45 лом догодио услед смицања (слика 23) и био је праћен извлачењем шипки. Поред повећања носивости и деформабилности у односу на носаче без ојачања, у случају четири од пет греда је облик лома промењен из комбинованог у лом услед савијања. Носивост је повећана и у односу на све остале испитане носаче, укључујући и узорке код којих су две GFRP шипке постављене косо једна иза друге (R1-f45 до R5-f45). На основу овога се може закључити да је овакав положај и распоред ојачања најповољнији. Без обзира на лом услед савијања, носачи R6-f45, R7-f45, R8-f45 и R10-f45 нису показали знаке пластификације притиснутих влакана дрвета у горњој зони. Такође, и код ових носача је лом претежно био инициран на местима дефеката у грађи дрвету у доњој затегнутој зони.



Слика 22. Лом услед савијања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45



Слика 23. Лом услед смицања носача ојачаних косим GFRP шипкама – Серија R-f45

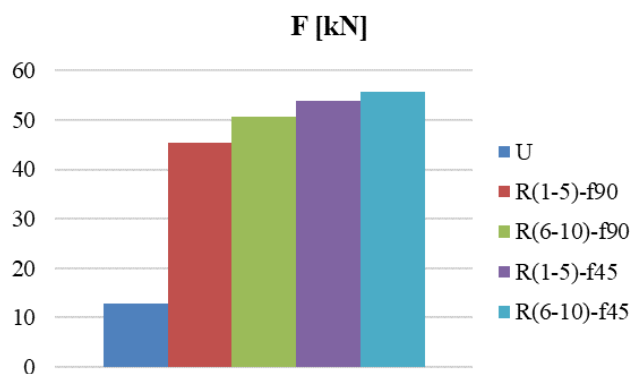
Лом на споју ламела није забележен ни код неојачаних носача, ни у случају носача ојачаних GFRP шипкама.

Оптерећење при лому, угиб у средини носача при лому и апроксимативна крутост на савијање добијени експерименталним испитивањем неојачаних и ојачаних носача приказани су у табели 2.

Табела 2. Експериментални резултати испитивања

| Носач | Максимална сила F_{max} (kN) | Угиб у средини при максималној сили w (mm) | Крутост на савијање EI ($\times 10^8$ kNm ²) |
|---------------------------|-----------------------------------|--|---|
| Серија U | | | |
| U6 | 15,0 | 13,8 | 9,03 |
| U7 | 12,7 | 12,1 | 8,85 |
| U8 | 16,7 | 15,1 | 9,55 |
| U9 | 10,7 | 8,8 | 9,91 |
| U10 | 8,7 | 8,0 | 8,60 |
| Средња вредност | 12,8 | 11,5 | 9,19 |
| SD | 3,2 | 3,1 | 0,53 |
| CV (%) | 25,2 | 26,6 | 5,8 |
| Серија R(1-5)-f90 | | | |
| R1-f90 | 52,1 | 53,6 | 9,17 |
| R2-f90 | 41,8 | 45,3 | 8,94 |
| R3-f90 | 45,6 | 58,9 | 8,00 |
| R4-f90 | 41,1 | 92,4 | 9,76 |
| R5-f90 | 46,7 | 95,5 | 9,35 |
| Средња вредност | 45,5 | 69,1 | 9,04 |
| SD | 4,4 | 23,2 | 0,65 |
| CV (%) | 9,7 | 33,5 | 7,2 |
| Поређење са Серијом U (%) | 256,7 | 498,8 | - |
| Серија R(6-10)-f90 | | | |
| R6-f90 | 46,3 | 42,2 | 10,17 |
| R7-f90 | 50,0 | 45,7 | 9,94 |
| R8-f90 | 55,0 | 58,4 | 8,58 |
| R9-f90 | 46,8 | 44,9 | 9,29 |
| R10-f90 | 55,7 | 51,9 | 10,09 |
| Средња вредност | 50,8 | 48,6 | 9,62 |
| SD | 4,4 | 6,5 | 0,67 |
| CV (%) | 8,7 | 13,4 | 7,0 |
| Поређење са Серијом U (%) | 298,3 | 321,2 | - |
| Серија R(1-5)-f45 | | | |
| R1-f45 | 62,6 | 63,2 | 9,40 |
| R2-f45 | 67,4 | 77,8 | 8,82 |
| R3-f45 | 65,1 | 68,0 | 9,04 |
| R4-f45 | 32,8 | 57,8 | 8,44 |
| R5-f45 | 41,6 | 43,5 | 9,31 |
| Средња вредност | 53,9 | 62,1 | 9,00 |
| SD | 15,6 | 12,7 | 0,38 |
| CV (%) | 29,0 | 20,5 | 4,3 |
| Поређење са Серијом U (%) | 322,6 | 437,7 | - |
| Серија R(6-10)-f45 | | | |
| R6-f45 | 52,9 | 51,4 | 9,79 |
| R7-f45 | 53,0 | 47,1 | 10,05 |
| R8-f45 | 61,4 | 61,7 | 9,86 |
| R9-f45 | 66,9 | 77,2 | 9,51 |
| R10-f45 | 44,3 | 45,2 | 8,87 |
| Средња вредност | 55,7 | 56,5 | 9,62 |
| SD | 8,7 | 13,2 | 0,46 |
| CV (%) | 15,6 | 23,4 | 4,8 |
| Поређење са Серијом U (%) | 336,8 | 389,5 | - |

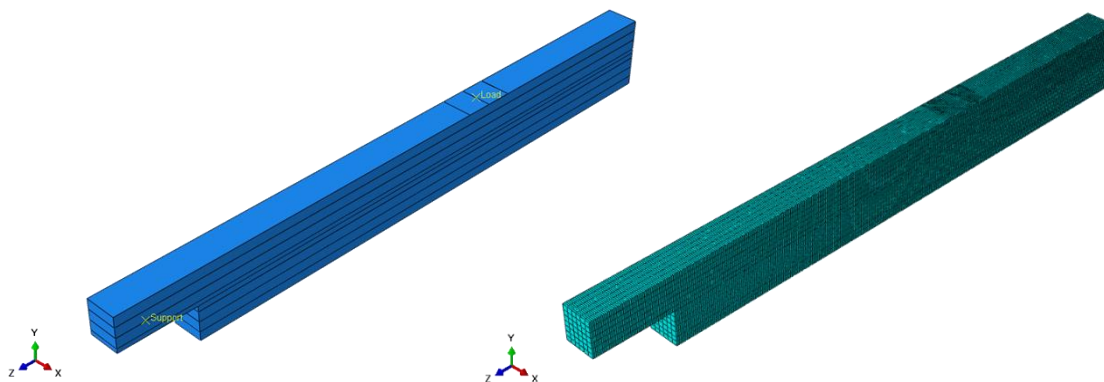
Вредности оптерећења и угиба су очитани из прикупљених експерименталних резултата. Крутост је срачуната на основу нагиба криве оптерећење - угиб, за област између $0,1F_{max}$ и $0,4F_{max}$ где је понашање носача линерано еластично, а F_{max} представља максимално оптерећење, односно оптерећење при лому носача. Из приказаних резултата се види да је ојачање у виду GFRP шипки допринело великом побољшању носивости у односу на неојачане носаче (слика 24).



Слика 24. Поређење носивости неојачаних и ојачаних носача

10.4. Нумеричка анализа

Тродимензионални модели експериментално испитаних неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца на бази методе коначних елемената направљени су у комерцијалном софтверском пакету *Abaqus* 6.13 (слика 25). Адекватно нумеричко моделирање има предност над експерименталним испитивањима у томе што захтева знатно мање ресурса. Међутим, како би нумеричка анализа била прецизна, неопходна је калибрација и верификација модела на основу експерименталних истраживања. У том циљу су презентовани тродимензионални нумерички модели испитаних носача, који након верификације кроз експериментално добијене резултате могу бити употребљени за даље параметарске анализе (варирање геометрије, материјалних карактеристика и система и положаја ојачања).



Слика 25. Тродимензионални нумерички модел

Геометријске карактеристике модела у потпуности одговарају геометрији експериментално испитаних носача. Модел је направљен тако да су искоришћени услови симетрије у z правцу, па је анализа извршена за половину прсте греде. Како је ојачање постављено дуж подужне осе носача, није коришћена симетрија у x правцу. Положај и димензије GFRP шипки одговарају експериментално испитаним диспозицијама ојачаних носача.

Примена адекватних конститутивних модела материјала је кључна при нумеричком моделирању носача, како би се добило очекивано механичко понашање елемената. Како је лом код свих испитаних носача у овом раду достигнут у линеарно еластичној области понашања (није долазило до пластификације притиснутих влакана), линеарно еластични конститутивни модел је сасвим адекватан за моделирање лепљеног ламелираног дрвета. Дрво је моделирано као ортотропни материјал, са различитим карактеристикама у сва три међусобно ортогонална правца. Лонгитудинални модул еластичности (у правцу пружања дрвених влакана) је одређен експериментално и износи $E_L = 10750$ МПа. Остале константе су израчунате према препоруци датој у [20]. Вредности *Poisson*-ових коефицијената су усвојене за меко дрво такође према [20]. Усвојене карактеристике дрвета као материјала у оквиру нумеричке анализе носача са редукованом висином пресека код ослонаца дате су у табели 3.

Табела 3. Карактеристике дрвета као материјала примењене у нумеричкој анализи

| E_L (N/mm ²) | E_R (N/mm ²) | E_T (N/mm ²) | G_{LR} (N/mm ²) | G_{LT} (N/mm ²) | G_{RT} (N/mm ²) | ν_{LR} | ν_{LT} | ν_{RT} |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------|------------|------------|
| 10 750 | 860 | 538 | 768 | 724 | 77 | 0,37 | 0,42 | 0,47 |

Челични елементи, односно подложне плочице на местима ослонаца и на местима уношења оптерећења, моделирани су као линеарно еластични изотропни материјал са модулом еластичности од $E = 210$ GPa и *Poisson*-овим коефицијентом од $\nu = 0,3$. GFRP шипке су моделиране са материјалним карактеристикама добијеним у оквиру сопственог експерименталног испитивања: модул еластичности $E = 40$ GPa и чврстоћа на затезање $f_t = 890$ МПа. *Poisson*-ов коефицијент за GFRP шипке је усвојен из литературе као $\nu = 0,25$.

Како је моделирана половина просте греде и искоришћена је симетрија у z правцу, задати су гранични услови симетрије на половини распона. Ослонац на крају носача је моделиран као покретан који спречава померања носача у вертикалном правцу. Омогућено је померање носача у подужном правцу, као што је био случај и при експерименталном испитивању. На месту ослонаца моделирана је челична плочица димензија 5 x 100 x 160 mm, што одговара извршеном експерименталном испитивању. Ова челична плочица на ослоњу, као и плочица испод тачке уношења оптерећења, чије су димензије 10 x 100 x 160 mm, повезана је са дрвеним носачем тако да нема релативних померања и обртања између носача и плочица (*tie constraint*).

У оквиру нумеричке анализе, оптерећење је задато у виду концентрисане силе која делује у трећини укупног распона, како би начин задавања оптерећења одговарао извршеним експерименталним испитивањима. Ова сила се уноси преко челичне плочице, као што је учињено и при експерименталном испитивању носача. Оптерећење је задато у једном кораку (*Step*), који је подељен на инкременте, и расте линеарно зависно од протеклог времена анализе.

При нумеричком моделирању се усваја идеална веза између ојачања и дрвета. Како би се поставило ојачање унутар пресека носача искоришћена је опција *embedded region* (попут моделирања арматуре код армиранобетонских елемената), при чему су GFRP шипке усвојени као „*the guest*“, а дрвени носач као „*the host*“ регион.

Коначни елементи на које је подељен лепљени ламелирани дрвени носач су *solid* C3D8R – просторни 3D коначни елементи са 8 чворова и редукованом интеграцијом који имају 6 степени слободе (три померања и три обртања). Величина коначних елемената је изабрана тако да се свака ламела по висини састоји од два елемента (16 mm), док је финија мрежа усвојена на местима ослонаца и уношења оптерећења, због проблема концентрације напона. Коначни елементи на које су подељене челичне плочице су

правоугаони плочасти (*shell*) елементи са 4 чвора и редукованом интеграцијом – S4R. *Shell* елементи се обично користе када је једна димензија знатно мања од осталих, као што је то случај код челичних плочица. Усвојена величина коначних елемената за челичне плочице је 5 mm. Подела модела на коначне елементе приказана је на слици 25. GFRP шипке су моделиране као *beam* елементи – B31. Величина коначних елемената на које су подељене GFRP шипке износила је 8 mm, како би се поклопили чворови носача и ојачања. Такође, задат је и „физички радијус дејства“ средстава за ојачање (одговара пречнику GFRP шипки, односно 10 mm). Чворови мреже коначних елемената ојачања су повезани са чворовима мреже коначних елемената носача који су обухваћени радијусом дејства.

Отварање и раст пукотина код лепљених ламелираних дрвених носача са редукованом висином пресека код ослонаца подвргнутих краткотрајном оптерећењу симулиран је коришћењем приступа нелинеарне механике лома помоћу опције *Cohesive Zone Modelling (CZM)* у *Abaqus*-у. Приликом извршених експерименталних испитивања неојачаних носача на савијање, пукотине су инициране на месту нагле промене висине пресека и пропагирале су у правцу влакана дрвета. Пошто је путања пукотине позната из експерименталних испитивања, подручје лома се може адекватно описати моделирањем кохезивне зоне (CZM), где се лом елемената одликује прогресивном деградацијом крутости материјала која се покреће процесом оштећења насталих услед иницирања пукотина.

У оквиру ове анализе примењен је критеријум максималног номиналног напона при нумеричком моделирању носача. Узимајући обележавања из *Abaqus*-а, крутост у кохезивној зони (K_{nn} , K_{ss} , K_{tt}), номинални напони (σ_n , σ_s , σ_t) и енергија лома (G_f) су улазни параметри CZM модела. У одсуству експерименталних резултата, вредности крутости у кохезивној зони су усвојене након калибрације модела неојачаних носача. Номинални напони су усвојени из спроведених експерименталних испитивања дрвета на смицање и затезање управно на влакна. Енергија лома је такође усвојена на основу извршених експерименталних испитивања. Усвојене вредности параметара при моделирању кохезивне зоне носача са редукованом висином пресека код ослонаца дате су у табели 4.

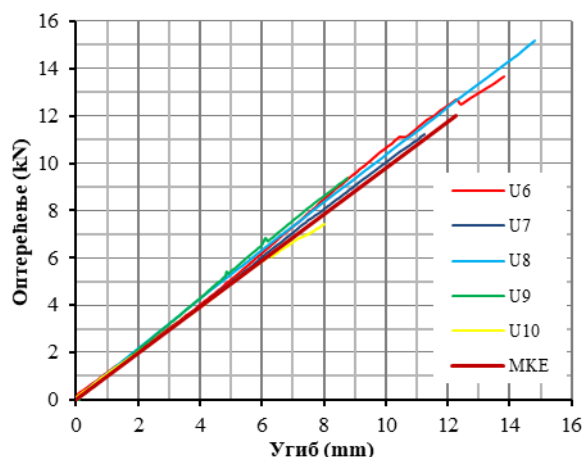
Табела 4. Параметри кохезивне зоне

| K_{nn} (N/mm ³) | K_{ss} (N/mm ³) | K_{tt} (N/mm ³) | σ_n (N/mm ²) | σ_s (N/mm ²) | σ_t (N/mm ²) | G_f |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-------|
| 26,6 | 20 | 20 | 0,9 | 5,85 | 5,85 | 0,24 |

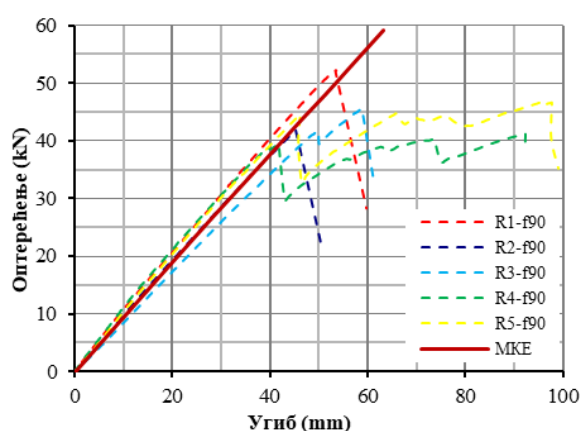
При нумеричкој симулацији, лом ојачаних носача је дефинисан као тренутак када пукотина пропагира и преко друге шипке, што се може сматрати да одговара извлачењу шипки и прекомерном отварању пукотине услед смицања при експерименталном испитивању.

Анализа неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца спроведена је статичким прорачуном *Abaqus/Standard solver*. Овај *solver* се користи за статичку анализу, када је неопходан тачан и прецизан одговор у смислу напона и дилатација, као што је случај у овом раду.

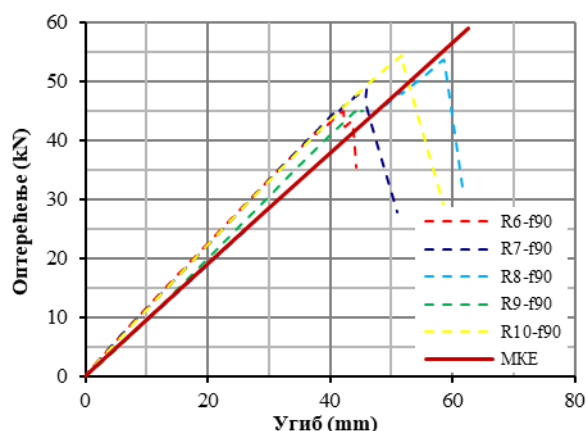
Добијени нумерички резултати су показали солидно слагање са експерименталним вредностима (слике 25-29), са разликама које се пре свега односе на варијабилности карактеристика дрвета као материјала.



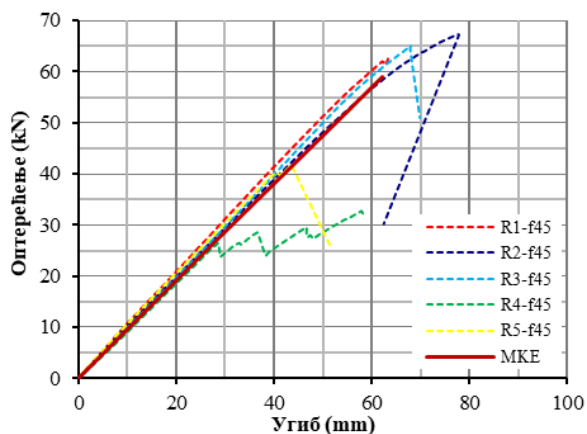
Слика 26. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију U (експериментални и нумерички резултати)



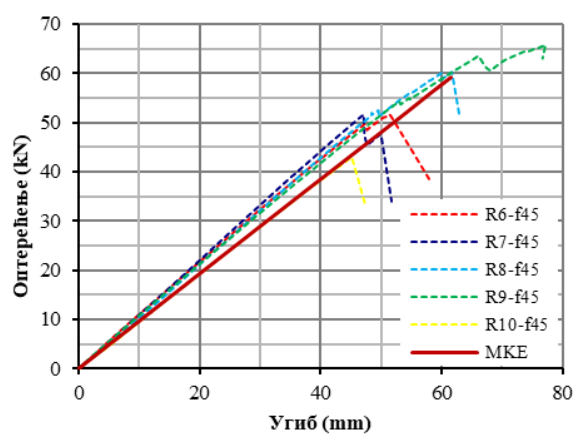
Слика 26. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R1 - R5) (експериментални и нумерички резултати)



Слика 27. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f90 (R6 - R10) (експериментални и нумерички резултати)

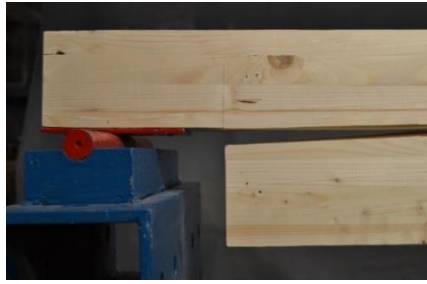


Слика 28. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R1 - R5) (експериментални и нумерички резултати)

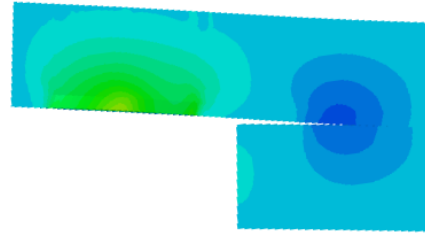


Слика 29. Дијаграми оптерећење - угиб за Серију R-f45 (R6 - R10) (експериментални и нумерички резултати)

Нумеричко предвиђање за понашање неојачних носача је показало добру сагласност са експериментално добијеним резултатима, са разликама у граничном оптерећењу и угибу које су последица великих коефицијената варијације при експерименталном испитивању. Облик лома је у потпуности одговарао лому носача који се догодио при експерименталном испитивању (слика 30).



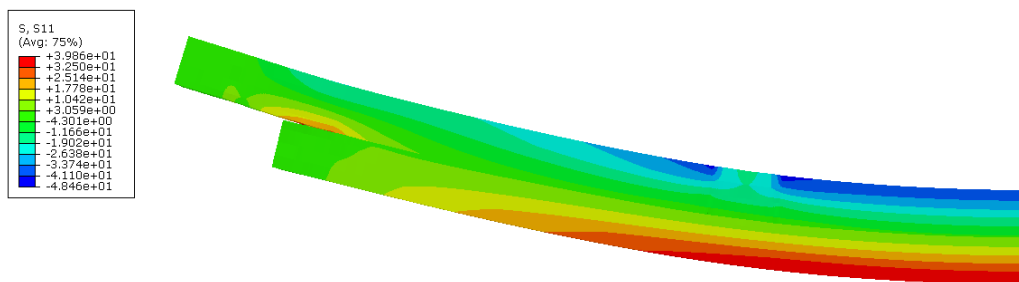
а) Експериментално истраживање



б) Нумеричка анализа

Слика 30. Облик лома носача Серије U – отварање пукотине

У случају носача ојачаних GFRP шипкама нумеричка анализа је показала да да лом наступа услед губитка носивости на савијање и да пукотине „не прелазе“ преко ојачања (слика 31), док је при експерименталним испитивањима до лома долазило како услед савијања тако и услед смицања. При нумеричком моделирању се претпоставља идеална веза између дрвета и ојачања, па су GFRP шипке биле довољне да се достигне лом услед савијања (носачи се понашају као да нема редукције висине попречног пресека код ослонаца). Разлика у граничном оптерећењу између нумеричких и експерименталних резултата најмања је у случају носача ојачаних косим GFRP шипкама постављеним једна до друге, код којих је до лома при експерименталним испитивањима углавном долазило услед прекорачења чврстоће на савијање. Иницијално отварање пукотине код свих ојачаних носача се десило при истој сили као и код неојачаних носача са напоном затезања при отварању пукотине који одговара задатој вредности при моделирању кохезивне зоне носача.



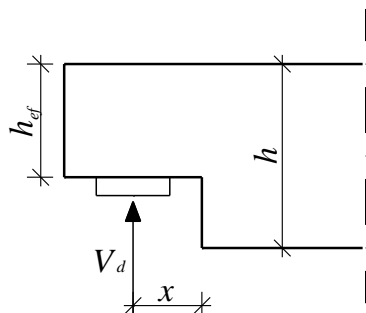
Слика 31. Лом носача услед достизања чврстоће на савијање у доњим затегнутим влакнима за носаче

Као и при експерименталним испитивањима, нумеричке симулације су доказале да су GFRP шипке ефикасно средство за ојачање. Поред тога, с обзиром да се при постављању ојачања у низу, друга GFRP шипка активира у мањој мери, нумеричка анализа је показала да је постављање ојачања једно до другог боља конфигурација у смислу достизања већих граничних оптерећења. Најбољи резултати су постигнути постављањем косих GFRP шипки једна до друге у попречном пресеку. Осим тога што се обе шипке активирају у истој мери, оне и боље „подносе“ сложено напонско стање које се јавља на месту редукције висине попречног пресека носача.

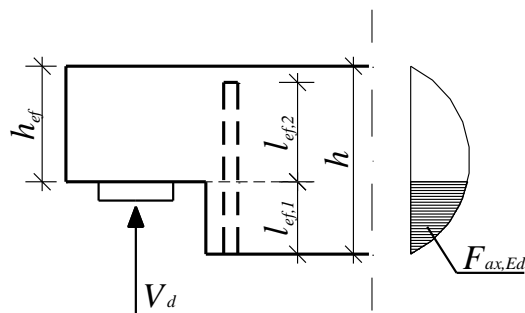
Ако се узме у обзир непредвидивост понашања дрвета као материјала, нумеричка анализа је показала добру сагласност са експерименталним испитивањем (максимална одступања у сили при лому су била до 9%). Презентовани модели могу бити употребљени за даље параметарске анализе, које укључују варирање геометрије, материјалних карактеристика и система и положаја ојачања.

10.5. Прорачун ојачања за експлоатационо оптерећење

Еврокод 5 даје смернице за прорачун носача правоугаоног попречног пресека, чија се влакна пружају лонгитудинално, са редукованом висином код ослонца. Смичући напон на редукованом делу пресека носача се рачуна користећи ефективну (редуковану) висину попречног пресека (слика 32).



Слика 32. Носач са редукованом висином пресека код ослонца



Слика 33. Вертикално ојачање носача са редукованом висином пресека код ослонца

Израз за проверу граничног стања носивости за смичући напон гласи:

$$\tau_d = \frac{1,5V_d}{b_{ef}h_{ef}} \leq k_v f_{v,d} \quad (1)$$

где је:

V_d – прорачунска вредност трансверзалне силе;

τ_d – прорачунска вредност смичућег напона;

$f_{v,d}$ – прорачунска вредност чврстоће на смицање;

h_{ef} – редукована висина носача;

b_{ef} – ефективна ширина носача: $b_{ef} = k_{cr} b$;

$k_{cr} = 0,67$ за правоугаони попречни пресек;

k_v – фактор редукације којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине попречног пресека:

$k_v = 1$ – за редуковану висину на супротној страни од ослонца;

$$k_v = \frac{k_n}{\sqrt{h} \left(\sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right)} \leq 1 \quad \text{– за редуковану висину на} \quad (2)$$

истој страни ослонца;

где је:

h – висина носача;

x – растојање реакције ослонца до места редукације висине пресека;

$$\alpha = \frac{h_{ef}}{h} \quad (3)$$

$$k_n = \begin{cases} 5 & \text{за монолитно дрво} \\ 6,5 & \text{за лепљено ламелирано дрво.} \end{cases}$$

Поступак прорачуна смичућег напона на месту редукације висине пресека дат у оквиру Еврокода 5 не предвиђа изразе за прорачун евентуалних ојачања. Као допуна Еврокоду 5, Немачки национални анекс предлаже поступак прорачуна ојачања штапастим спојним средствима на месту редукације висине пресека носача (слика 33). Овај метод прорачуна узима у обзир напон затезања управан на влакна, док занемарује појаву смичућих напона у правцу влакана. Приказани приступ је базиран на идеји да се

напон који се јавља на месту нагле промене висине носача расподељује између ојачања и дрвета путем фактора k_α .

Део силе који преузима ојачање се може срачунати као:

$$F_{ax,Ed} = k_\alpha V_d \quad (4)$$

уз услов да је:

$$F_{ax,Ed} \leq n F_{ax,Rd} \quad (5)$$

где је:

V_d – прорачунска вредност смичуће силе;

$$k_\alpha = 1,3 \left[3(1-\alpha)^2 - 2(1-\alpha)^3 \right] \quad (6)$$

$F_{ax,Ed}$ – прорачунска вредност аксијалне силе у једном средству за ојачање;

n – број средстава за ојачање;

$F_{ax,Rd}$ – прорачунска вредност капацитета носивости средства за ојачање на чупање.

Дубина забијања средства за ојачање (односно дужина сидрења у случају шипки) дефинише се као $l_{ef} = l_{ef,2}$ према слици 33., тј. представља дубину продора средства за ојачање у пресек изнад линије засека.

Фактор редукације k_v , којим се узима у обзир концентрација напона на месту нагле промене висине пресека, елиминише се додавањем ојачања. Према томе, код ојачаних носача са редукованом висином пресека може се узети се да је $k_v = 1$ при прорачуну носивости. Према томе, максимална прорачунска смичућа сила, коју дрвени део пресека ојачаног носача на месту редукације висине може да прихвати, износи:

$$\max V_d = \frac{2}{3} b_{ef} h_{ef} f_{v,d} \quad (7)$$

Поступак аналитичког прорачуна ојачања дат у Немачком националном анексу Еврокода 5 може се применити на носаче ојачане вертикално постављеним GFRP шипкама разматране у оквиру техничког решења.

10.6. Закључци и препоруке за примену техничког решења

Техничко решење ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека помоћу GFRP шипки се може применити за ојачање нових, али и за санацију постојећих конструкција. Применом овог решења се може у потпуности савладати проблем концентарције напона који се јавља као последица редукације висине попречног пресека носача над ослономцем.

На основу спроведених експерименталних и нумеричких испитивања неојачаних и ојачаних носача са редукованом висином пресека код ослонаца су изведени следећи закључци:

- До лома неојачаних носача је дошло услед прекорачења чврстоће на затезање управно на влакна на местима редукације висине пресека. Отварање пукотине је доминантан лом код неојачаних носача са редукованом висином пресека.
- Примена ојачање у виду GFRP шипки показало је знатно повећање носивости и деформабилности у односу на неојачане носаче.
- У случају већине носача ојачаних GFRP шипкама лом се догодио услед савијања, са достизањем носивости коју би имали носачи без редуковане висине пресека код ослонаца. Дакле, шипке су имале довољну носивост да након иницирања пукотине,

изврше спрезање подељеног дрвеног пресека тако да носачи могу да достигну своју пуну носивост на савијање.

- Што се тиче шеме ојачања, најбољи резултати су постигнути када су GFRP шипке постављене једна до друге у попречном пресеку под углом од 45°. Проблем овакве диспозиције ојачања је компликованост смештања и обезбеђивања захтеваних минималних ивичних и међусобних растојања.
- Симулирано понашање носача ојачаних са по две GFRP шипке (вертикалне и косе) је показало да пукотине не пропагирају „преко“ ојачања, те да лом наступа услед губитка носивости на савијање, који је дефинисан као достизање чврстоће дрвета на савијање у затегнутој зони.
- Нумеричка анализа је показала да се при постављању ојачања у низу други друга GFRP шипка активира у мањој мери (потпуно се активирају тек пошто пукотина дође до њих), па је потврђено да је постављање ојачања једно до другог повољнија конфигурација од постављања ојачања једно иза другог.
- Услов за употребу носача са редукованом висином пресека код ослонаца је познавање методе прорачуна ојачања која ће инжењерима омогућити једноставну примену у свакодневној пракси, попут поступака датог у Немачком националном анексу Еврокода 5.

Препоруке којих се треба придржавати приликом ојачања дрвених носача са редукованом висином пресека помоћу GFRP шипки:

- Рупе за постављање ојачања треба направити већег пречника од примењене GFRP шипке (за шипке Ø10, рупе Ø14), како би остало довољно простора за остваривање слоја лепка довољне дебљине да се обезбеди адхезија између шипки и лепка, као и лепка и дрвета.
- Рупе треба припремити тако да буду чисте и суве, како би се остварила правилна и потпуна веза између дрвета и ојачања.
- GFRP шипке је неопходно поставити у пројектовани положај лаганим увртањем, тако да се вишак лепка истисне из рупе.
- Потребно је изабрати адекватан лепак који се може примњивати за везу дрвета и композитног материјала, у складу са препорукама произвођача.
- Минимална ивична, међусобна растојања и дубина забијања GFRP шипки, треба усвојити у складу са препорукама датим у Еврокоду 5 за штапаста спојна средства.

На основу спроведених истраживања може се констатовати да и поред сложености проблема који се јављају са редукијом висине пресека дрвених носача, адекватно ојачање попут GFRP шипки, омогућава несметану примену оваквих елемената конструкција.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Gentile C, Svecova D, Rizkalla SH. Timber beams strengthened with GFRP bars: development and applications. *J Compos Constr* 2002;6:11.
- [2] Svecova D, Eden R. J. Flexural and shear strengthening of timber beams using glass fibre reinforced polymer bars - an experimental investigation. *Can J Civ Eng* 2004;31:45-55.

- [3] Borri A, Corradi M, Grazini A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. *Compos Part B Eng* 2005;36:143-53.
- [4] Micelli F, Scialpi V, La Tegola A. Flexural reinforcement of glulam timber beams and joints with carbon fiber-reinforced polymer rods. *J Compos Constr* 2005;9:337-47.
- [5] Johnsson H, Blanksvärd T, Carolin A. Glulam members strengthened by carbon fibre reinforcement. *Mater Struct* 2006;40:47-56.
- [6] Yusof A. Bending Behavior of Timber Beams Strengthened using Fiber Reinforced Polymer Bars and Plates. Doctoral dissertation. Faculty of Civil Engineering, Universiti Teknologi Malaysia, 2010.
- [7] Raftery GM, Whelan C. Low-grade glued laminated timber beams reinforced using improved arrangements of bonded-in GFRP rods. *Constr Build Mater* 2014;52:209-20.
- [8] Raftery GM, Kelly F. Basalt FRP rods for reinforcement and repair of timber. *Compos Part B - Eng* 2015;70:9-19.
- [9] Yang H, Liu W, Lu W, Zhu S, Geng Q. Flexural behavior of FRP and steel reinforced glulam beams: Experimental and theoretical evaluation. *Constr Build Mater* 2016;106:550-63.
- [10] Yang H, Ju D, Liu W, Lu W. Prestressed glulam beams reinforced with CFRP bars. *Constr Build Mater* 2016;109:73-83.
- [11] Mohler K, Mistler HL. Untersuchungen über den Einfluss von Ausklinkungen im Auflagebereich von Holzbiegeträgern auf die Tragfestigkeit, vol F 1504. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen Universität Karlsruhe (TH), 1978.
- [12] Jockwer R. Structural Behaviour of Glued Laminated Timber Beams with Unreinforced and Reinforced Notches. Doctoral dissertation. ETH Zurich, 2014.
- [13] Coureau J.L., Cuvillier E, Lavergne C. Strength of locally PGF reinforced end-notched beams. In: *Proceedings of International RILEM Symposium on Joints in Timber Structures*. RILEM Publications, vol PRO22, 2001. p. 413-22.
- [14] Blass, H.J., Bejtka I. Querszugverstärkung in gefährdeten Bereichen mit selbstbohrenden Schrauben, Fraunhofer IRB Verlag, 2003.
- [15] Gomez S, Svecova D. Behavior of split timber stringers reinforced with external GFRP sheets. *J Compos Constr* 2008;12:202-11.
- [16] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 5: EN 1995-1-1: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Brussels, Belgium, 2008.
- [17] European Committee for Standardization (CEN). EN 10480: Timber structures - Glued laminated timber - Requirements. Brussels, Belgium, 2005.
- [18] European Committee for Standardization (CEN). En 408:2010+a1: Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. Brussels, Belgium, 2012.
- [19] National Annex - Nationally determined parameters. Eurocode 5: DIN EN 1995-1-1/NA: Design of timber structures. Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Berlin, Germany, 2010.
- [20] Bodig J, Jayne BA. *Mechanics of Wood and Wood Composites*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982.

11. ТЕХНИЧКА ДОКУМЕНТАЦИЈА

- Уговор о пословно-техничкој сарадњи у прилогу.

- Листа техничких решења свих аутора:
Аутори немају друга техничка решења.

Аутори решења:

Доц. др Марија Тодоровић, маг. инж. грађ.

в. проф. др Иван Глишовић, дипл. грађ. инж.

проф. др Бошко Стевановић, дипл. грађ. инж., професор у пензији