

## Utjecaj trenja na ponašanje i rad predgotovljenih kompozitnih sustava drvo – nosivo staklo

Nikola Perković<sup>1</sup>, prof.dr.sc. Vlatka Rajčić<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [nperkovic@grad.hr](mailto:nperkovic@grad.hr)

<sup>2</sup> Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, [vrajcic@grad.hr](mailto:vrajcic@grad.hr)

### Sažetak

Osnovni koncept projektiranja građevina u potresnim područjima jest zadovoljavanje duktilnosti i dostatne disipacije energije cjelokupnog sustava. Kombinacijom drva i nosivog stakla osmišljen je sustav u kojem će svaki materijal prenositi opterećenje, a u međusobnoj interakciji konstitutivnih elemenata biti otporan na potres. Razvijen je sustav u kojem se staklo direktno oslanja na drveni okvir, a prijenos opterećenja se događa kontaktom dvaju materijala i sile trenja između njih. Pri potresnom opterećenju, trenje između stakla i drva je važan čimbenik koji utječe na ponašanje i rad kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo.

*Ključne riječi: kompoziti, drvo, nosivo staklo, potres, trenje, FEM analiza*

## Influence of friction on the behaviour and performance of prefabricated wood – bearing glass composite systems

### Abstract

The basic concept of seismic design of buildings is to ensure proper ductility and sufficient energy dissipation of the entire system. The combination of wood and bearing glass was used to form a system in which each material transmits the load while also acquiring seismic resistance through interaction of constitutive elements. In this newly developed system, glass leans directly onto the wooden frame, and load is transferred through contact and friction between the two materials. The friction between glass and wood is a significant factor in seismic design, as it influences behaviour and performance of the wood – glass composite system.

*Key words: composites, wood, load-bearing glass, earthquake, friction, FEM analysis*

## 1 Uvod

U posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do naglog razvoja stakla kao nosivog materijala. Nosivo staklo u kombinaciji s drvenim okvirom predstavlja novu generaciju nosivog kompozitnog sustava koji ima predispozicije za dobro ponašanje prilikom potresa, a istovremeno je energetski efikasno i isplativo, estetski prihvatljivo te ima dobre nosive karakteristike [1]. Iako postoje brojne norme vezane za proizvode od stakla (npr. [2, 3]), posebna europska norma samo za nosivo staklo je u pripremi te su dane tek okvirne smjernice za uporabu i dimenzioniranje elemenata od stakla [4]. Zasad su u uporabi prednorme prEN 13474 [4, 5] koje su osnova za stvaranje zajedničke norme. Modeli proračuna i europske norme podrazumijevaju uporabu staklenih panela kao sekundarnih elemenata [8], što kod proračuna otpornosti konstrukcije znači da pozitivni utjecaj tih elemenata pri prijenosu poprečnih opterećenja uzrokovanih potresom moramo zanemariti [7]. U praksi postoje razne vrste sustava i konstrukcija drvenih zgrada kao što su panelni i okvirni sustavi, no još uvijek, razvojem se mogu postići bolje značajke sustava, naročito za gradnju u potresnim područjima u skladu s novom generacijom propisa [10]. Područje primjene ovakvog sustava gradnje bilo bi gradnja nižih do srednje visokih poslovnih i stambenih zgrada, nadogradnja postojećih armiranobetonskih i zidanih zgrada brzo izvedivim montažnim etažama koje su predgotovljene u tvornici. Osnovni cilj istraživanja je unaprijediti spoznaje o nosivim kompozitnim sustavima drva s nosivim staklom te osmisлити koncept kompozitnog sustava koji će biti primjenjiv u stambenim zgradama.

Sustav će biti analiziran s aspekta nosivosti, uporabivosti, stabilnosti, ali i energetske učinkovitosti. Gradnja drvom je vrlo brza i u potpunosti pogodna prethodnoj pripremi u tvornicama, a u sveukupnom životnom rasponu (cradel to cradel – kolijevka do kolijevke) pokazuje izuzetno dobre rezultate u smislu ekonomičnosti i održivost te smanjenog CO<sub>2</sub> [9]. S obzirom na kompleksnost kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo i intencije prikazivanja što realnijeg ponašanja i karakteristika takvih sustava, istraživanje je podijeljeno u dvije cjeline: laboratorijska ispitivanja i istraživanja na numeričkim modelima. Također, planira se pristupiti LC analizama.

Definiranje kontakta između stakla i drva, kao i spajanje drvenih dijelova okvira, detalji su kojima treba posvetiti najveću pažnju, jer upravo način spajanja ovih elemenata uvelike određuje ponašanje cijelog kompozitnog sustava [6]. Uobičajen način spajanja nosivog stakla i drvene konstrukcije je ljepilima i različitim vrstama mehaničkih spajala [1]. Uporabom čeličnih mehaničkih spajala javljaju se komplicirana rješenja izvedbe i detalji koji oštećuju rub stakla i najosjetljiviji je dio staklenog elementa. Uporabom ljepila može se uspostaviti dobra veza, no postavlja se pitanje o trajnosti takvih sustava. Uz navedene probleme, prilikom potresnog opterećenja dolazi do oštećenja konstrukcije upravo na mjestu spojeva, a time i otkazivanja ci-

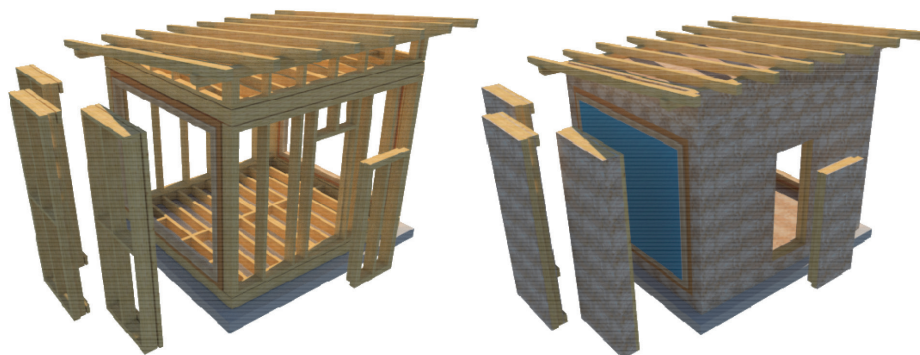
jelog nosivog sustava [1, 13]. Radi rješavanja spomenutog problema i što bolje disipacije energije prilikom potresnog opterećenja, razvijen je sustav gdje je nosivo staklo umetnuto u drveni okvir bez dodatnih mehaničkih spajala i ljepila. Sustav je zamišljen tako da se omogućiti djelomično slobodno kretanje stakla u drvenom okviru, a stabilnost stakla osigurava se dodatnim drvenim letvama. Stoga, opterećenje se prenosi direktnim kontaktom, tj. trenjem između dvaju elementa [1, 6, 7, 16].

U prethodnim ispitivanjima vidjelo se da do otkazivanja kompozitnog sustava dolazi u kutu drvenog okvira [1]. Zbog djelomično slobodnog kretanja, nosivi stakleni paneli ostaju neoštećeni, što je od iznimne važnosti u ovakvom kompozitnom sustavu jer su drveni elementi lako zamjenjivi, a mehaničke karakteristike i svojstva nosivog stakla zadržani. U nastavku rada, kroz projekt "Vetro lignum" pod vodstvom prof. dr.sc. Vlatke Rajčić, obrađuje se problematika trenja, daju se rezultati istraživanja te smjernice za daljnja istraživanja.

## 2 Prototip višenamjenskog kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo

Glavni cilj projekta je razviti, osmisлити i konstruirati novi kompozitni sustav koji će se koristiti kao neovisna predgotovljena konstrukcijska komponenta za građenje u seizmički aktivnim područjima. Svrha istraživanja je projektiranje kompozita i konstruiranje detalja spajanja koji nemaju negativan utjecaj na nosivo staklo, te razvijanje sustava sa visokim stupnjem disipacije energije. Preliminarna istraživanja pokazuju da se određeni kompozitni sustavi mogu koristiti u seizmičkim aktivnim područjima (kao što je Hrvatska) [1, 6, 8, 13, 14] ali optimizacija sustava i parametarska analiza još nisu napravljeni.

Posljednjih godina, zahvaljujući suradnji Sveučilišta u Zagrebu i Sveučilišta u Ljubljani, provedeno je preliminarno ispitivanje kompozitnog sustava drveno-nosivo staklo pri monotono statičkom i cikličnom opterećenju. Osnovni zaključci iz prethodnih istraživanja [1, 6, 12-14] navedeni su u ovom radu. Predviđeno je istraživanje i razvoj energetske učinkovitih kompozitnih sustava u trogodišnjem projektu pod nazivom VETROLIGNUM (prototip višenamjenskih kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo) koji financira Hrvatska zaklada za znanost. Ovaj projekt će nadograditi znanje vezano uz dimenzioniranje konstrukcije te istražiti nove načine povezivanja nosivih elemenata i napraviti studiju optimizacije određenih dijelova panela u svrhu što bolje energetske učinkovitosti. Studije omogućuju zaključke potrebne za izradu prototipa kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo (slika 1.), koja bi se mogla ugraditi u stvarnu zgradu što je i krajnji cilj projekta. Također, ova vrsta hibridnog elementa može se koristiti kao neovisni element u izgradnji drvenih konstrukcija, privremeno ili trajno ojačanje i stabiliziranje elemenata postojećih objekata i objekata kulturne baštine, te kao element za izgradnju višenamjenskih i adaptivnih fasadnih sustava.



Slika 1. 3D prikaz – prototip kompozitnog sustava

### 3 Ispitivanje trenja između drva i stakla

#### 3.1 Motivacija za istraživanje

Istraživanje trenja između drva i stakla od ključne je važnosti za razumijevanje rada cijelog kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo, u kojem stakleni panel može klizati u drvenom okviru. Upravo klizanje, odnosno trenje između stakla i drva jedan je od činitelja koji prenose dio horizontalnog opterećenja [6]. Sustav za ispitivanje je sastavljen od jednog uzorka laminiranog ili IZO stakla koji je ugrađen između dva drvena elementa. Pozicioniranje stakla postiglo se izradom dodatnih drvenih letvica koje sprječavaju bočni pomak stakla, no ne pritišću ga bočno, dakle, ne utječu na silu trenja. Na temelju testa, određujemo silu trenja na kontaktu drvo-staklo za određeni bočni pritisak, tj. normalnu silu. Kao rezultat toga dobivamo koeficijent trenja koji se može koristiti za numeričko modeliranje kontakta između drva i stakla u računskom modelu. Numerički analiza je provedena programskom podrškom ANSYS.

#### 3.2 Opis i izrada uzoraka

Sustav za ispitivanje trenja sastoji se od drvenih CLT elemenata, staklenih uzoraka te čeličnih elemenata (unos bočne sile). Radi optimiziranja, izrađeni su uzorci stakla različite vrste i debljine.

##### 3.2.1 Izrada staklenih uzoraka

Izrađeno je šest uzoraka stakla dimenzija 200 x 400 mm. Uzorci su bili sljedeći: 2 x laminirano staklo 2 x 6 mm, 2 x laminirano staklo 2 x 10 mm, 1 x IZO staklo s dvostrukim laminiranim staklom od 6 mm i međuprostorom 12 mm, 1 x IZO staklo s dvo-

strukim laminiranim staklom od 10 mm i međuprostorom 12 mm. Svi uzorci su ESG - kaljena stakla prema normi BS EN 12150-1. Tolerancija pri izradi je u dopuštenim granicama prema normi EN 14179-8. Rubovi uzoraka su grubo brušeni (DIN1249-11). Staklene plohe kod laminiranog stakla povezane su PVB folijom debljine 0,76 mm. 90 % međuprostora kod IZO stakla je ispunjeno argonom. Distancer je aluminijski širine 12 mm s pripadajućim slojevima butila i silikona DC 3363. Mehaničke karakteristike stakla prikazane su u tablici 1.

**Tablica 1. Mehaničke karakteristike stakla**

E - Youngov modul elastičnosti	70 000 N/mm <sup>2</sup>
G - modul posmika	28689 N/mm <sup>2</sup>
μ - Poissonov koeficijent	0,22
α - koeficijent temperaturnog širenja	8,8 × 10 <sup>-6</sup>
ρ - gustoća	2,5 g/cm <sup>3</sup>
Tlačna čvrstoća	700 - 1000 N/mm <sup>2</sup>
Vlačna čvrstoća	30 – 45 N/mm <sup>2</sup>

### 3.2.2 Izrada drvenih uzoraka

Drvo se kao građevni materijal koristi u prirodnoj i mehanički obrađenoj verziji. Prednost mehaničke obrade drva je u tome što se vizualnim i strojnim razvrstavanjem odstranjuju greške i dobiva materijal s većom homogenošću. U novije vrijeme na tržištu drva i materijala na osnovi drva pojavio se proizvod pod nazivom križno uslojene ploče i grede (CLT). Drveni CLT elementi obrađeni su u laboratoriju Građevinskog fakulteta prema zadanim mjerama. CLT se sastoji od 3 sloja i svaki sloj je debljine 30 mm. Drvo je klase C24 čije su mehaničke karakteristike dane u tablici 2. Dodatne drvene gredice koje pridržavaju staklo su dimenzija 30 x 30 mm.

**Tablica 2. Mehaničke karakteristike drva klase C24**

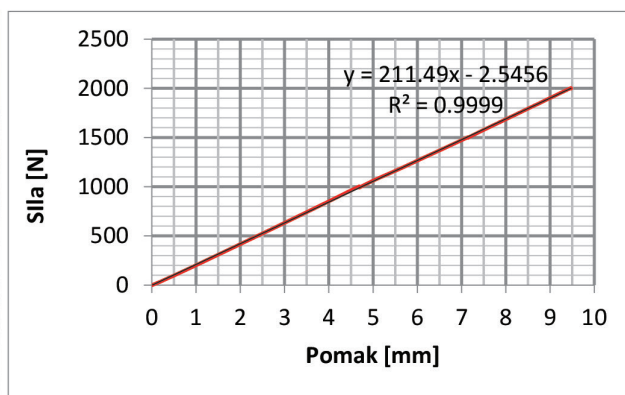
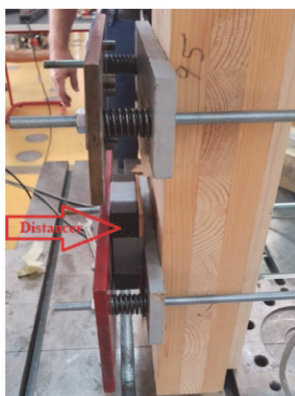
Mehaničke karakteristike drva C24									
Zapreminska težina [kg/m <sup>3</sup> ]	Srednji modul elastičnosti			Srednji modul posmika			Poissonov koeficijent		
	E <sub>x</sub> [MPa]	E <sub>y</sub> [MPa]	E <sub>z</sub> [MPa]	G <sub>xy</sub> [MPa]	G <sub>xz</sub> [MPa]	G <sub>yz</sub> [MPa]	ν <sub>xy</sub>	ν <sub>xz</sub>	ν <sub>yz</sub>
420 kg/m <sup>3</sup>	11000	600	580	600	690	580	0,3	0,25	0,6
Karakteristične čvrstoće drva klase C24, vrijednosti u [MPa]									
Savijanje f <sub>m,k</sub>	Vlak paralelno f <sub>t,0,k</sub>		Vlak okomito f <sub>t,90,k</sub>	Tlak paralelno f <sub>c,0,k</sub>		Tlak okomito f <sub>c,90,k</sub>	Posmik f <sub>v,k</sub>		
24	14		0,5	21		2,5	2,5		

### 3.3 Opis eksperimenta

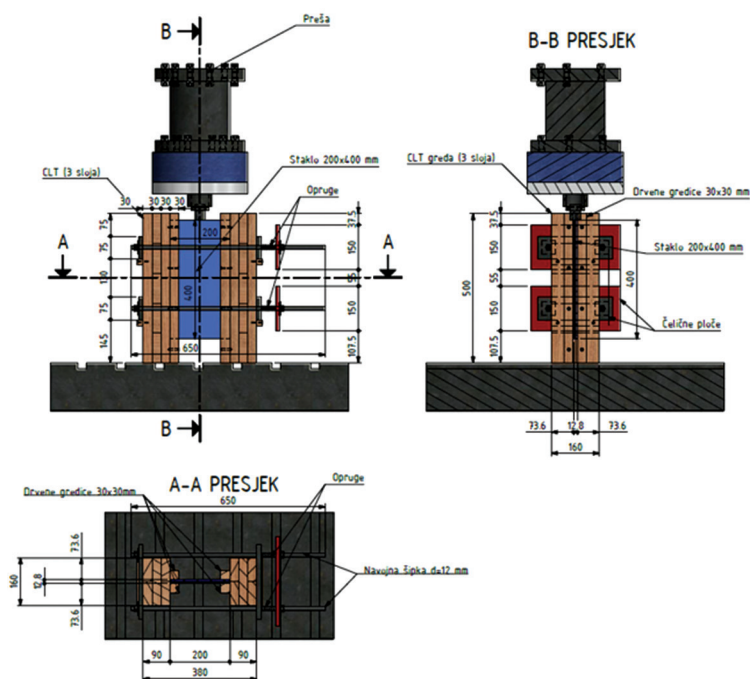
Eksperiment je proveden umetanjem laminiranog ili IZO staklenog uzorka između dva drvena elementa. Prije samog početka eksperimenta i unosa vertikalne sile, tj. sile koja djeluje u ravnini staklene plohe, potrebno je osigurati određeni bočni tlak između stakla i drva. Time direktno određujemo kontakt između drva i stakla. Sustav za unošenje bočne sile sastoji se od 6 čeličnih ploča, 4 navojne šipke s maticama, te 4 opruge. Sustav, dimenzije i pozicije elemenata prikazani su na slici 3.

#### 3.3.1 Unos normalne (bočne) sile

Unos bočnog pritiska željenog iznosa (1 kN, 2 kN ili 3 kN) ostvaren je preko određenog iznosa pomaka opruge. Opruge su postavljene između metalnih ploča. Pomak opruge ostvaren je preko pomaka metalnih ploča koje guraju opruge, odnosno kontroliranim zatezanjem i otpuštanjem matica na navojnoj šipci. Ovakav sustav omogućava konstantan bočni pritisak. Radi određivanja i kontroliranja bočne sile koja se unosi, napravljen je preliminarni test u kojem je cilj bio odrediti krutost opruga, tj. dobiti dijagram sila-pomak. Dijagram predstavlja odnos sile i pomaka za sve četiri opruge. Krutost opruge vidi se na slici 2. Određena je krutost jedne opruge, tako da je očitano 25 % iznosa sile iz dijagrama. Prednost ovog sustava je jednostavnost i točnost. Razmak između dvije metalne ploče, odnosno duljina opruge, određuje bočnu silu, a jednostavnost se očituje u mogućnosti izradi distancera željenih dimenzija koje možemo postaviti između dvije metalne ploče i zatim zategnuti vijke. Nakon postizanja željene bočne sile ( $F_n$ ) i centriranje uzorka, aktivirana je preša pomoću koje je unesena sila na staklenu plohu. U svrhu sprječavanja direktnog kontakta između preše (čelik) i stakla, postavljena je tanka gumena podloška na rub stakla, tj. na mjestu unosa sile.



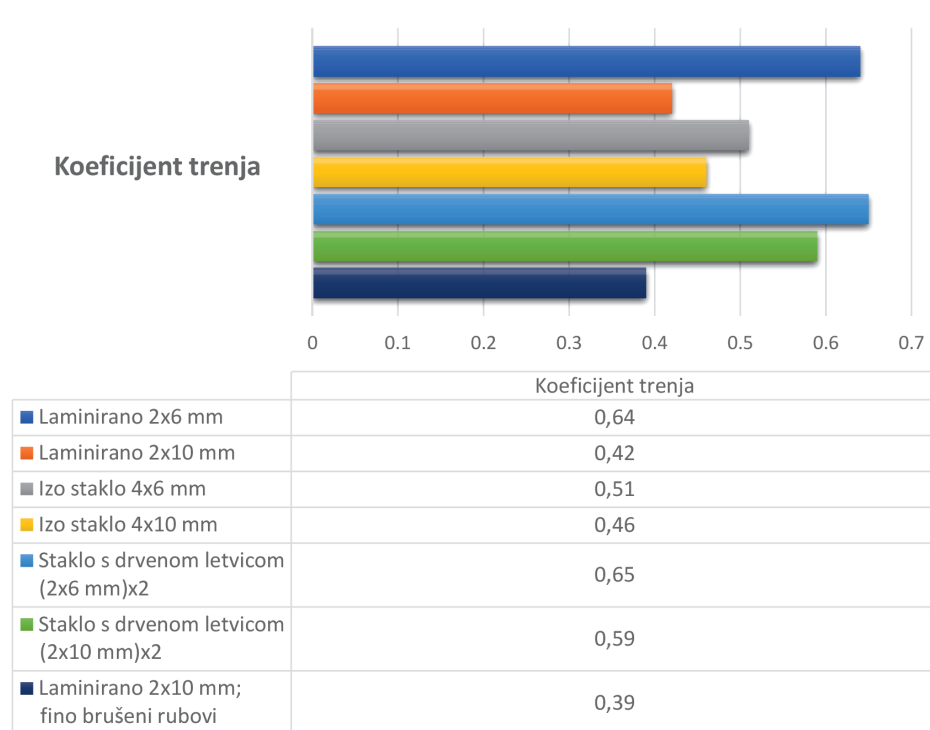
Slika 2. Krutost opruge i položaj distancera



Slika 3. Dimenzije i pozicije sustava za ispitivanje

### 3.4 Rezultati ispitivanja

Ukupno je ispitivano sedam uzoraka. Uzorci se razlikuju u debljini i vrsti staklenih elemenata. Šest uzoraka ima neobrađene rubove, a jedan uzorak ima fino brušene rubove. Uzorak s fino brušenim rubovima je ispitivan naknadno da bi se vidio utjecaj same obrade stakla. Eksperimentalnim putem dobiven je koeficijent trenja  $\mu$ , a dobije se kao omjer normalne (bočne) sile ( $F_n$ ) i sile trenja ( $F_t$ ). Kao što je već spomenuto, tijekom izmjerena je potrebna sila guranja staklene ploče tangencijalno na kontakt između drva i stakla, za određenu normalnu silu  $F_n$ . Rezultat se može grafički prikazati kao odnos između sile trenja  $F_t$  i uzdužnog pomaka pri određenoj normalnoj sili ( $F_n$ ). Sila trenja ( $F_t$ ) zapravo je polovica sile  $F$  potrebne za pomicanje stakla, jer se trenje javlja na dvije kontaktne plohe. U nastavku je dana usporedba rezultata pojedinih uzoraka (slika 4.) Sila trenja raste s povećanjem bočne sile i to po približno linearnom zakonu. Nakon utvrđene zakonitosti može se odrediti koeficijent trenja za svaki od uzoraka.

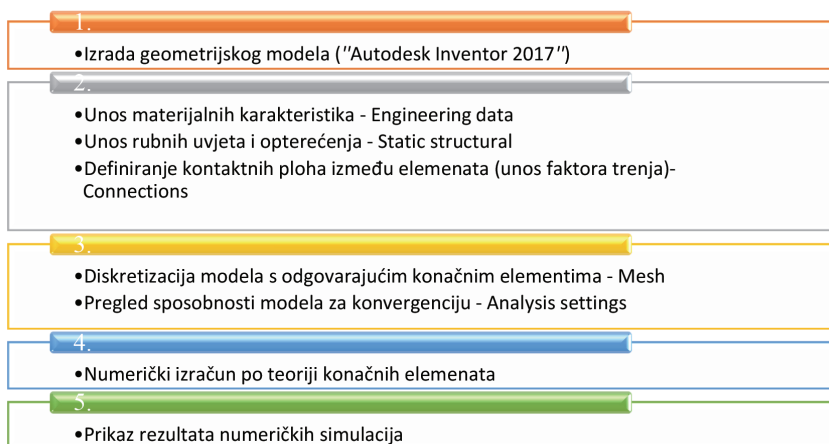


Slika 4. Koeficijent trenja – usporedba uzoraka

## 4 Numerički model

Provedena eksperimentalna istraživanja popraćena su numeričkim analizama. Cilj numeričkih analiza bio je proširenje znanja o ponašanju ispitanog sustava. Također, numeričke simulacije poslužile su kao potvrda i nadopuna eksperimentalnim rezultatima. Analiza je rađena programskom podrškom ANSYS, gdje se različite simulacije geometrijskih modela rješavaju uporabom metode konačnih elemenata (MKE) [11, 15, 17]. Cjelokupna geometrija modela izrađena je u programu "Autodesk Inventor 2017" te "uvučena" u računalni program ANSYS, gdje je formirana mreža konačnih elemenata i u kojem su se provodile daljnje simulacije. Shema postupka numeričke analize prikazana je na slici 5.

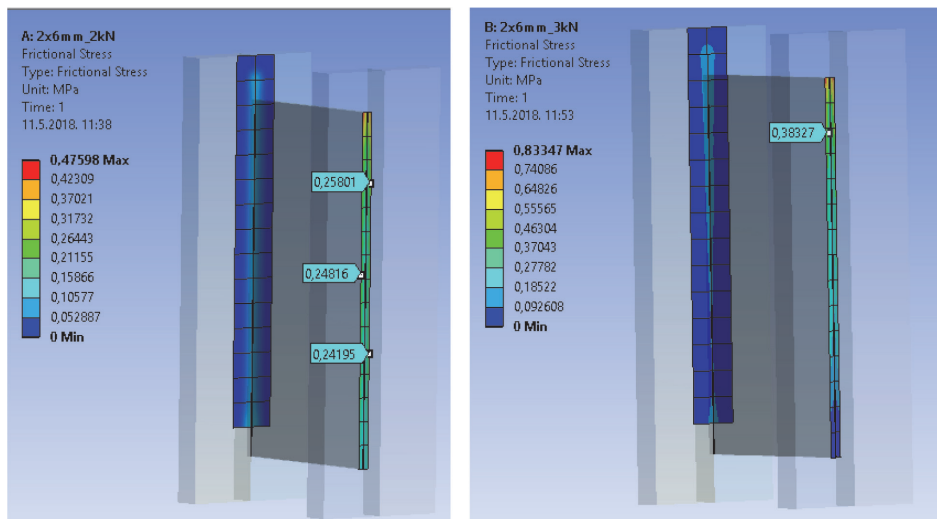




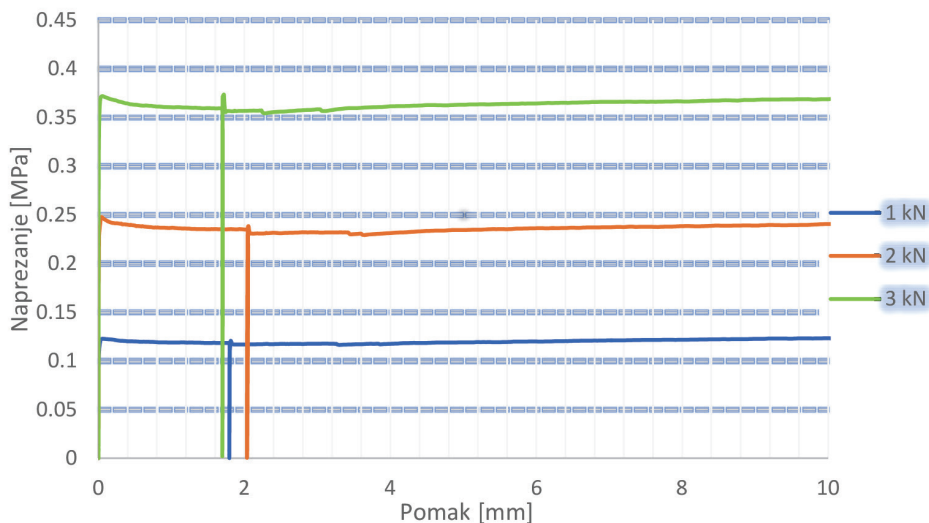
Slika 5. Shema postupaka numeričke analize

## 4.1 Rezultati numeričkih simulacija

S obzirom na to da je ispitivano više uzoraka, cilj numeričke analize je bio dobiti model i određenu zakonitost na osnovi koje bi se u budućnosti moglo predvidjeti ponašanje ovakvog sustava. Glavni parametar za kontrolu laboratorijskih ispitivanja i numeričkih simulacija je naprezanje, odnosno sila trenja koja se javlja na kontaktnim ploham, slika 6. i 7. Programska podrška ANSYS pruža mogućnost prikaza rezultata u vidu naprezanja uslijed trenja koje se javlja na kontaktnim ploham. U svrhu usporedbe rezultata, izračunana su stvarna naprezanja koja se javljaju na do-dirnim ploham.



Slika 6. Rezultati FEM analize – naprezanje na kontaktnim ploham



Slika 7. Rezultati laboratorijskog ispitivanja – naprezanje na kontaktim ploham

## 5 Zaključak i smjernice za daljnje istraživanje

Uvidom u postojeću literaturu i sadašnje stanje područja uočava se praznina u proučavanju kompozitnih sustava s nosivim staklom, posebice na opterećenja horizontalnim silama promjenljivog iznosa i smjera koja se događa prilikom potresnog opterećenja. Pri horizontalnom opterećenju, trenje između stakla i drva je čimbenik koji utječe na ponašanje i rad kompozitnog sustava drvo – nosivo staklo. U određenoj mjeri trenje ovisi o načinu obrade samih elemenata (posebno stakla), te naravno, o opterećenju koje je uneseno u sustav. Rubovi staklenih elemenata mogu se obraditi na više načina. Pokazalo se da je razlika između koeficijenta trenja kod neobrađenih i fino brušenih rubova zanemariva. Postoji razlika u koeficijentu trenja kada je umjesto laminiranog stakla postavljeno izolacijsko staklo ili staklo s drvenim letvicama, no nije značajna.

Numeričkim simulacijama može se dobiti detaljniji uvid u ponašanje kompozitnih sustava i pojedinih dijelova sustava. Rezultati eksperimenta su potvrđeni. Postupci modeliranja su od velike pomoći pri projektiranju ovakvih sustava te se na njima može zasnivati budući istraživački rad.

U ovom radu prikazana su ispitivanja uzoraka stakla s neobrađenim rubovima i fino brušenim rubovima. U budućnosti se mogu ispitati stakleni elementi s poliranim rubovima, te tako ustanoviti ponašanje i interakcija dvaju materijala. Tijekom prijenosa opterećenja i rada ovakvog kompozitnog sustava, kontaktna ploha na drvenom elementu s vremenom se mijenja i “troši”. Analiza i istraživanje promjene koeficijenta trenja u vremenu i pri cikličnom opterećenju bila bi od velikog značenja.

Eksperimentalna ispitivanja su potvrđena numeričkim simulacijama, no postoji prostor za detaljniju analizu sustava. Prije svega, model se treba proširiti na cijeli kompozitni okvir i realne uvjete. U tom slučaju, u prijenosu opterećenja sudjeluje mnogo više komponenti koje zahtijevaju posebnu pažnju pri numeričkim simulacijama.

## Literatura

- [1] Stepinac, M.: Spojevi kompozitnih sustava drvo - nosivo staklo u potresnom okruženju, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet sveučilišta u Zagrebu, 2015.
- [2] EN 572 - Glass in buiding - Basic glass products, CEN 2004
- [3] EN 12543-2 Glass in building - Laminated glass and laminated safety glass - Part 2: Laminated safety glass, CEN 2011
- [4] CEN, prEN 13474-2 Glass in building - Design of glass panes – Part 2: Design for uniformly distributed loads. 2000.
- [5] CEN, prEN 13474-3: Glass in building - Determination of the strength of glass panes - Part 3: General method of calculation and determination of strength of glass by testing. 2000.
- [6] Antolinc, D.: Uporaba steklenih panelov za potresno varno gradnjo objekto. Doktorska disertacija, 2013.
- [7] Antolinc, D., Zarnic, R., Cepon, F., Rajcic, V., Stepinac, M.: Laminated Glass Panels in Combination with Timber Frame as a Shear Wall in Earthquake Resistant Building Design. Challenging Glass 3 – Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, TU Delft,, 2012.
- [8] CEN, EN 1998: Design of structures for earthquake resistance. 2004.
- [9] Rosliakova, V.: Architectural application and Ecological Impact Studies of Timber-Glass Composites Structures, engineered transparency. International Conference at glasstec, Düsseldorf, Germany, 2014., pp. 1-8
- [10] Winter W, H.W., Kreher K, Load bearing and stiffening timber-glass composites. WCTE 2010, 2010.
- [11] Sucharda, O., Mikolasek, D., Brozovsky, J.: Finite Element Analysis and Modeling of Details Timber Structure. International journal of mathematical models and methods in applied sciences, 9 (2015), pp. 380-388.
- [12] Rajcic, V., Zarnic, R.: Racking Performance of Wood-Framed Glass Panels. World Conference on TimberEngineering, Paper No. WCTE 2012.
- [13] Rajcic, V., Zarnic, R.: Seismic response of timber frames with laminated glass infill, Proceedings of CIB-W18 Meeting 45, CIB-W18/45-15-4, pp. 11-19, Växjö, Sweden, 2012.

- [14] Krstevska, L., Tashkov, L., Rajcic, V., Zarnic, R.: Shaking Table Test of Innovative Composite Panel Composed of Glued Laminated Wood and Bearing Glass. 15 WCEE (15<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering) Lisboa 2012, pp. 1-10.
- [15] Tankut, N., Tankut, A., Zor, M.: Finite Element Analysis of Wood Materials, *Drvna industrija*, 65 (2014) 2, pp. 159-171.
- [16] Antolinc, D., Rajčić, V., Žarnić, R., Analysis of hysteretic response of glass infilled wooden frames, *Journal of civil engineering and management*, 20 (2014) 4, pp. 600-608
- [17] Hidallana-Gamage, H.D., Thambiratnam, D.P., Perera, N.J.: Numerical modelling and analysis of the blast performance of laminated glass panels and the influence of material parameters. *Engineering Failure Analysis*, Volume 45, October 2014, pp. 65-84