

# EKSPERIMENTALNO I NUMERIČKO ODREĐIVANJE KOEFIČIJENTA PROLAŽENJA TOPLOTE KROZ ŠESTOKOMORNI DVOSTRUKO ZASTAKLJENI PVC PROZOR SA ARGONSKOM ISPUNOM

## EXPERIMENTAL AND NUMERICAL EXAMINATION OF THE THERMAL TRANSMITTANCE OF THE PVC WINDOW FRAME OF SIX CAVITIES WITH DOUBLE GLAZED GLASS FILLED WITH ARGON

Aleksandar KIJANOVIĆ<sup>\*1</sup>, Nedžad RUDONJA<sup>2</sup>, Milan GOJAK<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Institut IMS, Laboratorija za toplotnu tehniku i zaštitu od požara, Beograd, Srbija,

<sup>2</sup> Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

*U radu je prikazano određivanje koeficijenta prolaženja toplote korišćenjem softverskog paketa THERM na primeru šestokomornog dvostruko zastakljenog PVC prozora sa argonskom ispunom. Numeričkim proračunom su dobijene vrednosti temperaturnog polja unutar prozirnog i neprozirnog dela prozora, površinski toplotni protok, kao i vrednost koeficijenta prolaženja toplote. Kako bi se utvrdila verodostojnost rezultata numeričkog proračuna sprovedena su eksperimentalna ispitivanja datog PVC prozora korišćenjem hot-box metode. Uporednom analizom utvrđeno je dobro slaganje eksperimentalnih i numeričkih vrednosti koeficijenta prolaženja toplote.*

**Ključne reči:** THERM; koeficijent prolaženja toplote za prozor; termičke simulacije PVC prozora; eksperimentalna ispitivanja PVC prozora

*In this paper was demonstrated an examination of thermal transmittance of the PVC window frame of six cavities with double glazed glass filled with argon using THERM software. The numerical simulations were performed to determine thermal transmittance, temperatures and heat flow fields for a window. Experimental examination were carried out for verification of numerical simulations using hot-box method. The comparative analysis showed good agreement between experimental and numerical values for thermal transmittance.*

**Key words:** THERM; thermal transmittance of PVC window; thermal simulation of PVC windows; experimental examination of PVC windows

### 1. Uvod

Gubici i dobici toplote građevinskih objekata najvećim delom zavise od termofizičkih karakteristika građevinskih elemenata i konstrukcija od kojih su objekti izgrađeni. Podaci govore [1] da se najveći deo toplotnih gubitaka, odnosno toplotnih dobitaka ostvaruje kroz prozore građevinskog omotača objekta u iznosu 25% od ukupne potrebne energije za grejanje i hlađenje objekta. S tim u vezi, od presudnog značaja za što preciznije inženjerske proračune toplotnog i rashladnog

opterećenja, kao i uređaja koji se koriste u sistemima grejanja i klimatizacije jeste poznavanje vrednosti koeficijenta prolaženja toplote kroz prozore i vrata, tj. kroz prozirne konstrukcije građevinskih objekata. Kada je reč o zemljama Evropske unije određivanje koeficijenta prolaženja toplote kroz prozore i vrata vrši se po važećem ISO 12567-1 standardu [2]. U Srbiji se po domaćem Pravilniku o energetske efikasnosti iz 2011. godine još uvek koristi standard SRPS U.J5.060 [3], baziran na starom DIN standardu. Osnova određivanja koeficijenta prolaženja toplote po oba standarda leži u eksperimentalnoj

\* Autor za korespondenciju: aleksandar.kijanovic@institutims.rs

proceduri zasnovanoj na tzv. hot-box metodi. Metoda se bazira na korišćenju tzv. „tople“ i „hladne“ komore u kojima se veštačkim putem održavaju različite vrednosti temperature vazduha. Ispitivani uzorak (vrata, prozor,...) se postavlja između „tople“ i „hladne“ komore i usled razlike temperatura vazduha u dve komore dolazi do prolaženja toplote kroz sam uzorak, ali i kroz zid koji razdvaja dve komore. Bilansiranjem energijskih tokova za obe komore određuje se deo toplotnog protoka koji prolazi kroz ispitivani objekat i na bazi jednostavnih proračuna uz korišćenje eksperimentalno dobijenih podataka dobija se vrednost koeficijenta prolaženja toplote kroz ispitivani uzorak. Procedura samog merenja i dobijanja validnih eksperimentalnih rezultata zavisi od više činilaca, ali uglavnom od materijala i dimenzija ispitivanog uzorka [6], kao i od stacionarnosti procesa.

U novije vreme, primena numeričkih metoda i softvera pruža mogućnost dobijanja vrednosti koeficijenta prolaženja toplote na dosta jednostavniji način uz dobijanje rezultata dovoljne tačnosti.

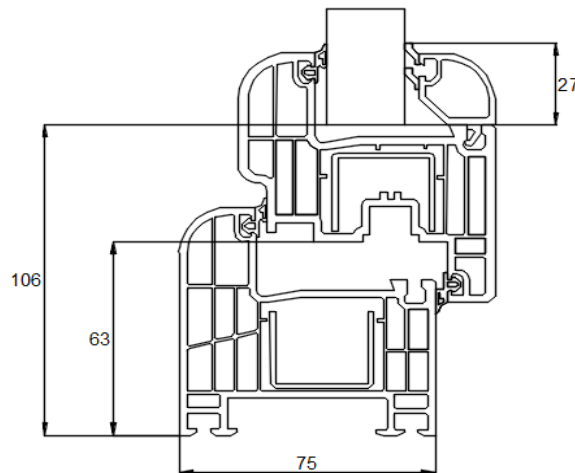
Osnovna prednost numeričkog proračuna u odnosu na eksperimentalnu analizu je taj što je uvek moguće definisati iste granične uslove, kao i mogućnost poređenja termičkih karakteristika različitih građevinskih konstrukcija [4].

Najčešće korišćeni softveri za numeričko određivanje koeficijenta prolaženja toplote su *THERM*, *FLIXO*, *SOLIDO*, *ANSYS* i sl. Određivanje koeficijenta prolaženja toplote u softverskom paketu *THERM* se bazira na primeni algoritma definisanog standardom ISO 15099 [5]. Po ovom standardu osim termičkih karakteristika određuju se i optičke karakteristike prozora kao što su refleksivnost, emisivnost i transmisivnost stakla. U ovom radu izvršeno je poređenje eksperimentalnih vrednosti koeficijenta prolaženja toplote dobijenih za dvostruko zastakljeni šestokomorni prozor sa argonskom ispunom i numeričkih vrednosti dobijenih korišćenjem softverskog paketa *THERM*.

## 2. Fizički model dvostruko zastakljenog prozora sa argonskom ispunom

Numeričkim putem je određen koeficijent prolaženja toplote za jednokrlni dvostruko zastakljen prozor sa argonskom ispunom, dimenzija 1000 x 1400 mm. Prozorski ram je napravljen od šestokomornog profila. Materijal za izradu prozorskog profila je tvrdi PVC. Razlog zbog koje se koristi tvrdi PVC u izradi PVC prozora je njegova postojanost u širokom temperaturnom intervalu (od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $80^{\circ}\text{C}$ ). Prozorski ram je urađen u trajnoj zavarivačkoj tehnici (nemogućnost demontaže rama). U ram je ugrađen staklo paket (4+15+4 mm) ispunjen argonom. Paket se sastoji od dve staklene ploče

(stakla) od kojih je jedna tipa FLOT, a druga nisko emisiono staklo (LOW-E). Između staklenih ploča postavljen je aluminijski distancer po celom obimu staklo paketa. Debljina lima distancera iznosi 1,1 mm i napunjen je silikagelom. Da bi se izbeglo curenje inertnog gasa van gasne ispune i da ne bi došlo do nastanka kondenzacije u gasnoj ispuni, po celom obimu distancera vrši se zaptivanje tiokolom i butilom. Primarna uloga butila je formiranje toplotnog mosta kako bi se izbegla mogućnost nastanka kondenzacije između staklenih ploča i do  $-40^{\circ}\text{C}$ . Prozorski profili su ojačani odgovarajućim čeličnim U profilom debljine 1,5 mm. Na ovaj način je obezbeđena statička stabilnost prozora pri udarima vetra, kao i kod nepravilnog rukovanja. Zaptivanje između krila i rama prozora se ostvaruje pomoću meke EPDM (etilen propilen dien monomer) zaptivne gume. Staklo paket se u krilo ugrađuje oslanjanjem na dva podmetača od polietilena. Sa unutrašnje strane prozora staklo se pričvršćuje tzv. lajsnom za staklo od mekog PVC-a.



Slika 1: Poprečni presek fizičkog modela šestokomornog PVC prozora

Ukupne dimenzije stakla su 800 x 1200 mm. Za određivanje vrednosti koeficijenta prolaženja toplote kroz staklo, merodavna je površina svetlog otvora prozora (površina stakla kroz koju prolazi svetlost). Dimenzije prozirnog dela stakla koje ulaze u proračun su 746 x 1146 mm. Razlika ukupne površine prozora i površine svetlog otvora predstavlja površinu neprozirnog dela prozora koja se koristi u proračunu za koeficijent prolaženja toplote za ram. Da bi se odredio koeficijent prolaženja toplote za celokupni prozor neophodno je izračunati površinske udele rama i stakla prema ukupnoj

površini prozora. U posmatranom slučaju površinski udeo stakla iznosi 61%, dok ostatak zauzima netransparentni deo prozora.

### 3. Matematički model dvostruko zastakljenog prozora sa argonskom ispunom

Diferencijalna jednačina provođenja toplote predstavlja parcijalnu diferencijalnu jednačinu kojom je opisana prostorna i vremenska promena temperature u posmatranom objektu. Opšti oblik diferencijalne jednačine provođenja toplote kroz čvrsto telo, u kome nema unutrašnjeg izvora toplote, ima oblik

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\Delta T \quad (1)$$

Ako je provođenje toplote stacionarno i dvodimenzijnsko, onda se prethodna jednačina svodi na Laplasovu parcijalnu diferencijalnu jednačinu

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

Laplasova diferencijalna jednačina provođenja toplote nema analitičko rešenje za složenije geometrijske domene i rešava se isključivo numeričkim putem. Rešavanjem Laplasove jednačine dobija se temperaturno polje u geometrijskom domenu. Veza između površinskog toplotnog protoka i promene temperature u posmatranom pravcu data je Furijeovim zakonom provođenja toplote koji ima oblik [5]

$$\dot{q} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \mathbf{e}_y \right) \quad (3)$$

Gde je  $k$  toplotna provodljivost materijala,  $\dot{q}$  površinski toplotni protok, dok su  $\mathbf{e}_x$  i  $\mathbf{e}_y$  jedinični vektori. Određivanjem srednjeg toplotnog protoka na granicama geometrijskog domena i poznavanjem razlike temperatura vazduha između „tople“ i „hladne“ komore, računskim putem se određuje koeficijent prolaženja toplote primenom formule u algebarskom obliku (4)

$$U = \frac{\dot{q}}{\Delta T} \quad (4)$$

U programskom paketu *THERM* prethodne jednačine se rešavaju metodom konačnih elemenata. Određivanjem energijskog bilansa za staklo dobijaju se vrednosti temperatura na granicama gasnih ispuna. Energijski bilans za staklo se svodi

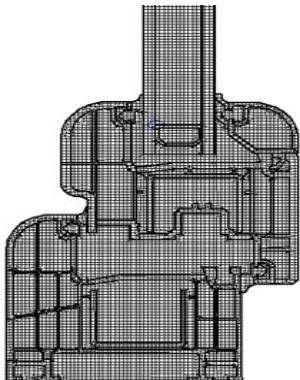
na numeričko rešavanje sistema linearnih jednačina čijim se rešavanjem dobija raspodela temperatura po debljini stakla. Detaljan postupak određivanja raspodele temperature i određivanje ekvivalentne toplotne provodljivosti gasne ispune definisan je standardom ISO 15099 [5]. Određivanje koeficijenta prolaženja toplote za staklo je izvršeno u programu *WINDOW* [4]. U ovom programu se najpre definišu tipovi stakla, debljine stakla i vrsta gasne ispune, pa se zatim vrši proračun koeficijenta prolaženja toplote. Rezultati proračuna za staklo se zatim učitavaju u program *THERM* i dalje se određuje koeficijent prolaženja toplote za prozor. Granični uslovi koji se zadaju za dvodimenzijnsku analizu šestokomornog dvostruko zastakljenog PVC prozora su otpori prolaženju toplote sa „tople“ i „hladne“ strane prozora, kao i temperature vazduha u komorama. Vrednost toplotnog otpora sa „tople“ (unutrašnje) strane prozora iznosi  $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  pri temperaturi od  $20^\circ\text{C}$  u toploj komori. Vrednost toplotnog otpora sa „hladne“ (spoljašnje) strane prozora iznosi  $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  pri temperaturi od  $0^\circ\text{C}$  u hladnoj komori. Ovim graničnim uslovima se definišu zimski uslovi ispitivanja (winter boundary conditions) [5]. Vrednosti toplotnih otpora su dodeljene u skladu sa propisanim toplotnim otporima po domaćem standardu za eksperimentalno ispitivanje građevinskih konstrukcija [3], iz razloga da bi se izvršilo poređenje eksperimentalnih i numeričkih vrednosti za koeficijent prolaženja toplote za prozor.

### 4. Rezultati numeričke analize prenošenja toplote kroz šestokomorni dvostruko zastakljeni prozor sa argonskom ispunom

Numeričko određivanje koeficijenta prolaženja toplote šestokomornog dvostruko zastakljenog PVC prozora sa argonskom ispunom sprovedeno je korišćenjem besplatnog softverskog paketa *THERM*. Pomoću ovog programa vrši se dvodimenzijnski proračun prozora, metodom konačnih elemenata. Proračun u ovom programu je baziran po algoritmu standarda ISO 15099 [5]. Ovim standardom je definisano matematičko modeliranje vazdušnih šupljina unutar prozorskih profila i modeliranje gasne ispune. Svi radijusi i zaobljenja vazdušnih šupljina i profila se aproksimiraju pomoću grupe tetiva na svakom radijusu, pri čemu se radijusi ispod 1 mm zanemaruju. Vazdušne šupljine se pri simulaciji tretiraju kao čvrsto telo i dodeljuje im se tip materijala (*Frame Cavity NFRC 100*). Ostalim materijalima koji su sastavni deo rama dodeljuju se standardizovane vrednosti za toplotnu provodljivost koje su propisane po ISO 10077-1 [7].

Nakon definisanja tipova materijala rama u program se ubacuju podaci za transparentni deo prozora koji je definisan u programu *WINDOW*. Kriterijum konvergencije rešenja

iznosi  $1e-07$ . Postupak numeričkog rešavanja jednačina je iterativan do 50 iteracija. Greška u energijskom bilansiranju iznosi 5,92%. Prosečna površina elementa mreže iznosi manje od  $2 \text{ mm}^2$ . Na slici 2 prikazana je generisana numerička mreža.



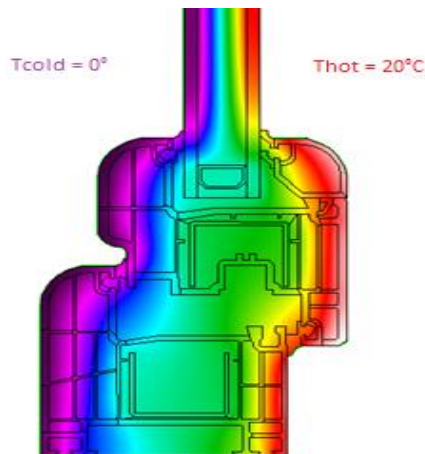
Slika 2: Prikaz numeričke mreže fizičkog modela ispitivanog prozora

## 5. Rezultati numeričkog modeliranja dobijeni korišćenjem THERM softvera

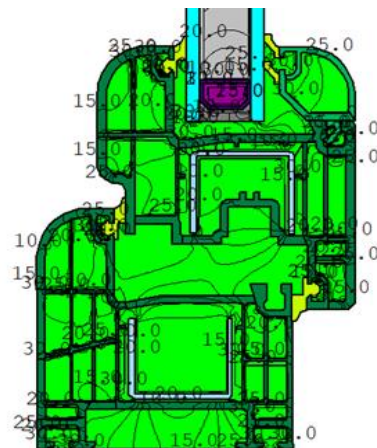
Numeričkim rešavanjem Laplasove i Furijeove jednačine za šestokomorni dvostruko zastakljen prozor sa argonskom ispunom u programu *THERM*, dobija se temperaturno polje i polje površinskog toplotnog protoka (slika 3). Na slici 3a prikazano je temperaturno polje u poprečnom preseku prozora. Uticaj vazдушnih komora u rama na smanjenje prenošenja toplote je primetan u bočnim delovima rama gde se nalaze vazdušne komore manjih dimenzija. Intenzivniji toplotni protok je prisutan u većim komora u kojima se nalazi metalni U profili. Uzrok većeg toplotnog protoka u ovom delu rama je nedostatak termičkih prekida, što ima za posledicu povećanje koeficijenta prolaženja toplote kroz ram, pa samim tim i za ceo prozor. Grafički prikaz linija konstantnog toplotnog protoka je dat na slici 3b). Takođe, može se primetiti i povećan toplotni protok na mestu kontakta aluminijumskog distancera i PVC rama, odnosno može se uočiti efekat u donjem staklenom delu prozora.

## 6. Eksperimentalna validacija numeričkog proračuna korišćenjem hot-box aparature

Eksperimentalno određivanje koeficijenta prolaženja toplote prozora u skladu sa navedenim standardima vrši se u unutar kondicioniranih „toplih“ i „hladnih“ ispitnih komora [3]. Na uzorak se postavljaju merni instrumenti (termoparovi i fluksmetri) sa tople i hladne strane ispitivanog uzorka.



a)



b)

Slika 3: Temperaturno polje i polje toplotnog protoka unutar fizičkog modela prozora dobijeni numeričkim modeliranjem

Nakon postizanja stacionarnog stanja vrši se obrada prikupljenih podataka i proračunava se koeficijent prolaženja toplote. U svrhu ovog eksperimenta postavljeni su termoparovi i toplotni fluksmetri u centralnom i u donjem staklenom delu prozora. Razlog zbog kojeg su postavljeni merni instrumenti u donjem staklenom delu prozora je taj da bi se eksperimentalno odredila promena toplotnog fluksa po visini stakla. Kod numeričkog modela ova površina predstavlja razliku površina svetlog otvora prozora i centralnog dela stakla. Površina donjeg staklenog dela prozora se određuje na visini od 63,5 mm, izmereno od unutrašnje ivice netransparentnog dela prozorskog krila. Visina od 63,5 mm na kojoj se određuje efe-

kat u donjem staklenom delu prozora je definisana standardima i u programu *THERM*. Na donjem delu prozora, na ramu sa hladne strane komore nalazi se toplotni fluksmetar. Dispozicija mernih instrumenata ispitivanog uzorka prikazana je na slici 4.



Slika 4: Prikaz mernih mesta na prozoru u hladnoj komori

Nakon dostizanja stacionarnog stanja u vremenskom intervalu od 200 min izvršeno je osrednjavanje izmerenih vrednosti i dobijene su prosečne vrednosti za temperature i toplotne flukseve u centralnom delu stakla, u donjem delu stakla i na ramu.

Tabela 1: Eksperimentalne dobijene vrednosti

	Ram	Centralni deo stakla	Donji deo stakla
Udeo u ukupnoj površini [-]	0,39	0,45	0,16
Temperatura na toploj strani uzorka [°C]	34,2	37,4	35,3
Temperatura na hladnoj strani uzorka [°C]	23,2	23,7	23,6
Temperaturna razlika [°C]	11	13,7	11,7
Toplotni fluks [W/m <sup>2</sup> ]	16,76	23,22	22,88
Toplotni otpor [m <sup>2</sup> K/W]	0,657	0,590	0,511
Koeficijent prolaženja toplote [W/ m <sup>2</sup> K]	1,209	1,316	1,416

Tabela 2: Numerički određene vrednosti koeficijenta prolaženja toplote

	Ram	Centralni deo stakla	Donji deo stakla
Koeficijent prolaženja toplote [W/ m <sup>2</sup> K]	1,165	1,591	1,945

Rezultati eksperimentalne i numeričke analize su dati u tabelama 1 i 2. Može se primetiti da su vrednosti koeficijenata prolaženja toplote za ram bliske, iz čega se izvodi zaključak da dati numerički model pruža dovoljno dobru tačnost u odnosu na realni objekat (prozor). Vrednosti koeficijenata prolaženja toplote u centralnom delu stakla značajnije odstupaju. Razlog odstupanja ovih vrednosti je pre svega što granični uslovi koji su zadati preko termičkih otpora u numeričkom modelu odstupaju od stvarnih termičkih otpora u ispitnim komorama. Takođe na toplotne fluksmetre deluje uticaj zračenja zidova ispitne komore, narušavanje stacionarnog stanja pri paljenju i gašenju rashladnih i grejnih jedinica u komorama, greške pri osrednjavanju mernih veličina, greške merenja itd.. U donjem delu stakla ovaj efekat je još izraženiji. Efekat u donjem staklenom delu predstavlja povećani toplotni fluks, što je posledica korišćenja metalnih distancera za staklo i uticaj materijala samog prozora. Razlog zbog kojeg je izmerena manja vrednost koeficijenta prolaženja toplote je tehničke prirode, pre svega zbog male merne površine koju pokriva toplotni fluksmetar i nemogućnosti merenja toplotnog fluksa po celoj visini u donjem staklenom delu.

Da bi precizno utvrdili raspodelu toplotnog fluksa u donjem staklenom delu neophodno je imati što veći broj toplotnih fluksmetara postavljeni po visini donjeg dela stakla. Ovo predstavlja ozbiljan tehnički zahtev i nemogućnost merenja u donjem delu stakla. Koeficijent prolaženja toplote u donjem staklenom delu prozora se najčešće određuje numeričkim putem, jer se jednostavno matematički osrednjavaju vrednosti temperatura i toplotnog fluksa u ovom delu stakla.

Koeficijent prolaženja toplote za prozor se određuje na osnovu eksperimentalno i numerički dobijenih vrednosti koeficijenata prolaženja toplote za ram, staklo i donji deo stakla. Udeli ovih površina u ukupnoj površini prozora su dati u tabeli 1. Ukupan koeficijent prolaženja toplote za prozor se određuje primenom naredne formule [3]:

$$U = (A_{\text{centar stakla}} U_{\text{centar stakla}} + A_{\text{donji deo stakla}} U_{\text{donji deo stakla}} + A_{\text{ram}} U_{\text{ram}}) / A_{\text{ukupno}} \quad (5)$$

U tabeli 3 su prikazani dobijeni eksperimentalno i numerički koeficijenti prolaženja toplote za dvostruko zastakljeni

šestokomorni PVC prozor sa argonskom ispunom. Vrednosti koeficijenta prolaženja toplote za prozor dobijeni eksperimentalno i numerički značajno se razlikuju, pre svega zbog velike razlike u koeficijentu prolaženja toplote u donjem staklenom delu prozora.

*Tabela 3: Koeficijent prolaženja toplote kroz dvostruko zastakljen PVC prozor sa argonskom ispunom*

	$U_{\text{eksperiment}}$ [W/ m <sup>2</sup> K]	$U_{\text{numerika}}$ [W/ m <sup>2</sup> K]
Koeficijent prolaženja toplote za prozor	1,759	2,439

U tabeli 4 prikazane su vrednosti koeficijenata prolaženja toplote bez uticaja efekata u donjem staklenom delu prozora.

*Tabela 4: Koeficijent prolaženja toplote kroz dvostruko zastakljen PVC prozor sa argonskom ispunom bez uticaja efekta u donjem staklenom delu prozora*

	$U_{\text{eksperiment}}$ [W/ m <sup>2</sup> K]	$U_{\text{numerika}}$ [W/ m <sup>2</sup> K]
Koeficijent prolaženja toplote za prozor	1,423	1,693

## 7. Zaključak

U radu je izvršena numerička i eksperimentalna analiza prenošenja toplote kroz šestokomorni dvostruko zastakljeni PVC prozor sa argonskom ispunom. Numerička analiza prenošenja toplote kroz prozor je izvršena u okviru programskog paketa *THERM* i dobijeni numerički rezultati su zadovoljavajuće tačnosti u odnosu na eksperimentalno određenu vrednost koeficijenta prolaženja toplote. Takođe, u radu je data analiza

efekta povećanog toplotnog protoka u donjem staklenom delu prozora koji nastaje kao posledica korišćenja aluminijumskog distancera između stakala u staklo paketu. U slučaju da se navedeni efekat zanemari dobilo bi se veće slaganje rezultata numeričkog modela i eksperimentalnih istraživanja. Moguće je zaključiti da se numeričkim modeliranjem kompleksnih prozorskih konstrukcija može postići zadovoljavajuća tačnost u pogledu dobijenih vrednosti za koeficijent prolaženja toplote, tj. numeričko modeliranje može poslužiti za ocenu termičkih performansi prozora i kao zamena za komplikovanu eksperimentalnu verifikaciju istih.

## 8. Literatura

- [1] **A. Gustafsen, H. Goudey**, Proceedings of the Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XI International Conference (Buildings XI), Clearwater Beach, USA, 2010.
- [2] \*\*\*, ISO 12567-1 Thermal performance of windows and doors – Determination of thermal transmittance by hot-box method – Part 1: Complete windows and doors, CEN, July 2010
- [3] \*\*\*, SRPS U.J5.060 Toplotna tehnika u visokogradnji – LABORATORIJSKE METODE ISPITIVANJA PROLAZA TOPLOTE U GRAĐEVINSKIM KONSTRUKCIJAMA ZGRADA, Beograd, 1983(povučen)
- [4] THERM 7/ WINDOW 7 NFRC Simulation Manual, National Fenestration Rating Council, USA, 2017.
- [5] \*\*\*, ISO 15099 Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations, ISO, 2010
- [6] **V. Stojanović**, Priručnik građevinske bravarije, Grafostil, Kragujevac, Srbija, 2008.
- [7] \*\*\*, ISO 10077-1 Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance Part 1: General, ISO, 2012