

Uticaj materijala na energetska svojstva i toplotni komfor u zgradama

Ana Radivojević^{1*} i Ljiljana Đukanović²

* Autor za korespondenciju

1 Arhitektonski fakultet, Univerzitet u Beogradu, e-mail: ana@arh.bg.ac.rs

2 Arhitektonski fakultet, Univerzitet u Beogradu, e-mail: djulij@arh.bg.ac.rs

APSTRAKT

Savremeno projektovanje i građenje ima za cilj da uspostavi adekvatan odnos između tri karakteristična pola: čoveka – korisnika, zgrade i okoline. Ovo poglavlje ima za cilj da istakne dotični problem uzimajući u obzir relevantne karakteristike termičkog omotača zgrade, odnosno uticaj koji izbor materijala ima na ponašanje objekta u celini. Danas smo zaintrigirani ponašanjem zgrade kao sistema, uglavnom kroz prizmu količine energije koju troši tokom svog postojanja. S jedne strane, to nas dovodi do potrebe za adekvatnim poznavanjem osnovnih principa fizike zgrade, a, s druge strane, do spoznaje o relevantnim osobinama materijala koje koristimo u procesu izgradnje kako bismo zadovoljili zahteve komfora korisnika. Iako se ovim poglavljem stavlja naglasak na problem zadovoljavanja zahteva za toplotnim komforom, na primeru karakterističnih tipova stambenih zgrada sa područja Beograda koje su prikazane i analizirane razmatran je stepen zadovoljavanja ukupnih zahteva komfora, kao i međuzavisnost koja postoji između različitih tipova komfora (toplotnog, vazdušnog, zvučnog i svetlosnog).

KLJUČNE REČI

parametri i uslovi komfora, ponašanje zgrada, toplotni i maseni protok, toplotna izolacija i termička masa, paropropustljivost

1 Uvod – Savremeni stav prema pitanju toplotne zaštite objekata

Savremeno društvo zahteva veliku količinu energije za svoje funkcionisanje. Pošto ta energija u velikoj meri potiče iz neobnovljivih izvora, pitanje potrošnje energije postalo je jedan od najvažnijih problema sa kojima se moderno društvo suočava, počevši od energetske krize sedamdesetih godina. S obzirom da su zgrade dokazano najveći potrošači energije, ovaj problem direktno proizilazi iz njihovog dizajna i strukture.

U početku su pažnja i briga prvenstveno bile usmerene ka potrebi za racionalnijim korišćenjem energije, što je doprinelo razvoju propisa u oblasti termičke zaštite zgrada. Danas, međutim, odnos prema životnoj sredini se shvata na mnogo širi način, poznat kao doktrina održivog razvoja, što bi, s aspekta energije, značilo da je izvorni pristup u vezi sa potrebom za očuvanjem energije vremenom evoluirao u holistički koncept energetske efikasnosti zgrada. Generalno posmatrano, problem energetske efikasnosti zgrada je povezan sa potrebom kontrole potrošnje operativne energije. Međutim, može se očekivati da će se, vremenom, sa povećanjem energetske efikasnosti, problem korišćenja energije preusmeriti ka pitanju tzv. ugrađene energije materijala i komponenti, čime se daje veći značaj pitanju izbora materijala prilikom postizanja ukupne energetske efikasnosti (Zöld & Szalay, 2007).

Energetska svojstva energetske efikasne zgrade i njihova potrošnja energije nesumnjivo u velikoj meri zavise od ostvarenih termičkih karakteristika, ali i od drugih faktora koji igraju sve važniju ulogu, kao što su instalacije grejanja i klimatizacije, primena energije iz obnovljivih izvora, elementi pasivnog grejanja i hlađenja, senila, kvalitet vazduha u unutrašnjem prostoru, adekvatno prirodno svetlo i dizajn zgrade (The European Parliament and the Council of the European Union, 2010). Treba naglasiti da takve zgrade treba projektovati i izvoditi tako da troše minimalnu količinu energije, ali uz istovremeno pružanje maksimalnog komfora korišćenja. Takav integrativni pristup procesu arhitektonskog projektovanja ima tri jednaka pola interesovanja – čoveka, zgradu i tehnologije, a često se shvata kao „klimatski dizajn“, odnosno projektovanje u skladu sa klimom (Hauslanden, de Saldanha, Liedl, & Sager, 2005).

Odgovarajući izbor materijala ima direktan uticaj na postizanje potrebnih termičkih osobina zgrade. Međutim, na udobnost utiču mnogi parametri, kao što su temperatura, vlažnost, kretanje vazduha, kvalitet vazduha, osvetljenje, buka, itd. (Sassi, 2006), koji takođe zavise od svojstava materijala, odnosno, od omotača zgrade. Stoga će ovo poglavlje analizirati složeni međusobni odnos između toplotnih zahteva savremene zgrade i njenog materijalnog aspekta, imajući u vidu iskazanu potrebu za stvaranjem ugodnog okruženja.

Diskusija o problemu koji se analizira u ovom poglavlju je podeljena na nekoliko delova koji objašnjavaju:

- osnovne aspekte i parametre komfora u zgradama
- relevantne elemente ponašanja zgrade u odnosu na osnovne principe fizike zgrade, uzimajući u obzir higrotermalne osobine građevinskih materijala i druge elemente koji su relevantni za adekvatno toplotno ponašanje građevinskog omotača i zgrade u celini.

U poslednjem delu poglavlja, u vidu studije slučaja, analizirana je sprega koja postoji između izbora materijala, ponašanja zgrade i rezultujućeg nivoa komfora. Na osnovu rezultata prethodne studije koja se fokusirala na meru u kojoj je postignuta ukupna udobnost stanovanja stambenog fonda Beograda (Đukanović, 2015), a kao model za ovo konkretno istraživanje, odabrano je nekoliko reprezentativnih zgrada. S obzirom na to da je Beograd glavni grad, a najveći grad u Srbiji, dotična studija ukazuje na širu sliku, odnosno, na kvalitet života u čitavoj zemlji. Imajući u vidu lokaciju odabranog modela, postignuti komfor stanovanja je procenjivan u skladu sa relevantnim srpskim propisima.

2 **Zahtevi korisnika – Postizanje komfora u zgradama**

Može se reći da postizanje takozvanih zahteva korisnika predstavlja jedan od principa i ciljeva savremenog projektovanja. Generalno posmatrano, korisnik može biti osoba ili bilo koje drugo živo biće, ili pak stvar za koju je objekat projektovan i građen, ali je najčešće upravo čovek neposredni predmet projektantskog interesovanja. Nivo ispunjenja zahteva korisnika ili, drugim rečima, ukupan utisak o kvalitetu prostora je, s jedne strane, individualan i rezultat percepcije naših čula, dok je, s druge strane, spregnut i usklađen sa standardima koji definišu granične merljive vrednosti reprezentativnih parametara. U oba slučaja, utisak je zasnovan na postignutoj udobnosti prostora. Pojam komfora, odnosno, udobnosti, se može razumeti kao sve ono što čini život udobnijim, a može se definisati i kao „stanje fizičke lakoće“ (Sassi, 2006).

Iako termini udobno i zdravo nisu sinonimi, udobnost mesta je usko povezana sa pojmom zdravog mesta. Stoga se savremena želja za projektovanjem za udobnost može shvatiti kao preduslov za postizanje zdravog okruženja (Sassi, 2006). Shodno tome, aktuelna istraživanja i praksa nastoje da definišu relevantne indikatore zdravlja i komfora (Bluyssen, 2010).

Ispunjavanje fizičkog aspekta nivoa udobnosti znači obezbeđivati:

- odgovarajuću unutrašnju temperaturu u odnosu na spoljnu temperaturu;
- odgovarajući nivo relativne vlažnosti i njegov uticaj na temperaturu;
- dovoljno prirodnog svetla i kvalitetnog osvetljaja bez bljeska;
- adekvatnu zvučnu izolovanost između zgrada – prema spoljašnjosti, kao i unutar zgrade; itd.

Ovi aspekti se mogu shvatiti kao specifični oblici komfora: termički, vizuelni ili svetlosni i akustički ili zvučni. Imajući u vidu da stvaranje zdrave životne sredine zahteva obezbeđivanje adekvatnog kvaliteta vazduha koji ne sadrži toksične supstance, mogli bismo da govorimo i o kvalitetu unutrašnjeg vazduha, koji bi se mogao nazvati vazдушnim komforom. Izgrađena sredina utiče na naše čulne organe (Szokolay, 2004), a naše iskustvo udobnosti u velikoj meri zavisi od osetljivosti naših čula, što je individualna kategorija. Međutim, postoje i različiti parametri vezani za zgradu i građenje koji utiču na sve oblike komfora. Veza koja postoji između različitih tipova udobnosti, čula pomoću kojih ih percipiramo i fizičkih parametara pomoću kojih opisujemo, objašnjavamo i merimo ove oblike komfora prikazana je u Tabeli 2.1.

OBLIK KOMFORA	TOPLOTNI	VAZDUŠNI	SVETLOSNI	ZVUČNI
Čulo	koža	nos, usta	oko	uho
				
Povezani fizički parametri	temperatura	odnos O ₂ :CO ₂	osvetljenost	glasnost
	vlažnost		bljesak	nivo zvuka
	kretanje vazduha	brzina provetravanja	temperature boje svetlosti	buka
	srednja temperatura zračenja	prisustvo zagađivača	faktor dnevnog svetla	

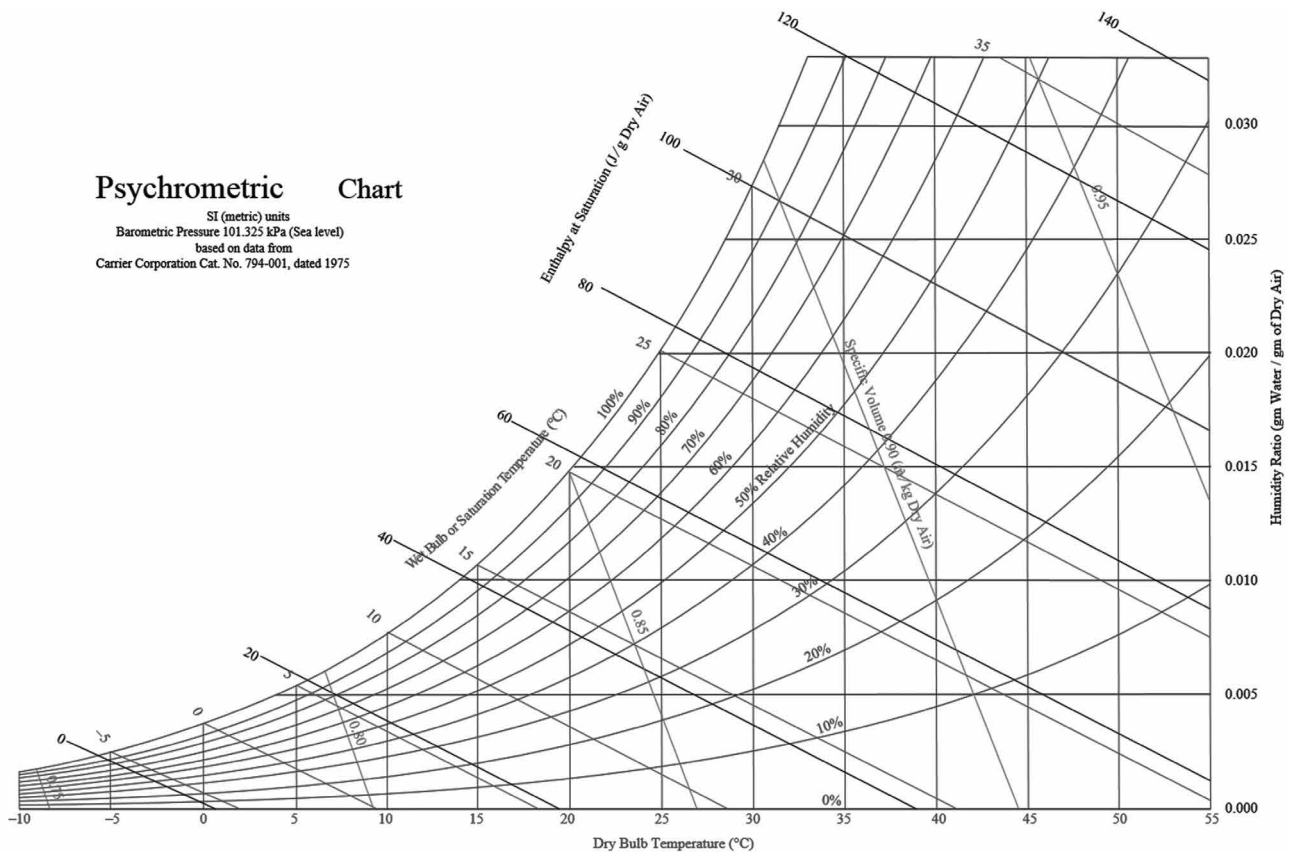
TABELA 2.1 Veza između vrste komfora, čula i fizičkih parametara

Iako je toplotni komfor samo jedan od vidova udobnosti, smatra se da je upravo to vrsta komfora koja je povezana sa doživljajem potpunog fizičkog blagostanja (Harris & Borer, 2005).

Toplotni komfor se shvata kao “stanje uma koje izražava zadovoljstvo toplotnim okruženjem” (Szokolay, 2004). On se može objasniti i kao termički neutralna sredina u kojoj ne postoji osećaj nelagodnosti pa se regulatorni mehanizmi organizma minimalno opterećuju, odnosno, gde se ostvaruje toplotna ravnoteža tela (Jovanović Popović, 1991). Metabolizam ljudskog tela svojim procesima neprestano proizvodi toplotu i, u zavisnosti od toplotnih uslova životne sredine, kako bi se održala toplotna ravnoteža organizma, mogu se aktivirati različiti mehanizmi termičkog prilagođavanja (kao što su: vazokonstrikcija, vazodilatacija, isparavanje i drhtanje). I brzina rasipanja toplote iz tela, kao i vrsta mehanizma koji se može aktivirati zavise od nekoliko grupa promenljivih, prikazanih u Tabeli 2.2. Pomenute grupe promenljivih mogu biti nazvane bilo kao ekološki, lični ili doprinoseći faktori (Szokolay, 2004), bilo kao objektivni ili subjektivni parametri (Jovanović Popović, 1991).

GRUPE PROMENLJIVIH (PREMA SZOKOLAY, 2004)		
EKOLOŠKI	LIČNI	DOPRINOSEĆI FAKTORI
Temperatura	Metabolizam (aktivnost)	Hrana i piće
Vlažnost	Oblačenje	Oblik tela
Kretanje vazduha	Stanje zdravlja	Potkožna masnoća
Srednja temperatura zračenja	Aklimatizacija	Starost i pol
OBJEKTIVNI	SUBJEKTIVNI	
Parametri (prema Jovanović Popović, 1991)		

TABELA 2.2 Vrste promenljivih, tj. parametri vezani za doživljaj toplotnog komfora



SL. 2.1 Psihometrijska karta
 (©-2009-Creative Commons; preuzeto
 sa: [https://commons.wikimedia.org/
 wiki/File:PsychrometricChart.SeaLevel.
 SI.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PsychrometricChart.SeaLevel.SI.svg))

Uopšteno govoreći, dobro razumevanje toplotnog komfora iziskuje različite načine prikazivanja različitih kombinacija istovremenog delovanja termičkih parametara. Zasnovana na korelaciji između temperature i vlažnosti vazduha, koja utiče na percepciju termičkog okruženja, psihometrijska karta se može shvatiti kao najčešće korišćeni način prikazivanja granica komfora (Sl. 2.1).

Individualna percepcija termičkog okruženja, ali i činjenica da se „ne samo svaka osoba razlikuje od druge osobe, već se on ili ona menja tokom vremena“ (Hauslanden et al., 2005), utiče na to da se danas analitičko određivanje i interpretacija termičkog komfora obično zasniva na izračunavanju PMV i PPD indeksa koji ukazuju na meru toplotne nelagodnosti (EN ISO 7730, 2005; EN 15251, 2007).

U današnje vreme, ukupni naponi na smanjenju korišćenja resursa u kontekstu postizanja održivosti rezultuju stvaranjem pojma održivog toplotnog komfora. Iako ne postoji jednostavan odgovor na pitanje šta tačno jeste održivi toplotni komfor, obezbeđenje toplotnog komfora je usko povezano sa problemom grejanja i hlađenja zgrade, tj. njene potrošnje energije. U tom smislu, moglo bi se pretpostaviti da predlozi i mere za dobro gazdovanje zgradom doprinose smanjenju upotrebe energije. Imajući u vidu da postoje mnoge kombinacije relevantnih parametara koje dovode do postizanja toplotne udobnosti, različiti stepeni odevenosti i /ili aktivnosti u kombinaciji sa nižim temperaturama okoline i drugim objektivnim toplotnim parametrima bi još uvek mogli da dovode do adekvatnog nivoa toplotne udobnosti koji je, svakako, održiviji u pogledu potrošnje energije (Parsons, 2010).

3 **Mehanizmi ponašanja termičkog omotača u službi toplotnog komfora**

Termički omotač zgrade je element koji razdvaja eksterno iz kondicioniranog – zagrejanog ili hlađenog unutrašnjeg okruženja i predodređuje kvalitet postignutog komfora. Mogao bi se takođe smatrati i kao interfejs između spoljnog prostora i korisnika unutar zgrade (Hauslanden et al., 2005). U kombinaciji sa prostornom organizacijom objekta, dizajn njenog omotača direktno utiče na potrošnju energije zgrade. Stoga se odgovarajući dizajn omotača smatra jednom od pasivnih mera projektovanja koje treba primeniti u cilju postizanja očuvanja energije (Oral, Yener, & Bayazit, 2004; Sassi, 2006). Istraživanje današnjih principa projektovanja omotača zgrade koje su sproveli pojedini istraživači (Oral et al., 2004), utvrđuje da postoji nekoliko vrsta parametara koji utiču na ponašanje omotača zgrade. Prvenstveno su grupisani kao oni koji se odnose na spoljašnje (eksterno) okruženje i oni koji su povezani sa unutrašnjim ili izgrađenim okruženjem (Tabela 3.1).

Parametri vezani za spoljni prostor su rezultat klimatskih uslova i stoga su shvaćeni kao prirodni faktori koje treba uzeti u obzir sa datim vrednostima. S druge strane, oni koji se odnose na unutrašnju sredinu su rezultat odluke projektanta i uključuju probleme i odluke na različitim nivoima: neposrednog okruženja, zgrade, prostorije ili elementa.

Shodno tome, savremeni propisi u oblasti toplotne zaštite predviđaju proveru energetske performansi zgrade na dva nivoa: 1) pojedinačne građevinske konstrukcije i 2) čitave zgrade. U skladu s tim, u slučaju termičkih propisa u Srbiji (Ministarstvo za zaštitu životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja Republike Srbije, 2011), definisano je da je neophodna provera elemenata i zgrade na sledeći način:

- na nivou pojedinačne građevinske konstrukcije utvrđivanjem vrednosti koeficijenta prolaza toplote (U), proverom mehanizma difuzije vodene pare koja se odvija kroz konstrukciju i proverom tzv. termičke mase u letnjem periodu;

- na nivou celokupnog objekta utvrđivanjem transmisionih gubitaka zgrade H_T gde se uzima u obzir i uticaj toplotnih mostova, ventilacionih gubitaka H_V , specifičnih transmisionih gubitaka H'_T i ukupnih zapreminskih gubitaka q_V .

razmera	POLOŽAJ	SPOLJA		UNUTRA		
		okolina	zgrada	prostorija	element	
					neprovidan	providan
parametri	<i>temperatura vazduha</i>	<i>dimenzije i orijentacija spoljašnjih prepreka</i>	<i>orijentacija</i>	<i>položaj u objektu</i>	<i>debljina materijala</i>	<i>dimenzije transparentnih delova</i>
	<i>Sunčevo zračenje</i>	<i>refleksija sunčevog zračenja okolnih površina</i>	položaj u odnosu na izvor buke	<i>dimenzije i faktor oblika</i>	<i>gustina materijala</i>	<i>broj slojeva zastakljenja</i>
	<i>vlažnost</i>	svetlosna refleksija okolnih površina	položaj u odnosu na druge objekte i izvor buke	<i>orijentacija</i>	<i>specifična toplota materijala</i>	<i>koeficijent prolaza toplote zastakljenja</i>
	<i>brzina vetra</i>	<i>pokrivač tla i priroda zemlje</i>	<i>oblik</i>	<i>koeficijent apsorpcije Sunčevog zračenja koje ulazi kroz providnu komponentu</i>	<i>toplotna provodljivost materijala</i>	<i>koeficijenti apsorpcije, refleksije i transmisije zastakljenja (solarni)</i>
	nivo osvetljaja			koeficijent apsorpcije zvuka unutrašnjih površina	koeficijenti apsorpcije i refleksije svetlosti površina	koeficijent transmisije zastakljenja za difuzno Sunčevo svetlo
	nivo zvuka			ukupni koeficijent apsorpcije zvuka	koeficijent transmisije zvuka	koeficijent transmisije zastakljenja za direktno Sunčevo svetlo
				koeficijenti refleksije svetlosti unutrašnjih površina	poroznost i hrapavost površine	koeficijent transmisije zvuka zastakljenja
					koeficijent apsorpcije zvuka površine	<i>tip rama</i>
					konstrukcija površine	stepen zaprljanosti zastakljenja
					<i>slojevitost konstrukcije</i>	
					dubina šupljine između slojeva	
					debljina i apsorpcija zvuka izolacionog materijala unutar šupljine	
				tip i broj veza između slojeva		

TABELA 3.1 Parametri koji utiču na projektovanje omotača* (prema Oral et al., 2004)

* tekst pisan italikom predstavlja parametre koji direktno utiču na toplotni komfor

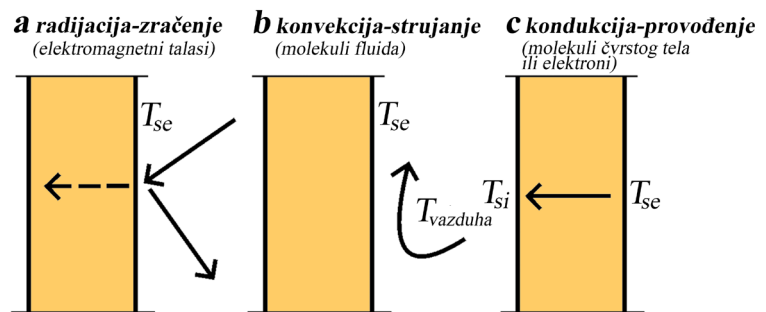
U principu, provera termičkih karakteristika zgrade sprovodi se na elementima njegovog termičkog omotača, odnosno svih građevinskih elemenata koji odvajaju negrejane od grejanih delova zgrade, ili koji odvajaju delove zgrade koji imaju različite uslove komfora.

3.1 Transport toplote i mase kroz omotač zgrade

Omotač zgrade je posrednik kroz koji se vrši prenos toplote i mase kao posledica tipičnih mehanizama delovanja. Delovanjem na određene mehanizme prenosa toplote i mase kroz omotač može se uticati na smanjenje energetske potreba zgrade (Sassi, 2006). Ovi postupci se mogu definisati kao potreba za:

- smanjenjem toplotnih gubitaka primenom odgovarajuće izolacije i povećanjem zaptivenosti zgrade,
- minimiziranjem neželjenih toplotnih dobitaka pomoću odgovarajućih zastora, izolacije i reflektivne završne obrade,
- uvažavanjem i upotrebom termičke mase u cilju ublažavanja dnevnih varijacija temperature ili kao skladište toplote.

Prema tome, toplotni protok kroz omotač zgrade se može objasniti mehanizmima refleksije toplote, otpora prenosu toplote koji, pak, zavisi od mehanizama kondukcije i konvekcije na njenom putu kroz element omotača (Sl. 3.1) i toplotnog kapaciteta, koji može imati značajne efekte na prenos toplote (Hall & Allison, 2010). Kondukcija ili provođenje kao mehanizam emitovanja toplote jeste rezultat direktnog kontakta. Karakteristična je za čvrsta tela i fluide u stanju mirovanja i prenosi se sa jednog molekula na drugi ili, u slučaju metala, kretanjem slobodnih elektrona. S druge strane, strujanje ili konvekcija je karakteristična za fluide (tečnosti i gasove) i postiže se kretanjem njihovih molekula. Treća metoda prenosa toplote – zračenje ili radijacija se javlja kada se toplota izvora zračenja prenosi transformacijom unutrašnje toplote u energiju u obliku elektromagnetnog zračenja (infracrveno zračenje), koju, na svom putu, čvrsto telo može reflektovati ili apsorbovati. Svaki od načina prenosa toplote predstavlja složenu funkciju veličine, oblika, sastava (vrste materijala) i orijentacije elementa konstrukcije zgrade.



SL. 3.1 Načini prenosa toplote

Kada je reč o toplotnom protoku kroz arhitektonske objekte, pitanja od značaja tiču se prenošenja toplote sa fluida na čvrsto telo, odnosno, sa vazduha na zgradu i obrnuto, usled razlike u temperaturi, kao i prenosa toplote kroz samu konstrukciju. Određuje se na osnovu ukupnog otpora prolazu toplote (R) koji uključuje otpore prenosa toplote na graničnim površinama (unutra i spolja) između strukture i vazduha (R_{si} i R_{se}), kao i otpora provođenju toplote kroz samu konstrukciju (R_c) koji zavisi od provodljivosti i debljine svakog sloja materijala u sklopu

predmetne konstrukcije. Ukupna vrednost prolaza toplote (koeficijent prolaza toplote U) omotača zgrade, koja je definisana termičkim propisima, predstavlja recipročnu vrednost ukupnog otpora prolazu toplote (Jednačina (1)).

$$U = \frac{I}{R_{si} + R_T + R_{se}} = \frac{I}{R_{se} + \sum_n \frac{d_n}{\lambda_n} + R_{se}} = \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Strukture danas uobičajenih građevinskih konstrukcija mogu biti vrlo kompleksne i da se sastoje od homogenih ili nehomogenih slojeva, da sadrže različite vrste slojeva vazduha, vazdušne prostore, itd. Takve okolnosti dodatno bi mogle da komplikuju izračunavanje njihovih toplotnih performansi (EN ISO 6946, 2007; Vilems, Šild, & Dinter, 2008; Medved, 2011), kao i određivanje mehanizma prenosa toplote kroz njih.

Međutim, maseni protok kroz omotač zgrade odnosi se na mehanizam difuzionog kvašenja, tj. transport vodene pare. Ovaj prirodni proces prenosa vodene pare se mora sprovesti tako da budu zadovoljena dva zahteva: 1) da na unutrašnjoj površini konstrukcije termičkog omotača nema površinske kondenzacije i 2) da prilikom difuzijskog prenosa vodene pare kroz konstrukciju ne postoji kondenzacija vodene pare u meri u kojoj povećanje vlažnosti utiče na trajnost i nosivost građevinskih konstrukcija (Medved, 2011).

Uopšteno govoreći, obe vrste transporta, i toplote i mase, predstavljaju rezultate neuravnoteženosti koja postoji u okolini u odnosu na temperaturu i relativnu vlažnost vazduha. Kada je reč o prenosu toplote, on se može objasniti kao transport energije koji je rezultat temperaturne razlike, dok je transport mase rezultat razlike u koncentraciji materije (Hall & Allison, 2010). Pravci kretanja toplote i mase su uglavnom istovetni, s tim što pod posebnim uslovima mogu biti različiti (Vilems et al., 2008). U zavisnosti od konkretnog pravca – prema spoljašnjosti ili unutrašnjosti korišćenih prostorija – može se govoriti o toplotnim gubicima ili o toplotnim dobicima, koji, pak, mogu biti poželjni ili nepoželjni, u zavisnosti od konkretne situacije. Stoga je važno pravilno razumeti kako mehanizme transporta tako i metode kvantifikacije (Hall & Allison, 2010; Künzle & Karagiozis, 2010).

Određene pretpostavke se usvajaju prilikom izračunavanja toplotnih karakteristika termičkog omotača, kao što su: stacionaran način prenosa toplote; jednodimenzionalni prenos toplote, što znači da je toplotni fluks upravan na posmatranu prepreku; sva relevantna fizička svojstva materijala su konstantna (Todorović, Bogner, & Denić, 2012). Imajući u vidu složenost problema prenosa toplote, takve pretpostavke i pojednostavljenja su opravdani, a izračunate vrednosti su u većini slučajeva dovoljno tačne. Međutim, trebali bismo biti svesni činjenice da u stvarnosti postoji konstantna promenljivost određenih parametara kao što su temperatura i relativna vlažnost; stoga, umesto stabilnog okruženja i stacionarnog prenosa toplote, oni su zavisni od vlage i

vremenski promenljivi (Hall & Allison, 2010). Ova činjenica utiče kako na karakteristike materijala u sklopu termičkog omotača tako i, posledično, na mehanizam prenosa toplote.

3.2 Relevantne karakteristike građevinskih materijala i principi strukturiranja omotača zgrade

Na putu kroz termički omotač, i toplota i vlaga se mogu uskladištiti ili preneti, u zavisnosti od higrotermalnih svojstava primenjenih građevinskih materijala. U principu, kontrola protoka toplote kroz materijal ili konstrukciju zasnovana je na tri karakteristična mehanizma delovanja: 1) refleksija toplote, koja je karakteristika metala, tj. materijala u kojima preovlađuje radijacija kao način prenosa toplote. Princip se odnosi na pravilnu ugradnju metalnih folija unutar strukture; 2) otpor prenošenju toplote, što je princip delovanja termoizolacionih materijala; i 3) skladištenje ili akumuliranje toplote kao karakteristika masivnih konstrukcija, koje je vremenski promenljivo (Hall & Allison, 2010) i značajno za adekvatnu termičku stabilnost konstrukcije. Način na koji se odvija prirodni proces difuzije vodene pare kroz omotač je direktno povezan sa paropropusnošću građevinskog materijala, pri čemu su porozni građevinski materijali posebno osetljivi na svaku promenu sadržaja vlage. Shodno tome, izmerene vrednosti toplotne provodljivosti ugrađenog poroznog materijala i njegove projektne vrednosti mogu se u određenoj meri razlikovati, što treba uzeti u obzir prilikom projektovanja elemenata termičkog omotača (Hall & Allison, 2010).

U zavisnosti od dominacije relevantnih higrotermalnih osobina, materijali se mogu klasifikovati u više određenih grupa. U odnosu na njihove osnovne termičke karakteristike, mogu se razlikovati sledeće vrste materijala:

- oni koji imaju dobru toplotnu akumulaciju i loše izolacione osobine, kao što su takozvani konstruktivni materijali;
- oni koji imaju lošu toplotnu akumulaciju i dobre izolacione osobine, kao što su toplotne izolacije;
- staklo kao jedinstveni građevinski materijal koji je specifičan po svojoj transparentnosti i ispoljava specifično ponašanje u odnosu na različite opsege elektromagnetnog / solarnog zračenja – vidljivo, ultraljubičasto i infracrveno; i
- inovativni izolacioni materijali koji se mogu shvatiti kao nova generacija građevinskih materijala nastalih kao rezultat povećane potrebe za većom energetsom efikasnošću zgrada.

S druge strane, u odnosu na ispoljenu paropropustljivost i ulogu u strukturi, postoje dva specifična tipa materijala:

- oni koji deluju kao paronepropusni film ili parna brana koja usporava kretanje pare, ali ne sprečava u potpunosti njen prenos; i
- paropropusne folije, tj. slojevi tankog materijala koji omogućavaju prolaz vodene pare u jednom pravcu, ali ga sprečavaju u drugom.

Pravilno funkcionisanje fizičkog procesa difuzije vodene pare, koje je bitno da bude zadovoljeno, zavisi od klimatskih uslova, vrste i svojstava primenjenih materijala, debljine i paropropustljivosti pojedinačnih slojeva materijala, kao i njihovog redosleda u sklopu. U suprotnom, može doći do neželjenog povećanja vlažnosti materijala u termičkom omotaču kao rezultat nekontrolisanog difuzionog protoka, koji tokom vremena može prouzrokovati promene u termičkim, mehaničkim i drugim svojstvima materijala i konstrukcija, odnosno dovesti do različitih oblika oštećenja konstrukcija i njihovog prevremenog starenja (Künzel & Karagiozis, 2010).

Savremeni termički zahtevi nameću specifične probleme u graditeljskoj praksi usled povećane debljine konvencionalnih građevinskih materijala. Shodno tome, kao posledica povećane svesti o njihovim relevantnim osobinama i pravilima ponašanja, postoji potreba za efikasnijom upotrebom građevinskih materijala i konstrukcija. Obezbeđivanje komfora i efikasnosti u pogledu energije prilikom izgradnje zgrada može se postići kada se nekoliko aspekata istovremeno uzme u obzir: izolaciona svojstva materijala i konstrukcija, njihovo ponašanje u pogledu difuzije vodene pare koje je uslovljeno paropropustljivošću materijala, i adekvatna primena toplotne inercije koja je relevantna za bolje skladištenje toplote i omogućava tzv. vremenski pomak u dostizanju maksimalnih temperaturnih vrednosti. U tom smislu, osnovni principi koje treba poštovati su sledeći:

- U slučaju slojevitih konstrukcija, otpor prolazu toplote svih slojeva treba da se povećava idući od unutra ka spolja, a u isto vreme otpor difuziji vodene pare treba da se smanjuje od unutrašnje strane prema spoljašnjoj;
- Da bi se iskoristila toplotna inercija zidova, toplotna izolacija treba da bude na spoljnoj strani konstrukcije - izuzeci su prostorije koje se povremeno zagrevaju i u kojima je potrebno brzo zagrevanje vazduha (pozorišta i koncertne dvorane, sportske hale, itd.);
- Pri kreiranju koncepta zgrade i strukturiranju sklopova treba težiti ka adekvatnoj kombinaciji toplotne inercije i dobre toplotne izolacije;
- Ventilisani vazdušni slojevi mogu doprineti boljim karakteristikama konstrukcija u odnosu na difuziju vodene pare (izostavljanjem parne brane), kao i na letnju stabilnost konstrukcije (povećanjem faktora prigušenja amplitude oscilacije temperature).

4 Udobnost u zgradama i međuzavisnost zahteva komfora – Studije slučaja

Postizanje komfora u zgradama, u praktičnom smislu, u direktnoj je zavisnosti od načina izgradnje zgrada, naročito primenjenih materijala, pravila projektovanja i izgradnje koja su se vremenom menjala kao rezultat tehničkih i tehnoloških inovacija, razvoja građevinskih propisa, društvenih, ekonomskih i drugih okolnosti. Procena postignutog životnog komfora mogla bi biti polazna tačka za razumevanje kvaliteta stambenog fonda, kao i njegovih potencijala za dalja energetska unapređenja.

Imajući to u vidu, stambeni fond Beograda analiziran je sa stanovišta toplotnog komfora, ali sa osvrtom na uticaje koje je imao i na druge oblike stambenog komfora (Đukanović, 2015). Polazište za analizu je pretpostavka da izgrađene zgrade, kroz svoju strukturu, volumetriju i oblikovanje, stvaraju najvažnije preduslove za postizanje toplotnog komfora, gde odlučujuću ulogu ima fasadni omotač, kao granica između najizrazitijih temperaturnih razlika. Analizirajući dominantne termičke uslove kojima je fasada izložena (zimi i leti), struktura omotača (spoljašnji zidovi, prozori, krovovi itd.) je od ključnog značaja za postizanje toplotnog komfora, dok tokom leta važnu ulogu ima i dodatna zaštita na nivou prozora zajedno sa prirodnom ventilacijom.

U okviru sprovedenog istraživanja utvrđene su strukturne karakteristike elemenata termičkog omotača tipičnih stambenih objekata i oni su korišćeni kao osnova za formiranje reprezentativnih modela stambene arhitekture Beograda. Ovi modeli su predmet dalje analize, sprovedene prema utvrđenim parametrima komfora, kako bi se ispitao ukupni kvalitet analiziranog stambenog fonda.

4.1 Utvrđivanje karakteristika reprezentativnih modela

Izabrana su i analizirana tri teorijska modela koji odražavaju različite periode izgradnje stambenog fonda: 1) najstarije zgrade (izgrađene pre Prvog svetskog rata); 2) zgrade izgrađene tokom masovne stambene izgradnje šezdesetih i sedamdesetih godina i 3) zgrade izgrađene devedesetih godina dvadesetog veka (Tabela 4.1). Ovakva podela obeležava značajne periode u izgradnji stambenog fonda ali se poklapa i sa periodizacijom razmatranom sa stanovišta postojanja propisa iz oblasti termičke zaštite (Radivojević, 2003; Radivojević i Jovanović Popović, 2013): 1) period pre usvajanja prvih propisa iz ove oblasti; 2) period koji odgovara prvim propisima o termičkoj zaštiti u Srbiji i 3) period koji prethodi usvajanju Pravilnika o energetske efikasnosti objekata (Ministarstvo za zaštitu životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja Republike Srbije, 2011), kojim je u Srbiji uvedena obaveza izgradnje energetske efikasne zgrade. Analiza tri odabrana modela fokusira se na fasadni omotač i uticaje koje ima na ostvarenje toplotnog, vazdušnog, zvučnog i svetlosnog komfora.

	TIPIČNA KUĆA / UZOR	OSNOVA	PRESEK
Model 1 (pre 1919)			
Model 2 (1960-1975)			
Model 3 (posle 1990)			

TABELA 4.1 Osnovne karakteristike analiziranih teorijskih modela

Modeli su kreirani sa svim relevantnim elementima koji predstavljaju tipičnu dnevnu sobu iz analiziranog perioda. Dnevna soba je izabrana kao mesto gde se odvijaju dnevne aktivnosti, pa se može smatrati relevantnom za procenu stepena ostvarenog stambenog komfora. Analiza stambenog fonda Beograda pokazala je da dimenzije prostorije (dužina i širina) mogu biti iste za sve modele (5 x 4 m), što odgovara konstruktivnom i funkcionalnom rasteru i kod masivnog i kod skeletnog konstruktivnog sistema. Međutim, visina sobe varira u zavisnosti od perioda koji model reprezentuje. Analizirana soba zauzima centralnu poziciju u organizacionoj šemi i ima obodne zidove koji su određeni na sledeći način: jedan zid prostorije je definisan kao fasadni zid, drugi je pregrada ka susednom stanu, a ostale dva se graniče sa drugim prostorijama stana. Posmatrano po vertikali, prostorna jedinica

je ugrađena u središnji deo stambene zgrade, tako da, sa donje i gornje strane, postoji susedni stambeni prostor. Ovakva pozicija je najzastupljenija kod višeporodičnih stambenih zgrada. Usvojena je južna orijentacija prostorije, što predstavlja poželjnu poziciju za ovakvu prostornu namenu.

Model je formiran tako da reprezentuje tipičan način materijalizacije elemenata sklopa (zidova, tavanica, prozora) kao i preovlađujući konstruktivni sklop (masivni ili skeletni) koji je primenjivan na objektima građenim u posmatranom periodu. Dimenzije prozora, njihov položaj, broj, visina parapeta, primenjeni materijal okvira, zastakljenja, konstruktivni sklop, kao i vrsta zastora, promenljivi su u zavisnosti od aktuelnih načina građenja i arhitektonskih stilova. Uticaj prozora se sagledava u svim oblicima stambenog komfora, a u pojedinim ima odlučujuću ulogu (svetlosnom).

Model 1 reprezentuje najstarije izgrađene objekte u Beogradu za koje je karakterističan masivni zidani sklop sa opekom kao osnovnim materijalom konstrukcije. Najraniji period izgradnje obeležila je primena dvostrukih drvenih prozora sa razmaknutim krilima, koji su ugrađivani u zid od opeke (Đukanović, Radivojević, & Rajčić, 2016). Dimenzije prozora i visina parapeta odabrani su u skladu sa tadašnjim važećim standardima i aktuelnom arhitektonskom volumetrijom.

Model 2 reprezentuje objekte nastale u periodu najintenzivnije stambene izgradnje na kojima su primenjivani prefabrikovani sistemi bazirani na armiranom betonu. Model je formiran prema sistemu IMS, koji je u to vreme preovlađivao u stambenoj izgradnji Beograda, u skeletnoj konstrukciji, sa parapetnim sklopom u kombinaciji običnog i peno betona. Fasade višeporodičnih stambenih objekata imale su prepoznatljivu formu, sa horizontalnim prozorskim trakama i parapetnim prefabrikovanim panelima koji su imali višeslojnu strukturu. Smanjena debljina parapetnih zidova, ali i propagirane uštede u građenju, dovele su do masovnije primene prozora sa spojenim krilima. Ovakav sklop sa platnenom roletnom usvojen je na modelu 2.

Model 3 reprezentuje period posle 1990. koji odlikuje napuštanje prefabrikovanih armirano-betonskih sistema i povratak tradicionalnom načinu građenja. Strukturu nosećih zidova najčešće čine ošupljeni glineni blokovi, koji postaju dominantan materijal u građenju stambenih zgrada, potiskujući opeke sa konstruktivnih pozicija. Fasadni zidovi se oblažu termoizolacionim materijalima (najčešće stiroporom). Tokom devedesetih godina započinje proizvodnja plastičnih prozora, koji vremenom potiskuju iz upotrebe drvene, prevashodno zbog jednostavnog održavanja, dobrih termičkih karakteristika i niske cene (Tabela 4.2).

4.2 Indikatori postignutog termičkog komfora

U skladu sa zahtevima aktuelnih propisa u Srbiji, izabrani parametri za procenu toplotnog komfora su: koeficijent prolaza toplote (U), parametri difuzije vodene pare - kontrola kondenzacije, provera letnje termičke stabilnosti izračunavanjem faktora amplitude oscilacije temperature (v) i kašnjenja oscilacije temperature (η), kao i transmisioni gubici kroz fasadni omotač. U Tabeli 4.2 prikazana je struktura fasadnog omotača za svaki model: procenat raspodele površina punih i transparentnih delova, kao i odnos transmisionih gubitaka kroz prozor i fasadni zid na posmatranom segmentu. Ovakav pristup posledica je načina na koji je formiran istraživački model, gde su dimenzije prozora varijabilne i odražavaju karakteristike izabranog perioda izgradnje. U tom smislu, model je dizajniran tako da se njegov termički omotač sastoji samo od fasadnog zida sa prozorom. Na taj način se promene u dimenzijama prozora i spratnim visinama sagledavaju nezavisno od drugih uticaja.

Koeficijenti prolaza toplote spoljašnjih zidova kod svih analiziranih modela ne ispunjavaju važeće srpske propise, koji bi za postojeće zgrade trebali da budu manji od $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Ministarstvo za zaštitu životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja Republike Srbije, 2011). Upoređujući rezultate prikazane u Tabeli 4.2, najlošiji rezultati koeficijenta prolaza toplote su kod betonskog prefabrikovanog zida (model 2), što je posledica loših termičkih karakteristika armiranog betona kao osnovnog materijala u sklopu. Parametri letnje termičke stabilnosti ne zadovoljavaju propisane vrednosti za ovaj fasadni zid, što može dovesti do variranja temperature vazduha u unutrašnjosti prostora, u zavisnosti od temperature spoljašnjeg prostora. U slojevima fasadnih zidova u modelima 2 i 3 dolazi do pojave kondenzacije, koja se isušuje u granicama dozvoljenog vremenskog ograničenja. Međutim, vreme isušivanja za model 2 je značajno duže, što ukazuje na nepovoljnije karakteristike ovakvog zida sa stanovišta difuzije vodene pare.

Na modelima su ugrađeni prozori koji su različiti po svom sklopu, što za posledicu ima razlike u koeficijentima prolaza toplote. Najbolje karakteristike pokazuje drveni dvostruki prozor sa širokom kutijom, a najlošije jednostruki plastični trokomorni prozor sa dvostrukim termoizolujućim staklom. Kod modela 1 transparentni delovi su zastupljeni u manjoj meri u odnosu na fasadni zid (16%) ali se preraspodela transmisionih gubitaka kroz omotač menja, zbog lošijih termičkih karakteristika prozora u odnosu na zid.

Grafikon strukture omotača kod modela 3 pokazuje nešto veću zastupljenost prozora na fasadi (25%) nego što je slučaj kod modela 1, ali je odnos transmisionih gubitaka kroz elemente fasade potpuno drugačiji, usled velikih razlika u koeficijentima prolaza toplote između dva elementa termičkog omotača. Fasadni zid kod modela 3 u svom sklopu ima termoizolaciju pa je vrednost koeficijenta prolaza toplote povoljnija nego u prvom primeru, ali je prozor po svojim termičkim karakteristikama najlošiji, što dovodi do ovakve procentualne raspodele transmisionih gubitaka.

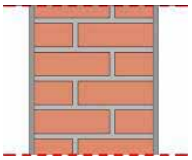

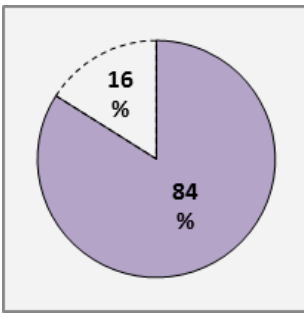
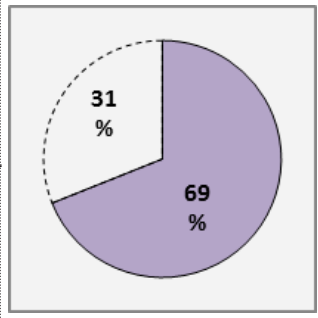
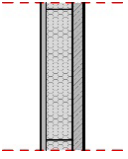

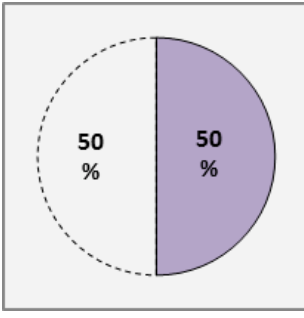
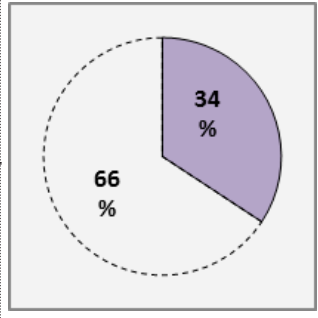
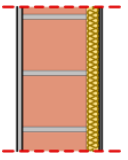

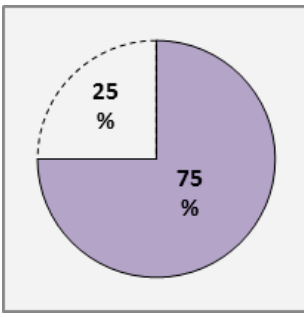
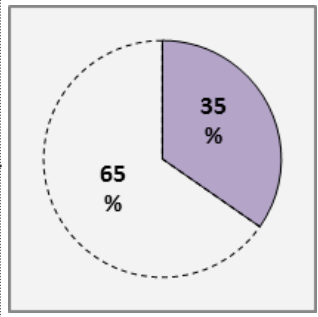
MODEL 1 FASADNI OMOTAČ			
Fasadni zid	Prozor	Struktura omotača	Transmisioni gubici
 <p>zid od opeke 45 cm obostrano malterisan</p>	 <p>drveni, dvostruki prozor sa razmaknutim krilima-široka kutija unutrašnje zavese</p>		
$U=1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U > U_{\max}$ $v=131.0 > v_{\min}=15$ $\eta=16.8 > \eta_{\min}=7$ kondenzacije: nema	$U=2.6 \text{ W/m}^2\text{K}$, $U > U_{\max}$	površina fasadnog omotača: 16,46 m ² spoljni zid: 13,82 m ² prozor: 2,64 m ²	ukupni transmisioni gubici omotača: 22,08 W/K spoljni zid: 15,22 W/K prozor: 6,86 W/K
MODEL 2 FASADNI OMOTAČ			
Fasadni zid	Prozor	Struktura omotača	Transmisioni gubici
 <p>parapetni element u kombinaciji betona i peno-betona</p>	 <p>drveni, dvostruki prozor sa spojenim krilima platnena roletna</p>		
$U=1.46 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U > U_{\max}$ $v=10.4 < v_{\min}=15$ $\eta=5.9 < \eta_{\min}=7$ kondenzacija: u sloju 2; 25,6 dana za isušenje	$U=2.8 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U > U_{\max}$	površina fasadnog omotača: 11,76 m ² spoljni zid: 5,88 m ² prozor: 5,88 m ²	ukupni transmisioni gubici omotača: 25,04 W/K spoljni zid: 8,58 W/K prozor: 16,46 W/K
MODEL 3 FASADNI OMOTAČ			
Fasadni zid	Prozor	Struktura omotača	Transmisioni gubici
 <p>zid od šupljeg bloka sa termoizolacijom 33 cm</p>	 <p>plastični, trokomorni sa termoizolacionim staklom spoljašnja roletna</p>		
$U=0.53 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U > U_{\max}$ $v=109.7 > v_{\min}=15$ $\eta=9.3 > \eta_{\min}=7$ kondenzacija: u sloju 3; 1,5 dana isušenja	$U=3.0 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U > U_{\max}$	površina fasadnog omotača: 12,33 m ² spoljni zid: 9,25 m ² prozor: 3,08 m ²	ukupni transmisioni gubici omotača: 14,15 W/K spoljni zid: 4,91 W/K prozor: 9,24 W/K

TABELA 4.2 Parametri termičkog komfora kod analiziranih modela

Specifičnost modela 2, u odnosu na ostale primere, jeste struktura omotača, u kojoj je površina fasadnog zida jednaka površini prozora, što je posledica oblikovnih karakteristika prvih prefabrikovanih zgrada u Beogradu. Horizontalne prozorske trake koje smenjuju betonski parapetni elementi su obeležje ovog perioda građenja, što pokazuje određene specifičnosti u rezultatima termičkog proračuna. Visoka vrednost koeficijenta prolaza toplote usvojenog prozora sa spojenim krilima (koji ima lošije termičke karakteristike od prozora sa razdvojenim krilima), uz zastupljenost u strukturi omotača od 50%, doprinosi da gubici toplote kroz prozor čine 66% od ukupno ostvarenih, što je najviši procenat dobijen u istraživanjima usvojenih modela. Istovremeno, među analiziranim modelima transmisioni gubici kroz fasadu imaju najveću vrednost kod modela 2.

4.3 Indikatori ostvarenog vazdušnog komfora

Važan segment postizanja vazdušnog komfora u zgradama je infiltracija i ona je određena vrstom primenjenih fasadnih materijala, vrstom i kvalitetom stolarije i načinom ugrađivanja. Pošto energetska arhitektura ima za cilj postizanje uštede energije i smanjenje toplotnih gubitaka, minimiziranje nekontrolisane infiltracije zaptivanjem pukotina i spojnica je način da se postigne velika ušteda energije za grejanje i hlađenje. Međutim, ovo može stvoriti prostore u kojima kvalitet vazduha nije na zadovoljavajućem nivou.

Infiltracija vazduha kroz fasadni zid je niskog intenziteta i, u većini slučajeva, ne može da obezbedi minimalan broj izmena vazduha neophodnih da bi se postigao higijenski minimum. Infiltracija vazduha kroz spojnice fasadne stolarije višestruko je intenzivnija od protoka kroz fasadne zidove, što je doprinelo da fokus analize vazdušnog komfora postojećih stambenih zgrada Beograda bude na ovom parametru koji, s jedne strane, doprinosi kvalitetu unutrašnjeg vazduha, a, s druge, povećava ventilacione gubitke i potrebnu energiju za grejanje. Količina vazduha koja se infiltrira kroz spojnice prozora izračunava se prema opštoj formuli, koja uključuje dužinu spojnice, permeabilnost spojeva i razliku pritisaka.

Protok vazduha infiltracijom kroz spojnice izračunat je za analizirane modele, a dobijeni rezultati su prikazani u Tabeli 4.3. Kod modela 1 primenjeni su dvostruki drveni prozori sa razmaknutim krilima, kod kojih su elementi doprozornika i krila napravljeni sa preklopima i bez zaptivnih sredstava. Udvojeni doprozornici i krila, formiranje ispusta u opeci na koji prozor naleže i tampon sloj vazduha između spoljnih i unutrašnjih elemenata doprinosili su boljim izolacionim svojstvima ovakvog sklopa. Prozori su dvodelni po širini i visini, što povećava dužinu spojnica koje su relevantne za proračun protoka vazduha i već kod razlike pritisaka od 25 Pa dostiže se higijenski minimum: protok vazduha u količini polovine ukupne zapremine prostorije ostvarene za jedan čas, prema standardu SRPS EN 12831 (2003).

Na modelu 2 primenjeni su dvostruki prozori krilo na krilo, koji odgovaraju konceptu tanjih zidova sa armiranim betonom kao osnovnim materijalom što karakteriše višeporodične stambene zgrade u analiziranom periodu. Spojnice između prozorskih elemenata formirane su sa preklopima, bez zaptivki i, pošto je doprozornik jednostruk, ovakav sklop pokazuje veću vazдушnu propusnost od dvostrukog prozora sa razmaknutim krilima. Prozori su kontinualni, formiraju horizontalne trake koje se pružaju čitavom dužinom fasade, što značajno povećava dužine preklopa i dodatno doprinosi većem protoku vazduha. U Tabeli 4.3 može se videti da se pri minimalnoj razlici pritisaka od 5 Pa postiže higijenski minimum, dok se kod razlike između spoljnog i unutrašnjeg pritiska od 50 Pa izvrše skoro tri izmene vazduha po času, bez otvaranja prozora, samo infiltracijom kroz spojeve.

	TIP PROZORA	ZAPREMINA PROSTORA [M ³]	DUŽINA SPOJNICE [M]	PERMEABILNOST A [M ³ /HMPA ^{2/3}]	PROTOK VAZDUHA [M ³ /H]										
					$V = \sum A_i \cdot L_i \cdot \Delta P_{E-I}^N$										
					ΔP_{E-I}										
					5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
Model 1	drveni dvostruki sa razdvojenim krilima	70	11.4	0.4	13	21	28	34	39	44	49	53	58	62	
Model 2	drveni dvostruki sa spojenim krilima	50	16.4	0.6	29	46	60	73	84	95	105	115	125	134	
Model 3	PVC jednostruki termoizolaciono staklo	52	11.2	0.2	7	10	14	17	19	22	24	26	28	30	

TABELA 4.3 Protok vazduha kroz spojnice prozora na analiziranim modelima

Povoljne termičke i zvučne performanse, pristupačna cena i lako održavanje doprineli su činjenici da su plastični prozori postali najčešće korišćeni u domaćoj stambenoj izgradnji od devedesetih godina prošlog veka i takav tip prozora usvojen je na modelu 3. Rezultati pokazuju da je kod ovog modela ostvarena najbolja zaptivenost što je posledica usvojenog najnižeg koeficijenta paropropusnosti i dužine spojnice koja je približno jednaka modelu 1 a značajno kraća od modela 2. Minimalni protok vazduha infiltracijom kroz spojnice prozora ostvaruje se pri razlici pritisaka od 40 Pa što je prikazano u Tabeli 4.3.

4.4 Indikatori ostvarenog zvučnog komfora

Razmatranje fasadne pregrade u kontekstu zvučnog komfora u najvećoj meri je uslovljeno prozorskim otvorom koji predstavlja najslabiji segment u ukupnom sklopu fasadnog zida i potencijalno mesto na kome dolazi do prenosa zvučnih impulsa. Pošto se u radu analiziraju različiti prozorski sklopovi koji su primenjivani na fasadama stambenih zgrada Beograda, važno je naglasiti njihova zvučno izolaciona svojstva (Fasold & Sonntag, 1971; baza podataka u softveru Ursa Fragmat Akustika RS) koja u velikoj meri predstavljaju opredeljujući segment ukupne izolovanosti pregrade (Tabela 4.4).

Novi sistem standarda iz oblasti zvučne zaštite uveo je značajne promene u načinu izračunavanja akustičkih karakteristika prostorija. Za razliku od prethodne metode izračunavanja u kojoj su pregrade posmatrane kao pojedinačni, izdvojeni elementi, aktuelna metoda podrazumeva kompleksno sagledavanje svih okolnih sklopova i njihovih međusobnih spojeva, koji neposredno utiču na izolacionu moć posmatrane pregrade. Na ovaj način se razmatra ukupna složenost prenosa zvuka kroz konstrukciju.

	TIP PROZORA	IZOLACIONA MOĆ PROZORA	FASADNI ZID U KOJI JE UGRAĐEN	ZVUČNA IZOLOVANOST $D_{2m,nT}$
Model 1	drveni, dvostruki sa razdvojenim krilima- široka kutija (razmak stakala 12 cm)	39 dB	masivni zidani zid od opeke	45 dB
Model 2	drveni, dvostruki sa spojenim krilima- krilo na krilo	31 dB	betonski prefabrikovani parapeti	31 dB
Model 3	plastični sa termoizolacionim staklom	31 dB	zidani zid od goter blokova	34 dB

TABELA 4.4 Zvučno izolacione karakteristike primenjenih prozora

Zvučna izolovanost ($D_{2m,nT}$) fasadnog zida definiše se kao razlika u nivoima zvuka između dva prostora koja odeljuje fasadna pregrada i kao takva određena je graničnim vrednostima buke na otvorenom prostoru i u zatvorenim prostorijama. U zavisnosti od lokacije objekta, u odnosu na akustičke zone, određene su merodavne vrednosti zvučne izolovanosti, a za potrebe ovog istraživanja usvojena je minimalna vrednost $D_{2m,nT}=20$ dB. Svi analizirani fasadni zidovi zadovoljavaju ove uslove ali su najbolji rezultati postignuti kod modela 1, što je posledica činjenice da je zvučna izolacija pregrade u direktnoj srazmeri sa njenom površinskom masom i primena masivnog zidanog sklopa od opeke pokazuje svoje dobre izolacione karakteristike. S druge strane, primena prozora sa širokom kutijom, koji imaju visok nivo izolacionih svojstava u odnosu na ostale tipove primenjenih prozora, utiče da izolovanost fasade bude daleko iznad propisanih minimalnih vrednosti.

4.5 Indikatori postignutog svetlosnog komfora

Istraživanje svetlosnog komfora za uslove korišćenja prirodnog osvetljenja ponovo postavlja fokus na fasadni zid i prioritetni uticaj koji ima na ostvarenje ovog oblika komfora. Postizanjem zadatih uslova korišćenjem dnevne svetlosti ostvaruju se nezamenljive zdravstvene pogodnosti korisnika prostora i ujedno doprinosi racionalnom korišćenju energije i poboljšanju ukupne energetske efikasnosti zgrade. Maksimalno korišćenje prirodnog, uz smanjenje upotrebe veštačkog osvetljenja, u cilju postizanja optimalnih uslova svetlosnog komfora, preporuka je svih standarda koji se bave ovom problematikom.

Istraživanje svetlosnog komfora stambenog fonda Beograda rađeno je za uslove korišćenja dnevnog svetla. Analizirani modeli ilustruju tipične načine formiranja transparentnih delova omotača zgrade kod višeporodičnih stambenih zgrada Beograda. Pored dimenzija otvora prozora, ostali elementi strukture omotača koji utiču na nivo osvetljenja

prostorije su dimenzije osvetljene sobe (širina, dužina i čista visina), visina parapeta i postojanje i dubina terase ili lođe.

U cilju ispitivanja usvojenih modela, postavljeni su identični uslovi sredine (lokacija, orijentacija, uslovi neba). Odabrana je južna orijentacija koja se preporučuje za prostore dnevnog boravka, a u letnjim mesecima može biti nepovoljna zbog pojave blještanja. U sredini prostorije postavljen je sto kako bi se pratila osvetljenost i bljesak u zoni radnog prostora. Parametri na osnovu kojih će se vršiti ocena kvaliteta osvetljaja stambenih zgrada su količnik dnevne svetlosti i bljesak. Analiza svetlosnog komfora usvojenih modela obavljena je uz pomoć računarskog alata koji omogućava jednostavno i prostorno sagledavanje parametara svetlosnog komfora (Veluk Dailight Visualizer 2).

Kod modela 1 karakteristična je primena prozora koji imaju izraženu visinu u odnosu na širinu i odnos njihovih dimenzija je približno 1:2 (š/v). Prosečni količnik dnevne osvetljenosti je 1,89 % (Tabela 4.5), što se uklapa u srednje zahteve koji su propisani za prostorije dnevnog boravka, ali je blisko donjoj granici (1,6-3%). U središnjem delu prostorije, gde se najčešće obavljaju dnevne aktivnosti, količnik dnevne osvetljenosti je oko 1,5%, što je na granici između srednjih i malih zahteva prema važećoj domaćoj regulativi (SRPS U.C9.100, 1963; Jugoslovenski komitet za osvetljenje, 1974).

Izražena visina prozorskog otvora omogućava dubok prodor svetlosti u prostoriju, ali njegova nedovoljna širina prouzrokuje stvaranje slabije osvetljenih delova u uglovima sobe uz fasadni zid, što za posledicu ima neravnomerno osvetljen prostor. Blještanje se pojavljuje na maloj površini, neposredno uz fasadni zid; sjajnost zidnih i plafonskih površina je, sa manjim odstupanjima, u optimalnim granicama. Međutim, sjajnost vidnog zadatka na postavljenom radnom stolu je 100 cd/m² što je na donjoj skali preporučenih vrednosti (100-300 cd/m²).

Prosečni količnik dnevne osvetljenosti kod modela 2 je 5,17% i ova vrednost nalazi se u kategoriji velikih zahteva propisanih za prostorije dnevnog boravka, u kojima se predviđa čitanje i učenje. Raspon vrednosti ovog parametra je 1,74-16,99% i kreće se od nivoa srednjih zahteva do izvanredno velikih (preko 12%). Evidentna je ravnomerna distribucija svetlosti po prostoriji i to je rezultat postavljanja prozorskih traka čitavom dužinom fasadnog zida. Podjednako je raspoređena po širini prostorije sa ravnomernim slabljenjem po dubini prostorije.

Zidovi imaju sjajnost površina veću od 200 cd/m², a u zoni pored prozora povećava se na 1000 cd/m², što je višestruko uvećana vrednost u odnosu na preporučenu. Sjajnost plafona je u rasponu od 250-1000 cd/m² što takođe prekoračuje optimalne vrednosti. U prvoj trećini dubine prostorije registruje se pojava blještanja sa vrednostima preko 6.000 cd/m². Dobijeni rezultati sugerišu neophodnu zaštitu u vidu zastora ili senila u letnjim mesecima, kako bi se postigli optimalni nivoi osvetljenosti i sprečila pojava bljeska.

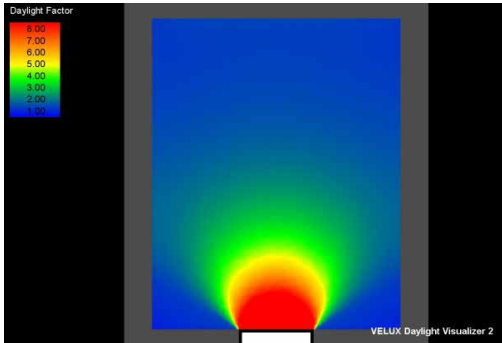

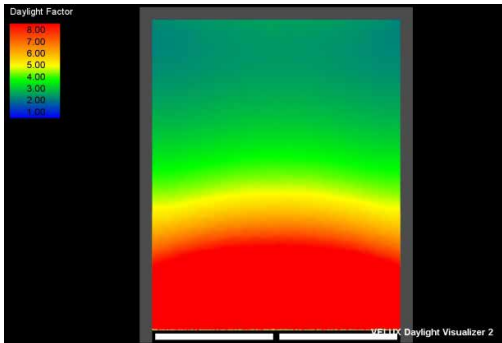
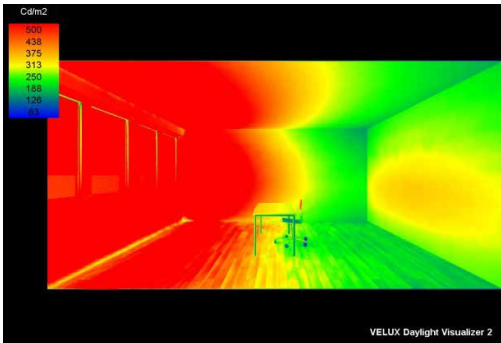
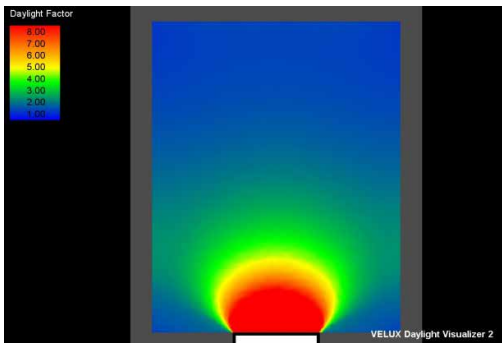
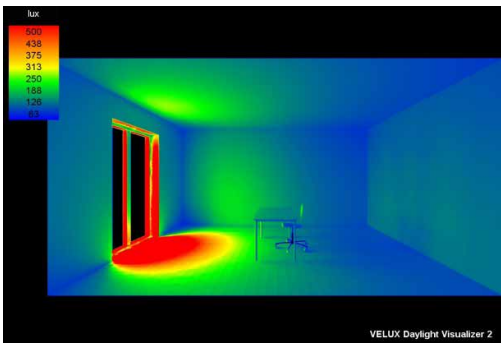
	KOLIČNIK DNEVNE SVETLOSTI [%]	BLJEŠTANJE [CD/M ²]
Model 1: prozor 120/220cm	prosečna vrednost: 1.89	
		
Model 2: prozor 400/140cm	prosečna vrednost: 5.17	
		
Model 3: prozor 140/220cm	prosečna vrednost: 2.05%	
		

TABELA 4.5 Vrednosti parametara svetlosnog komfora kao rezultat korišćenja Velux Daylight Visualizer 2

Na fasadama stambenih zgrada izgrađenih posle 1990. godine, predstavljenih modelom 3, postavljaju se izduženi prozorski otvori sa niskim parapetom, ili bez njega, ili, sa jednodelnim ili dvodelnim vratima i spoljašnjom ogradom odgovarajuće visine (tzv francuski balkoni). Prosečni količnik dnevne osvetljenosti je 2,3%, što se uklapa u kategoriju srednjih zahteva koji su propisani za prostorije dnevnog boravka (1,6-3%). U središnjem delu prostorije količnik dnevne osvetljenosti je oko 2%.

Zidovi prostorije imaju sjajnost površina veću od 100 cd/m², a pojava blještanja registrovana je u donjoj zoni oko fasadnog otvora. Sjajnost površine plafona je najvećim delom u granicama preporučenih vrednosti (100-300 cd/m²). Pojava blještanja registruje se samo u području poda ili radnih površina postavljenih neposredno uz otvor za vrata.

Sličnosti u formiranju prozorskih otvora kod modela 1 i 3 uticali su da rezultati istraživanja osvetljenja prostorije dnevnog boravka pokazuju neznatne razlike. S druge strane, model 2 specifičan je po načinu na koji je formiran otvor i parametri svetlosnog komfora pokazuju dijametralne razlike u odnosu na ostale modele, koje se ogledaju kako u distribuciji svetlosti po prostoriji tako i u vrednostima parametara osvetljenosti koji determinišu stepen ostvarenog svetlosnog komfora.

5 Zaključak

Postoje različiti razlozi i metode prema kojima izbor materijala utiče kako na udobnost života tako i na energetska efikasnost zgrade. Kao što je prethodno objašnjeno, ovo se naročito odnosi na projektovanje i strukturu omotača zgrade koji je glavni posrednik između čoveka i njegovog okruženja i ujedno najvažniji faktor za postizanje udobnosti života i istovremene efikasne potrošnje energije. Naše poznavanje ponašanja i uloge materijala u nekoj konstrukciji nam omogućava da predvidimo ponašanje objekta kao celine i da razumemo efekte projektovanja na rad i funkcionisanje zgrade.

Prikazane analize odabranih modela stambenog fonda Beograda ukazale su na to kako su različiti konstruktivni sklopovi, tehnike gradnje i tehnologije, zajedno sa primenjenim projektantskim principima koji su bili tipični za vreme koje modeli reprezentuju, uticali na postizanje uslova komfora i potrošnje energije. Karakteristično je da različiti parametri koji se prvenstveno odnose na karakteristike fasadnog omotača (kao što su struktura zida i prozora i odnos zid-prozor) i njihova kombinacija utiču na realizaciju različitih oblika komfora:

- toplotni komfor zavisi od kombinacije karakteristika zidne konstrukcije i kvaliteta i strukture prozora, ali, zbog značajne razlike u transmissionim gubicima ovih elemenata od velikog je značaja njihov međusobni odnos;
- postizanje vazdušnog komfora u velikoj je meri rezultat vazdušne propusnosti fasade, kao posledica kvaliteta i veličine prozora, ali i spoja prozora sa zidom;
- postizanje zvučnog komfora zavisi od površinske mase zida kao i od karakteristika prozora, njegovog sklopa, kao i načina zastakljivanja;
- kvalitet svetlosnog komfora je u velikoj meri uslovljen odnosom zida i prozora.

Iako su analizirani modeli predstavljali situacije koje su u skladu sa standardima vremena, iz današnje perspektive, u odnosu na većinu analiziranih parametara, neophodna su određena poboljšanja kako bi se prilagodili aktuelnim zahtevima (Đukanović i dr., 2016), što potvrđuje evoluciju našeg razumevanja životnog komfora.

Naglašena potreba za smanjenjem potrošnje energije danas je imperativ, a fokusira se na problem toplotnog komfora, iako se istovremeno prate i drugi oblici komfora. Visoki zahtevi za minimalnom potrošnjom energije u zgradama, između ostalog, nameću veću potrebu za korišćenjem

izolacionih materijala, što često ugrožava izvodljivost takvih složenih i često obimnih konstrukcija. Rešenja za ovakve probleme se traže u primeni novih vrsta savremenih materijala koji će, s jedne strane, biti prilagođeni postavljenim zahtevima, dok, s druge strane, postoji potreba za preispitivanjem visokih zahteva termičkog komfora u formi takozvanog održivog komfora. Međutim, sigurno je da će vremenom, u svetlu održivog razvoja, pored problema sa energijom, u aktuelne doktrine projektovanja i izgradnje biti uključena i ostala pitanja, donoseći novu perspektivu u procesu izbora i korišćenja građevinskih materijala.

Literatura

- Bluyssen, P. (2010). Towards new methods and ways to create healthy and comfortable buildings. *Building and Environment*, 45, 808-818. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.020>
- Đukanović, Lj. (2015). *Tipologija i valorizacija građevinske strukture stambenih zgrada Beograda sa stanovišta komfora stanovanja*. [Neobjavljena doktorska disertacija]. Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Đukanović, Lj., Radivojević, A., & Rajčić, A. (2016). Potentials and limitations for energy refurbishment of multi-family residential buildings built in Belgrade before World War One. *Energy and Buildings*, 115, 112-120. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.047>
- EN ISO 6946: 2007. *Building components and building elements -- Thermal resistance and thermal transmittance -- Calculation method*.
- EN ISO 7730: 2005. *Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*.
- EN 12831: 2003. *Heating systems in buildings — Method for calculation of the design heat load*.
- EN 15251: 2007. *Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*.
- Fasold, W., & Sonntag, E. (1971). *Bauphysikalische Entwurfslehre*. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen.
- Hall, M.R., & Allison, D. (2010). Heat and mass transport processes in building materials. U: M. Hall (Ed.), *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings*. (str. 3-53). Boca Raton, Fla: Woodhead Publishing.
- Harris, C., & Borer, P. (2005). *The Whole House Book* (2nd ed.). Machynlleth, Powys: Centre for Alternative Technology.
- Hauslanden, G., de Saldanha, M., Liedl, P., & Sager, C. (2005). *Climate design. Solution for buildings that can do more with less technology*. Basel: Birkhauser, 2005.
- Jovanović Popović, M. (1991). *Zdravo stanovanje*. Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Jugoslovenski komitet za osvetljenje. (1974). *Preporuke za osvetljenje*. Beograd: Jugoslovenski komitet za osvetljenje.
- Künzel, H.M., & Karagiozis, A. (2010). Hygrothermal behaviour and simulation in buildings. U: M. Hall (Ed.), *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings*. (str. 54-76). Boca Raton, Fla: Woodhead Publishing.
- Ministarstvo za zaštitu životne sredine, rudarstvo i prostorno planiranje Republike Srbije. (2011). *Pravilnik o energetskej efikasnosti zgrada*. *Službeni glasnik RS*, 61.
- Medved, S. (2011). *Građevinska fizika*. Novi Pazar: Državni univerzitet u Novom Pazaru.
- Oral, G. K., Yener, A.K. & Bayazit, N.T. (2004). Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Building and Environment*, 39, 281-287. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00141-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00141-0)
- Parsons, K. (2010). Thermal comfort in buildings. U: M. Hall (Ed.), *Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings*. (str. 127-147). Boca Raton, Fla: Woodhead Publishing.
- Radivojević, A. (2003). Iskustva i pravci razvoja standarda iz oblasti termičke zaštite kod nas i u svetu. U: *Energetska optimizacija zgrada u kontekstu održive arhitekture – I deo*. (str. 99-123). Beograd: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Beogradu.
- Radivojević, A. & Jovanović Popović M. (2013). Correlations between thermal and acoustic performances in residential buildings in the scope of building regulations in Serbia. *FACTA UNIVERSITATIS, Series: Architecture and Civil Engineering* 11(2), 125 - 134.
- Sassi, P. (2006). *Strategies for sustainable architecture*. Oxon: Taylor & Francis.
- SRPS U.C9.100: 1963. *Dnevno i električno osvetljenje prostorija u zgradama*.
- Szokolay, S. (2004). *Introduction to architectural science. The basis of sustainable design*. Oxford: Architectural Press.

- The European Parliament and the Council of the European Union. (2010). Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Official Journal of the European Union*, L 153, 13-35. Preuzeto sa <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=EN>
- Todorović, M., Bogner, M., & Denić, N. (2012). *O izolaciji*. Beograd: ETA.
- Ursa Fragmat - Akustika RS, software. Preuzeto sa <http://www.ursa.rs/sr-latn-cs/arhitekti/stranice/program-akustika.aspx>
- Velux Daylight Visualizer 2, software. Preuzeto sa <http://www.velux.co.uk/professional/tools/architects/visualizers>
- Vilems, V., Šild, K., & Dinter S. (2008). *Građevinska fizika 1*. Beograd: Građevinska knjiga.
- Zöld, A., & Szalay, Z. (2007). What is missing from the concept of the new European Building Directive? *Building and Environment*, 42, 1761-1769. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.12.003>