

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Lucija Martinić, Valentina Pogačić, Katarina Marić

Utjecaj vrste spona na točkaste toplinske mostove i optimizacija njihova rasporeda za povećanje krutosti predgotovljenih zidnih panela

Zagreb, 2019.

Ovaj rad izrađen je na Zavodu za materijale i na Zavodu za tehničku mehaniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom doc.dr.sc. Bojana Milovanovića, dipl. ing. građ. i doc. dr. sc. Marija Uroša, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2018./2019.

KRATICE

$\{S\}$	vektor rubnih uvjeta
A [m ²]	ploština okomita na smjer kretanja topline
A_i [m ²]	ploština na koju se odnosi vrijednost U_i
c [J/(kg K)]	specifični toplinski kapacitet
C [J/(m ³ K)]	volumetrijski toplinski kapacitet
d [m]	debljina
F_a [kN]	potresna sila horizontalna potresna sila koja djeluje u središtu mase nekonstrukcijskog elementa u najnepovoljnijem smjeru
f_0 [m ⁻¹]	Faktor oblika zgrade
H [m]	visina zgrade mjerena od temelja ili gornjeg ruba krutog podruma
h_c [W/(m ² K)]	koeficijent konvekcije
h_{se} [W/(m ² K)]	vanjski plošni koeficijent prijelaza topline
h_{si} [W/(m ² K)]	unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline
I [W/m ³]	toplina generirana u elementu
$K_{i,j,k+0.5}$ [W/K]	koeficijent toplinske veze između volumena (i, j, k) i $(i, j, k+1)$
L_{2D} [W/(m K)]	koeficijent toplinske veze dobiven iz 2-D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša
L_{3D} [W/K]	koeficijent toplinske veze dobiven iz 3-D proračuna 3-D komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša
L_j [m]	duljina na koju se odnosi vrijednost Ψ_j
m [kg]	masa tijela
N_i	broj 1-D komponenata
N_j	broj 2-D komponenata
Q [J]	količina topline
q [W/m ²]	gustoća toplinskog toka
q_a	faktor ponašanja elemenata
R [m ² K/W]	otpor prolasku topline
$R_{i,j,k+0.5}$ [m ² K/W]	toplinski otpora između dvaju volumena
S	koeficijent tla
S_a	potresni koeficijent primjenjiv na nekonstruktivne elemente

t [h]	vrijeme
$T = T(x, y, z)$ [K]	temperatura u točki s koordinatama (x, y, z)
T_1 [s]	osnovni period vibracija zgrade u odgovarajućem smjeru
T_1 i T_2	temperature na vanjskim površinama
$T_{1,2,3,..}$ [°C]	temperature u čvorovima kontrolnih volumena 1, 2, 3, ...
T_a [s]	osnovni period elementa vibracija nekonstruktivnog elementa
T_f [K]	temperatura fluida dalje od granične plohe
T_p [K]	temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid
U [W/(m ² K)]	koeficijent prolaska topline
U_i [W/(m ² K)]	plošni koeficijent prolaska topline 1-D komponente i koja razdvaja dva promatrana okoliša
W_a [kN]	težina elemenata
z [m]	visina od vrha temelja do vrha zgrade nekonstruktivnog elementa iznad razine primjene potresnog djelovanja (temelj i gornji rub krutog podruma)
α	omjer proračunskog ubrzanja temeljnog tla na temeljnom tlu tipa A, a_g i gravitacijskog ubrzanja g
γ_a	faktor važnosti elemenata
ΔT [°C]	promjena temperature
$\Delta x, \Delta y$ i Δz	dimenzije kontrolnih volumena, te su konstantne po cijelom volumenu elementa
θ_{dp} [K]	temperatura rosišta
θ_e [K]	temperatura vanjskog zrak
θ_i [K]	temperatura zraka u prostoriji
θ_{si}	površinska temperatura sa strane prostorije
λ [W/(m K)]	toplinska provodljivost
$\lambda_{1,2,3,4,5,6}$ [W/(m K)]	toplinske provodljivosti materijala
$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ [W/(m K)]	toplinske provodljivosti u smjeru x, y i z
Ψ_j [W/(m K)]	duljinski koeficijent prolaska topline
X [W/K]	točkasti koeficijent prolaska topline

SADRŽAJ

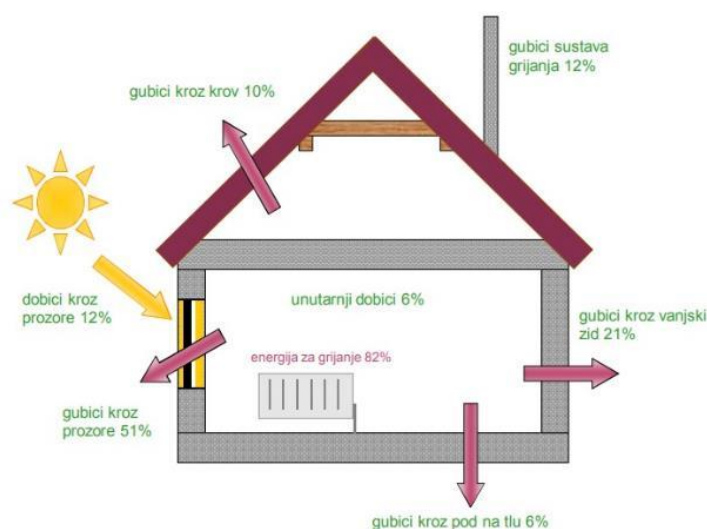
1. UVOD.....	1
2. MOTIVACIJA I HIPOTEZA	3
3. METODOLOGIJA RADA.....	5
4. ODRŽIVOST	6
4.1. ODRŽIVA GRADNJA	6
4.2. ENERGETSKA UČINKOVITOST	8
4.3. OTPAD.....	10
5. FIZIKALNE KARAKTERISTIKE ZGRADE	14
5.1. GRAĐEVINSKA FIZIKA	15
5.2. TOPLINA I TEMPERATURA	17
5.3. PRIJENOS TOPLINE	19
5.4. KOEFICIJENT PROLASKA TOPLINE I TOPLINSKI OTPOR.....	22
6. TOPLINSKI MOSTOVI	24
7. ECO SANDWICH®	30
8. 3D NUMERIČKA ANALIZA PROVOĐENJA TOPLINE	37
8.1. PROVOĐENJE TOPLINE – MATEMATIČKA FORMULACIJA	37
8.1.1. RUBNI UVJETI.....	37
8.1.2. POČETNI UVJETI.....	38
8.1.3. PROVOĐENJE TOPLINE IZMEĐU DVA ELEMENTA.....	38
8.2. UVOD U METODU KONTROLNIH VOLUMENA	39
8.3. PROVOĐENJE TOPLINE – NUMERIČKA FORMULACIJA.....	40
8.4. TOPLINSKI TOKOVI IZ PRORAČUNATIH TEMPERATURA	42
9. PRORAČUN TOČKASTIH TOPLINSKIH MOSTOVA.....	43
9.1. PRORAČUN METODOM KONTROLNIH VOLUMENA	43
9.1.1. ULAZNI PODACI.....	44
9.1.2. RUBNI I POČETNI UVJETI	45
9.1.3. NUMERIČKA FORMULACIJA MATRICE PROVODLJIVOSTI	47

9.2.	PRORAČUN TOPLINSKIH MOSTOVA KOMERCIJALNIM PROGRAMOM ANTHERM.....	51
9.2.1.	NUMERIČKI MODEL	52
9.3.	REZULTATI DOBIVENI MKV-OM I U ANTHERMU	54
9.4.	MODELI CIJELOG ZIDNOG PANELA.....	63
9.5.	OBRADA I USPOREDBA REZULTATA ZIDNOG PANELA.....	68
10.	EKSPERIMENTALNI DIO ANALIZE NOSIVOSTI	73
11.	OBRADA REZULTATA EKSPERIMENTALNOG DIJELA	78
11.1.	ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA.....	78
11.2.	ISPITIVANJE NA ODREZ POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA	82
11.3.	ISPITIVANJE SILE ČUPANJA POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA	87
11.4.	ISPITIVANJE NOSIVOSTI ZIDNOG PANELA IZRAĐENOG OD POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA.....	91
11.4.1.	ISPITIVANJE DINAMIČKIM OPTEREĆENJEM ZIDNOG PANELA	92
11.4.2.	ISPITIVANJE PRI CIKLIČKOM OPTEREĆENJU ZIDNOG PANELA.....	95
12.	NUMERIČKI MODEL	97
12.1.	ULAZNI PARAMETRI	98
12.2.	ANALIZA REZULTATA	104
12.3.	VARIJANTE OJAČANJA ZIDNOG PANELA.....	107
13.	ZAKLJUČAK.....	119
14.	ZAHVALE	121
15.	LITERATURA	122
16.	SAŽETAK.....	131
17.	SUMMARY	132
18.	ŽIVOTOPISI	133
19.	PRILOZI.....	134
19.1.	PRILOG A.....	134

1. UVOD

Povijest graditeljstva obiluje raznolikim tehnikama i materijalima gradnje. Tipovi građevina razvijali su se od jednostavnih nastambi od blata, slame, šiblja, (...), preko građevina s masivnim zidovima, čija se širina nekad mjerila i u metrima, pa sve do suvremenog doba, gdje se gradi od raznih polimernih materijala, legura metala, kompozitnih materijala, (...), koji omogućuju ostvarivanje znatno složenijih konstrukcija (veće visine, veći rasponi, složeniji i razvedeniji tlocrti i presjeci) uz tanje i lakše nosive elemente.

Za razliku od perioda nakon druge tehnološke revolucije te kasnijeg razvoja, gdje se težilo zadovoljavanju isključivo statike konstrukcije, zadnjih se petnaestak godina svijest o kvaliteti izvedbe obodnih elemenata zgrade, u toplinskom smislu, značajno povećala. U Hrvatskoj je na to svakako utjecao Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (dalje u tekstu: TPRUETZZ) [1]. Uostalom, jedan od sedam bitnih zahtjeva za građevinu je gospodarenje energijom i očuvanje topline, što znači da građevina mora biti energetski učinkovita, upotrebljavajući što je moguće manje energije tijekom gradnje i razgradnje. To je dovelo do značajnog povećanja debljine toplinske izolacije klasičnim izolacijskim materijalima i sustavima, odnosno razvoja novih toplinsko izolacijskih materijala s vrlo malom toplinskom provodljivošću, odnosno posljedično manjom debljinom. Na slici 1-1 vidljivo je kako 21 % ukupnih gubitaka topline u zgradi otpada na gubitke kroz vanjske zidove. Relativno visok postotak gubitaka putem vanjskih zidova ostavlja prostora za značajno smanjenje gubitaka ugradnjom zidnih elemenata s niskim koeficijentom prolaska topline.



Slika 1-1 Energetska bilanca zgrade [2]

Prema procjenama, zgradarstvo čini oko 40 % [3] ukupne potrošnje energije, što pruža veliku mogućnost za potencijalne energetske, a time i ekonomske uštede.

Od 2018. godine, od strane Europske unije, uvodi se standard tzv. zgrade gotovo nulte energije (*eng. nearly zero energy building*). Niska, odnosno nulta, količina energije podrazumijeva nisku ukupnu potrošnju primarne energije (energija za grijanje, hlađenje, ventilaciju i pripremu potrošne tople vode) i podmirenje te energije iz obnovljivih izvora. Od 31. prosinca 2020. godine sve nove zgrade moraju biti gotovo nulte energije. Zgrade s malim utroškom energije su temelj održive gradnje koja uključuje uporabu prikladnih građevnih materijala koji nisu štetni za okoliš, uštedu toplinske energije, zdrav i udoban boravak ljudi u zgradama te ispravno gospodarenje otpadom pri rekonstrukciji i rušenju.

Održivom se gradnjom može smanjiti proizvodnja materijala koji iziskuju relativno mnogo energije prilikom proizvodnje, kao što su cement, čelik, razni agregati i aluminij [4]. Ne očekuje se da će se ugradnja takvih materijala smanjiti, obzirom na njihove brojne prednosti, ali znanost i istraživanja idu u smjeru recikliranja takvih materijala, čime bi se istovremeno i smanjila količina materijala na odlagalištima otpada što je u skladu sa 7. temeljnim zahtjevom za gradnju. Zbog svog je velikog potencijala za ponovnu upotrebu građevinski otpad jedan od prioritetnih smjerova za financiranje, određen od strane Europske komisije.

Na količinu otpada svakako utječe i način gradnje. Predgotovljeni sustav gradnje je trenutno u usponu zbog svojih brojnih prednosti. Kvaliteta predgotovljenih elemenata, s obzirom na to da se proizvodi pod stručnim i stalnim nadzorom te pod specificiranim standardima, je jednolika i visoka. Proizvodnja se odvija u unutarnjem prostoru u kontroliranim uvjetima te elementi nisu izloženi vremenskim prilikama. Vrijeme gradnje je kraće nego pri tradicionalnoj gradnji, što direktno utječe na ekonomski aspekt gradnje, uz činjenicu da je manja količina viška materijala, odnosno građevinskog otpada.

2. MOTIVACIJA I HIPOTEZA

Trenutni su zakoni u EU usmjereni na smanjenje potrošnje energije, a velik se dio potrošene energije u zgradi gubi zbog neadekvatne izoliranosti i kvalitete gradnje. Podatak kako toplinski mostovi čine oko 30 % ukupnih transmisijskih gubitaka zgrade, dao je motivaciju za istraživanje mogućnosti smanjenja istih u ECO-SANDWICH® predgotovljenom zidnom panelu. Posljedice pojave toplinskih mostova, uz sami gubitak toplinske energije, su široke, od pojave kondenzacije u slojevima zida do pojave plijesni, odlamanja dijelova žbuke, cvjetanja soli i ostalo. Kod projektiranja i građenja zgrade vrijedi načelo kako je potrebno koristiti sve ekonomski prihvatljive tehničke i tehnološke mogućnosti kako bi se djelovanje toplinskih mostova što više oslabilo.

Stoga će se istražiti mogućnost zamjene postojećih čeličnih spona s polimernim kompozitnim materijalom za povezivanje slojeva ECO-SANDWICH® predgotovljenog zidnog panela.

S obzirom na to da polimerne kompozitne spona imaju manju čvrstoću nego čelik, potrebno je optimizirati njihov raspored unutar panela i predvidjeti potrebna ojačanja. Manja krutost, prouzrokovana zamjenom spona, može dovesti do njihovog početnog progiba, što bi predstavljalo problem prilikom montaže zidnog panela.

HIPOTEZA

- 1) Primjenom polimernih kompozitnih spona u fasadnom panelu će se značajno smanjiti toplinski gubici kroz točkaste toplinske mostove, u usporedbi s čeličnim sponama.
- 2) Moguća je optimizacija rasporeda polimernih kompozitnih spona kako bi se zadržala zadovoljavajuća krutost predgotovljenih zidnih panela, odnosno pojavili minimalni progibi vanjskog sloja betona pri djelovanju vertikalnog i horizontalnog opterećenja.

CILJEVI

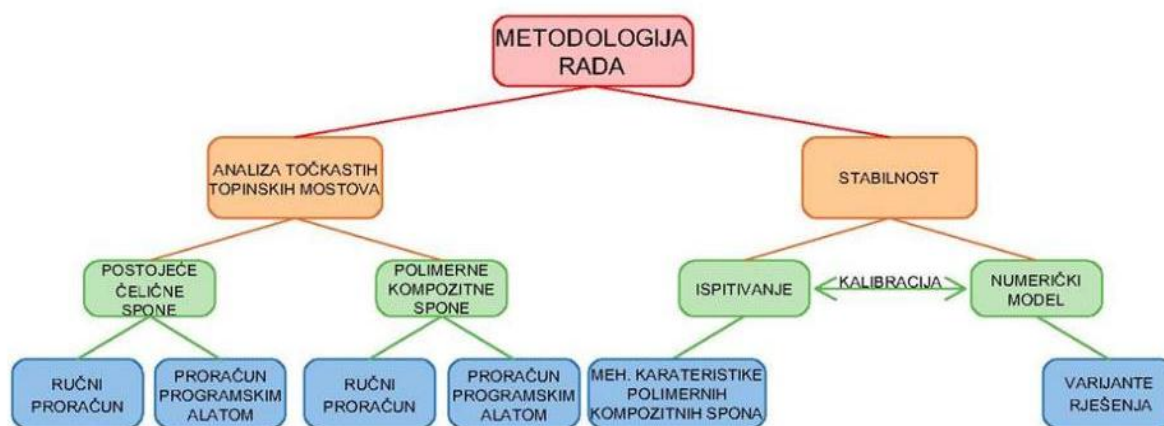
Ciljevi rada uključuju dokazivanje smanjenja koeficijenta točkastih mostova što povlači smanjenje toplinske provodljivosti cijelog zidnog panela (U – vrijednost). Ispitivanjima provedenima na zidnom panelu pokušat će se dokazati da uporaba polimernih kompozitnih spona neće utjecati na stabilnost zidnog panela. U nastavku su taksativno nabrojani ciljevi rada:

- 1) Proračun utjecaja točkastih toplinskih mostova na karakterističnom elementa zidnog panela pomoću smišljenog algoritma temeljenog na metodi kontrolnih volumena za analizu poboljšanja cijelog zidnog panela smanjenjem njegove U - vrijednosti
- 2) Provjera rezultata dobivenih algoritmom za karakteristični element pomoću komercijalnog programa AnTherm
- 3) Proračun utjecaja točkastih toplinskih mostova u komercijalnom programu AnTherm za cijeli panel zbog usporedbe s karakterističnim modelom koji je manjih dimenzija
- 4) Laboratorijsko ispitivanje mehaničkih svojstava zidnog panela s polimernim kompozitnim sponama, koji će se koristiti za numerički model zidnog panela
- 5) Izrada numeričkog modela zidnog panela s ishodom pronalaženja najpovoljnijeg rasporeda polimernih kompozitnih spona pomoću programskog paketa SAP 2000 v.20.2.0.

3. METODOLOGIJA RADA

Istraživanje uključuje analizu postojećih točkastih toplinskih mostova nastalih zbog čeličnih spona, koje spajaju međusobno sve slojeve panela. Zbog smanjenja utjecaja gubitka energije kroz točkaste toplinske mostove, uvjetovanih čeličnim sponama, pristupit će se usporedbi rezultata s polimer kompozitnim sponama. Analiza toplinskih mostova uključuje proračun metodom kontrolnih volumena te proračun pomoću programskog alata AnTherm zbog provjere točnosti. Uz model koji se dimenzijama poklapa s ručnim proračunom, u AnThermu će se modelirati zidni panel u punoj veličini. Ulazni podaci za materijale, korištene u obje metode proračuna, uzete su na temelju dostupnih izvjava o svojstvima od strane proizvođača polimernih kompozitnih spona, HK Composites, i na temelju tehničkog lista za ECO-SANDWICH® panel.

Numeričkoj analizi zidnog panela u kojem su slojevi spojeni polimernim kompozitnim sponama prethodila su, za potrebe ovoga rada, ispitivanja uzoraka ECO-SANDWICH® zidnog panela, provedena na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, u laboratoriju Zavoda za materijale te dio ispitivanja u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku. Eksperimentalnim ispitivanjem obuhvatilo se ispitivanje vlačne čvrstoće, odreza i sile čupanja kod polimernih kompozitnih spona, te kod zidnih panela ispitivanje nosivosti, dinamičko i cikličko opterećenje. Time su dobiveni ulazni podaci za modeliranje panela s polimernim kompozitnim sponama pomoću programskog paketa SAP2000, v.20.2.0, u kojem su izrađena varijantna rješenja postavljanja spona, kako bi se odredio njihov optimalan raspored po pitanju stabilnosti. Vizualni slijed metodologije, prikazan je na slici 3-1.



Slika 3-1 Metodologija rada

4. ODRŽIVOST

Svijet se razvija brže nego ikada do sada. S procjenom kako gradska područja u svijetu rastu brzinom od oko 200.000 stanovnika po danu, jasno je kako je velika potreba za bržom gradnjom zgrada. S druge strane, 30 % ukupnih emisija stakleničkih plinova čini upravo zgradarstvo. Uzimanjem u obzir oba trenda, potrebne su određene promjene u dosadašnjem načinu funkcioniranja građevinskog sektora. Područje građevinarstva je već tradicionalno prilično sporo po pitanju prihvaćanja novih tehnologija i općenito praćenja tehnološkog napretka u svijetu (za razliku od npr. automobilske industrije, industrije mobilnih uređaja) pa nema velike razlike u građenju prije npr. 50 godina i sada. Međutim, kako održivost sve više postaje zahtjevom nego težnjom, građevinarstvo je zahvaćeno valom modernizacije. Modernizacija bi trebala, između ostalog, pridonijeti u smislu povećanja energetske učinkovitosti i održivosti, s obzirom na to da je građevinarstvo velik potrošač energije u svijetu [5]. Kako je rastuća potražnja za energijom vitalan čimbenik gospodarskog razvoja, očekuje se kako je nedostatak iste jedan od problema koji očekuju čovječanstvo u budućnosti.

4.1. ODRŽIVA GRADNJA

Održivost može istovremeno biti i ideja i način života, način proizvodnje i način gradnje. Pojam održive gradnje kreće od filozofije 21. stoljeća, koja se okreće čovjeku i prirodi, čiji se sklad ponovno otkriva i naglašava. Taj stav je temelj koncepta održive gradnje i uvod u ekološku arhitekturu.

Održiva gradnja, a i održivost općenito, zahtjeva sljedeće:

- 1) Znatno smanjenje uporabe energije,
- 2) Ponovnu iskoristivost i mogućnost recikliranja materijala,
- 3) Zadovoljstvo čovjeka,
- 4) Minimalne utjecaje na okoliš i minimalnu ugrađenu energiju [6].

Aktivnosti u okviru projektiranja, gradnje, upravljanja, održavanja, rekonstrukcije i rušenja uvelike utječu na prirodni okoliš. Održivo projektiranje teži korištenju što manje prirodnih resursa, a lokalni se resursi koriste na ekonomičan način i ne narušava se ekološka ravnoteža.

Na minimum se svode štetni utjecaji građevina na okoliš, istodobno se stvaraju preduvjeti za zdrav i ugodan život, a i smanjuje se količina otpadnog materijala [6].

Jedan od načina za potonje je ponovna uporaba određenog materijala ili recikliranih materijala te njegova ugradnja u drugačiji ili sličan građevinski proizvod. Za ocjenu materijala ili građevnog proizvoda po pitanju njegovih utjecaja na okoliš, promatra se njegov cijeli životni ciklus, kako je prikazano na slici 4-1.



Slika 4-1 Životne faze materijala/građevnog proizvoda

Negativan utjecaj na okoliš uključuje sve emisije izvora materijala (tvornica), emisije koje se javljaju tijekom korištenja (formaldehidi i razna sredstva za čišćenje i održavanje materijala) te naposljetku emisije koje se javljaju tijekom konačnog deponiranja materijala. Za materijale je bitna njihova dugotrajnost, tj. njihova sposobnost zadržavanja „zelenih“ karakteristika tijekom predviđenog vremena. U suprotnom, takvi materijali se ne smatraju ekološki učinkovitim [7].

Održivost primijenjena u građevinarstvu sve više dobiva na važnosti, s obzirom na trendove u svijetu te na pozitivne posljedice koje ima na ekološki sustav, na čovjeka i na samo poslovanje. Prema nekim istraživanjima, u sektoru građenja troši se 17 % vodnih resursa, 25 % šumskih proizvoda od drva i čak 40 % energetske resursa [6], što znači da bi se globalni problem prevelike potrošnje energije mogao donekle smanjiti energetsom učinkovitošću u građevinarstvu, tj. smanjenjem tog postotka.

4.2. ENERGETSKA UČINKOVITOST

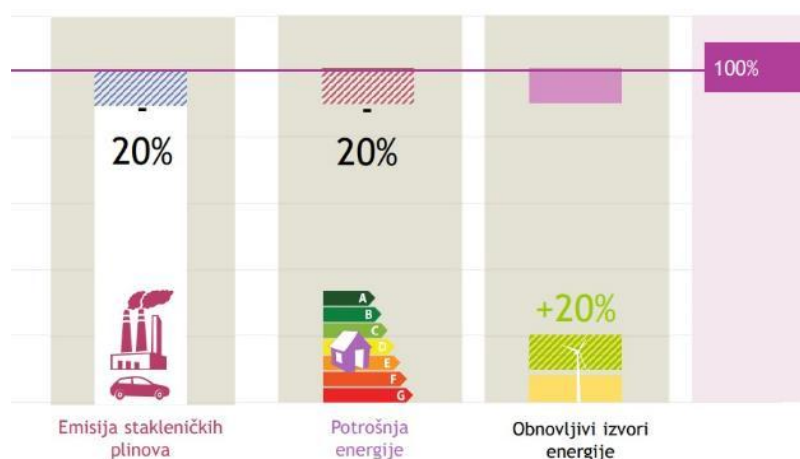
Energetska je učinkovitost suma isplaniranih i provedenih mjera, čiji je cilj korištenje minimalne moguće količine energije, a tako da razina udobnosti i stopa gospodarske proizvodnje ostanu sačuvane [8]. Energetska učinkovitost nije isključivo usredotočena na uštedu, kao što je često promatrana, već na poboljšanje kvalitete življenja. Doprinosi biološko-ekološkim zahtjevima, s obzirom na to da ugodniji boravak doprinosi zdravlju ljudi, a zaštititi okoliša doprinosi manjom emisijom CO₂ u atmosferu zbog manje potrošnje energije [9]. Uključuje niz različitih područja mogućnosti uštede toplinske i električne energije uz racionalnu uporabu neobnovljivih izvora energije i minimalnu upotrebu obnovljivih izvora energije, u iznosu od 20 % od ukupne isporučene energije [10].

Izgradnja građevine podrazumijeva potrošnju energije u čitavom uporabnom vijeku, od građenja do rušenja. Tijekom tog procesa razlikuju se operativna i ugrađena energija. Operativna energija je ona koja je potrebna za izgradnju, održavanje i rušenje, a ugrađena za proizvodnju građevnih materijala i uređaja u uporabnom vijeku zgrade. Nužnom se energijom smatra ona potrebna za iskop, uklanjanje i transport materijala, u iznosu od približno 1 % energije potrošene u cjelokupnom uporabnom vijeku zgrade. U prošlim se desetljećima smanjenje ukupne potrošnje energije uglavnom izvodilo smanjenjem operativne energije, poboljšanjem toplinske ovojnice zgrade ¹ (deblji sloj toplinske izolacije, prozori s poboljšanom toplinskom izolacijom, smanjenje toplinskih mostova poboljšanjem zrakonepropusnosti) i ugrađivanjem energetski učinkovite ventilacije i sustava grijanja. Veliki dio tih mjera zapravo smanjuje operativnu energiju, ali s druge strane povećava udio ugrađene primarne energije i emisiju stakleničkih plinova [11].

Ušteda toplinske energije, osim o toplinskoj zaštiti zgrade, ovisi i o obliku zgrade, orijentaciji, materijalu konstrukcije te o klimatskim uvjetima. Optimizacijom toplinske ovojnice zgrada, prema rezultatima istraživanja, mogu se postići godišnje uštede u iznosu od 70 % za grijanje te 40 % za hlađenje. Svi gubici zgrade se definiraju energetskom bilancom.

Energetska je učinkovitost izrazito bitna za budućnost. Cilj unutar energetsko-klimatskog paketa zakona, koji je EU postavila do 2020. godine, obuhvaća smanjenje potrošnje energije za 20 % (u odnosu na onu koja se do 2020. očekuje u slučaju neprovođenja posebnih mjera), povećanje za 20 % energije proizvedene iz prirodnih izvora i smanjenje za 20 % emisije stakleničkih plinova, kao što je prikazano na slici 4-2 [12].

¹ Ugrađeni dijelovi zgrade koji odvajaju unutrašnjost zgrade od vanjskog okoliša.



Slika 4-2 Strateški ciljevi EU do 2020.godine [2]

Za nastavak težnje za ostvarenjem održivog razvoja, donesen je Program za održivi razvoj 2030., globalni sporazum kojim se utvrđuje univerzalni, sveobuhvatni program djelovanja. Sa 17 ciljeva održivog razvoja i 169 podciljeva, uravnotežene su okolišna, društvena i gospodarska dimenzija. Neki su od ciljeva, izgradnja prilagodljive infrastrukture, promoviranje uključive i održive industrijalizacije i poticanje inovativnosti u infrastrukturi te osiguranje održivih oblika potrošnje i proizvodnje [13]. U studenom 2018. godine, Europska je komisija predstavila dugoročnu viziju za modernu, konkurentnu i klimatski neutralnu ekonomiju do 2050. godine. Strategija pokazuje kako Europa može ulaganjem u tehnološka rješenja, industriju, ekonomiju i znanost predvoditi na putu do klimatske neutralnosti. Jedna od mjera je npr. smanjenje emisije stakleničkih plinova u iznosu 80 - 90 % za držanje globalnog zatopljenja ispod 2 °C [14].

Jedan od svakako bitnih prepreka održivom razvoju je otpad. Do 2020. godine bi se trebao postići cilj od minimalno 70 % ne štetnog građevinskog otpada i otpada od rušenja za recikliranje ili ponovnu upotrebu, čime se stavlja naglasak na još jedan veliki segment problema štetnog utjecaja na okoliš.

4.3. OTPAD

Građevinski otpad je prepoznat i određen od strane Europske komisije kao jedan od prioritetnijih problema u ukupnom zbrinjavanju otpada. Prema Pravilniku o gospodarenju otpadom, on je definiran kao otpad koji je nastao prilikom gradnje građevina, rekonstrukcije, uklanjanja i održavanja postojećih građevina, te otpad nastao od iskopanog materijala [15]. Otpad s velikim potencijalom za recikliranje i ponovnu upotrebu je neopasni građevinski otpad, budući da neke od tih komponenata otpada imaju veliku vrijednost u pogledu zamjene prirodnih izvora sirovina. Prema Zakonu o gradnji (NN 153/13, 20/17), jedan od temeljnih zahtjeva za građevinu je održiva uporaba prirodnih izvora, što znači da građevine moraju biti projektirane, izgrađene i uklonjene tako da je uporaba prirodnih izvora održiva. Također, mora se zajamčiti ponovna uporaba ili mogućnost reciklaže građevine, njezinih materijala i dijelova nakon uklanjanja, trajnost građevine i uporaba okolišu prihvatljivih sirovina i sekundarnih materijala u građevinama [16]. Tim načinom opskrbe otpadom smanjuje se potreba za izgradnjom dodatnih odlagališta te se umanjuje rizik od odlaganje otpada na „divljim“ deponijima.

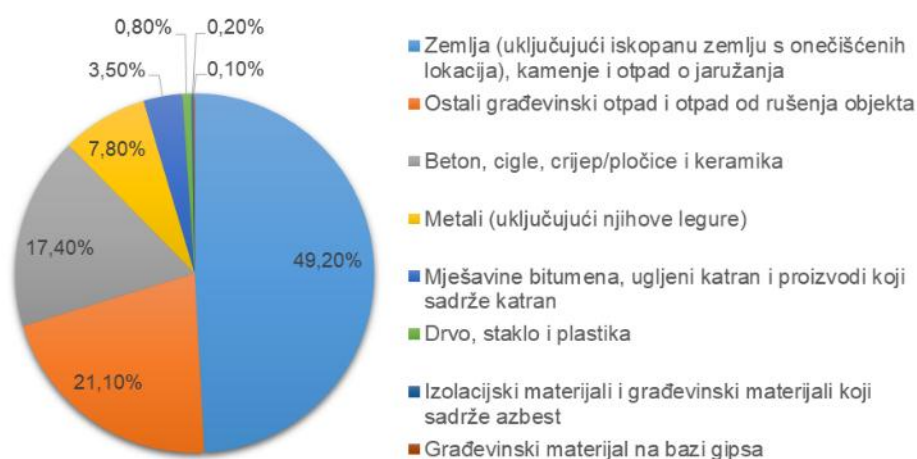
Stupanj recikliranja i ponovne upotrebe građevinskog otpada i otpada od rušenja značajno se razlikuje (u rasponu od 10 do 90 %) između zemalja EU. Jedan od ciljeva Okvirne direktive o otpadu jest osigurati okvir za podizanje stupnja recikliranja u društvu [17].

Sukladno Okvirnoj direktivi o otpadu, u Republici Hrvatskoj, donesen je Plan gospodarenja otpadom Republike Hrvatske za razdoblje 2017. do 2022. godine (NN 3/17). Plan gospodarenja otpadom kao provedbeni dokument dio je kontinuiranog planiranja gospodarenja otpadom koje je nužno osigurati na svim razinama, od nacionalne do lokalne. Na slici 4-3 je prikazan sustav kojim bi se osigurao cilj manje količine otpada potrebnog za zbrinjavanje.



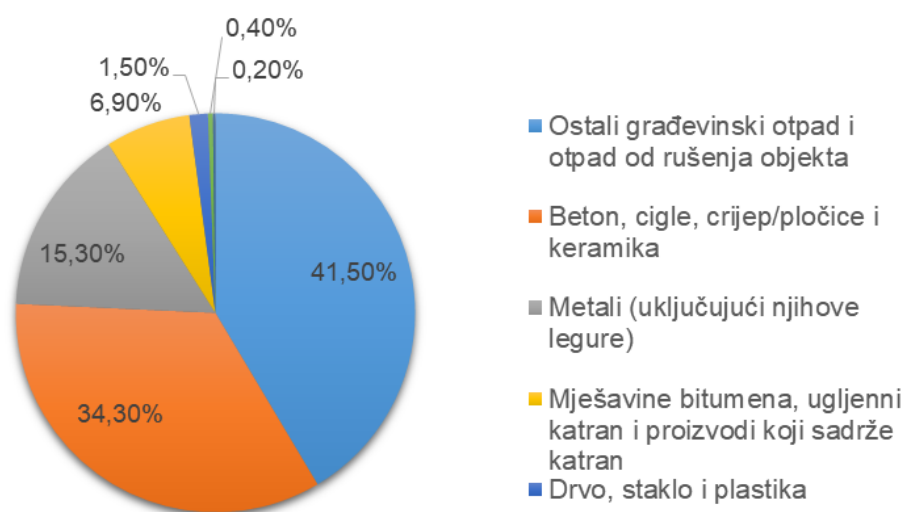
Slika 4-3 Provedbeni plan gospodarenja otpadom [18]

Prema Procjeni količina građevinskog otpada i potencijala za njegovo korištenje za 2015. godinu i promatrajući velike tvrtke (22), srednje tvrtke (52) i male tvrtke i obrtnike (173) ukupna je količina građevinskog otpada 1.189.316 tona. Rezultati otpada su razvrstani prema županiji nastanka otpada, prema pojedinoj vrsti građevnog otpada, proizvođačima građevnog otpada, i ostalo. Od ukupne količine otpada (1.189.316 tona) najveći udio ima zemlja, uključujući iskopanu zemlju s onečišćenih lokacija (49 %), zatim ostali građevinski otpad i otpad od rušenja objekata (21,1 %), beton, cigla, crijep/pločice i keramika (17,4 %), metali i njegove legure (7,8 %) i ostale vrste otpada (< 5 %), kao što je prikazano na slici 4-4.



Slika 4-4 Sustav otpada uključujući iskop zemljanog materijala

Ako se promatra građevni otpad u kojemu je isključen iskop zemljanog materijala (slika 4-5), tada je ostali građevni otpad i otpad od rušenja objekta zastupljen s 41,5 %, beton, cigle, crijep/pločice i keramika s 34,3 %, a metali uključujući i njegove legure s 15,3 %.



Slika 4-5 Sustav otpada isključujući iskop zemljanog materijala

Promotri li se količine proizvedenog građevnog otpada prijavljeni u Registru onečišćavanja okoliša prema djelatnostima, vidi se kako najveći postotak ima građevinarstvo sa 69 %, zatim prerađivačka industrija s 9 %, te trgovina na veliko i na malo, popravak motornih vozila i motocikala s 8 %, i ostali [19].

Da bi se smanjio porast proizvodnje otpada, teži se odvojenom prikupljanju i recikliranju otpada. Za ovaj sustav je bitno uspostaviti sustav gospodarenja otpadom koji teži ispunjenju nekoliko ciljeva, a to su spriječiti nastanak otpada, priprema za ponovnu upotrebu, recikliranje, drugi postupci oporabe npr. energetska oporaba i zbrinjavanje otpada. Ovaj sustav omogućuje ponovo korištenje, popravak, obnavljanje i recikliranje postojećih materijala i proizvoda. Procjenjuje se da se približno 90 % građevnog otpada i otpada od rušenja može ponovno upotrijebiti, ovisno o vrsti konstrukcije i lokalnom tržištu. Osim za nasipavanje, građevni otpad moguće je upotrijebiti i za izradu novih betonskih ili asfaltnih mješavina.

Također, u svijetu su se zbog želje i pojednostavljenja skupljanja, sortiranja i ostalih intervencija po pitanju otpada otvorile razne organizacije i „pokretači“ inicijative za logičnim slijedom prikupljanja otpada. Jedan od takvih projekata je RE⁴ [20]. Naime, temelji se na četiri intervencije u vezi građevinskog materijala, a to su da se ostvari ponovno korištenje, recikliranje građevinskog otpada i energetske učinkoviti predgotovljeni elementi za obnovu

konstrukcija i građevnih objekata. Slika 4-6 prikazuje koncept i tijek kako se od građevinskog otpada dolazi do inovativnih rješenja za ponovnu upotrebu materijala.



Slika 4-6 Tijek rada RE4 organizacije

Trenutno je upotreba recikliranog agregata u betonima za konstrukcije još uvijek ograničena zbog nečistoća u recikliranom agregatu (kao npr. ostaci drva, papira, žbuke, plastike i ostalih čestica), manje gustoće, povećane apsorpcije u usporedbi s agregatom prirodnog porijekla i ostalo. Kombinacijom recikliranog i prirodnog agregata moguće je postići odgovarajuća svojstva betona za potrebe u građevinarstvu. Svojstva betona s recikliranim agregatom je moguće poboljšati upotrebom kemijskih i/ili mineralnih dodataka.

Upravo iz potrebe, a i želje za recikliranjem i ponovnom upotrebom materijala, javljaju se inovativna rješenja za građevnim proizvodima kod kojih je uspješno apliciran reciklirani i sekundarni materijal. Jedan od takvih primjera je zidni panel izrađen s recikliranim betonom i opekom. Uporabom recikliranih materijala u zidnom panelu, smanjuje se količina otpada, a istovremeno, predstavlja optimalno rješenje za gradnju niskoenergetskih i pasivnih zgrada te obnovu postojećih građevina.

5. FIZIKALNE KARAKTERISTIKE ZGRADE

Danas se sve više grade nove zgrade pod nazivom „održiva kuća“, „niskoenergetska kuća“, „pasivna kuća“, „zgrada gotovo nulte energije“ tj. ZG0E (*eng. nZEB*) i „zelena kuća“. Sve su to pojmovi koji su nastali iz potrebe za racionalnim korištenjem energije, smanjenjem građevinskog otpada recikliranjem, minimiziranjem korištenja prirodnih resursa, posebice ne obnovljivih prirodnih izvora.

Jedna od mjera za ostvarivanje energetske učinkovitosti je Direktiva 2010/31/EU (EPBD II) koja uvodi tzv. zgrade gotovo nulte energije (*eng. nearly zero energy building*) u „svakodnevnu“ primjenu. „Zgrada gotovo nulte energije jest zgrada koja ima vrlo visoka energetska svojstva. Ta gotovo nulta odnosno vrlo niska količina energije trebala bi se u vrlo značajnoj mjeri pokrivati energijom iz obnovljivih izvora, uključujući energiju iz obnovljivih izvora koja se proizvodi na zgradi ili u njezinoj blizini, a za koju su zahtjevi utvrđeni propisom“ [10]. Od 31.12.2018. sve novoizgrađene zgrade javne namjene i od 31.12.2020. sve novoizgrađene zgrade moraju biti zgrade gotovo nulte energije. Na slici 5-1, vidljivo je kako je vanjska ovojnica nZEB zgrada visoke učinkovitosti, kao i energetske sustavi unutar zgrade te se teži i proizvodnji energije unutar same zgrade.



Slika 5-1 nZEB [21]

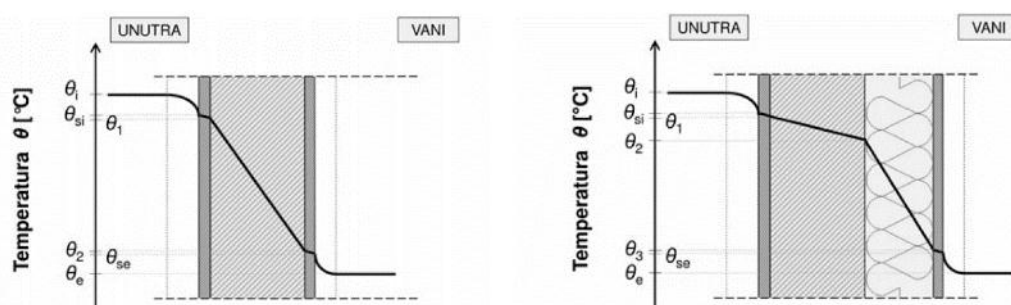
5.1. GRAĐEVINSKA FIZIKA

Zbog nedostatka energije, nesigurnosti u opskrbi istom te stalnog rasta cijene energije i energenata porasla je svijest o potrebi očuvanja, odnosno racionalnoj upotrebi energije. Sve više dolazi do izražaja zagađenost okoliša te se pokušavaju kroz različite mjere otpad i štetni plinovi svesti na minimum. Građevinska fizika, kao primijenjena znanost, sve više dolazi do izražaja. Građevinska fizika se bavi tim problemima, problemima vezanima uz toplinu, zvuk, vlagu, požar i promatra odnos između čovjeka i okoline u okviru prostornog i urbanističkog planiranja, arhitektonskog projektiranja, građenja, (...). Možemo reći da je zadatak stvoriti udobno stanovanje u zgradama te zaštititi čovjeka od vanjskog okoliša. Također, od izuzetne važnosti je ako želimo stvoriti visoko kvalitetne zgrade za potrebe ljudi. Možemo ju definirati i kao „znanost o očuvanju klimatskih uvjeta u zgradama i njenim dijelovima“ [2].

Bavi se higrotermalnim, akustičnim i problemima povezanim s osvjetljenjem dijelova i cijelih građevina. Područje interesa ovoga rada je higrotermika, koja se bavi transportom topline, zraka i vlage kroz građevinske materijale, elemente te prijenosom između građevine i okoliša.

Neki od zahtjeva koje građevinska fizika postavlja na građevinu su ekološki, udobnost stanovanja, zahtjevi materijala, ekonomski zahtjevi i arhitektonski zahtjevi. Zahtjevi korisnika podrazumijevaju sigurnosti i udobnost stanovanja. Kako je zadatak građevinske fizike izgraditi udobnu unutrašnjost zgrada te zaštititi čovjeka od vanjskog okoliša (što podrazumijeva zaštitu od sunca, temperaturnih promjena, vjetra), velika se pozornost pridaje vanjskoj ovojnici.

Ovojnica zgrade, preko koje se odvija međudjelovanje između čovjeka i okoline su zidovi, podovi, krov, prozori, vrata... Prema [10] „Ovojnica zgrade jesu ugrađeni dijelovi zgrade koji odvajaju unutrašnjost zgrade od vanjskog okoliša“.



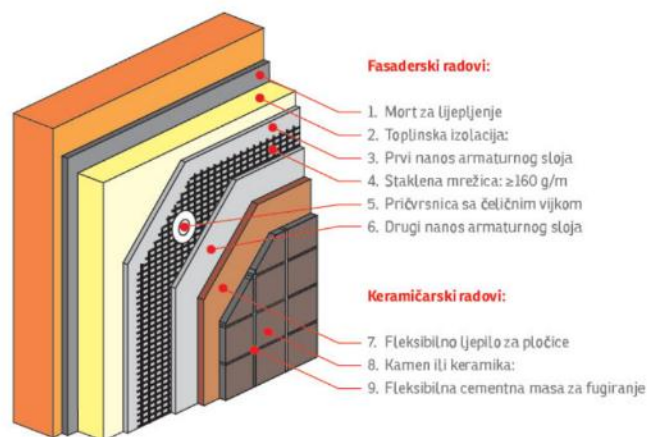
Slika 5-2 Prolazak topline kroz zid bez toplinske izolacije i sa toplinskom izolacijom [22]

Na postojećim zgradama moguće je poboljšati toplinsku izolaciju vanjske ovojnice te tako smanjiti potrošnju energije za 30 – 80 % [2]. Poboljšanje možemo izvesti instalacijom boljih

sustava za grijanje, ventilaciju i klimatizaciju te ugradnjom boljih materijala odnosno materijala s manjom toplinskom provodljivošću. Na slici 5-2 vidljivo je kako upotrebom toplinsko izolacijskog materijala u vanjskoj ovojnici zgrade smanjujemo temperaturne promjene unutar slojeva zida i toplinske gubitke, što rezultira manjom potrošnjom energije. Smanjenje potrošnje energije ovisi o obliku zgrade koji prikazujemo faktorom oblika zgrade f_o , stupnju toplinske izolacije, instaliranim tehničkim sustavima, orijentacijom i lokacijom zgrade² [10].

Toplinska izolacija povećava se dodavanjem toplinsko izolacijskog sloja. Kod izolacije zida toplinsko izolacijski sloj može se staviti iznutra ili izvana. Bolje rješenje je ako se stavlja izvana.

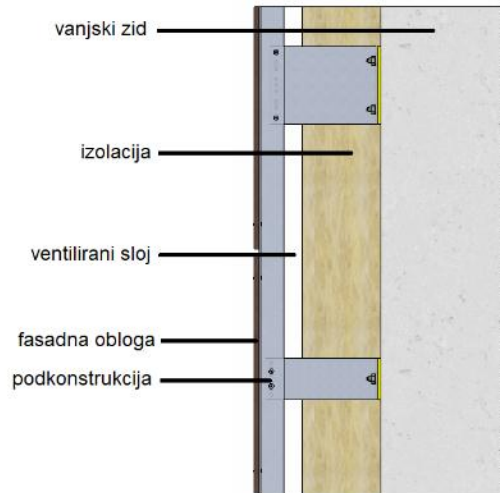
Pri postavljanju toplinsko-izolacijskog sloja izvana, najučestaliji sustav je ETICS. To je povezani sustav za vanjsku toplinsku izolaciju kod kojeg je najčešći izolacijski materijal ekspanzibilni polistiren (EPS) ili mineralna vuna (MW). Izvodi se tako da se na konstrukciju pomoću lijepljenja i pričvrstnica toplinsko izolacijski sloj pričvršćuje na konstrukciju te se na njega stavlja tankoslojna podložna i završna fasadna žbuka (slika 5-3).



Slika 5-3 Struktura ETICS sustava [22]

Druga mogućnost kod postavljanja toplinsko-izolacijskog sloja izvana je ventilirana fasada. Ventilirana fasada je sustav u kojem se nalazi sloj ventiliranog zraka između toplinske izolacije i fasadne obloge koja se postavlja na potkonstrukciju (slika 5-4). Takvo rješenje se smatra idealnim za istovremeno rješavanje problema toplinske izolacije i kondenzacije vodene pare.

² Faktor oblika zgrade, $f_o = A/V_e$ [m^{-1}] jest količnik oplošja, A [m^2], i obujma, V_e [m^3], grijanog dijela zgrade



Slika 5-4 Dijelovi ventilirane fasade [23]

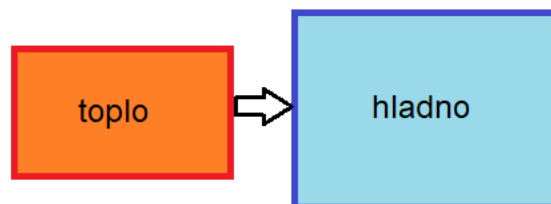
Ideja za ventiliranim fasadama izašla je iz „efekta dimnjaka“. Taj efekt je povezan s podizanjem toplog zraka, jer je lakši od hladnog, a ulazom hladnijeg zraka odozdo. Na taj se način ventilira fasada.

Takve fasade imaju bolju energetska učinkovitost u ljetnom periodu, jer vanjski sloj preuzima toplinsko opterećenje, a ventilirani sloj zraka smanjuje temperaturu na vanjskoj površini toplinsko izolacijskog sloja. U hladnijem periodu, smatra se da imaju manju učinkovitost te je potrebno dodatno brtvljenje zbog kiše nošene vjetrom.

5.2. TOPLINA I TEMPERATURA

Toplina je energija koja zbog promjene temperature prelazi iz područja više temperature u područje niže temperature sve dok se temperature, odnosno unutarnje energije, ne izjednače (slika 5-5) [24].

Prijelaz topline ostvaruje se vođenjem, strujanjem i zračenjem.



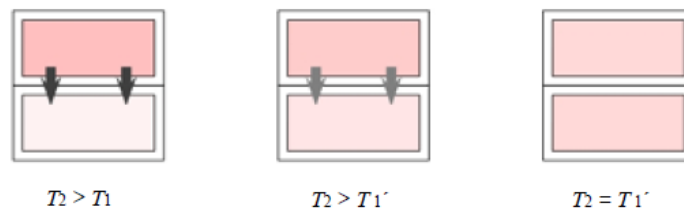
Slika 5-5 Prijelaz topline

Temperatura je fizikalna veličina pomoću koje se karakterizira stanje zagrijanosti ili ohlađenosti nekog tijela (sustava). Mjeri se termometrom. Mjerna jedinica za temperaturu je stupanj Celzijus [°C] i Kelvin [K], a još se koriste i Fahrenheit te Rankine. Poveznica između Kelvina i stupnja Celzijusa je [24]:

$$T [K] = T [^{\circ}\text{C}] + 273,16 \quad (5.1)$$

Temperatura je proporcionalna srednjoj kinetičkoj energiji gibanja molekula. Svaka molekula ima određenu temperaturu što je usko povezano s njenim gibanjem. Molekule koje maju veću temperaturu brže se gibaju od onih koje imaju nisku temperaturu.

Količina topline, Q [J], je toplinska energija koja prođe s jednog tijela na drugo tijelo. Ako je sustav u kontaktu s tijelom koji ima veću temperaturu od njega, započinje proces u kojem će se povećavati temperatura sustava, uz istodobno smanjivanje temperature tijela, kako bi ukupna količina topline ostala nepromijenjena (slika 5-6).



Slika 5-6 Količina topline [2]

Količina se topline izražava [25]:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5.2)$$

gdje je:

m [kg] - masa tijela

c [J/(kg K)] - specifični toplinski kapacitet

ΔT [°C] - promjena temperature.

5.3. PRIJENOS TOPLINE

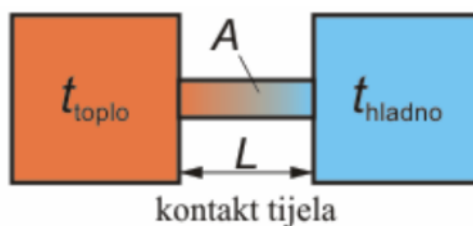
Kako je opisano u poglavlju 5.2. prilikom nejednolike temperature između dvaju sustava dolazi do prijenosa topline sve dok se temperatura na oba sustava ne izjednači. Ovisno o agregatnom stanju i međusobnom odnosu dvaju sustava razlikuju se tri načina prijenosa topline (slika 5-7):

- vođenje (kondukcija), strujanje (konvekcija) i radijacija (zračenje).



Slika 5-7 Vrste prijenosa topline [2]

Prijenosom topline vođenjem (kondukcijom) smatra se prijenos topline s molekule na molekulu, odnosno ostvaruje se molekularnim gibanjem. Kako bi se energija mogla prenijeti mora postojati kontakt između molekula (slika 5-8). Ovakav način prijenosa može biti u krutim, tekućim i plinovitim tvarima.



Slika 5-8 Prijenos topline vođenjem (kondukcijom) [26]

„Brzina“ kojom se odvija prijenos topline naziva se toplinska provodljivost, λ , i svojstvo je materijala. Takav način prenošenja je važan u građevinarstvu jer je to način prenošenja topline kroz građevinske materijale.

Kod plinova, zbog kaotičnog gibanja i sudaranja molekula brže molekule predaju dio svoje kinetičke energije sporijim molekulama koje se nalaze u susjedstvu, pa one svojima, te se tako prenosi toplina. Kod tekućina djelovanjem elastičnih titranja molekula prenosi se toplinska energija. Kod metala i legura zbog gibanja slobodnih elektrona događa se prijenos topline. Zbog postojanja slobodnih elektrona, metali su svrstani u jedne od najboljih vodiča topline.

Fourierov zakon vođenja topline glasi [2]:

$$Q = A \cdot \lambda \cdot \frac{T_1 - T_2}{d} \cdot t [\text{J}] \quad (5.3)$$

gdje je:

Q [J] - količina topline koja prođe kroz površinu ploštine A u vremenu t

A [m²] - ploština okomita na smjer kretanja topline

λ [W/(m K)] - toplinska provodljivost

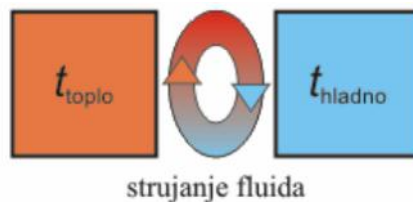
T_1 i T_2 - temperature na vanjskim površinama

d [m] - debljina

t [h] - vrijeme.

Izraz (5.3) vrijedi za stacionaran tok, odnosno temperature su konstantne u vremenu.

Prijenos topline strujanjem (kondukcijom) nastaje kretanjem mase fluida (npr. zrak, voda) kako je prikazano na slici 5-9. Fluid primi toplinu, zagrije se, te je odnosi dalje gdje ju predaje nekoj hladnijoj čvrstoj tvari ili se miješa s hladnijim dijelom fluida i njemu predaje toplinu. Da bi se ostvario takav prijenos potrebna je struja fluida, plina ili tekućine.



Slika 5-9 Strujanje (kondukcija) [26]

Prijenos topline strujanjem izražava se [2]:

$$q = h_c \cdot (T_p - T_f) \left[\text{W/m}^2 \right] \quad (5.4)$$

gdje je:

q [W/m^2] - gustoća toplinskog toka

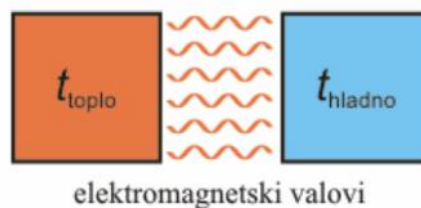
T_p [K] - temperatura čvrste plohe uz koju struji fluid

T_f [K] - temperatura fluida dalje od granične plohe

h_c [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$] - koeficijent konvekcije.

Primjer strujanja je radiator u prostoriji. Topli zrak iznad radijatora diže se, a hladan dolazi do radijatora odozdo, te se tako strujanjem zraka toplina prenosi po sobi.

Prijenos topline zračenjem (radijacijom) nastaje kada se toplinska energija pretvori u elektromagnetsko zračenje koje tijelo emitira u okolinu (slika 5-10). Kada molekule i atomi prelaze u više energijsko stanje, apsorbiraju energiju, a kada prelaze u niže energijsko stanje emitiraju energiju. Nije potreban medij za prijenos topline. Primjer prijenosa topline zračenjem je sunčeva energija.



Slika 5-10 Zračenje (radijacija) [26]

5.4. KOEFICIJENT PROLASKA TOPLINE I TOPLINSKI OTPOR

Toplinski gubici kroz element ovise o materijalima od kojih je izrađen odnosno njihovoj toplinskoj provodljivosti, λ . Toplinska provodljivost λ [W/(m K)] označava količinu topline u [J], koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala jedinične ploštine presjeka i jedinične debljine okomito na njegovu površinu pri jediničnoj razlici temperatura zraka [2]:

$$\lambda = \frac{Q}{A \cdot \Delta T} \cdot \frac{d}{t} [\text{W/mK}] \quad (5.5)$$

gdje je:

Q [J] - količina topline

d [m] - debljina

A [m²] - ploština materijala okomita na smjer kretanja topline

ΔT [K] - razlika temperature

t [h] - vrijeme.

Za cijeli element definira se koeficijent prolaska topline, U , koji karakterizira prijenos topline iz jednog prostora u susjedni prostor preko građevinskog elementa. Koeficijent prolaska topline U [W/(m² K)] označava količinu topline koja u jedinici vremena prođe okomito kroz jediničnu površine građevinskog elementa pri jediničnoj razlici temperatura zraka s obje strane elementa [2].

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (5.6)$$

gdje je:

h_{si} [W/(m² K)] - unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline

d [m] - debljina materijala

λ [W/(m K)] - toplinska provodljivost

h_{se} [W/(m² K)] – vanjski plošni koeficijent prijelaza topline.

Otpor prolasku topline, R [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$], recipročan je vrijednosti koeficijenta prolaska topline. Označava svojstvo toplinske izolacije elementa. Što je vrijednost otpora prolasku topline veća, to je bolja toplinska izolacija.

$$R = \frac{1}{U} [\text{m}^2\text{K}/\text{W}] \quad (5.7)$$

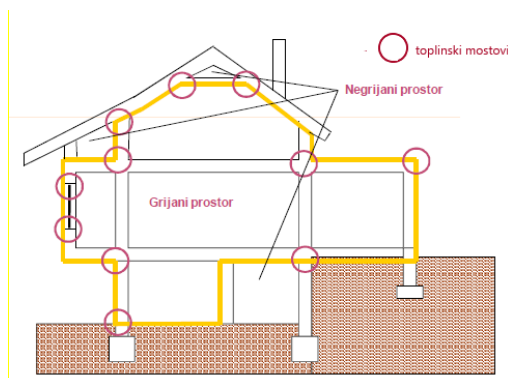
gdje je:

U [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$] - koeficijent prolaska topline [2].

6. TOPLINSKI MOSTOVI

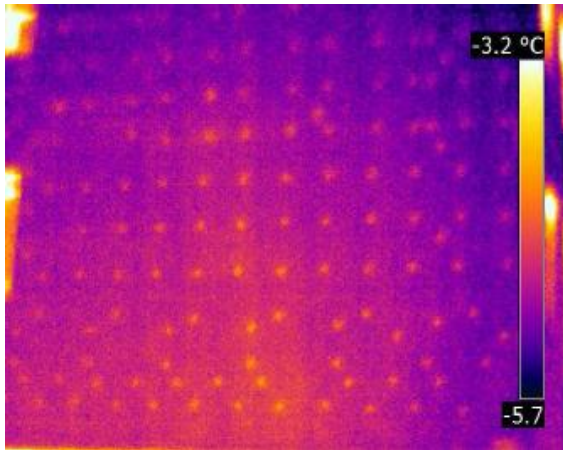
Toplinski most jest manje područje u ovojnici grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan, odnosno povećan je gubitak temperature, radi promjene proizvoda, debljine ili geometrije građevnog dijela [10]. Predstavljaju veliki problem udobnosti stanovanja. Na mjestima toplinskih mostova, prikazana na slici 6-1, s unutarnje strane može doći i do nastanka plijesni, u hladnijim periodima, zbog promjene površinske temperature na unutrašnjoj i vanjskoj površini elementa [27]. Posljedice toplinskih mostova su kondenzacija vodene pare, razaranje građevinskih dijelova, povećano zadržavanje prašine na vlažnim površinama, pukotine, cvjetanje soli i sl. [2].

Kako bi ih u najvećoj mogućoj mjeri smanjili treba ih uzeti u obzir već kod projektiranja konstrukcije te veliku pažnju posvetiti samoj izvedbi konstrukcije. Toplinski mostovi su jače izraženi na zgradama koje imaju bolju toplinsku izolaciju jer u slabije izoliranim kućama površinska temperatura elemenata svugdje je približno jednaka te se kondenzat pravilno raspoređuje.



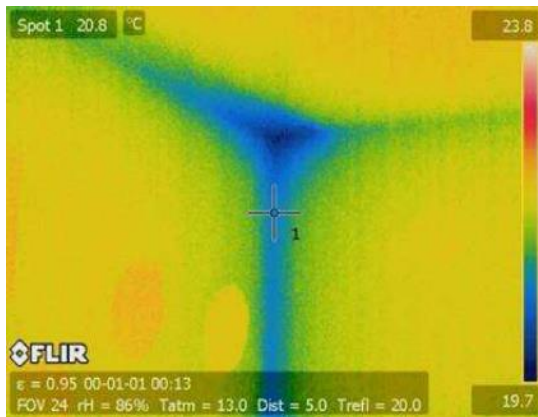
Slika 6-1 Toplinski mostovi [2]

Prema obliku razlikujemo dvije vrste toplinskih mostova: točkaste i linijske. Primjer linijskih toplinskih mostova su balkoni i međukatne AB ploče, a primjer točkastih toplinskih mostova (slika 6-2) su elementi za pričvršćivanje, nosači. S obzirom na mjesta u zgradama gdje oni nastaju dijele se na geometrijske toplinske mostove, toplinske mostove uvjetovane materijalom, kombinirane toplinske mostove, konstruktivne toplinske mostove, zračne (konvektivne) toplinske mostove i toplinske mostove uvjetovane okolinom [2].



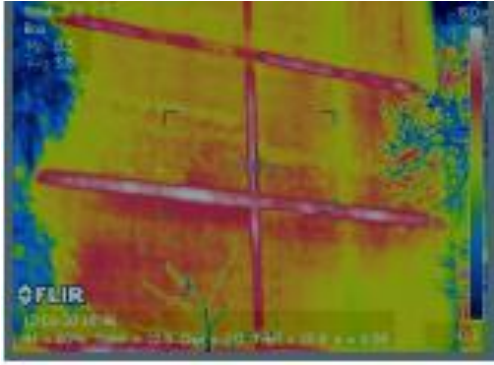
Slika 6-2 Primjer točkastog toplinskog mosta [27]

Geometrijski toplinski mostovi, prikazani na slici 6-3, nastaju na uglovima zgrada i mjestima promjene građevinskih dijelova zgrade.



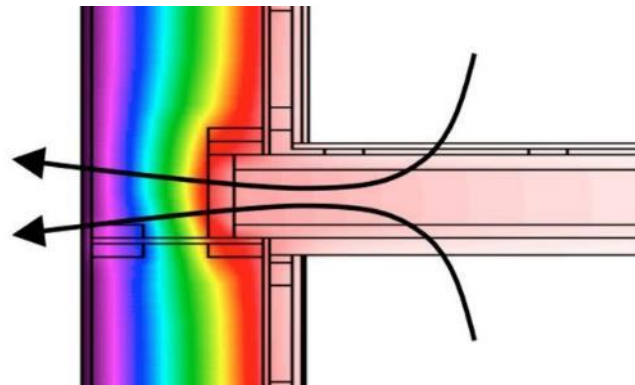
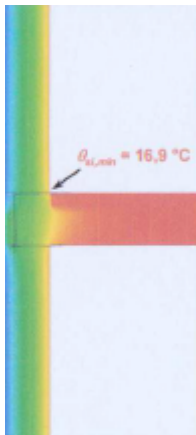
Slika 6-3 Geometrijski toplinski most [2]

Toplinski mostovi uvjetovani materijalom nastaju na mjestima promjene i spajanja različitih materijala različitih toplinskih provodljivosti (slika 6-4).



Slika 6-4 Geometrijski toplinski mostovi [2]

Kombinirani toplinski mostovi (slika 6-5) nastaju na mjestima promjene geometrije (npr. promjena debljine elementa) i materijala. Primjeri su: konzolni balkoni i promjena debljine zida.



Slika 6-5 Kombinirani toplinski mostovi [28]

Konstruktivni toplinski mostovi nastaju uslijed proboja nosive konstrukcije kroz ovojnicu zgrade (slika 6-6).



Slika 6-6 Konstruktivni toplinski mostovi [2]

Zračni (konvektivni) toplinski mostovi nastaju prilikom nekontroliranog propuhivanja kroz zazore prozora, uvjetovani su šupljinama u sloju toplinske izolacije (slika 6-7).



Slika 6-7 Zračni toplinski most [2]

Toplinski mostovi uvjetovani okolinom (slika 6-8) nastaju prilikom pojačanog zagrijavanja pojedinih mjesta na vanjskoj ovojnici zgrade. Primjer: dovod pare, kotlovnica, radijator ispod prozora.



Slika 6-8 Toplinski mostovi uvjetovani okolinom [2]

Metoda kojom se najčešće uočavaju toplinski mostovi na zgradama je infracrvena termografija (ICT) kojom na brz, jednostavan i učinkovit način mogu odrediti mjesta toplinskih gubitaka na vanjskoj ovojnici zgrade [27].

Prilikom proračuna utjecaja toplinskih mostova koristit će se norme HRN EN ISO 10211 i HRN EN ISO 14683 te se pretpostavljaju stacionarni uvjeti prolaska topline. Norma HRN EN ISO 14683 prikazuje pojednostavljenu metodu proračuna linearnih toplinskih mostova, a norma HRN EN ISO 10211 prikazuje detaljniji proračun linijskih i točkastih toplinskih mostova u zgradarstvu. Parametri koji se uzimaju u obzir su vezani uz rubne uvjete, vanjsku i unutarnju temperaturu zraka, geometriju odnosno dimenzije elementa te toplinske i materijalne karakteristike elementa. Za izvedbu programa za proračun toplinskih mostova koristit će se metoda kontrolnih volumena (trodimenzionalni proračun).

U ovom primjeru toplinski mostovi su točkasti te su uzrokovani promjenom materijala i geometrije. Nastaju na mjestima korištenja spona.

Gubici kroz točkaste toplinske mostove se opisuju točkastim koeficijentom prolaska topline X [W/K]. Koeficijent prolaska topline prikazuje nam koliko se povećava prolazak topline kroz toplinski most u odnosu na ukupni toplinski tok. Vrijednost se određuje izrazom [2]:

$$X = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \psi_j \cdot L_j \quad (6.1)$$

gdje je:

L_{3D} [W/K] - koeficijent toplinske veze dobiven iz 3-D proračuna 3-D komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša

U_i [W/(m² K)] - plošni koeficijent prolaska topline 1-D komponente i koja razdvaja dva promatrana okoliša

A_i [m²] - ploština na koju se odnosi vrijednost U_i

Ψ_j [W/(m K)] - duljinski koeficijent prolaska topline proračunan pomoću jednadžbe (6.2)

L_j [m] - duljina na koju se odnosi vrijednost Ψ_j [m]

N_j - broj 2-D komponenata

N_i - broj 1-D komponenata.

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j l_j \quad (6.2)$$

gdje je:

L_{2D} [W/(m K)] - koeficijent toplinske veze dobiven iz 2-D proračuna komponente koja razdvaja dva promatrana okoliša

l_j [m] - duljina na koju se odnosi vrijednost U_j

N_j - broj 1-D komponenata [2].

7. ECO SANDWICH®

Kako je spomenuto u prethodnim poglavljima, 5. i 6., sve se više grade niskoenergetske zgrade, s dobrim toplinskim svojstvima vanjske ovojnice. Jedan od inovativnih i održivih proizvoda kao optimalno tehnološko rješenje za gradnju niskoenergetskih i pasivnih zgrada te obnovu postojećih građevina je ECO-SANDWICH® nenosivi predgotovljeni ventilirani zidni panel. Nastanak ovog proizvoda potaknut je trendovima i potrebom za upotrebom proizvoda koji smanjuje utrošak energije, odnosno energetski je učinkovit. To je predgotovljeni panel izrađen od betona s recikliranim agregatom i opekom, slojem mineralne vune i zraka (slika 7-1).



Slika 7-1 ECO-SANDWICH® [29]

Osmišljen je kao inovativni sustav u suradnji znanstvenih institucija i industrije uz podršku Europske komisije kroz projekt financiran u sklopu programa CIP Eco-Innovation.

ECO-SANDWICH® predstavlja i potencijalno rješenje za jedan od aktualnijih i najvećih problema u građevinskoj industriji, a to su problemi građevinskog nezbrinutog otpada, problemi prevelike potrošne energije i emisije CO₂.

Zidni paneli su trajni i imaju male troškove održavanja. Ugradnja je brza i ekonomski učinkovita, te ih je moguće demontirati i ponovno montirati. Primjenjuju se kod izgradnje novih, ali i kod obnove postojećih stambenih zgrada, skladišta, tvornica, restorana i sl. Kako se radi o predgotovljenim elementima, proizvodnja se odvija u kontroliranim uvjetima u tvornici što

rezultira kvalitetnijim proizvodom od onog izrađenog na gradilištu te je mogućnost greške puno manja.

Kako bi se smanjio udio građevinskog otpada, te povećalo recikliranje i ponovna uporaba, od ukupne količine agregata potrebnog za izradu betona oko 50 % je od recikliranog agregata i opeke. Unutarnji (nosivi) sloj betona izrađen je s recikliranim agregatom, a vanjski sloj betona s recikliranom opekom.

Između slojeva betona nalazi se sloj mineralne vune i zraka. Kako bi se dva sloja betona međusobno povezala koriste se spona koje mogu biti čelične ili od polimernog kompozita (tablica 7-1).

Tablica 7-1 Slojevi ECO-SANDWICH®

	Slojevi	Debljina [cm]
ECO - SANDWICH®	Beton sa agregatom od recikliranog betona	12,00
	Ecese mineralna vuna	20,00
	Ventilirajući sloj (sloj zraka)	4,00
	Beton sa agregatom od reciklirane opeke	6,00

BETON

Beton koji se koristi za izradu sadrži 50 % recikliranog agregata (beton, opeka). Uz reciklirani agregat, beton sadrži 400 kg cementa CEM II A/S 42.5 R (portland cement s dodatkom zgure) s vodocementnim omjerom $v/c = 0,42$ te superplastifikatorom Malcret SPA 0,7 % na masu cementa [30].

Prednosti betona s recikliranim agregatom u odnosu na konvencionalni su njegove toplinske karakteristike. Takav beton se pokazao kao kvalitetniji i bolji, u istraživanjima je dokazano da beton napravljen s recikliranim agregatom ima niži koeficijent toplinske provodljivosti od jednakovrijednog betona s klasičnim agregatom.

MINERALNA VUNA - ECOSE®

Mineralna vuna koja se koristi u proizvodnji zidnih panela izrađena je Ecosse® tehnologijom, koja umjesto formaldehida koristi prirodne smole kao vezivo [31]. U proizvodnji Ecosse® mineralne vune koriste se reciklirane staklene boce, otpadno staklo, otpad nastao u samoj proizvodnji vune, što čini oko 85 % ukupne sirovine za proizvodnju mineralne vune i silicijski pijesak (slika 7-2). U materijalu se ne nalaze štetne tvari kao što je formaldehid, fenol, pentan, butan te je za proizvodnju potrebno do 70 % manje energije u odnosu na proizvodnju tradicionalne mineralne vune.



Slika 7-2 Mineralna vuna [32]

Bitno je naglasiti da proizvodi od staklene mineralne vune proizvedeni po Ecosse® tehnologiji zadovoljavaju najstrože industrijske standarde vezane za kvalitetu zraka u prostorijama. Specifičnost Ecosse® mineralne vune kao materijala dokazana je certificiranjem u skladu s propisima o hlapivim organskim tvarima (VOC) i propisima o kvaliteti zraka u unutarnjem okolišu [33].

Uspoređujući s ostalim sličnim proizvodima koji se mogu pronaći na tržištu, ECO-SANDWICH® zidni paneli imaju povoljnije karakteristike u vidu troškova životnog ciklusa, znatno manji stupanj utjecaja na okoliš te ga je moguće ponovo iskoristiti i reciklirati.

Tablica 7-2 Svojstva slojeva ECO-SANDWICH® zidnog panela [29]

	Svojstvo	Vrijednost
Beton izrađen od recikliranog agregata (udio recikliranog agregata 50%)	Srednja vrijednost toplinske provodljivosti na +10°C u suhom stanju	0,858 W/(m K)
	Relativna vrijednost otpora difuziji vodene pare, S_d	1,77 m
	Difuzija vodene pare, μ	37
	Gustoća u suhom stanju	2105 kg/m ³
	Čvrstoća betona	C 30/37
	Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana	6,4 MPa
	Modul elastičnosti nakon 8 dana	33,80 GPa
	Koeficijent propusnosti plina	1,28*10 ⁻¹⁶ m ²
	Faktor razmaka šupljina u očvrslom betonu	0,159 mm
	Sadržaj zraka u očvrslom betonu	5,74 %
	Faktor dimenzija šupljina u očvrslom betonu	29,90 mm ⁻¹
	Kapilarna apsorpcija	1,00 kg/(m ² h ^{-1/2})
	Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje – ljuštenje soli	XF4
	Vodopropusnost	VDP3

	Svojstvo	Vrijednost
Beton izrađen od reciklirane opeke (udio reciklirane opeke 50%)	Srednja vrijednost toplinske provodljivosti na +10°C u suhom stanju	0,746 W/(m K)
	Relativna vrijednost otpora difuziji vodene pare, S_d	1,40 m
	Difuzija vodene pare, μ	29
	Gustoća u suhom stanju	1971 kg/m ³
	Čvrstoća betona	C 30/37
	Čvrstoća na savijanje nakon 28 dana	6 MPa
	Modul elastičnosti nakon 8 dana	18,20 GPa
	Koeficijent propusnosti plina	0,76*10 ⁻¹⁶ m ²
	Faktor razmaka šupljina u očvrnulom betonu	0,114 mm
	Sadržaj zraka u očvrnulom betonu	10,55 %
	Faktor veličina šupljina u očvrnulom betonu	26,13 mm ⁻¹
	Kapilarna apsorpcija	0,9 kg/(m ² h ^{-1/2})
	Otpornost na smrzavanje i odmrzavanje – ljuštenje soli	XF4
Vodopropusnost	VDP2	

	Svojstvo	Vrijednost
ECOSE® mineralna vuna	Prema normi HRN EN 13162: MW-EN 13162-T4-WS-WL(P)-AF10	
	Deklarirana toplinska provodljivost, λ_D	0,034 W/(m K)
	Difuzija vodene pare, μ	1
	Reakcija na požar	Negorivo, klasificirano kao Euroclass A1
	Tolerancija debljine	T4
	Zrakonepropusnost, AFr	≥ 10,0 kPa·s/m ² ovisno o debljini

	Svojstvo	Vrijednost
ECO-SANDWICH® panel	Koeficijent prolaska topline (U – vrijednost)	$< W/(m^2 K)$
	Otpornost zračnog zvuka, R_w	53 dB
	Toplinska masa	458 kg/m ²
	Čelik za armiranje	
	Karakteristična vlačna čvrstoća, f_{tk}	540 N/mm ²
	Karakteristična granica popuštanja, f_{yk}	500 N/mm ²
	Mehanička otpornost (projektirane vrijednosti)	
	Otpornost na požar, preporučena klasa po normi HRN EN 13501-2	> 90 min
	Reakcija na požar	A1

Prva primjena ECO-SANDWICH®-a je kuća, izgrađena 2016. godine, energetskog razreda A+, smještena u Zelenom kvartu grada Koprivnice (slika 7-3). Druga primjena je Dječji vrtić Ribica u Sarvašu (slika 7-4).



Slika 7-3 Prva kuća izgrađena sa Eco-sandwich-om® [34]



Slika 7-4 Dječji vrtić Ribica u Sarvašu [34]

Toplinska provodljivost, uspoređujući s klasičnim betonom, 36 % je manja kod betona s recikliranim materijalom, a 45 % manja kod betona sa recikliranom opekam [29], što sveukupno daje koeficijent prolaska topline elementa manji od $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Dani koeficijent prolaska topline je za element s čeličnim sponama. Kako bi se smanjio koeficijent prolaska topline i utjecaj točkastih toplinskih mostova, analizirat će se mogućnost ugradnje polimernih kompozitnih spona. Spone povezuju međusobno slojeve panela. U nastavku je najprije prikazana teorijska podloga za model panela, a zatim i sami proračun.

8. 3D NUMERIČKA ANALIZA PROVOĐENJA TOPLINE

8.1. PROVOĐENJE TOPLINE – MATEMATIČKA FORMULACIJA

Diferencijalna jednačina koja opisuje 3D zakon provođenja topline u općem slučaju glasi [35]:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\lambda_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) + I(x, y, z, t) = C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (8.1)$$

pri čemu je:

I [W/m³] – toplina generirana u elementu

$\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ [W/(m K)] – toplinske provodljivosti u smjeru x, y i z

C [J/(m³ K)] – volumetrijski toplinski kapacitet

$T = T(x, y, z)$ [K] – temperatura u točki s koordinatama (x, y, z).

U ovom radu će se promatrati slučaj u kojem su toplinske provodljivosti u x i y smjeru jednake ($\lambda_x = \lambda_y$), a mijenjat će se samo toplinska provodljivost u z smjeru (λ_z). Neće se promatrati generiranje topline u elementima, tj. $I = 0$. Rubni uvjeti će se promatrati kao nepromjenjivi u vremenu (stacionarni prijelaz topline) pa će akumulacija topline u elementu također biti jednaka nuli.

8.1.1. RUBNI UVJETI

Rubni uvjeti mogu biti zadani na jedan od dva načina:

- 1) Pomoću temperature $T_{g,p}(t)$ (unutarnje ili vanjske), te plošnog otpora prijelazu topline, R (m² K/W). Rubni uvjet se opisuje pomoću Fourierovog zakona – jednačina (8.2):

$$T_{g,p}(t) - T|_{pov} = R \cdot (-\lambda) \cdot \frac{\partial T}{\partial n} |_{pov} \quad (8.2)$$

U ovom slučaju je $\partial T / \partial n$ derivacija funkcije temperature u smjeru normale na graničnu površinu.

2) Preko toplinskog toka na graničnoj površini:

$$(-\lambda) \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{g.p.} = f(t) \quad (8.3)$$

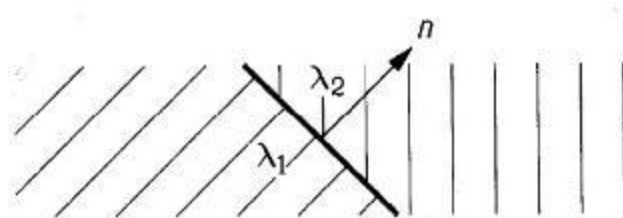
8.1.2. POČETNI UVJETI

S obzirom na to da se temperatura u određenoj točki u elementu ne mijenja s vremenom, temperaturni gradijent je konstantan pa nema akumulacije topline u elementu – jednadžba (8.4).

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (8.4)$$

8.1.3. PROVOĐENJE TOPLINE IZMEĐU DVA ELEMENTA

Na slici 8-1 vidljiva je unutarnja granica koja razdvaja dva materijala s različitim toplinskim provodljivostima λ_1 i λ_2 .



Slika 8-1 Normala na unutarnju granicu dvaju materijala različitih toplinskih provodljivosti [35]

Funkcija temperature je neprekinuta na toj granici. Normala na graničnu plohu je označena s n , a uvjet za neprekinutost toplinskoga toka je dan jednadžbom (8.5):

$$\lambda_2 \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_2 = \frac{T|_2 - T|_1}{R_{ins}} = \lambda_1 \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_1 \quad (8.5)$$

8.2. UVOD U METODU KONTROLNIH VOLUMENA

Metoda kontrolnih volumena (MKV) dobiva na popularnosti u inženjerskoj primjeni, između ostalog, zbog mogućnosti korištenja nestrukturiranih mreža sastavljenih od proizvoljnih poliedarskih kontrolnih volumena. Njena je najčešća primjena u numeričkom modeliranju strujanja fluida, a s obzirom na raširenost problema provođenja topline te na ograničene mogućnosti njihova analitičkog rješavanja, uloga numeričkih metoda u ovome području je značajna. Kontrolni volumeni znatno olakšavaju diskretizaciju geometrijski kompliciranih prostornih domena, vrlo čestih u inženjerskoj praksi [36].

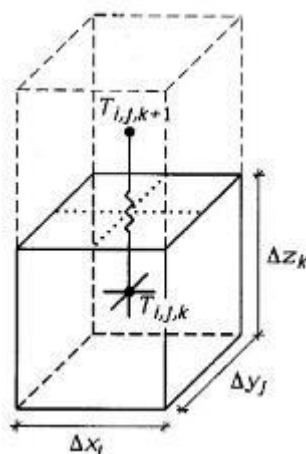
Metoda se odlikuje najvećim izravnim udjelom fizikalnog sadržaja u matematičkom modeliranju procesa. Modeliranje započinje geometrijskom podjelom tijela na djeliće elementarnih (kontrolnih) volumena. Ti kontrolni volumeni se diskretiziraju središnjim čvorom, u kojima se definiraju temperature cijelog elementa u svakom trenutku. Na taj se način realno stanje modelira kao stepeničasto. Toplinski tokovi računaju se pomoću nastalih razlika temperatura između središnjih čvorova susjednih volumena. Stoga se referentne temperature za svaki pojedini elementarni volumen pripisuju određenim referentnim ili čvornim točkama unutar volumena. Na taj se način temperaturne razlike spregnu sa svojim toplinskim otporima, u smjeru okomitom na granične plohe. Pretpostavka je da su rasporedi temperature među referentnim točkama linearni te da vrijedi Fourierov zakon provođenja topline [37].

Realni je proces provođenja topline dobiven primjenom prvog zakona termodinamike, prema kojem je suma svih pojedinih toplinskih tokova, raspodijeljenih između kontrolnih volumena, jednaka promjeni njihovih unutarnjih energija [37]. Uz poznate rubne uvjete te odnose među kontrolnim volumenima, jedina su nepoznanica temperature u čvorovima unutar elemenata.

Još su u prošlom stoljeću postali dostupni mnogi komercijalni programi za numeričke proračune provođenja topline, koji primjenjuju različite proračunske metode. Ipak, poznavanje metode kontrolnih volumena te mogućnost ručnog proračuna zadržava svoju vrijednost u proračunu toplinskih tokova, s obzirom na to da omogućuju kontrolu unosa podataka te bolju interpretaciju rezultata [37].

8.3. PROVOĐENJE TOPLINE – NUMERIČKA FORMULACIJA

Diferencijalna jednačina (8.1) se u numeričkoj formulaciji zamjenjuje diskretnom aproksimacijom. Kontinuirano se temperaturno polje zamjenjuje temperaturnim poljem u diskretnim točkama te se tako dobiva mreža kontrolnih volumena za daljnje proračune. U proračunu je korišten Kartezijev koordinatni sustav. Inkrementi volumena u x , y i z smjeru označeni su kao Δx , Δy i Δz . Što su ti inkrementi manji, to je bolje poklapanje proračuna MKV i realnog stanja, ali raste i vrijeme potrebno za proračun, kao i numerička nestabilnost rješenja (npr. zbog greške zaokruživanja).



Slika 8-2 Kontrolni volumeni (i, j, k) i $(i, j, k+0.5)$ [35]

Slika 8-2 prikazuje dva kontrolna volumena, (i, j, k) i $(i, j, k+1)$ s inkrementima Δx , Δy i Δz . Toplinski tok preko površine A_{xy} između dvaju kontrolnih volumena izražen je preko temperaturene razlike između dvije diskretne točke, smještene u središtu oba volumena. Toplinski tok je dan jednačinom (8.6):

$$Q_{i,j,k+0.5} = K_{i,j,k+0.5} \cdot (T_{i,j,k} - T_{i,j,k+1}) \text{ [W]} \quad (8.6)$$

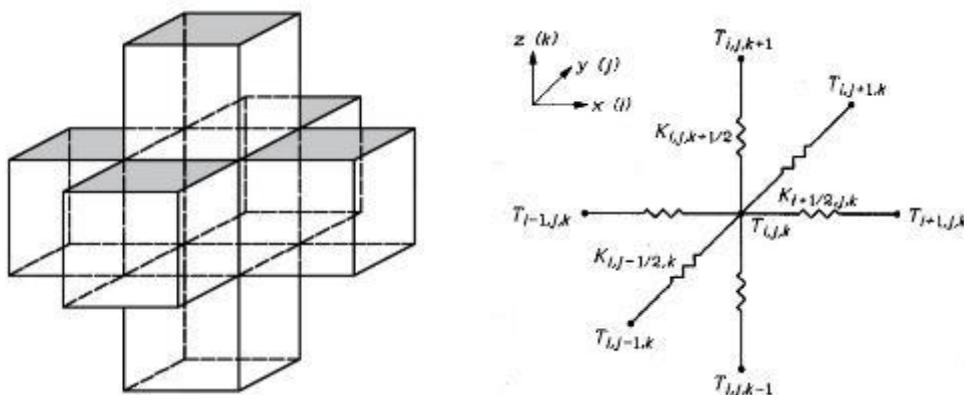
gdje je:

$K_{i,j,k+0.5}$ (W/K) - provodljivost površine A_{xy} između volumena (i, j, k) i $(i, j, k+1)$.

Toplinska provodljivost računa se kao:

$$K_{i,j,k+0.5} = \frac{\Delta x_i \cdot \Delta y_j}{\Delta z_k / (2 \cdot \lambda_{i,j,k}) + \Delta z_{k+1} / (2 \cdot \lambda_{i,j,k}) + R_{i,j,k+0.5}} \text{ [W/K]} \quad (8.7)$$

Zanimljivo je primijetiti kako postoji analogija matrice formulacije za provođenje topline s onom koja daje iznose unutarnjih sila na temelju krutosti i pomaka u nekom statičkom sustavu ili u elektrotehnici za električni napon na temelju električnog otpora i jakosti struje.



Slika 8-3 3D prikaz toplinskih provodljivosti između pojedinih kontrolnih volumena

Slika 8-3 prikazuje kontrolni volumen (i, j, k) sa svojom toplinskom provodljivošću $\lambda_{i,j,k}$ [W/(m K)]. Toplinska se provodljivost odnosi na toplinski tok kroz cijelo područje $\Delta x, \Delta y$, u smjeru z .

Jednadžba (8.7) vrijedi za sve unutarnje kontrolne volumene koji nemaju nijednu stranicu u kontaktu s rubom. Član $R_{i,j,k+0.5}$ je za unutarnje volumene proizvoljan, a odnosi se na toplinski otpor između dva volumena.

Jednadžba (8.8) odnosi se na rubne volumene, gdje se uzima u obzir plošni otpor prijelazu topline $R_{1/2,j,k}$ [m²KW].

$$K_{0.5, j, k} = \frac{\Delta y_j \cdot \Delta z_k}{\Delta x_1 / (2 \cdot \lambda_{1, j, k}) + R_{0.5, j, k}} \text{ [W/(m} \cdot \text{K)]} \quad (8.8)$$

8.4. TOPLINSKI TOKOVI IZ PRORAČUNATIH TEMPERATURA

Za svaki kontrolni volumen formira se Kirchhoffova jednačba prema kojoj je algebarski zbroj toplinskih tokova koji ulaze u čvor jednak toplinskom toku koji izlazi iz čvora³. Ukupni toplinski tok jednog kontrolnog volumena (i, j, k) prenesen iz šest okolnih kontrolnih volumena u tom slučaju glasi:

$$\begin{aligned} H_{i, j, k} = & K_{i-0.5, j, k} \cdot (T_{i-1, j, k} - T_{i, j, k}) + K_{i+0.5, j, k} \cdot (T_{i+1, j, k} - T_{i, j, k}) + \\ & K_{i, j-0.5, k} \cdot (T_{i, j-1, k} - T_{i, j, k}) + K_{i, j+0.5, k} \cdot (T_{i, j+1, k} - T_{i, j, k}) + \\ & K_{i, j, k-0.5} \cdot (T_{i, j, k+1} - T_{i, j, k}) + K_{i, j, k+0.5} \cdot (T_{i, j, k+1} - T_{i, j, k}) [W / m] \end{aligned} \quad (8.9)$$

Vrijednosti izračunate prema jednačbi (8.9) formiraju matricu $[K]$, koja mora biti regularna kako bi mogao postojati njen inverz $[K]^{-1}$.

$$[K] \cdot \{T\} = \{S\} \quad (8.10)$$

Nepoznate temperature dane vektorom $\{T\}$ u izrazu (8.10) dobivaju se rješavanjem sljedećeg sustava jednačbi:

$$\{T\} = [K]^{-1} \cdot \{S\} \quad (8.11)$$

gdje je:

$\{S\}$ - vektor rubnih uvjeta.

³ U slučaju nestacionarnog proračuna, kod kojeg su rubni uvjeti promjenjivi u vremenu, razlika ulaznog i izlaznog toplinskog toka neće biti jednaka nuli zbog akumulacije topline u svakom vremenskom koraku.

9. PRORAČUN TOČKASTIH TOPLINSKIH MOSTOVA

9.1. PRORAČUN METODOM KONTROLNIH VOLUMENA

Za potrebe proračuna, osmišljen je algoritam temeljen na metodi kontrolnih volumena, čije su izlazne vrijednosti temperature u pojedinim čvorovima kontrolnih volumena, iz čega se direktno mogu dobiti vrijednosti koeficijenata toplinske veze. Pomoću njih se zatim kvantificiraju toplinski mostovi. ECO-SANDWICH® zidni panel sastoji se od četiri sloja međusobno povezana čeličnim sponama. Cilj proračuna metodom kontrolnih volumena je odrediti vrijednosti toplinskih gubitaka u zidnom panelu, koji nastaju zbog visoke toplinske provodljivosti čelika, tj. čeličnih spona, te ih usporediti s toplinskim gubicima koji nastaju ako se zamijene sponama od polimernog kompozitnog materijala. Ulazni parametri za algoritam su dimenzije kontrolnih volumena, koeficijenti propustljivosti između kontrolnih volumena ovisno o njihovom materijalu i položaju te temperature vanjskog i unutarnjeg okoliša.

Algoritam je programiran u MS Office Excelu, tako što se na temelju unosa navedenih ulaznih parametara automatski formira matrica propustljivosti za analizirani element. Time se u par koraka mogu dobiti rezultati koji se sastoje od:

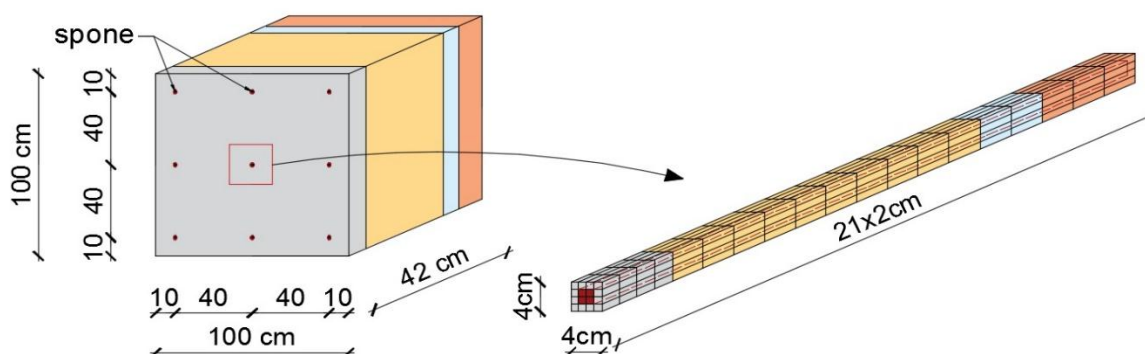
- 1) matrice propustljivosti
- 2) vektora rubnih uvjeta
- 3) vektora temperatura u čvorovima kontrolnih volumena
- 4) vizualnog prikaza temperatura u čvorovima koji graniče s vanjskim i unutarnjim okolišem
- 5) koeficijenta toplinske veze
- 6) temperaturne krivulje.

Rješenja dobivena numeričkim proračunom preko metode kontrolnih volumena će se usporediti s rješenjima dobivenim preko komercijalnog računalnog programa kako bi se pokazalo da se i bez korištenja računalnog programa može dobiti rješenje koje je u inženjerskoj praksi zadovoljavajuće.

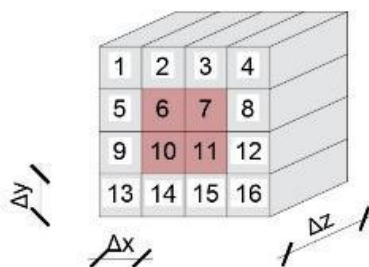
9.1.1. ULAZNI PODACI

Za proračun metodom kontrolnih volumena bitan je broj elementarnih volumena jer se povećanjem broja volumena (smanjenjem njihovih dimenzija) smanjuje razlika u odnosu na realno stanje. No, ako su dimenzije premale, može doći do suprotnog učinka. Broj potrebnih kontrolnih volumena za zadovoljavajuće numeričko rješenje ovisi o raznim parametrima, kao što su npr. geometrija i materijal. Za proračun je odabran jedan segment zidnog panela, koji se sastoji od jedne spone i njezinog okoliša. Slika 9-1 prikazuje izvršenu podjelu tog segmenta na konačan broj kontrolnih volumena. Na njoj je vidljivo kako je dimenzija promatranog karakterističnog elementa 4 cm x 4 cm x 42 cm. Smatra se kako će rezultati dobiveni na karakterističnom elementu biti primjenjivi i za cijeli fasadni panel, koji je većih dimenzija.

Ukupan broj čvorova za koje je potrebno numerički odrediti vrijednost temperature je 336 (16 x 21), što znači da je potrebno dobiti 336 jednadžbi iz kojih slijedi matrica toplinskih propustljivosti [K] dimenzija 336 x 336. Tablica 9-1 daje ulazne parametre o materijalima potrebnima za numerički proračun.



Slika 9-1 Diskretizacija ECO-SANDWICH® zidnog panela kontrolnim volumenima



Slika 9-2 Prikaz numeriranja kontrolnih volumena na unutarnjem rubu karakterističnog elementa panela

Tablica 9-1 Debljine i vrijednosti koeficijenta provodljivosti pojedinih slojeva ECO-SANDWICH® elementa (od vanjskog sloja prema unutarnjem) [29]

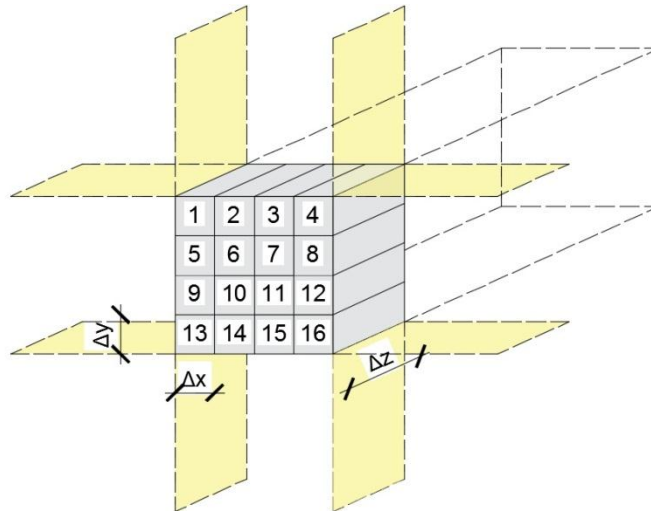
Br.	Materijal	Debljina sloja [m]	Toplinska provodljivost λ [W/(m K)]
1	Beton s recikliranom opekrom	0,06	0,746
2	Ventilirani sloj zraka	0,04	0,226
3	Mineralna vuna	0,20	0,034
4	Beton s recikliranim agregatom	0,12	0,858

Tablica 9-2 Karakteristike spona

Br.	Materijal spona	Promjer [mm]	Toplinska provodljivost λ [W/(m K)]
5	Čelične spona	8	16
6	Polimerne kompozitne spona	18	0,35

9.1.2. RUBNI I POČETNI UVJETI

Rubni uvjeti dani vektorom $\{S\}$ su prikazani u Prilogu 1. Vektor se sastoji od toplinskih tokova rubnih površina prema vanjskom i unutarnjem zraku, tj. temperatura vanjskog i unutarnjeg zraka pomnoženih s koeficijentom propustljivosti između rubnih kontrolnih volumena i vanjskog/unutarnjeg okoliša, prema izrazu 8.4. Površine koje predstavljaju granicu odrezanog dijela panela (slika 9-3) s ostatkom elementa su pretpostavljene kao adijabatske. Preko tih površina nema izmjene topline panela s okolinom.



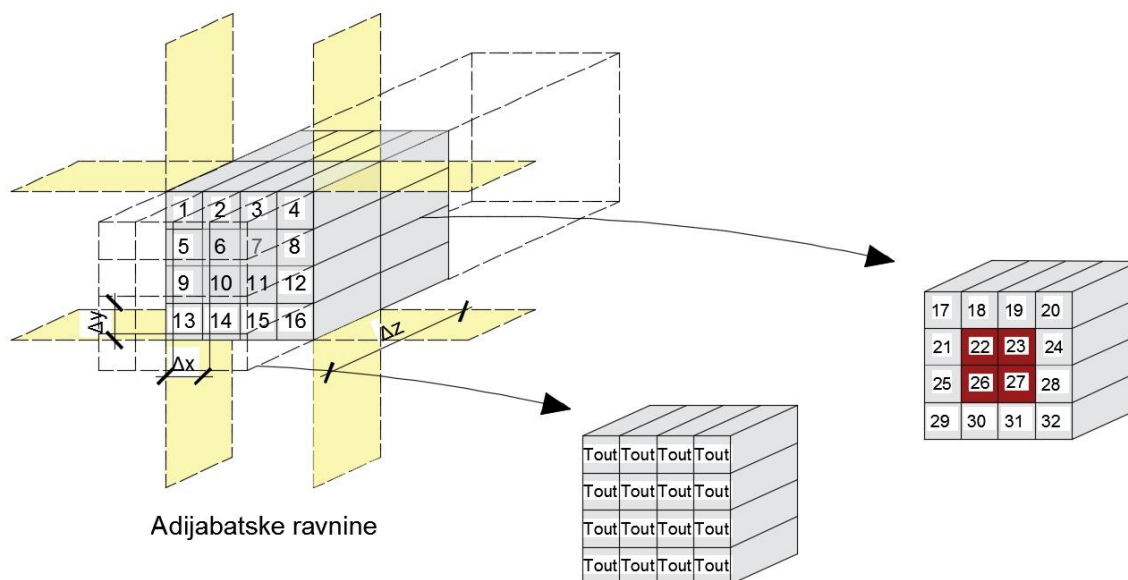
Slika 9-3 Adijabatske ravnine

Za rubne uvjete uzeta je temperaturna razlika u iznosu od 30 K ($^{\circ}\text{C}$), točnije, u unutarnjem je okolišu temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, a u vanjskom $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na formulaciju matrice toplinske provodljivosti rubni uvjeti nemaju utjecaja.

S obzirom na to da se promatra stacionaran slučaj provođenja topline, nema ovisnosti parametara (temperature i toplinskoga toka) o vremenu, tj. temperature su konstantne u vremenu.

9.1.3. NUMERIČKA FORMULACIJA MATRICE PROVODLJIVOSTI

Matrica propustljivosti $[K]$, sadrži članove $H_{i,j,k}$ izračunate preko izraza (8.9). Primjer raspisivanja jednadžbe dan je u nastavku.



Slika 9-4 Susjedni kontrolni volumeni za čvor 1

Za čvor 1 vrijedi:

$$K_1 \cdot (T_1 - T_2) + K_1 \cdot (T_1 - T_5) + K_1 \cdot (T_1 - T_{17}) + K_{1,ou} \cdot (T_1 - T_{out}) = 0 \quad (8.12)$$

$$K_1 \cdot T_1 - K_2 \cdot T_2 + K_1 \cdot T_1 - K_1 \cdot T_5 + K_1 \cdot T_1 - K_1 \cdot T_{17} + K_{1,ou} \cdot T_1 - K_{1,ou} \cdot T_{out} = 0 \quad (8.13)$$

$$T_1 \cdot (3 \cdot K_1 + K_{1,ou}) - K_2 \cdot T_2 - K_1 \cdot T_5 - K_1 \cdot T_{17} - K_{1,ou} \cdot T_{out} = 0 \quad (8.14)$$

Za čvor 2 vrijedi:

$$K_1 \cdot (T_2 - T_1) + K_1 \cdot (T_2 - T_6) + K_1 \cdot (T_2 - T_3) + K_1 \cdot (T_2 - T_{18}) + K_{1,ou} \cdot (T_2 - T_{out}) = 0 \quad (8.15)$$

$$K_1 \cdot T_2 - K_1 \cdot T_1 + K_1 \cdot T_2 - K_1 \cdot T_6 + K_1 \cdot T_2 - K_1 \cdot T_3 + K_1 \cdot T_2 - K_1 \cdot T_{18} + K_{1,ou} \cdot T_2 - K_{1,ou} \cdot T_{out} = 0 \quad (8.16)$$

$$T_2 \cdot (4 \cdot K_1 + K_{1,ou}) - K_1 \cdot T_1 - K_1 \cdot T_6 - K_1 \cdot T_3 - K_1 \cdot T_{18} - K_{1,ou} \cdot T_{out} = 0 \quad (8.17)$$

(...)

Za čvor 6 vrijedi:

$$K_1 \cdot (T_6 - T_5) + K_1 \cdot (T_6 - T_2) + K_1 \cdot (T_6 - T_7) + K_1 \cdot (T_6 - T_{10}) + K_2 \cdot (T_6 - T_{22}) + K_{1, out} \cdot (T_6 - T_{out}) = 0 \quad (8.18)$$

$$K_1 \cdot T_6 - K_2 \cdot T_5 + K_1 \cdot T_6 - K_1 \cdot T_2 + K_1 \cdot T_6 - K_1 \cdot T_7 + K_1 \cdot T_6 - K_1 \cdot T_{10} + K_2 \cdot T_6 - K_2 \cdot T_{22} + K_{1, out} \cdot T_6 - K_{1, out} \cdot T_{out} = 0 \quad (8.19)$$

$$T_6 \cdot (4 \cdot K_1 + K_2 + K_{1, out}) - K_2 \cdot T_5 - K_1 \cdot T_2 - K_1 \cdot T_7 - K_1 \cdot T_{10} - K_2 \cdot T_{22} - K_{1, out} \cdot T_{out} = 0 \quad (8.20)$$

(...)

Vrijednost K_1 dobivena je preko izraza (8.7):

$$K_1 = \frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\Delta z / (2 \cdot \lambda_1) + \Delta z / (2 \cdot \lambda_1)} \quad (8.21)$$

$$K_1 = \frac{0,01 \cdot 0,01}{0,02 / (2 \cdot 0,858) + 0,02 / (2 \cdot 0,858)} = 0,00429 [\text{W/K}] \quad (8.22)$$

Vrijednost $K_{1, out}$ dobivena je preko izraza (8.8):

$$K_{0.5, j, k} = \frac{\Delta y_j \cdot \Delta z_k}{\Delta x_1 / (2 \cdot \lambda_{1, j, k}) + R_{0.5, j, k}} \quad (8.23)$$

gdje je:

Δx , Δy i Δz – dimenzije kontrolnih volumena, te su konstantne po cijelom volumenu elementa (slika 10-1)

$\lambda_{1,2,3,4,5,6}$ [W/(m K)] – toplinske provodljivosti materijala dane u tablicama 9-1 i 9-2

K_1 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu nosivi beton - nosivi beton

K_2 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu nosivi beton – polimerna kompozitna spona.

Kako su u zidnom panelu četiri različita materijala u slojevima, potrebni su još i koeficijenti prolaska topline:

K_3 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu polimerna / čelična spona – polimerna kompozitna / čelična spona

K_4 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu mineralna vuna – nosivi beton

K_5 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu mineralna vuna – polimerna kompozitna
čelična spona

K_6 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu mineralna vuna – mineralna vuna

K_7 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu mineralna vuna – zračni sloj

K_8 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu polimerna kompozitna / čelična spona
– zračni sloj

K_9 [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu zračni sloj – zračni sloj

K_{10} [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu fasadni beton – zračni sloj

K_{11} [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu polimerna kompozitna / čelična spona
– fasadni beton

K_{12} [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu fasadni beton – fasadni beton

$K_{1,out}$ [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu nosivi beton – unutarnji okoliš

$K_{3,out}$ [W/(m K)] – koeficijent propustljivosti za vezu fasadni beton – vanjski okoliš

$T_{1,2,3,..}$ [W/(m K)] – temperature u čvorovima kontrolnih volumena 1, 2, 3, ...

Za svaki koeficijent propustljivosti određene su dvije vrijednosti, zbog različitog inkrementa Δz u odnosu na Δx i Δy . Jedna je vrijednost za prolazak topline kroz površinu $\Delta x \cdot \Delta y$, u smjeru Δz , a druga za strujanje kroz površinu $\Delta x \cdot \Delta z$ u smjeru Δy , odnosno kroz površinu $\Delta y \cdot \Delta z$ u smjeru Δx . Matrica se propustljivosti [K] popunjava koeficijentima propustljivosti dobivenima kao što je prethodno opisano. Za svaku jednadžbu popuni se jedan red matrice.

Na temelju matrice [K] i vektora {S}, pomoću izraza (8.11), dobivene su vrijednosti temperatura po pojedinim čvorovima kontrolnih volumena. Tablica 9-3 usporedno prikazuje vrijednosti koeficijenata propustljivosti za formiranje matrice propustljivosti. Neke se vrijednosti poklapaju zato što je jedina razlika u materijalu spona. Za protok topline između rubnih elemenata i vanjskog/ unutarnjeg okoliša, računao se samo z smjer, s obzirom na to da nema interakcije s vanjskim/unutarnjim okolišem u x i y smjeru.

Tablica 9-3 Koeficijenti propustljivosti za slučaj s čeličnim sponama

	Toplinska propustljivost u smjeru osi [W/m K]			
	Model s čeličnim sponama		Model s polimernim kompozitnim sponama	
	x/ y	z	x/ y	z
K_1	0,01716	0,00429	0,01716	0,00429
K_2	0,03257	0,00814	0,00994	0,00249
K_3	0,32000	0,08000	0,00700	0,00175
K_4	0,00131	0,00033	0,00131	0,00033
K_5	0,00136	0,00034	0,00124	0,00031
K_6	0,00068	0,00017	0,00068	0,00017
K_7	0,00118	0,00030	0,00118	0,00030
K_8	0,00891	0,00223	0,00549	0,00137
K_9	0,00452	0,00113	0,00452	0,00113
K_{10}	0,00694	0,00173	0,00694	0,00173
K_{11}	0,02851	0,00713	0,00953	0,00238
K_{12}	0,01492	0,00373	0,01492	0,00373
$K_{1,out}$		0,00071		0,00071
$K_{2,out}$		0,00187		0,00187

Dio matrice propustljivosti prikazan je u Prilogu 1. Za pristupanje sljedećem koraku proračuna, algoritam je uključivao pronalazak inverza matrice [K], dimenzija također 336 x 336.

Vektor {S} se izračunao tako što su za rubne uvjete uzete temperature unutarnjeg i vanjskog okoliša od 20 °C i -10 °C. Vektor {S} se može promijeniti tako da se na predviđena mjesta samo upišu druge vrijednosti rubnih uvjeta. Rezultat za temperature od 20 °C i -10 °C prikazan je također u Prilogu 1.

Nakon izvršenog programiranog matematičkog postupka kao u izrazu (8.11), dobivene su vrijednosti temperatura u čvorovima kontrolnih volumena. Rezultati su zatim uspoređeni s onima dobivenima proračunom komercijalnim programom AnTherm.

9.2. PRORAČUN TOPLINSKIH MOSTOVA KOMERCIJALNIM PROGRAMOM ANTHERM

AnTherm je komercijalni program koji se koristi za izračun toplinskih tokova u konstrukcijskim elementima - za toplinske mostove i kondenzacije. Elementi se u programu zadaju jednostavno, brzo i precizno. Pouzdan je alat, koji omogućuje provedbu europskih zahtjeva za procjenu toplinske učinkovitosti u zgradarstvu. Usklađen je s europskim normama EN ISO 10211, EN ISO 10077 (za stacionarni tok) i EN ISO 13786 (za nestacionarni tok)⁴. Programom se mogu rješavati slučajevi dvodimenzionalnog i trodimenzionalnog toplinskog proračuna. Trodimenzionalni model može se zadati tako da se pretvori iz dvodimenzionalnog ili se direktno zada u trodimenzionalnom obliku.

Pozadina programskog proračuna temelji se na podjeli na konačne elemente. Konačni se elementi povezuju koeficijentima toplinske veze, kao i u metodi kontrolnih volumena, prikazanoj u poglavlju 8. Koeficijentima toplinske veze se popunjava matrica propustljivosti za stacionaran proračun. Za nestacionaran se proračun računaju harmonijski koeficijenti toplinske veze, koji su zadani kao kompleksni brojevi i kao amplitudni/fazni parovi. Matematički zadatak je, u načelu, jednak za program i za programirani algoritam temeljen na metodi kontrolnih volumena. Razlika je u načinu rješavanja tog problema. AnTherm rješenja pronalazi eksplicitnim metodama, tj. jednadžbe rješava iterativno, a programirani algoritam koristi implicitne metode, tj. rješava sustav jednadžbi u obliku $[K] \times \{S\} = \{T\}$.⁵ Maksimalne veličine konačnih elemenata mogu se zadati ručno, ovisno o potrebnoj preciznosti proračuna te o geometriji i materijalu [38].

Postupak izračuna uključuje zadavanje geometrije (visina, širina, debljina slojeva) konstrukcijskog elementa, svojstva materijala (toplinske provodljivosti), vanjskog i unutarnjeg plošnog koeficijenta prolaska topline. Nakon toga se pokreće proračun po unaprijed zadanoj mreži konačnih elemenata. Po završetku proračuna zadaje se vanjska i unutarnja temperatura iz koje slijede rezultati. Rezultati su prikazani u obliku tablice i grafički prikazani u obliku temperaturne krivulje, krivulje toplinskog toka, kondenzacijske krivulje, izoterme, (...).

⁴ Nestacionarni tok kao npr. harmonijski, periodični

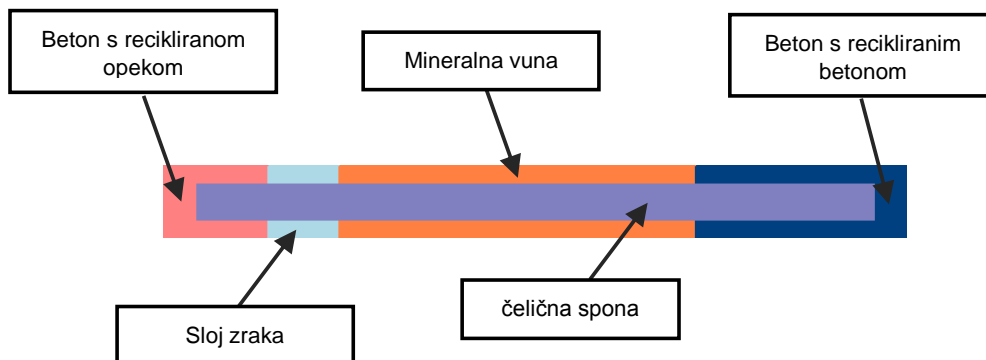
⁵ Implicitne se metode obično koriste kako bi se izbjegla ograničenja vezana uz stabilnost eksplicitne metode (mogućnost računanja velikog broja čvorova bez uzimanja izrazito malog inkrementa pomaka u mreži konačnih elemenata)

9.2.1. NUMERIČKI MODEL

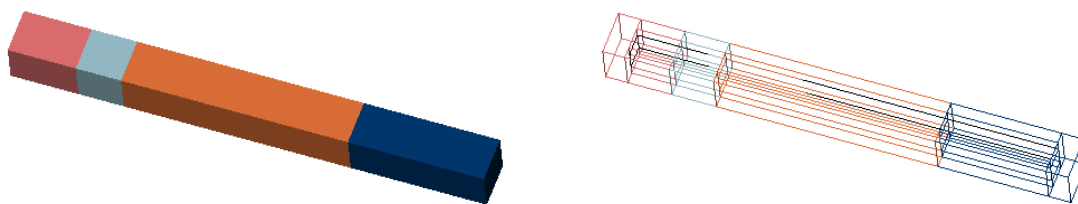
Kako bi se provjerili rezultati dobiveni pomoću metode kontrolnih volumena napravljen je jednaki model u komercijalnom programu AnTherm, što znači da je jednaka geometrija, jednaka su svojstva materijala te jednak plošni koeficijenti prolaska topline. Model je podijeljen na slične kontrolne volumene, što je više moguće, onima iz algoritma metodom kontrolnih volumena. Minimalna vrijednost stranice kontrolnog volumena je 10 mm, a maksimalna 20 mm.

Napravljena su dva modela, kao i u prethodnom poglavlju, od kojih jedan sadrži čelične spone, a drugi polimerne kompozitne spone. Model je napravljen izravnim unosom podataka za izradu trodimenzionalnog modela. Kako bi se mogli uočiti toplinski mostovi, prvo je bilo potrebno nacrtati cijeli model sa svim slojevima pa na kraju spone.

Slika 9-5 prikazuje slojeve modela karakterističnog elementa s čeličnim sponama. Na slici je vidljivo kako spona ne ide u potpunosti do ruba elementa, već je upuštena u nosivi i fasadni sloj betona. Slika 9-6 prikazuje trodimenzionalni model napravljen u programu.

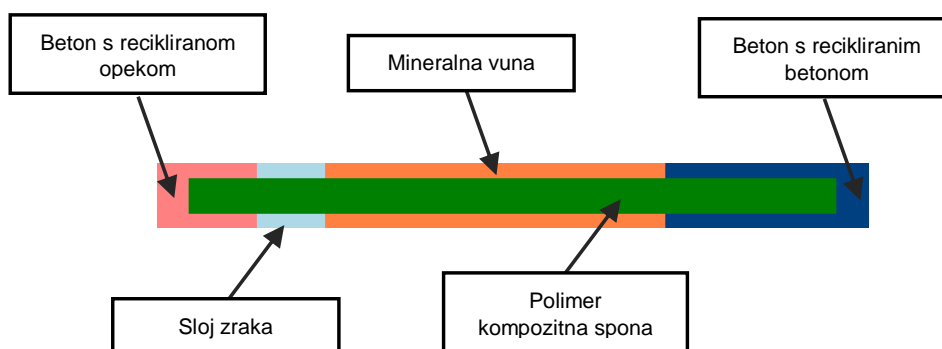


Slika 9-5 Poprečni presjek zidnog panela s čeličnim sponama

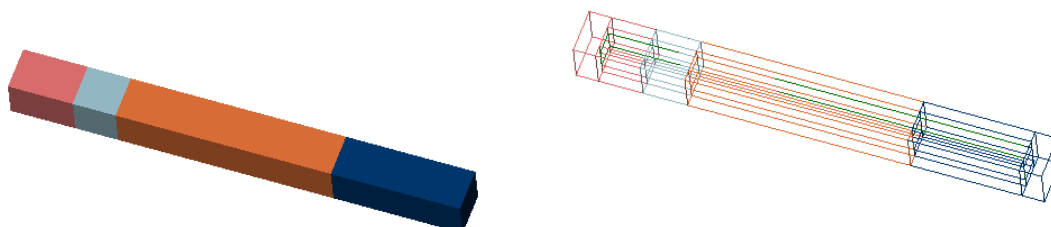


Slika 9-6 Aksonometrijski prikaz zidnog panela

Slika 9-7 prikazuje slojeve modela s polimernim kompozitnim slojevima, a slika 9-8 prikazuje napravljeni trodimenzionalni model.



Slika 9-7 Poprečni presjek zidnog panela



Slika 9-8 Aksonometrijski prikaz zidnog panela

9.3. REZULTATI DOBIVENI MKV-OM I U ANTHERMU

Za proračun točkastih toplinskih mostova korištene su dvije metode, napravljen je algoritam koji proračunava temperature i toplinske tokove metodom kontrolnih volumena i proračun komercijalnim programom AnTherm. Za karakteristični model, dimenzija 4 cm x 4 cm x 42 cm, uzeti su slučajevi s čeličnim i s polimernim kompozitnim sponama te uspoređeni s rezultatima iz AnTherma.

Za analizu će se najprije promotriti temperature na rubnim dijelovima elementa, koji graniče s unutarnjim i vanjskim okolišem. Karakteristika je toplinskih mostova da je na njima temperatura u odnosu na okoliš s nižom temperaturom veća, a u odnosu na okoliš s višom temperaturom niža.

Slika 9-9 prikazuje raspodjelu temperature unutar ravnine poprečnog presjeka, koja graniči s vanjskim okolišem, a slika 9-10 prikazuje ravninu poprečnog presjeka koja graniči s unutarnjim okolišem. Te su dvije ravnine prikazane jer su na njima jasno uočljivi toplinski mostovi, koji se očituju u promjeni temperature kod volumena koji predstavljaju spona (srednji dio poprečnog presjeka) u odnosu na okolne volumene. Za vanjski je rub temperatura središnjih čvorova viša kod čeličnih spona, nego temperatura okolnih čvorova. Na unutarnjem rubu temperatura središnjih čvorova je niža kod čeličnih, nego temperatura okolnih čvorova.

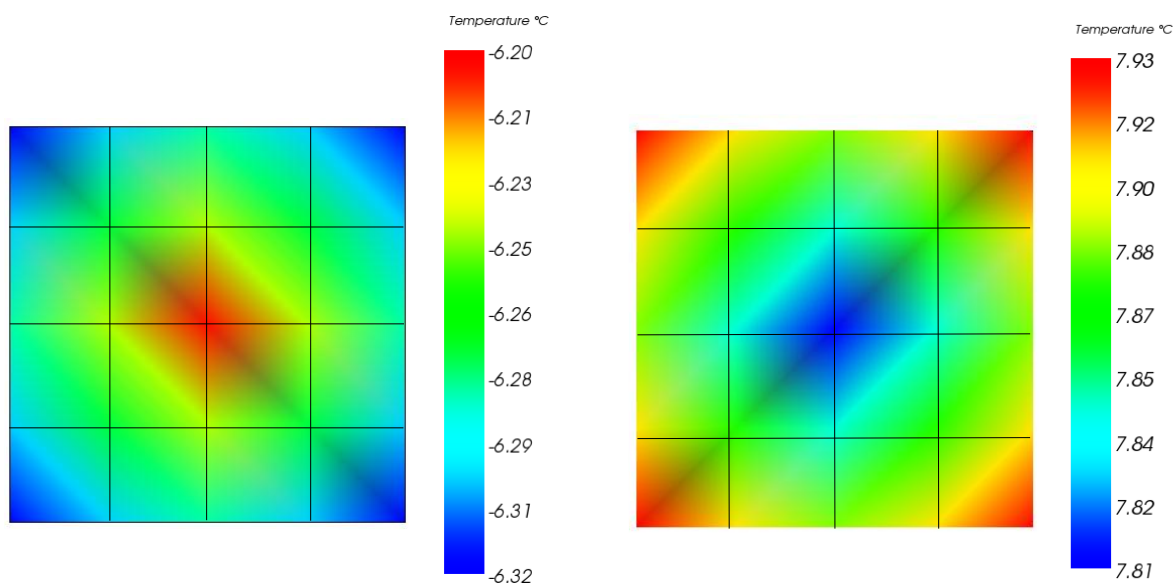
-5,17094	-5,10624	-5,10624	-5,17094
-5,10624	-4,92657	-4,92657	-5,10624
-5,10624	-4,92657	-4,92657	-5,10624
-5,17094	-5,10624	-5,10624	-5,17094

Slika 9-9 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]

7,02588	6,96825	6,96825	7,02588
6,96825	6,81037	6,81037	6,96825
6,96825	6,81037	6,81037	6,96825
7,02588	6,96825	6,96825	7,02588

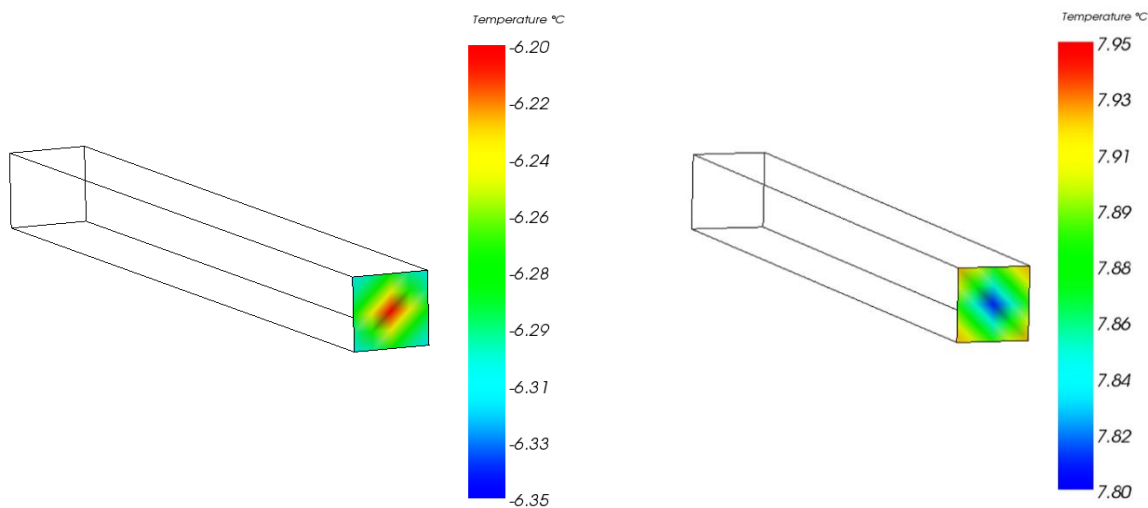
Slika 9-10 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]

Slika 9-11 prikazuje raspodjelu temperature na ravnini poprečnog presjeka, koja graniči s vanjskim okolišem, a slika 9-12 prikazuje ravninu poprečnog presjeka koja graniči s unutarnjim okolišem za model s čeličnim sponama izrađen u programu AnTherm.



Slika 9-11 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]

Slika 9-12 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]



Slika 9-13 Prikaz toplinskog mosta na granici elementa s čeličnim sponama s vanjskim okolišem

Slika 9-14 Prikaz toplinskog mosta na granici elementa s čeličnim sponama s unutarnjim okolišem

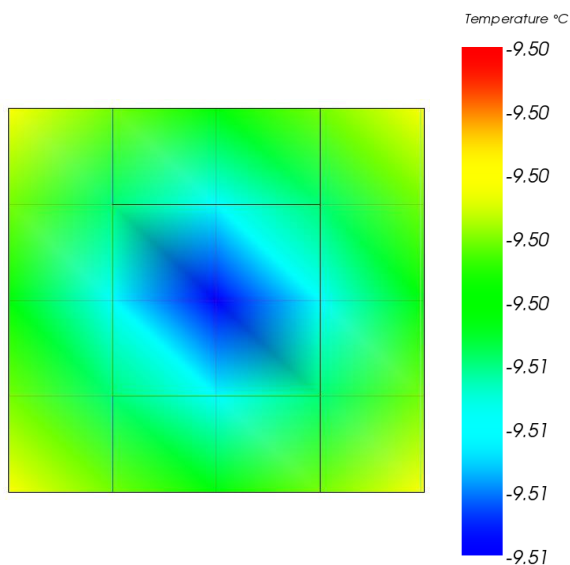
Vrijednosti na slikama pokazuju određeno odstupanje temperatura na rubovima za model iz metode kontrolnih volumena i iz komercijalnog programa. Odstupanje je otprilike 1 °C za čelične spone.

-9,33586	-9,33934	-9,33934	-9,33586
-9,33934	-9,35077	-9,35077	-9,33934
-9,33934	-9,35077	-9,35077	-9,33934
-9,33586	-9,33934	-9,33934	-9,33586

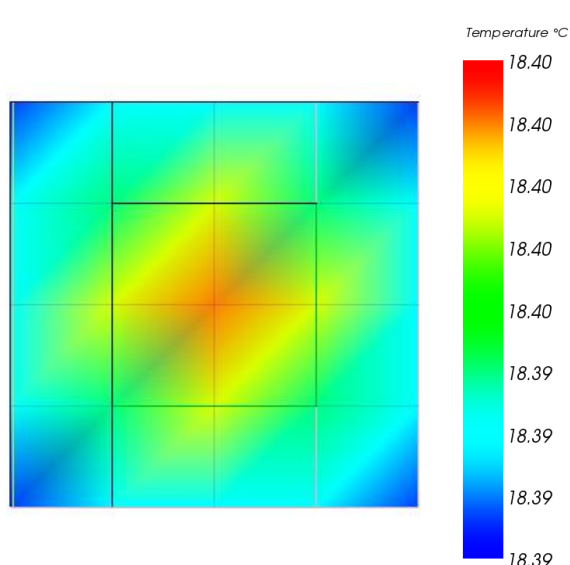
Slika 9-15 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]

18,24690	18,25078	18,25078	18,24690
18,25078	18,26306	18,26306	18,25078
18,25078	18,26306	18,26306	18,25078
18,24690	18,25078	18,25078	18,24690

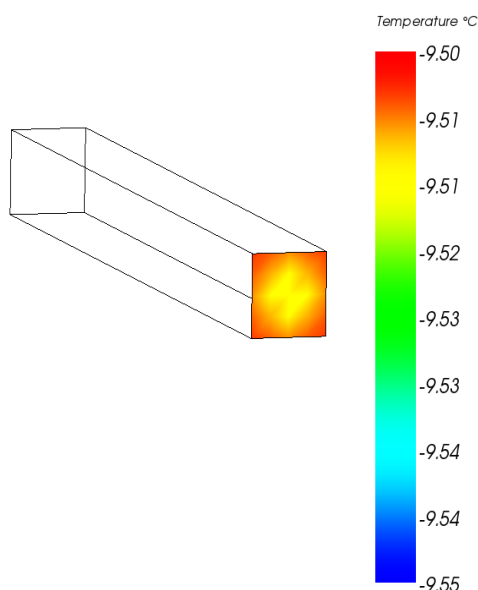
Slika 9-16 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]



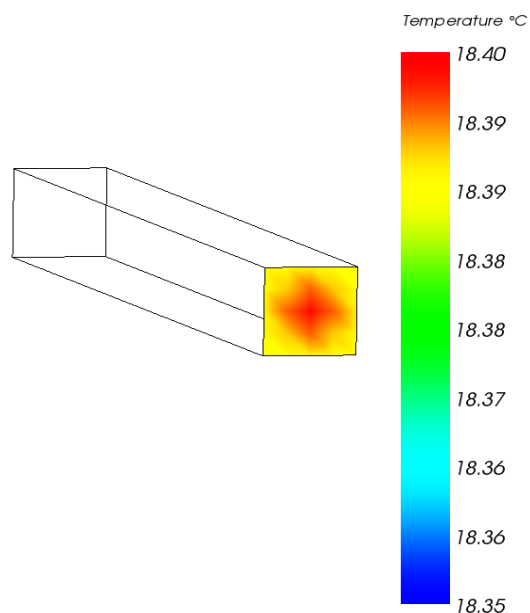
Slika 9-17 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]



Slika 9-18 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]



Slika 9-19 Prikaz toplinskog mosta na vanjskoj strani modela s polimernim kompozitnim sponama



Slika 9-20 Prikaz toplinskog mosta na unutarnjoj strani modela s polimernim kompozitnim sponama

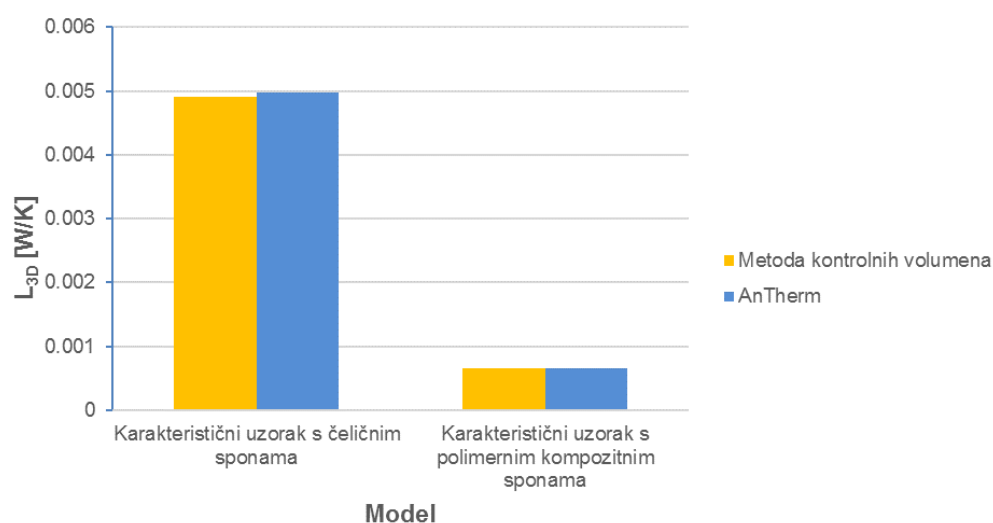
Kod polimernih kompozitnih spona je situacija različita u odnosu na čelične spone. Temperature su na unutarnjem rubu središnjih čvorova više nego temperature okolnih čvorova, a na vanjskom rubu niže nego temperature okolnih čvorova (vrijedi i za proračun MKV-om i u AnThermu).

Slika 9-17 do slike 9-20 prikazuju rezultate za temperature na unutarnjem i vanjskom rubu promatranog elementa s polimernim kompozitnim sponama. Kao što je vidljivo sa slika, temperaturna se raspodjela poklapa s proračunom MKV, tj. razlike su za konkretan slučaj $\sim 0,16$ °C.

Osim temperatura, uspoređene su vrijednosti koeficijenta toplinske veze za obje metode proračuna (tablica 9-4).

Tablica 9-4 Koeficijent toplinske veze L_{3D} [W/K]

Model	Metoda kontrolnih volumena	AnTherm	Odstupanje [%]
Karakteristični uzorak s čeličnim sponama	0,004916	0,004974	1,1
Karakteristični uzorak s polimernim kompozitnim sponama	0,000658	0,000659	0,15



Slika 9-21 Rezultati proračuna L_{3D} za karakteristični model

Slika 9-21 pokazuje kako su za koeficijent toplinske veze rezultati zadovoljavajući, s odstupanjima od 1,1 % za čelične spone i 0,15 % za polimerne kompozitne spone. Razlog odstupanja je vjerojatno nemogućnost zadavanja u potpunosti iste mreže kontrolnih volumena kao u ručnom proračunu. Jednak razlog može biti i za odstupanje temperatura na rubnim površinama za dvije metode proračuna.

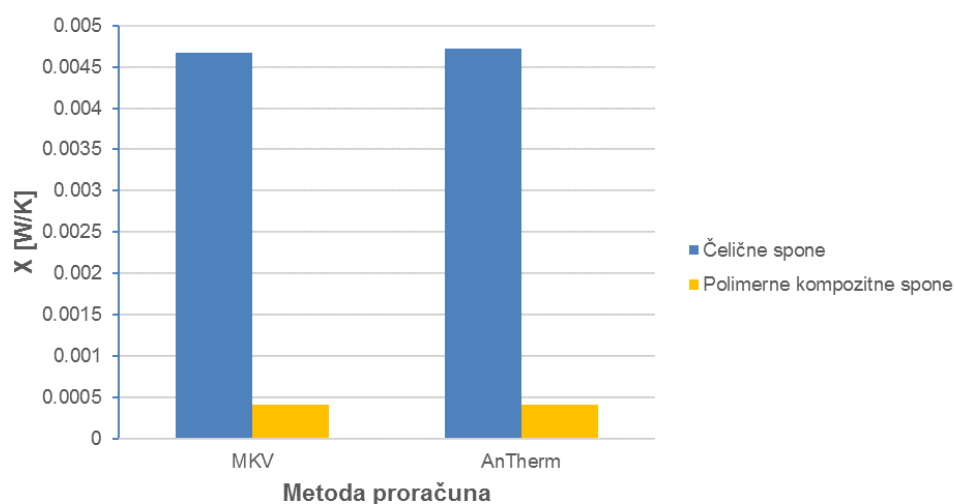
Kako bi se procijenila ozbiljnost toplinskih mostova, pomoću koeficijenta prolaska topline i koeficijenta toplinske veze, preko izraza (6.2) izračunao se točkasti koeficijent prolaska topline, X . Rezultati su prikazani u tablicama (tablica 9-5 i tablica 9-6).

Tablica 9-5 Vrijednosti točkastih koeficijenata prolaska topline, X

	Spone	U [W/(m ² K)]	A [m ²]	L_{3D} [W/K]	X [W/K]
MKV	Čelične	0,155087	0,0016	0,004916	0,004668
	Polimerne kompozitne	0,155087	0,0016	0,000658	0,0004098
AnTherm	Čelične	0,155662	0,0016	0,004974	0,004725
	Polimerne kompozitne	0,155662	0,0016	0,000659	0,00041

Tablica 9-6 Usporedba točkastih koeficijenata prolaska topline, X , za ručni i proračun AnThermom [W/K]

Model	Metoda kontrolnih volumena	AnTherm	Odstupanje [%]
Karakteristični uzorak s čeličnim sponama	0,004668	0,004725	1,21
Karakteristični uzorak s polimernim kompozitnim sponama	0,0004098	0,00041	0,0195

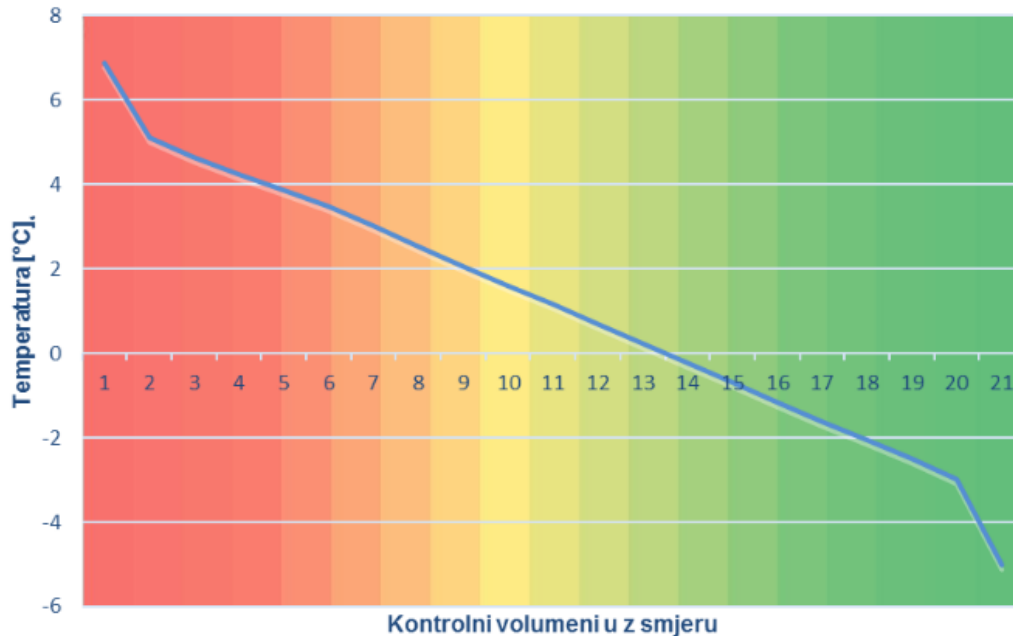


Slika 9-22 Usporedba vrijednosti točkastih koeficijenata prolaska topline, X

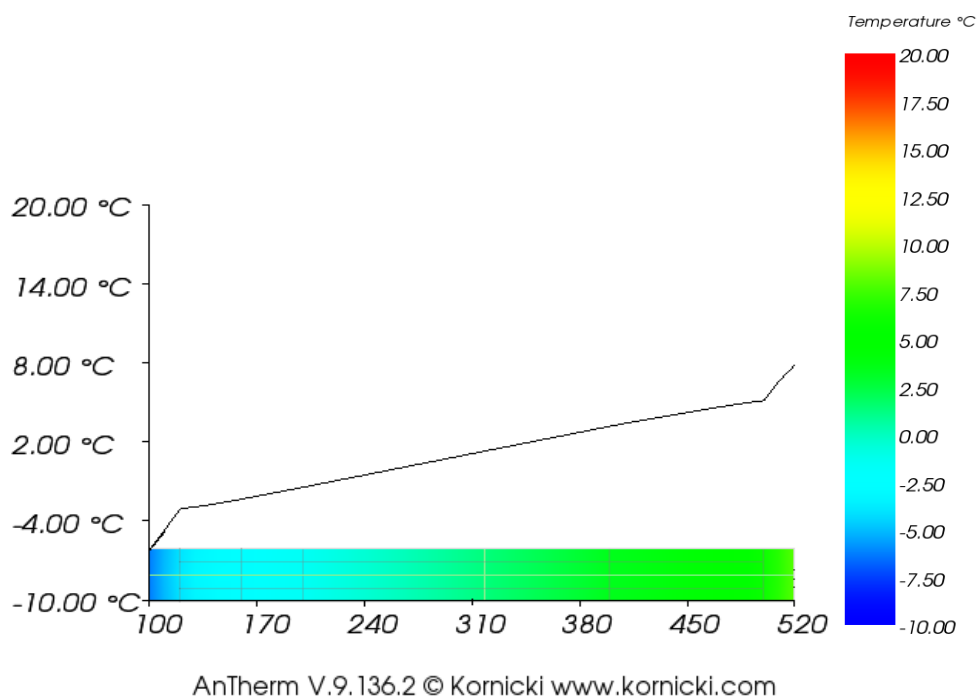
Jasno je vidljiva razlika u iznosima točkastih koeficijenata prolaska topline za različite materijale spona. Ako se čelične spone zamijene polimernim kompozitnim, iznos vrijednosti X

smanji se sa 0,004668 na 0,0004098 W/(m·K), što je smanjenje za 91,22 % kod proračuna MKV, a kod proračuna u AnThermi sa 0,004725 na 0,00041 W/(m·K) što je smanjenje za 91,32 %.

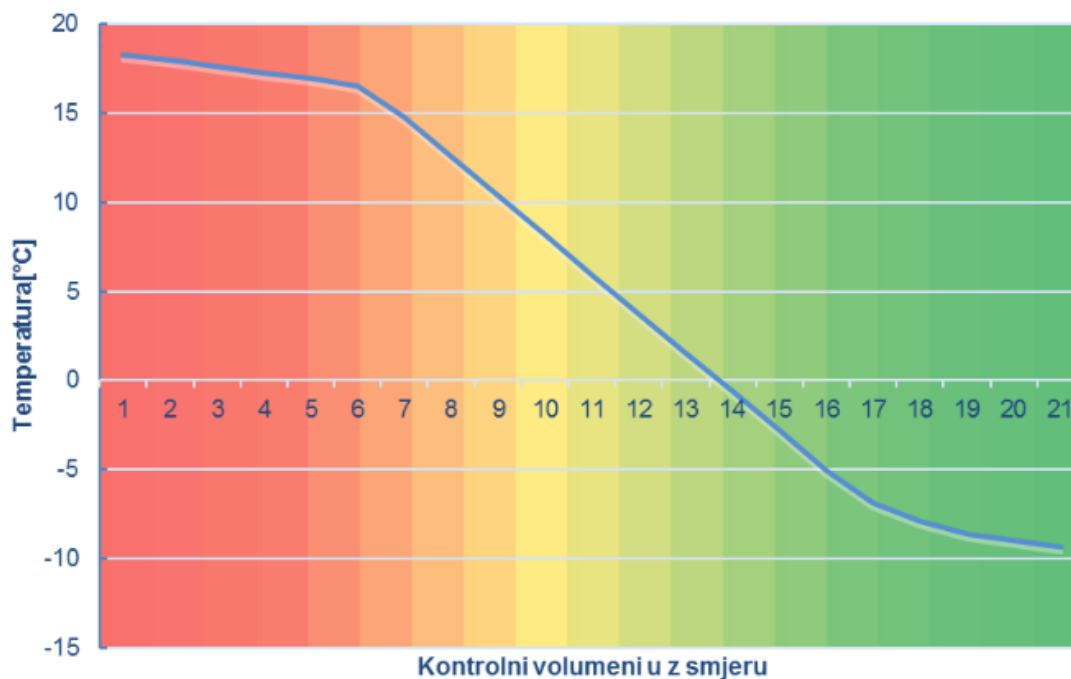
Za analizu rezultata su još uzete temperaturne krivulje, kako bi se vidjele vrijednosti temperatura i u uzdužnom smjeru, ne samo u poprečnom. Krivulje su prikazane za temperature duž spona i kod proračuna MKV-om i kod proračuna AnThermom.



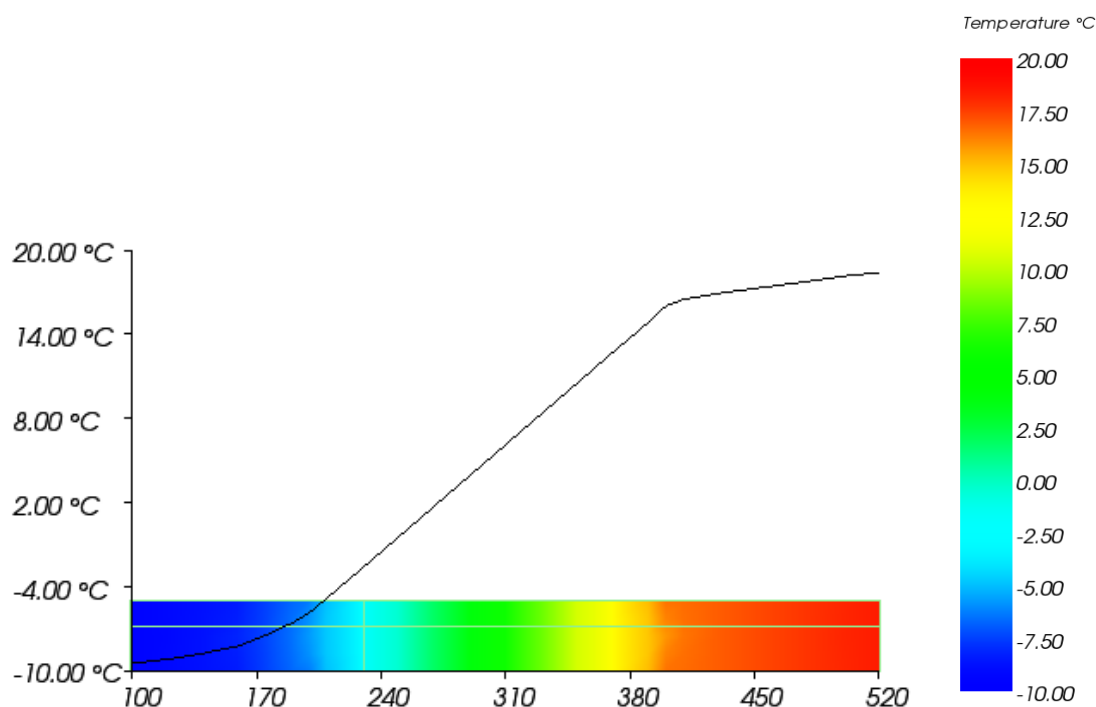
Slika 9-23 Temperaturna krivulja za element s čeličnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C



Slika 9-24 Temperaturna krivulja za element s čeličnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C



Slika 9-25 Temperaturna krivulja za element s polimernim kompozitnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C



Slika 9-26 Temperaturna krivulja za element s polimernim kompozitnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C

Na slikama 9-23 - 9-26 prikazane su temperaturne krivulje kroz uzdužnu os spona za temperature unutarnjeg okoliša od 20 °C i vanjskog okoliša od -10 °C. Usporede li se krivulje po metodama proračuna, zaključuje se da se oblikovno poklapaju. Može se uočiti da se, kod modela s polimernim sponama, temperature dobivene na oba načina proračuna kreću u očekivanom rasponu, tj. padovi temperatura između okoliša i elementa su do 1 °C. Međutim, kod modela s čeličnim sponama uočeno je kako su iznosi padova temperatura na rubovima preveliki, tj. ne odgovaraju stvarnom stanju.

Jedan od mogućih razloga je premalen broj konačnih volumena u modelima. Od 16 elemenata, koliko ih je u poprečnom presjeku, njih 4 su spona. Kod modela elementa s polimernim kompozitnim sponama nije toliko velika razlika kao kod čeličnih vjerojatno zbog toga što čelik ima puno veću toplinsku provodljivost nego polimerni kompozit pa puno više utječe na okolne kontrolne volumene, kojima su pridruženi drugi materijali.

Kako bi se vidio stvarni utjecaj toplinskih mostova na ukupno ponašanje panela s obzirom na prijenos topline, u nastavku je napravljen proračun cijelog panela u programu AnTherm.

9.4. MODELI CIJELOG ZIDNOG PANELA

Kako bi se izračunao koeficijent toplinske provodljivosti cijelog panela izrađen je model dimenzija 1,00 x 1,00 m. Model je zadan u trodimenzionalnom obliku zbog mogućnosti unosa linijskih spona. Nakon dobivene U -vrijednosti, unesene su najprije čelične, a zatim i polimerne kompozitne spona. Na taj način su izračunata povećanja toplinskih tokova, karakterističnih za toplinske mostove. U konačnici je napravljena usporedba rezultata kako bi se vidio utjecaj spona na ukupnu U -vrijednost zidnog panela.

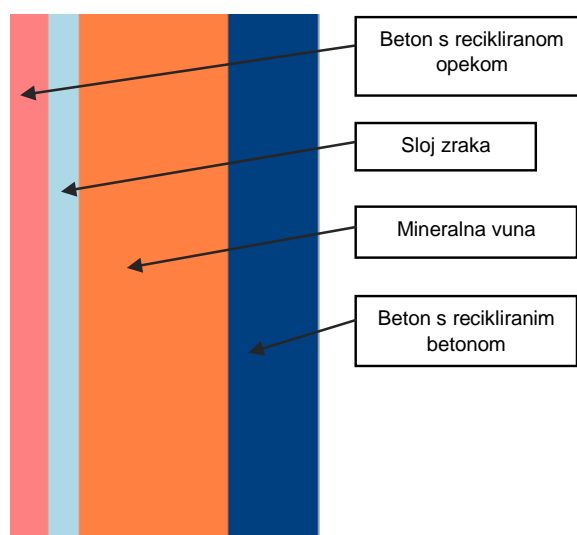
Devet spona je raspoređeno po površini od 1,00 m². Karakteristike materijala i debljine slojeva su jednake onima u proračunu MKV. Potrebno je još definirati i toplinsku provodljivost sloja zraka koji se nalazi između sloja mineralne vune i fasadnog betona jer ona ovisi o površini poprečnog presjeka promatranog elementa. Vrijednost je izračunata u AnThermi prema normi EN ISO 10077 za razliku u temperaturi od 10 K i iznosi:

$$\lambda_{\text{zrak}} = 0,2281 \text{ W/(m K)}.$$

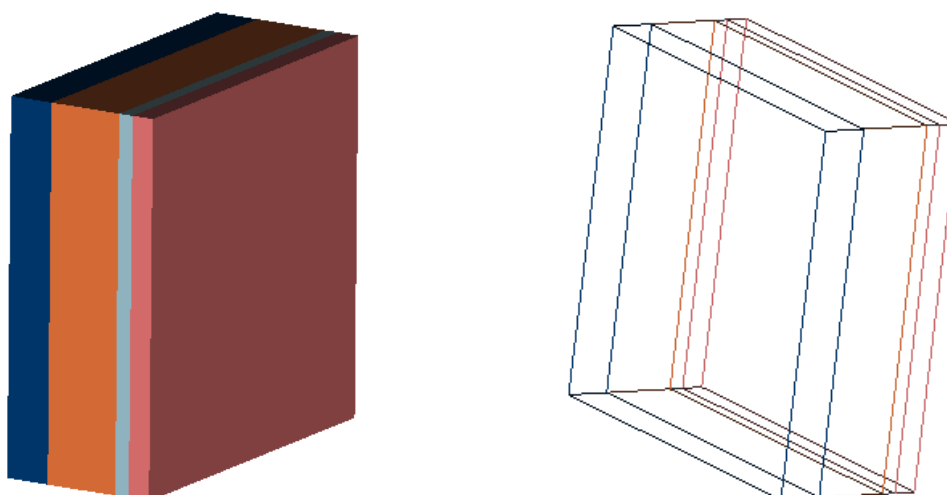
U nastavku su prikazane sve tri varijante modela dimenzija 1,00 x 1,00 m:

- 1) Model bez spona.
- 2) Model s čeličnim sponama.
- 3) Model s polimernim kompozitnim sponama.

Zidni panel bez spona (slika 9-27), potreban je kako bi se mogao usporediti s ostala dva modela, odnosno vidjeti koliki je utjecaj toplinskih mostova. Ovim proračunom dobit će se „čisti“ koeficijent toplinske provodljivosti kao referentna vrijednost s kojom će se uspoređivati slučajeve s čeličnim i polimernim kompozitnim sponama.

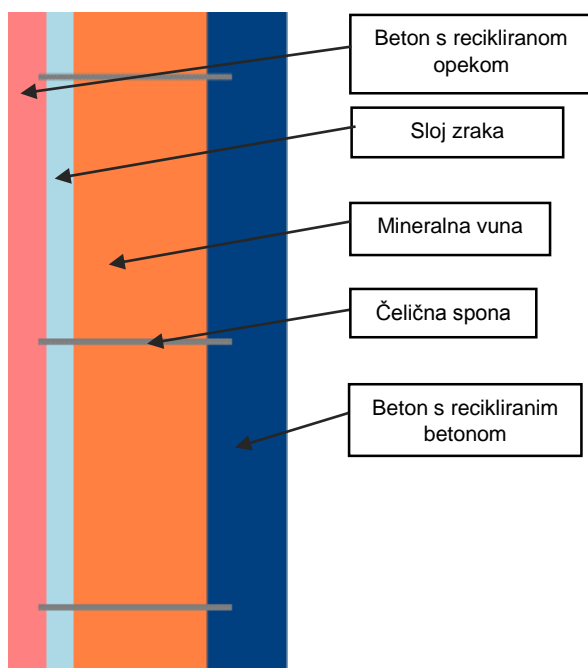


Slika 9-27 Slojevi zidnog panela

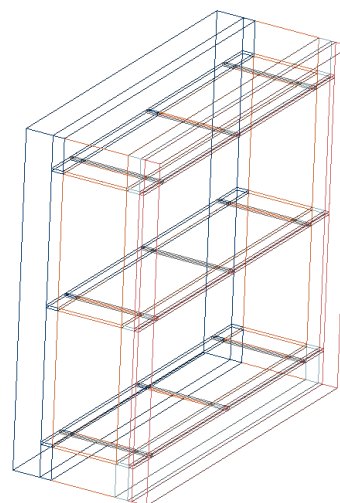


Slika 9-28 Aksonometrijski prikaz zidnog panela

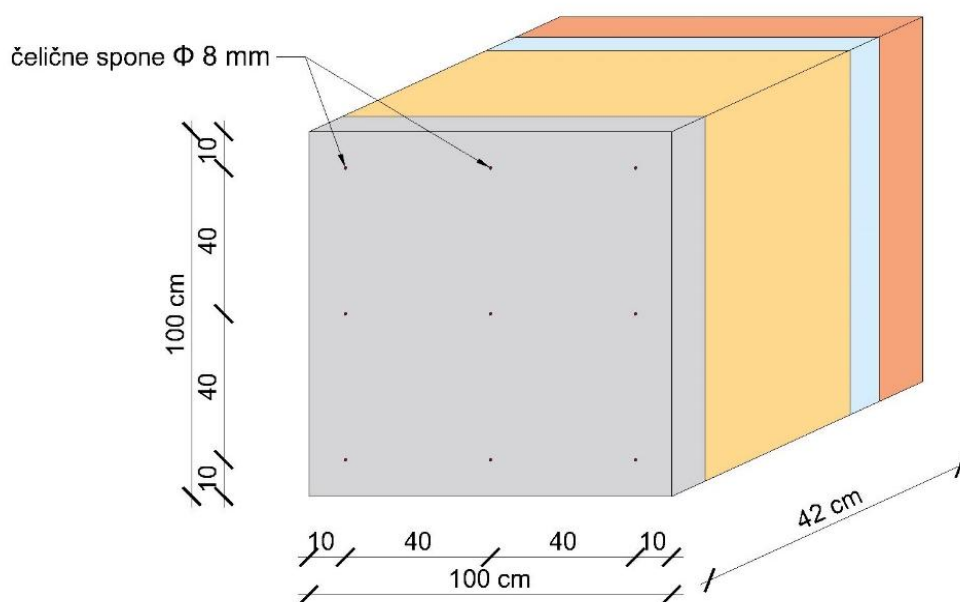
Drugi je model panel s čeličnim sponama (slika 9-29). Postojeći panel je napravljen s čeličnim sponama (slika 9-31). Čelične spone služe kao distanceri prilikom proizvodnje te kao ukrućenje prilikom eksploatacije panela. Definirane su kao kvadratni elementi dimenzija 8 x 8 mm, duljine 289 mm. Kako bi se mogli uočiti toplinski mostovi, potrebno je u programu definirati prvo sve slojeve, a zatim spone, inače ih program ne uzima u obzir.



Slika 9-29 Poprečni presjek zidnog panela



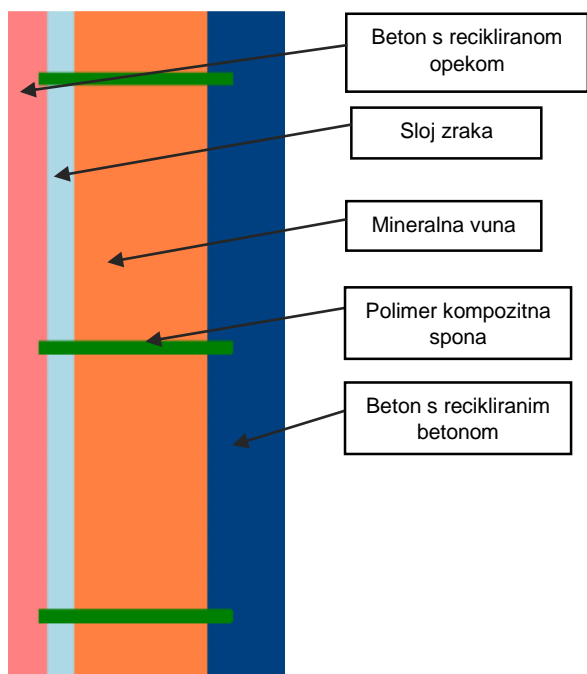
Slika 9-30 Aksonometrijski prikaz zidnog panela



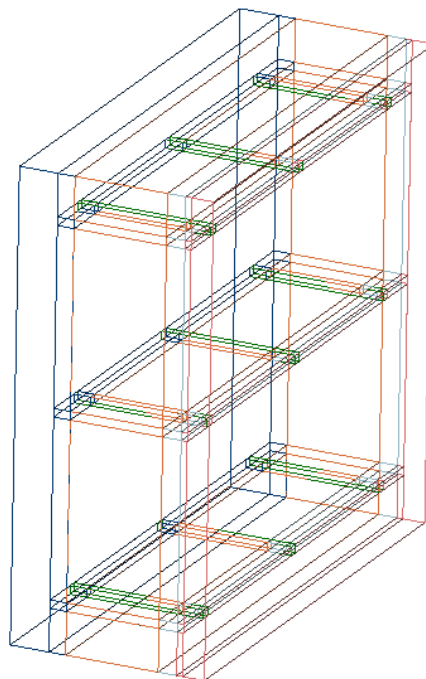
Slika 9-31 3D prikaz zidnog panela sa čeličnim sponama

Slika 9-32 prikazuje treći model, model s polimernim kompozitnim sponama. Zamjenom trenutnih spona polimernim kompozitnim sponama zadržala bi se njihova funkcija ukrućenja prilikom eksploatacije i osiguranja razmaka između slojeva. Slika 9-34 prikazuje raspored

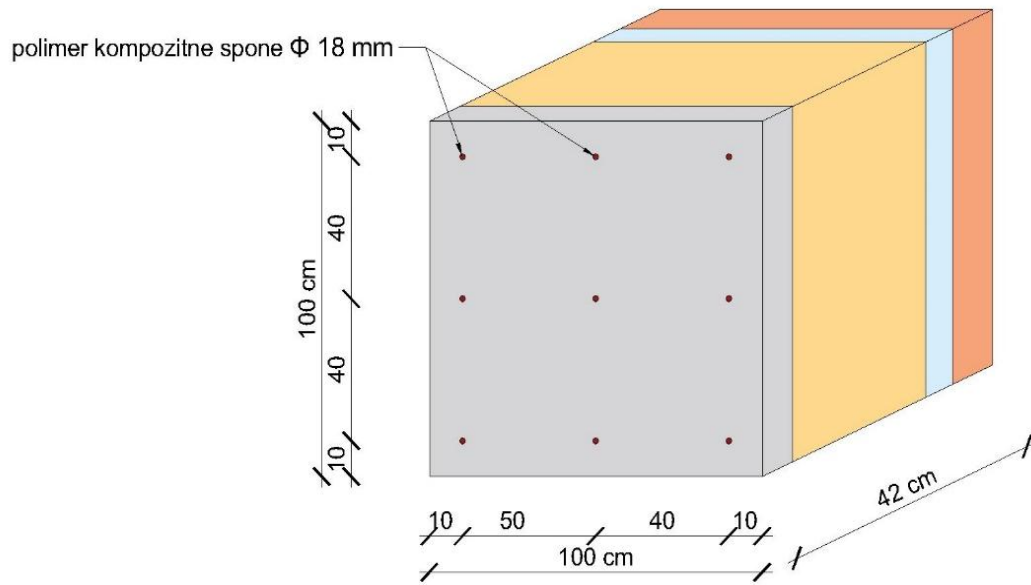
polimernih kompozitnih spona. Definirane su kao kvadratni elementi dimenzija 18 x 18 mm, duljine 289 mm. Isto kao u prethodnim primjerima, kako bi se mogli uočiti toplinski mostovi, potrebno je u programu definirati prvo sve slojeve, a zatim spone.



Slika 9-32 Poprečni presjek zidnog panela



Slika 9-33 Aksonometrijski prikaz zidnog panela



Slika 9-34 3D prikaz zidnog panela s polimernim kompozitnim sponama

9.5. OBRADA I USPOREDBA REZULTATA ZIDNOG PANELA

Kao uspoređujući parametar za sva tri modela prikazana u prethodnom poglavlju, uzet je koeficijent prolaska topline, odnosno koeficijent toplinske veze. Tablica 9-7 prikazuje dobivene vrijednosti za sve modele. Za razliku od modela bez spona, u modelima sa sponama ne dobije se vrijednost koeficijenta prolaska topline, nego se zbog toplinskih mostova dobije koeficijent toplinske veze. Koeficijent toplinske veze sastoji se od koeficijenta prolaska topline pomnoženog s površinom i točkastog koeficijenta prolaska topline (utjecaj točkastih toplinskih mostova). U prvom modelu je izračunat koeficijent prolaska topline, pa se vezom navedenoj u prethodnoj rečenici može lako izračunati ozbiljnost toplinskih mostova.

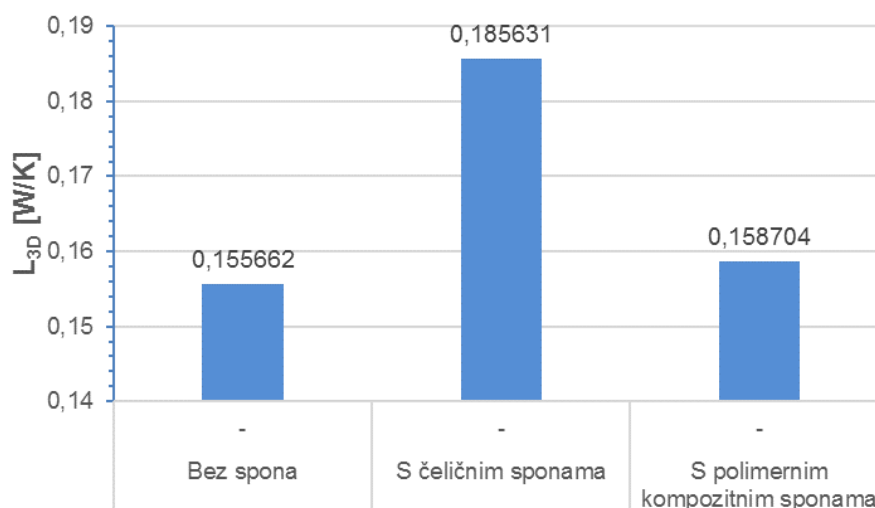
Tablica 9-7 Koeficijent toplinske provodljivosti U za numerički model bez spona

Model bez spona	Koeficijent prolaska topline, U [W/m ² K]		
	Prostor	Unutarnji okoliš	Vanjski okoliš
	Unutarnji okoliš	-	0,155662
	Vanjski okoliš	0,155662	-
Model s čeličnim sponama	Koeficijent toplinske veze, L_{3D} [W/K]		
	Prostor	Unutarnji okoliš	Vanjski okoliš
	Unutarnji okoliš	-	0,185631
	Vanjski okoliš	0,185631	-
Model s polimernim kompozitnim sponama	Koeficijent toplinske veze, L_{3D} [W/K]		
	Prostor	Unutarnji okoliš	Vanjski okoliš
	Unutarnji okoliš	-	0,158704
	Vanjski okoliš	0,158704	-

Programom je dobivena vrijednost koeficijenta prolaska topline jednaka onoj koja se dobije iz jednadžbe (5.6):

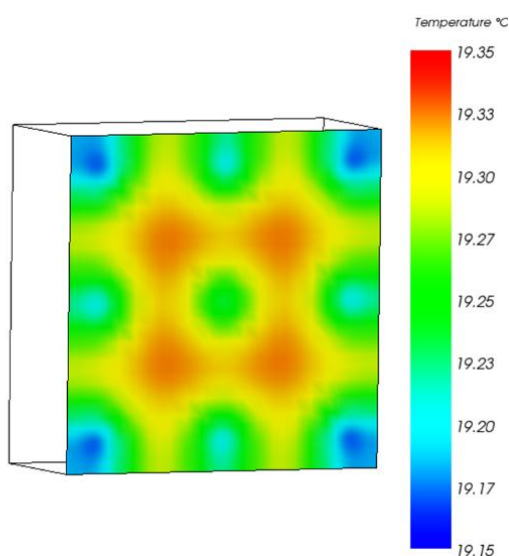
$$U = \frac{1}{0,13 + \frac{0,06}{0,746} + \frac{0,04}{0,2281} + \frac{0,20}{0,034} + \frac{0,12}{0,858} + 0,04} = 0,155 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Slika 9-35 pokazuje vidljivu razliku koeficijenta toplinske veze za cijeli panel, dimenzija 1,00 m x 1,00 m x 42 cm, s čeličnim sponama u odnosu na onaj s polimernim kompozitnim sponama. Koeficijent se u prvom slučaju poveća za 0,029969 W/K što je povećanje od 19,25 % u odnosu na element bez spona. Za polimerne kompozitne spone, povećanje koeficijenta je 0,003042, što je 1,95 % veće nego koeficijent toplinske veze elementa bez spona. Dakle, koeficijent toplinske veze se smanji 10 puta uporabom polimernim kompozitnih spona umjesto čeličnih.

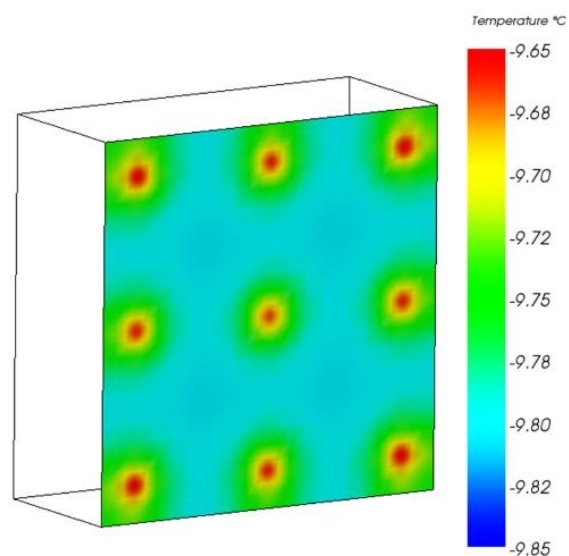


Slika 9-35 Rezultati proračuna L_{3D} za cijeli panel u AnThermu

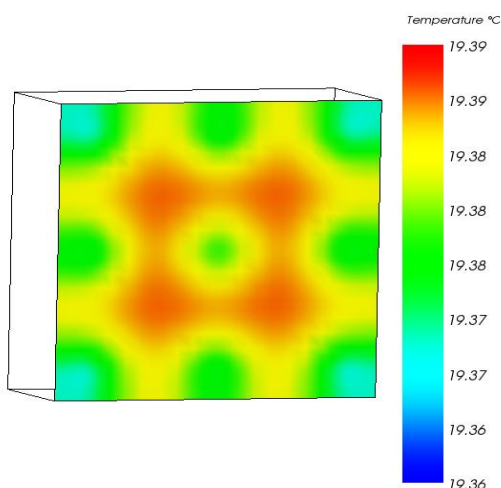
Slika 9-36 i slika 9-37 prikazuju temperaturnu raspodjelu na elementima, za rubne uvjete 20 °C i -10 °C za panel s čeličnim sponama. Za razliku od modela dimenzija 4 cm x 4 cm x 42 cm, dobivene vrijednosti su u očekivanom rasponu iz čega se zaključuje da model zadovoljava po pitanju simulacije realnog stanja. Spektar boja jasno ocrta mjesto na koje su ugrađene čelične spone. To su mjesta s višom, odnosno nižom temperaturom u odnosu na ostatak panela. Za panel s polimernim kompozitnim sponama, čak i prilagođavajući vrijednosti temperatura za spektar boja, manje su uočljiva mjesta ugradnje spona (slika 9-38 i slika 9-39). To znači da je na tim mjestima manji protok topline nego kod čeličnih spona.



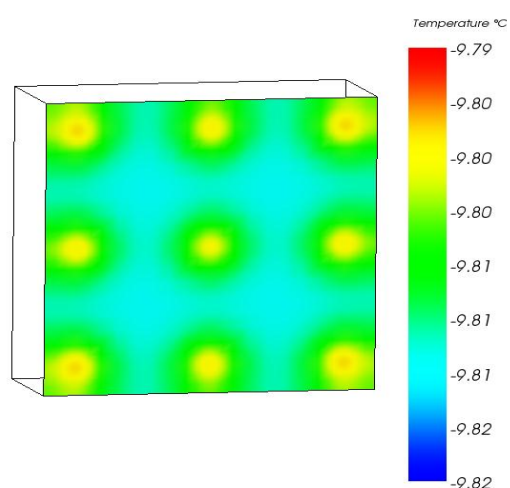
Slika 9-36 Toplinski mostovi s unutarnje strane panel sa čeličnim sponama



Slika 9-37 Toplinski mostovi s vanjske strane panela sa čeličnim sponama

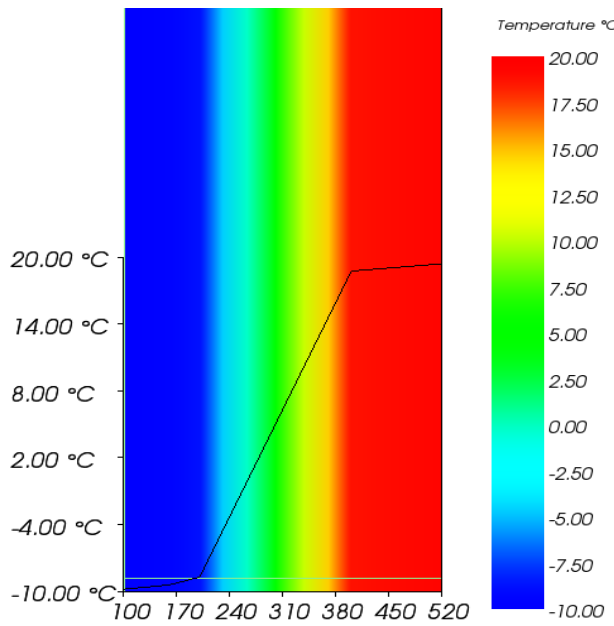


Slika 9-38 Toplinski mostovi s unutarnje strane za panel s polimernim kompozitnim sponama

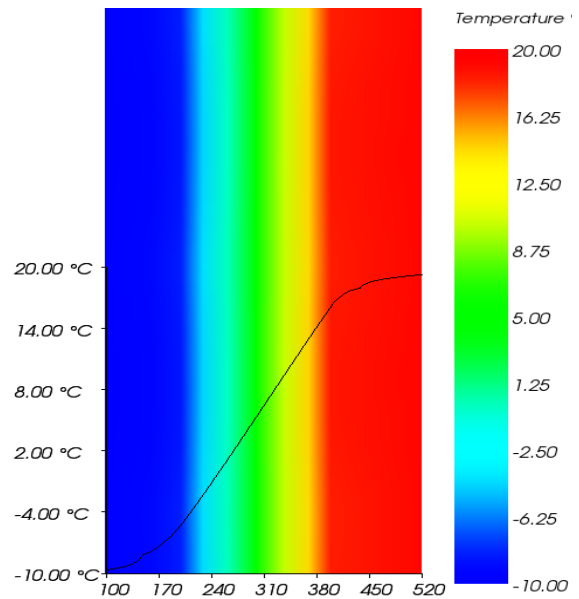


Slika 9-39 Toplinski mostovi s vanjske strane za panel s polimernim kompozitnim sponama

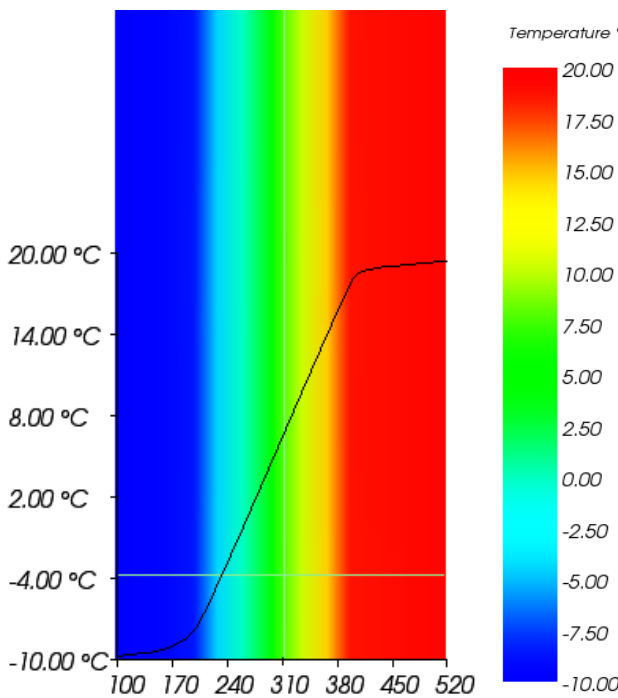
Za temperature kroz cijeli presjek, prikazane su temperaturne krivulje (slika 9-40, slika 9-41 i slika 9-42). Za modele sa sponama, temperature su prikazane u osi spona. Ugradnjom čeličnih spona se temperaturna krivulja „zagladi“, tj. vidi se kako se temperatura na fasadnom sloju betona (plava boja) povisi, a na nosivom sloju betona (crvena boja) smanji. Za element s polimernim kompozitnim sponama se također krivulja „zagladi“, ali manje nego s čeličnim sponama, pa njen oblik više slični na krivulju koja uopće ne sadrži spona.



Slika 9-40 Temperaturna krivulja zidnog panela bez spona



Slika 9-41 Temperaturna krivulja zidnog panela s čeličnim sponama



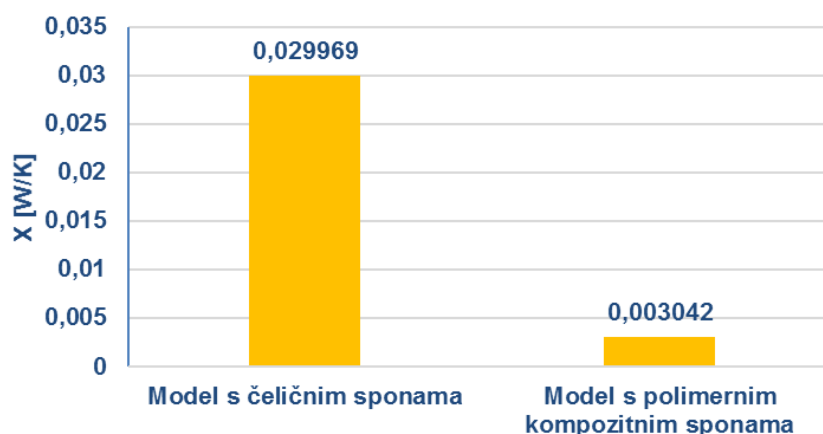
Slika 9-42 Temperaturna krivulja za panel s polimernim kompozitnim sponama

Za kvantifikaciju toplinskih mostova, tj. procjenu njihove ozbiljnosti, pomoću izraza (6.1) izračunava se vrijednost točkastog koeficijenta prolaska topline, X . Dio jednadžbe

$\sum_{j=1}^{N_j} \psi_j L_i$ jednak je nuli jer na modelu nema linearnih toplinskih mostova. A_i je površina koja je obuhvaćena u izračunu koeficijenta toplinske provodljivosti, U . $A_i = 1,00 \cdot 1,00 = 1,00 \text{ m}^2$.

Tablica 9-8 Koeficijenti prolaska topline za dva modela

Model	Točkasti koeficijent prolaska topline X [W/K]
Model s čeličnim sponama	$X = 0,185631 - 0,155662 \cdot 1,00 = 0,029969 \text{ W/K}$
Model s polimernim kompozitnim sponama	$X = 0,158704 - 0,155662 \cdot 1,00 = 0,003042 \text{ W/K}$



Slika 9-43 Usporedba koeficijenata prolaska topline

Rezultati pokazuju kako zamjena čeličnih polimernih spona polimernim kompozitnim uzrokuje smanjenje točkastog koeficijenta prolaska topline s 0,029969 W/K na 0,003042 W/K, što je smanjenje od 89,85 % (tablica 9-8). Odnos točkastih toplinskih koeficijenata za dva slučaja prikazan je i grafički (slika 9-43).

Osvrćući se na dobivene rezultate, vidljivo je kako ugradnja polimernih kompozitnih spona osigurava manje gubitke stvaranjem toplinskih mostova s nižim točkastim koeficijentom prolaska topline. U nastavku su rada ispitane te spone kako ne bi njihova ugradnja s namjerom poboljšanja toplinskih svojstava ugrozila stabilnost i krutost panela.

10. EKSPERIMENTALNI DIO ANALIZE NOSIVOSTI

Za provjeru stabilnosti zidnog panela nakon zamjene čeličnih spona s polimernim kompozitnim sponama, provedena su ispitivanja s ciljem utvrđivanja mogućnosti primjene istih u ECO-SANDWICH® zidnom panelu. Za analizu je odabran proizvod tvrtke HK Composites (slika 10-1). Spojni elementi izrađeni su od polimera visokih uporabnih svojstava. Prema specifikaciji proizvođača svojstva polimernih kompozitna spona (za debljinu izolacije od 20 cm) odgovaraju onima navedenim u tablici (tablica 10-1).



Slika 10-1 Spona ST200 izrađena od polimera visokih uporabnih svojstava

Tablica 10-1 Svojstva polimerne kompozitne spona za debljinu izolacije od 20 cm [39]

Naziv proizvoda	Standardna spona duljine 20 cm(ST200)
Opis:	HK™ standardna zidna spona niske provodljivosti za izolaciju debljine 20 cm
Proizvod:	spona duljine 20 cm za izolirane betonske fasadne panele
Debljina izolacije:	200 mm
Duljina spona:	289 mm
Dubina ugradnje:	38 mm
Promjer kroz izolaciju:	19 mm
Vatrootpornost:	Otpornost na vlačno opterećenje od 1,34 kN preko 90 min kada je požar isptivan prema ASTM E1512 01, Poglavlje 7.4.3
Debljina sloja:	50 do 100mm
Nosivost pri vlaku	10,23 kN
Nosivost pri čupanju:	10,23 kN
Nosivost pri posmiku:	4,44 kN

Otpornost na alkalije:	Odlično ¹
Udarna čvrstoća	Odlično ²
Toplinska provodljivost:	0.35 W/(m K)
1 Ispitivanje baznog materijala nije pokazalo promjene u svojstvima pri izlaganju alkalijama. 2 Neizrezani Izod ⁶ element na ispitivanje udarne sile baznog materijala nije imao nikakav lom.	

Za potrebe istraživanja izvedbe ECO-SANDWICH[®] panela s polimernim kompozitnim sponama izrađena su 3 uzorka na kojima su provedena ispitivanja. Uzorci su se sastojali od nosivog sloja debljine 12 cm i dimenzija poprečnog presjeka 1,2 x 1,0 m te vanjskog sloja debljine 6 cm i dimenzija poprečnog presjeka 1,0 x 1,0 m. Uzorci su izvedeni bez toplinske izolacije.

Beton korišten pri izradi uzoraka je beton s recikliranim agregatom. Nosivi slojevi izrađeni su od betona u kojem je 50% agregata zamijenjeno recikliranim betonom (oznaka RB50). Vanjski slojevi su na 2 uzorka izvedeni od betona u kojem je 50% agregata zamijenjeno recikliranim betonom, a vanjski sloj na jednom uzorku izrađen je od betona u kojemu je 50% agregata zamijenjeno recikliranom opekam (oznaka RO50). Sastavi betona prikazani su u tablicama 10-2 i 10-3.

Tablica 10-2 Sastav betona sa zamjenom 50% agregata recikliranog betona (RB50)

KOMPONENTA	m [kg]	ρ [kg/dm ³]	V [dm ³]
Cement CEM II A/S 42,5 R	400,0	3,01	132,9
Voda	168	1	168,0
v/c 0,42	-	-	-
Zrak 6 %	-	-	60,0
Plastoerant MELCRET SPA 0,7 %	2,8	1,1	2,5
Agregat 0-4P (50% slapnica, 50 % smontara)	891,19	2,8	318,3
Agregat 4-8R	254,63	2,5	101,9

⁶ Metoda određivanja udarne čvrstoće polimernih materijala prema ASTM (Američko društvo za ispitivanje i materijale)

Agregat 8-16R	545,41	2,52	216,4
UKUPNO	2262,0	2,26	1000,0

Tablica 10-3 Sastav betona sa zamjenom 50% agregata recikliranom opekom (RO50)

KOMPONENTA	m [kg]	ρ [kg/dm ³]	V [dm ³]
Cement CEM II A/S 42,5 R	400,0	3,01	132,9
Voda	168	1	168,0
v/c 0,42	-	-	-
Zrak 6 %	-	-	60,0
Plastoaerant MELCRET SPA 0,7 %	2,80	1,1	2,5
Agregat 0-4P (50% slapnica, 50 % smontara)	891,19	2,8	318,3
Agregat 4-8R	243,60	2,126	114,6
Agregat 8-16R	422,68	2,075	203,7
UKUPNO	2128,3	2,13	1000,0

Slika 10-2 prikazuje tijek izvedbe zidnog panela u kojima je veza između nosivog i vanjskog sloja betona ostvarena polimernim kompozitnim sponama ST200 (slika 10-1).



a) vezanje polimernih kompozitnih spona za armaturu



b) pričvršćivanje polimernih kompozitnih spona za armaturu nosivog sloja



c) betoniranje nosivog sloja



d) postavljanje oplata i armature za vanjski sloj

Slika 10-2 Tijek izvedbe uzoraka ECO-SANDWICH® panela upotrebom polimernih kompozitnih spona

Prilikom izrade uzoraka ECO-SANDWICH® zidnog panela, polimerne kompozitne spone su pričvršćene za armaturu nosivog sloja (slika 10-2a i slika 10-2b), kako bi ostale fiksirane tijekom vibriranja betona. Polimerne kompozitne spone su postavljene na međusobnom razmaku od 40 cm s razmakom 10 cm u odnosu na vanjski sloj panela.

Pregledom uzoraka nakon očvršćivanja u vlažnoj komori uočeno je da sve polimerne kompozitne spone nisu paralelne što je posljedica nedovoljne preciznosti izvedbe prilikom betoniranja nosivog sloja. Tijekom polaganja polimernih kompozitnih spona u vanjski sloj betona došlo je do deformiranja pojedinih spona (slika 10-3a), što pokazuje nejednoliku distribuciju opterećenja od nosivog sloja po pojedinim sponama. Pregledom uzoraka nisu uočene pukotine ili druga oštećenja u betonu. Nakon podizanja panela u uspravni položaj uočeno je da nastaje progib polimernih kompozitnih spona $\Delta h \approx 1$ cm (slika 10-3b).



a) odstupanja u položaju polimernih kompozitnih spona, deformiranje pod težinom nosivog sloja



b) početni progib pod djelovanjem vlastite težine

Slika 10-3 Nedostaci u uzorcima panela nastale tijekom izvođenja

Navedeni problemi prilikom izvedbe ukazuju da je potrebno unaprijediti tehnologiju izvedbe ECO-SANDWICH® zidnih panela u slučaju kada se pri izradi primjenjuju polimerne kompozitne spona. Ujedno, potrebno je povećati njihovu točnost geometrije postavljanja. Ovaj problem će se riješiti projektiranjem spona čiji će oblik biti prilagođen za primjenu u ECO-SANDWICH® zidnom panelu.

Postojanje početnog progiba polimernih kompozitnih spona može predstavljati problem prilikom montaže ECO-SANDWICH® zidnih panela. Korištenjem duljih polimernih kompozitnih spona ovaj progib će se dodatno povećati. U sustavu zidnih panela s XPS-om, za koji su polimerne kompozitne spona ST200 razvijene, problem početnog progiba je riješen prionljivošću između XPS-a i betona. U slučaju ECO-SANDWICH® zidnog panela nužno je predvidjeti dodatne ukrute. Numeričkim modelom promatranog panela dano je nekoliko rješenja za sprječavanje početnog progiba i povećanja krutosti elementa.

11. OBRADA REZULTATA EKSPERIMENTALNOG DIJELA

Eksperimentalnim ispitivanjem obuhvatilo se:

- Ispitivanje vlačne čvrstoće polimernih kompozitnih spona
- Ispitivanje na odrez polimernih kompozitnih spona
- Ispitivanje sile čupanja polimernih kompozitnih spona
- Ispitivanje nosivosti zidnog panela izrađenog od polimernih kompozitnih spona
 - Ispitivanje dinamičkim opterećenjem zidnog panela
 - Ispitivanje pri cikličkom opterećenju zidnog panela

U nastavku su prikazani postupci ispitivanja i analiza podataka dobivenih ispitivanjem. Sva ispitivanja su provedena na Građevinskom fakultetu u Zagrebu u laboratoriju Zavoda za materijale te dio ispitivanja u laboratoriju Zavoda za tehničku mehaniku. Kod svih metoda ispitivanja koristile su se iste (pod time se misle jednakih mehaničkih karakteristika, definiranih u tablici 10-1) polimerne kompozitne spona ST200.

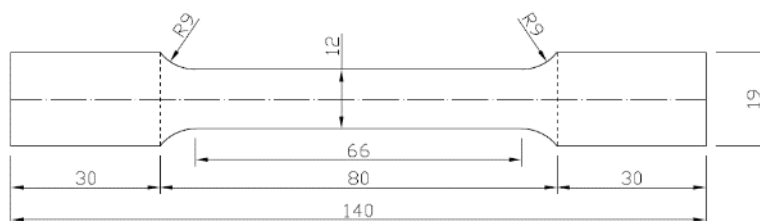
11.1. ISPITIVANJE VLAČNE ČVRSTOĆE POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA

Ispitivanje vlačne čvrstoće polimernih kompozitnih spona provedeno je direktnim vlakom prema normi HRN EN ISO 6892-1:2010⁷. Ispitivanje je provedeno na tri uzorka. Dimenzije uzoraka za ispitivanje određene su u skladu s navedenom normom koja se odnosi na uzorke okruglog poprečnog presjeka. Uzorci za ispitivanje izrađeni su tokarenjem iz dostavljenih polimernih kompozitnih spona (slika 11-1). Slika 11-2 prikazuje dimenzije uzoraka za ispitivanje.



Slika 11-1 Uzorci za ispitivanje dobiveni iz polimernih kompozitnih spona ST200

⁷ Metalni materijali - Ispitivanje vlačne čvrstoće - 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi



Slika 11-2 Dimenzije uzorka za ispitivanje vlačne čvrstoće pri direktnom vlaklu

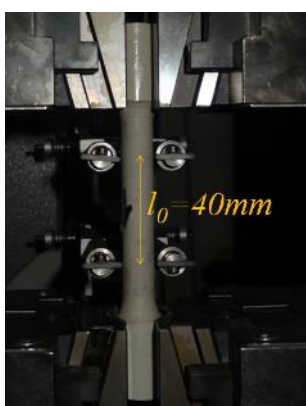
Navedeni postupak primijenjen je za ispitivanje zbog toga što se prema nizu normi za ispitivanje polimera HRN EN ISO 527:2012⁸, nije moglo udovoljiti zahtjevima po pitanju oblika uzoraka za ispitivanje. Prema normi HRN EN ISO 527 predviđa se da se uzorci za ispitivanje izrađuju u kalupima prilikom proizvodnje. Slika 11-3 prikazuje tijek ispitivanja vlačne čvrstoće.



a) uzorci prije ispitivanja



b) prihvat uzorka u uređaju za ispitivanje

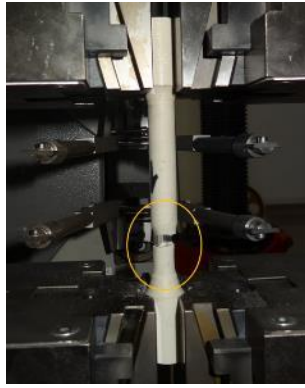


c) duljina l_0 na kojoj su mjerene deformacije



d) formiranje suženja na uzorku

⁸ Plastika - Određivanje rasteznih svojstava



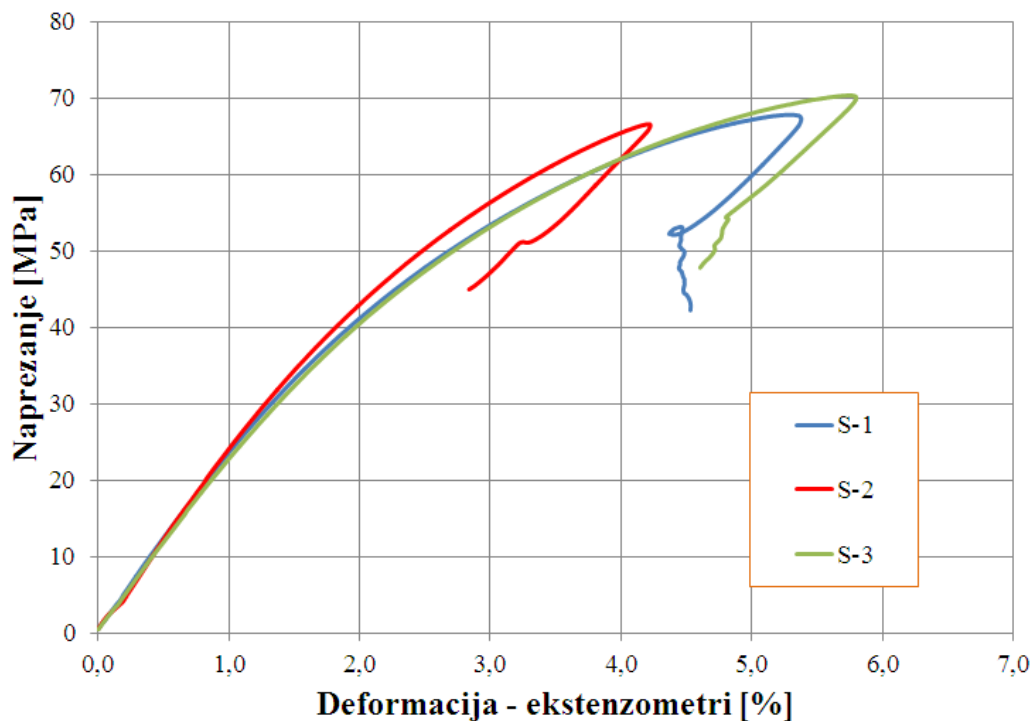
e) lom uzorka na mjestu suženja



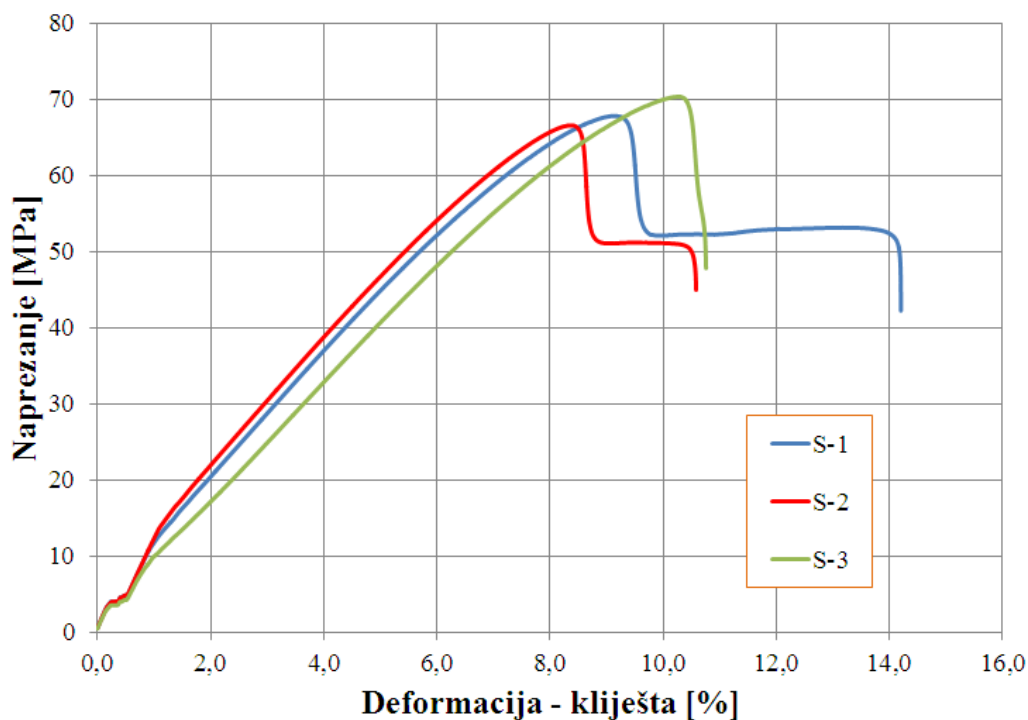
f) uzorci nakon ispitivanja

Slika 11-3 Tijek ispitivanja vlačne čvrstoće polimernih kompozitnih spona direktnim vlakom

Sva tri ispitana uzorka pokazala su vrlo slično ponašanje pod opterećenjem. Slika 11-4 prikazuje radne dijagrame polimernih kompozitnih spona uslijed ispitivanja vlačne čvrstoće. Suženje na sva tri ispitana uzorka nastalo je izvan područja na kojem su mjerene deformacije uzorka. Na slici 11-5 prikazani su radni dijagrami polimernih kompozitnih spona koristeći podatke o razmaku čeljusti kojima su prihvaćeni uzorci (*grip-to-grip separation*).



Slika 11-4 Radni dijagrami uzoraka polimera



Slika 11-5 Radni dijagrami uzoraka obzirom na udaljenost čeljusti kidalice

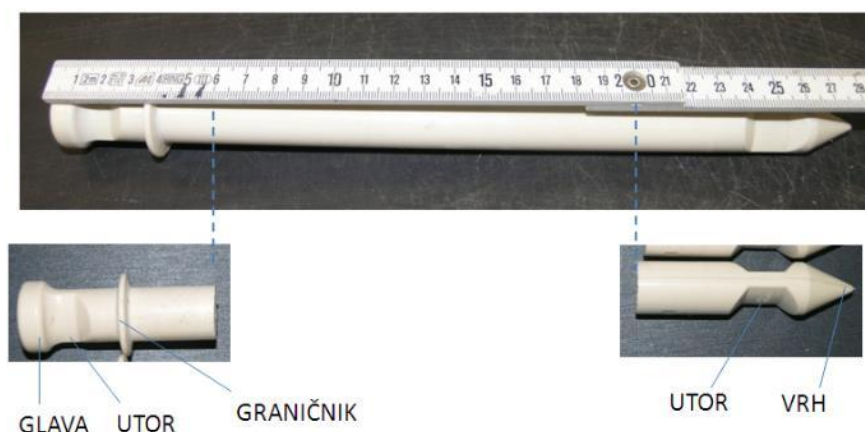
Tablica 11-1 prikazuje dobivene čvrstoće uzoraka. Rasipanje rezultata ispitivanja predočeno je koeficijentom varijacije koji iznosi 3%.

Tablica 11-1 Čvrstoće polimera dobivene ispitivanjem direktnim vlakom

Uzorak	Promjer [mm]	Najveće naprežanje [MPa]	Srednja vrijednost [MPa]	Standardna devijacija [MPa]	Koeficijent varijacije [%]
S-1	12,09	67,8	68,2	1,9	3
S-1	12,06	66,5			
S-3	12,18	70,3			

11.2. ISPITIVANJE NA ODREZ POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA

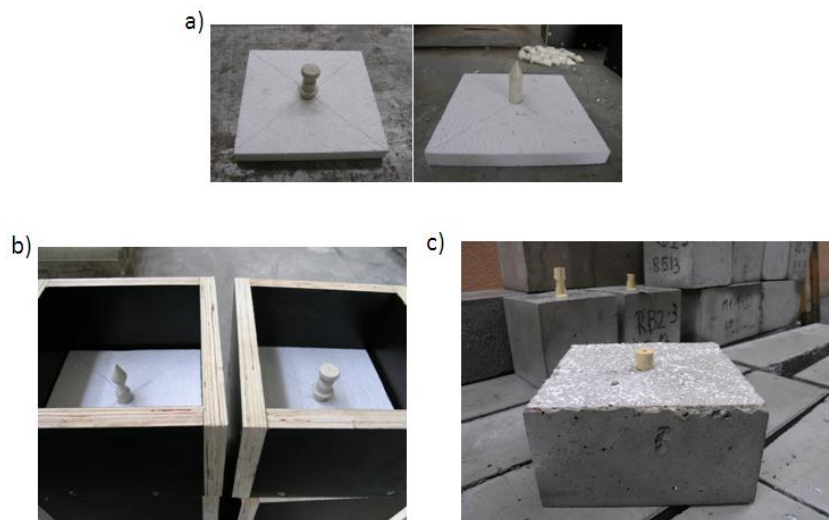
Ispitivanje na odrez provedeno je na uzorcima izrađenim iz već definiranih polimernih kompozitnih spona. Slika 11-6 prikazuje oblik uzoraka. Iz svake polimerne kompozitne spona dobivena su dva uzorka za ispitivanje. Na slici 11-6 su navedeni i nazivi pojedinih dijelova polimernih kompozitnih spona. Budući da su uzorci drugačijih geometrijskih karakteristika (dio s glavom i dio s vrhom) provedena su ispitivanja na oba dijela zbog mogućeg različitog ponašanja prilikom opterećivanja.



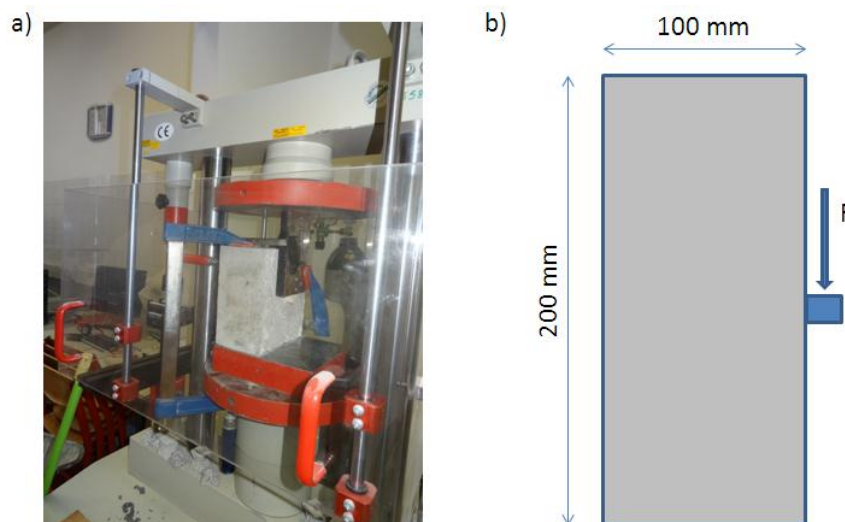
Slika 11-6 Uzorci za ispitivanje na odrez

Ispitivanje je provedeno na uzorcima ugrađenim u beton. Izrađeno je ukupno 12 uzoraka. Šest uzoraka ugrađeno je u beton izrađen s agregatom od recikliranog betona i šest ih je ugrađeno u beton izrađen s agregatom od reciklirane opeke. Sastavi betona navedeni su u tablicama 10-2 i 10-3.

Od šest uzoraka za svaku vrstu betona po tri su izrađena s ugrađenim vrhom polimerne kompozitne spona, a tri s ugrađenom glavom polimerne kompozitne spona u beton. Slika 11-7 prikazuje način izrade uzoraka za ispitivanje. Dimenzije elemenata betona u koji su ugrađeni uzorci su 20 x 20 x 10 cm. Na slici 11-8 prikazano je ispitivanje i shema opterećenja uzoraka. Oznake, g i v označavaju je li u beton ugrađen dio uzorka s glavom ili vrhom.



Slika 11-7 Izrada uzoraka za ispitivanje na odrez: a) postavljanje uzoraka na ploču EPS-a; b) postavljanje uzoraka u kalup; c) uzorak nakon vađenja iz kalupa i uklanjanja EPS-a



Slika 11-8 a) ispitivanje na odrez; b) shema opterećivanja uzorka

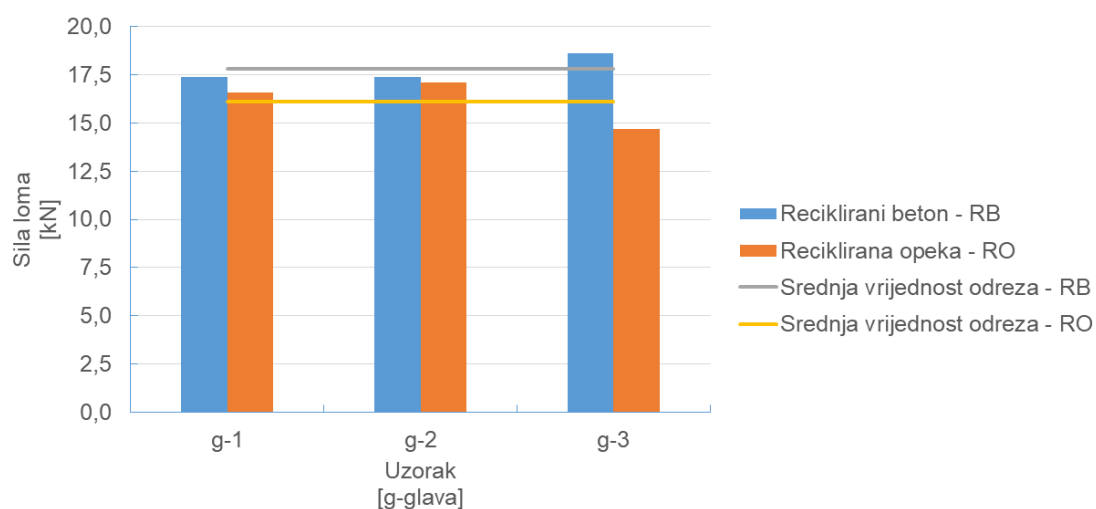
U tablicama 11-2 i 11-3 su dani rezultati ispitivanja iz kojih možemo vidjeti da je prosječna nosivost polimernih kompozitnih spona ugrađenih u beton s recikliranim betonom 18,00 kN, dok onih ugrađenih u beton s recikliranom opekam 16,00 kN.

Tablica 11-2 Rezultati ispitivanja na odrez za uzorke ugrađene u beton s recikliranim betonom

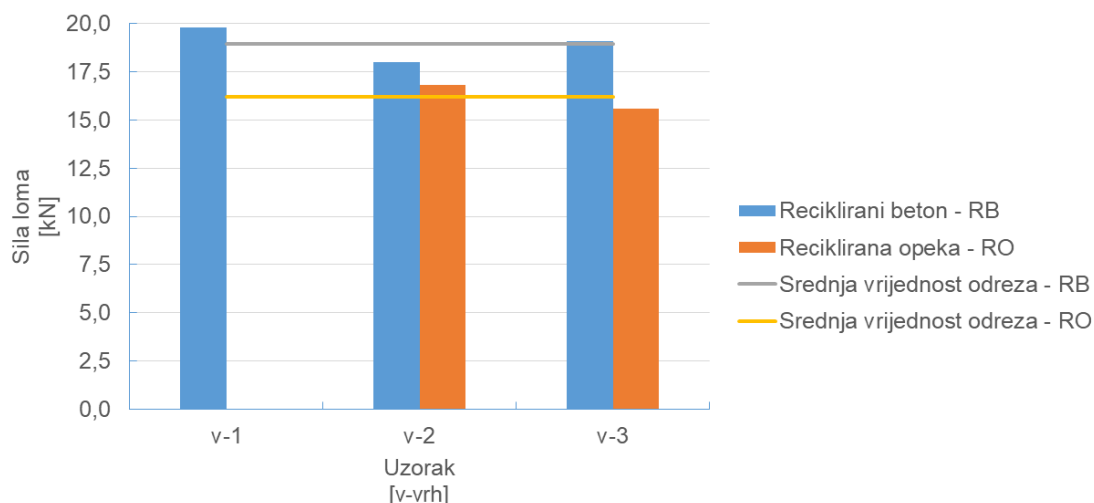
Uzorak	Sila loma [kN]	Način loma	Srednja sila loma [kN]
RB-g-1	17,4	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	17,8
RB-g-2	17,4	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	
RB-g-3	18,6	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	
RB-v-1	19,8	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	19,0
RB-v-2	18,0	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	
RB-v-3	19,1	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	

Tablica 11-3 Rezultati ispitivanja na odrez za uzorke ugrađene u beton s recikliranom opekom

Uzorak	Sila loma [kN]	Način loma	Srednja sila loma [kN]
RO-g-1	16,6	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	16,1
RO-g-2	17,1	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	
RO-g-3	14,7	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	
RO-v-1	-	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	16,2
RO-v-2	16,8	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	
RO-v-3	15,6	lom po polimernoj kompozitnoj sponi	



Slika 11-9 Usporedba rezultata ispitivanja glave na odrez za uzorke ugrađene u beton



Slika 11-10 Usporedba rezultata ispitivanja vrha na odrez za uzorke ugrađene u beton

Slika 11-9 i slika 11-10 prikazuju usporedbu rezultata prilikom ispitivanja, na osnovu čega se može zaključiti da je otpornost uzoraka na odrez manja kod betona s recikliranom opekom, za razliku od betona s recikliranim betonom. Na slikama je vidljiva srednja vrijednost odreza ispitivanih glava, g , ili vrhova, v , spona ugrađenih u beton. Kod svih ispitanih uzoraka do loma je došlo zbog popuštanja polimerne kompozitne spone. Izgled uzoraka nakon ispitivanja prikazan je na slici 11-11. Na betonu u okolini spone nisu uočene pukotine niti kod jednog ispitanog uzorka.



Slika 11-11 Oštećenja nastala zakazivanjem tijekom ispitivanja

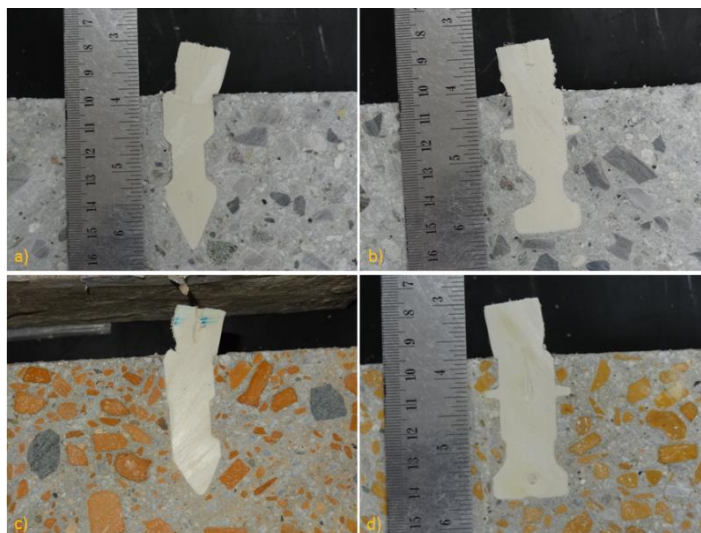
Nakon ispitivanja uzorci su ispiljeni radi analize kvalitete ugradnje polimernih kompozitnih spona u beton. Ispiljeni uzorci prikazani su na slici 11-12, na kojoj su prikazana četiri karakteristična slučaja:

- beton s recikliranim betonom i ugrađenim vrhom polimerne kompozitne spone
- beton s recikliranim betonom i ugrađenom glavom polimerne kompozitne spone

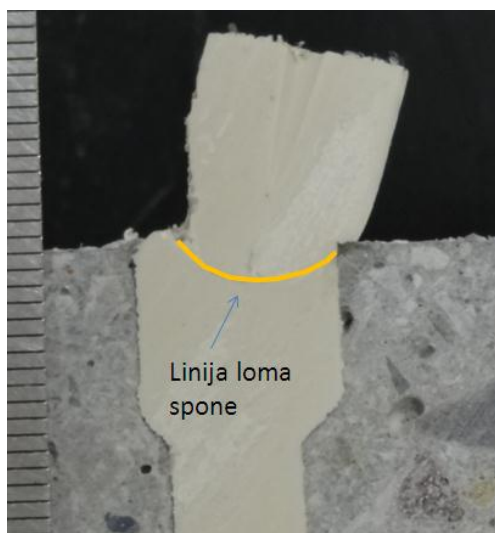
c) beton s recikliranom opekom i ugrađenim vrhom polimerne kompozitne spona

d) beton s recikliranom opekom i ugrađenom glavom polimerne kompozitne spona

Slika 11-12 prikazuje da je beton dobro ugrađen oko navedenih spona, odnosno na kontaktu polimerne kompozitne spona i betona nema vidljivih šupljina. Prionljivost između betona i spona je vrlo mala i veza se ostvaruje isključivo njenim oblikom, odnosno ispunjavanjem utora. Na slici 11-13 je vidljiva linija loma uzorka nakon ispitivanja na odrez.



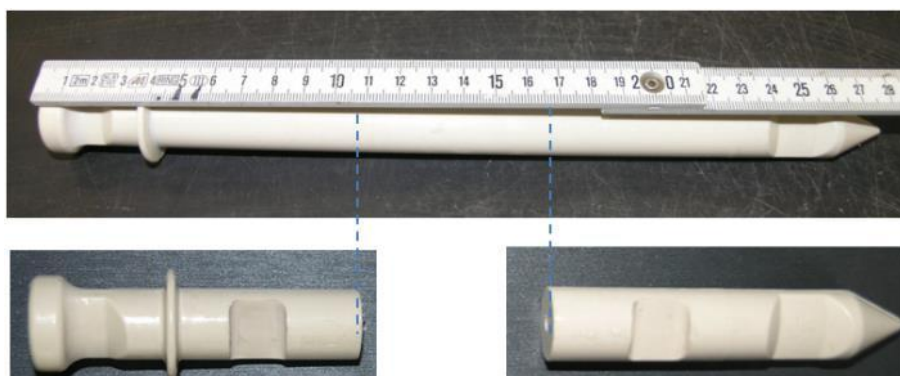
Slika 11-12 Ispiljeni uzorci nakon ispitivanja na odrez ugrađeni u reciklirani beton ili u recikliranu opeku



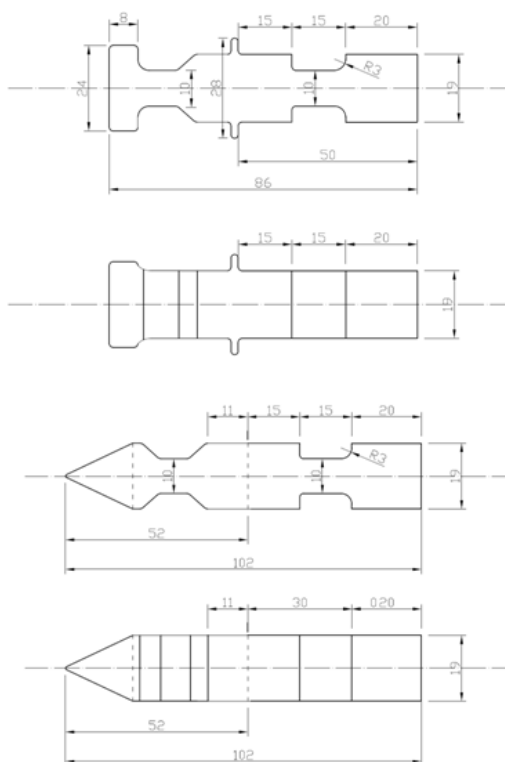
Slika 11-13 Linija loma polimerne kompozitne spona nastala tijekom ispitivanja

11.3. ISPITIVANJE SILE ČUPANJA POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA

Ispitivanje sile potrebne za čupanje polimerne kompozitne spona iz betona provedeno je s uzorcima izrađenim iz spona. Slika 11-14 prikazuje oblik ispitivanih uzoraka. Iz svake polimerne kompozitne spona dobivena su dva uzorka za ispitivanje. Dimenzije uzoraka prikazane su na slici 11-15. Budući da su uzorci drugačijih geometrijskih karakteristika (dio s glavom i dio s vrhom) provedena su ispitivanja na oba dijela zbog mogućeg različitog ponašanja prilikom opterećivanja.



Slika 11-14 Uzorci za ispitivanje čupanjem



Slika 11-15 Projektirane dimenzije uzoraka za ispitivanje čupanjem

Ispitivanje je provedeno na uzorcima ugrađenim u beton. Izrađeno je ukupno 12 uzoraka. Šest uzoraka ugrađeno je u beton izrađen s agregatom od recikliranog betona i šest uzoraka ugrađeno je u beton izrađen s agregatom od reciklirane opeke. Sastavi betona navedeni su u tablicama 10-2 i 10-3.

Od šest uzoraka za svaku vrstu betona tri su izrađena s ugrađenim vrhom i tri s ugrađenom glavom polimerne kompozitne spone u beton. Slika 11-16 prikazuje izradu uzoraka dimenzija betona 150 x 150 x 150 mm.

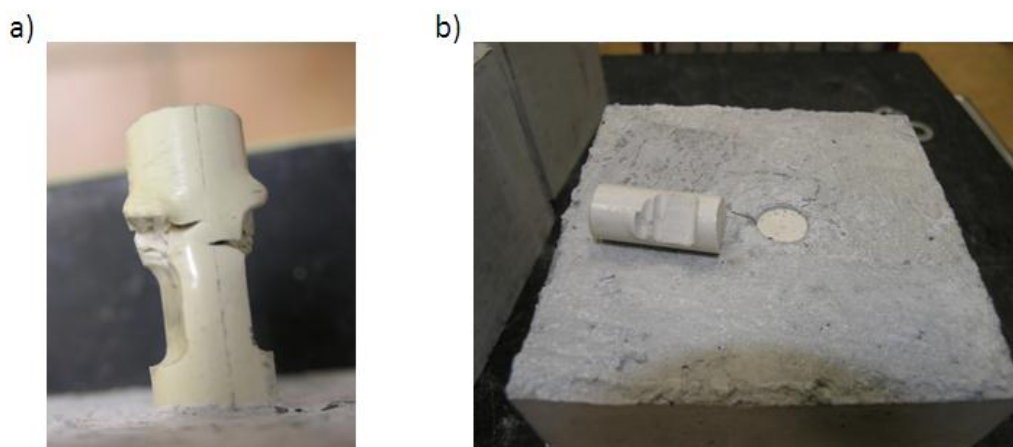
Čupanje uzoraka iz betona provedeno je hidrauličnim uređajem tvrtke Meyco, a prikazan je na slici 11-17. Prilikom ispitivanja sila čupanja je jednoliko povećavana sve do zakazivanja. Na betonu nisu uočena bitna oštećenja osim blagog ljuštenja površine oko polimernu kompozitnu sponu. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablicama 11-4 i 11-5.



Slika 11-16 Izrada uzoraka za ispitivanje čupanjem



Slika 11-17 Ispitivanje čupanjem



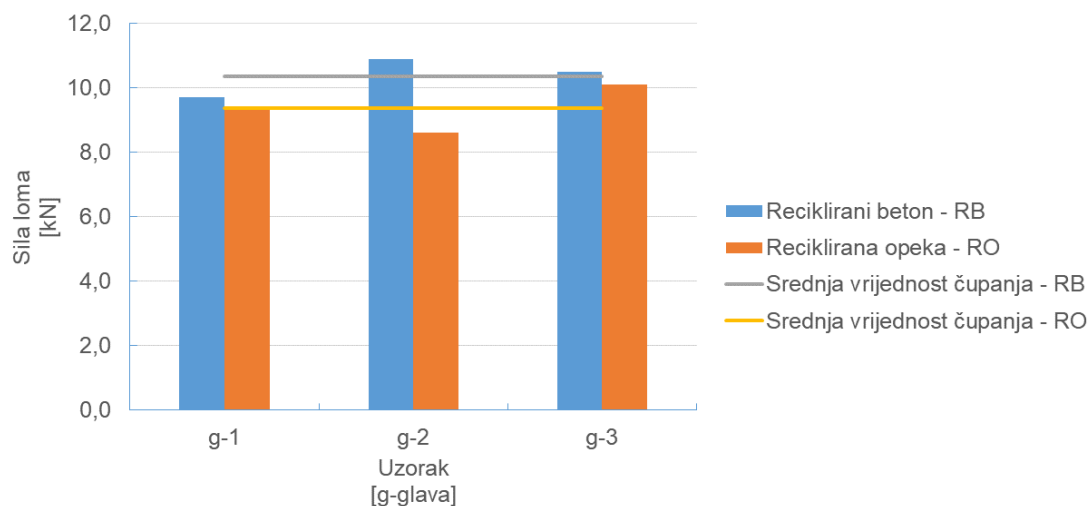
Slika 11-18 Tipični oblici sloma prilikom ispitivanja čupanjem: a) plastične deformacije ; b) kruti lom uz površinu

Tablica 11-4 Rezultati ispitivanja čupanjem za uzorke ugrađene u beton s recikliranim betonom

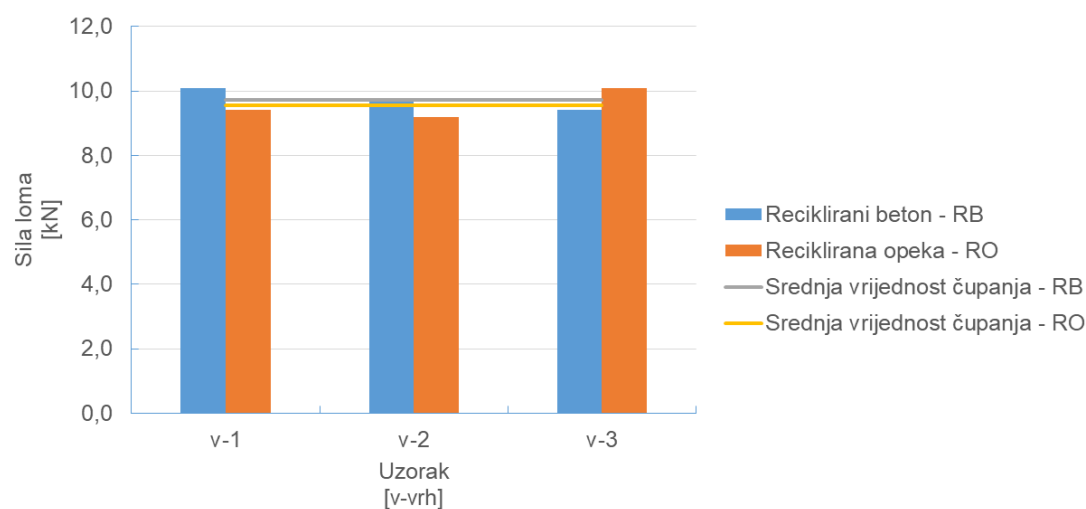
Uzorak	Pritisak [bar]	Sila loma [kN]	Srednja sila loma [kN]
RB-g-1	58	9,7	10,4
RB-g-2	64	10,9	
RB-g-3	62	10,5	
RB-v-1	60	10,1	9,7
RB-v-2	58	9,7	
RB-v-3	56	9,4	

Tablica 11-5 Rezultati ispitivanja čupanjem za uzorke ugrađene u beton s recikliranom opekom

Uzorak	Pritisak [bar]	Sila loma [kN]	Srednja sila loma [kN]
RO-g-1	56	9,4	9,4
RO-g-2	52	8,6	
RO-g-3	60	10,1	
RO-v-1	56	9,4	9,6
RO-v-2	55	9,2	
RO-v-3	60	10,1	



Slika 11-19 Usporedba rezultata ispitivanja glava čupanjem za uzorke ugrađene u beton

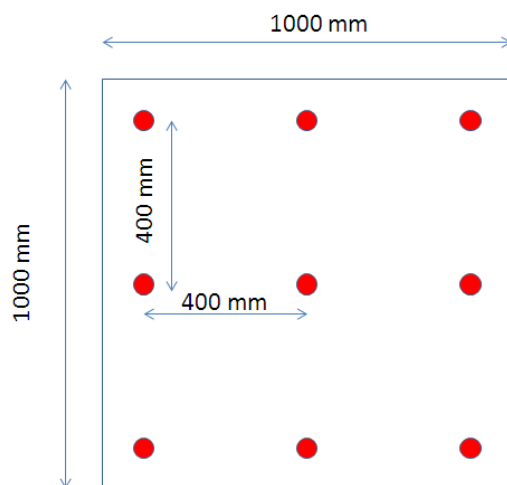


Slika 11-20 Usporedba rezultata ispitivanja vrha čupanjem za uzorke ugrađene u beton

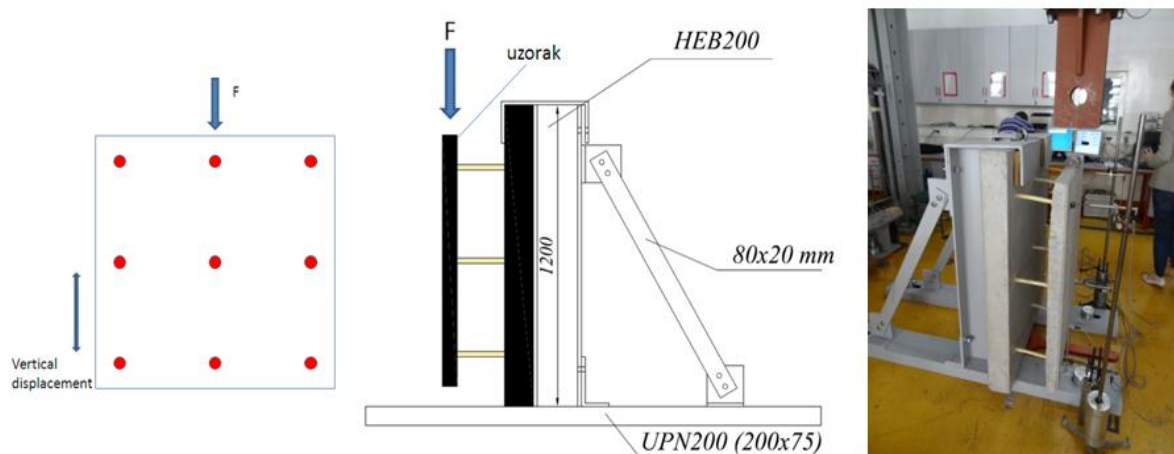
Iz rezultata ispitivanja može se uočiti da je prosječna nosivost polimernih kompozitnih spona ugrađenih u beton s recikliranim betonom 10,00 kN, dok onih ugrađenih u beton s recikliranom opekom 9,00 kN. Dobivene vrijednosti su vrlo blizu deklariranim od proizvođača, koja iznosi 10,23 kN (tablica 10-1). Promotre li slike 11-19 i 11-20 može se vidjeti da su vrijednosti čvrstoće prilikom ispitivanja polimernih kompozitnih spona na čupanje poprilično jednake onima ugrađenima u beton s recikliranim betonom ili opekom. Ipak, uočavamo da je neznatno veća vrijednost čvrstoće kod spona ugrađenih u beton s recikliranim betonom. Kod svih ispitanih uzoraka došlo je do sloma spona. Dva tipična oblika loma prikazana su na slici 11-18. Može se zaključiti da je nosivost spoja betona i polimernih kompozitnih spona veća od nosivosti samih spona.

11.4. ISPITIVANJE NOSIVOSTI ZIDNOG PANELA IZRAĐENOG OD POLIMERNIH KOMPOZITNIH SPONA

Za potrebe istraživanja izvedbe ECO-SANDWICH® zidnog panela s polimernim kompozitnim sponama izrađena su 3 uzorka na kojima su provedena ispitivanja. Geometrijske karakteristike kao i tijek izvedbe zidnog panela opisani su u poglavlju 10. Raspored spona na vanjskom sloju betona, prikazan je na slici 11-21. Za potrebe ispitivanja izrađen je sustav za pridržajne uzorka tijekom ispitivanja (slika 11-22). Sustav za pridržanje projektiran je i izveden tako da spriječi pomake nosivog sloja betona, a da pri tome omogući deformiranje vanjskog sloja betona.



Slika 11-21 Raspored polimernih kompozitnih spona u uzorcima



Slika 11-22 Shema sustava za pridržanje tijekom ispitivanja i slika uzorka prije opterećivanja

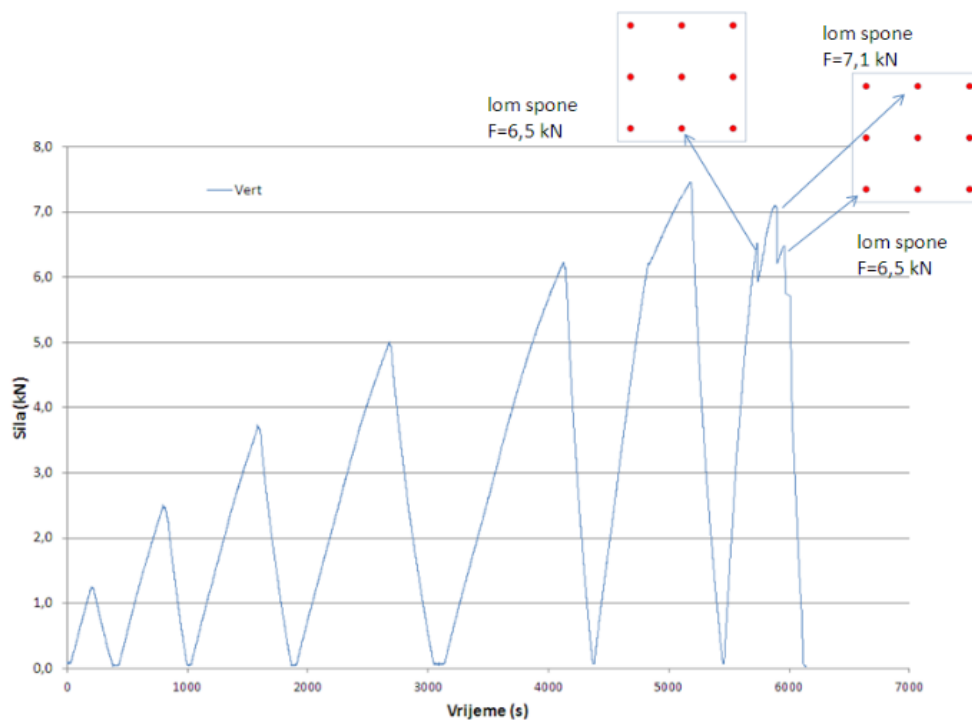
Uzorci su ispitani primjenom dva različita načina opterećivanja uzoraka. Jedan uzorak ispitan je primjenom dinamičkog opterećenja, a dva uzorka ispitana su pri oscilirajućem opterećenju. Dinamičkim ispitivanjem utvrđena je nosivost elementa, a ispitivanje s oscilirajućim opterećenjem je provedeno kako bi se dobilo više informacija o ponašanju polimernih kompozitnih spona, betona s recikliranim agregatom i cijelog sustava pri dinamičkim uvjetima opterećenja.

11.4.1. ISPITIVANJE DINAMIČKIM OPTEREĆENJEM ZIDNOG PANELA

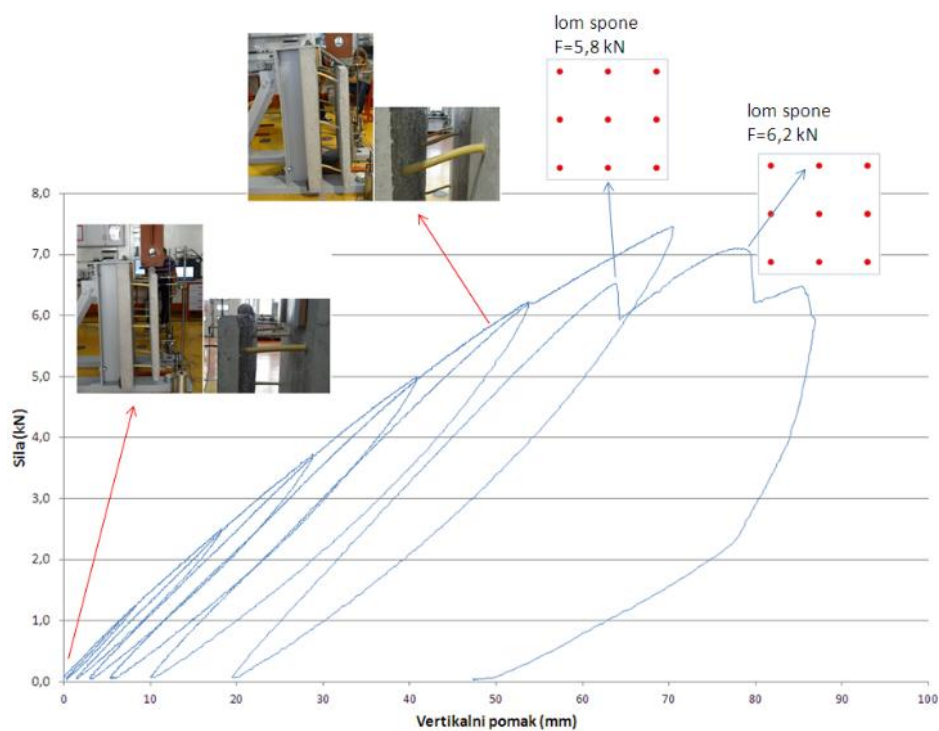
Dinamičkom opterećivanju podvrgnut je uzorak u kojem je vanjski sloj izrađen od betona u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom. Na uzorku su mjereni horizontalni i vertikalni pomaci tijekom ispitivanja. Nanošenje opterećenja je provedeno u nekoliko koraka s postepenim povećavanjem razine opterećenja u svakom sljedećem koraku. Slika 11-23 prikazuje tijek nanošenja opterećenja. Na dijagramu su označene točke u kojima je došlo do sloma polimernih kompozitnih spona. Kod slike 11-24 prikazan je dijagram zavisnosti sile i vertikalnog pomaka vanjskog sloja panela.

Tijekom ispitivanja nije uočena pojava pukotina u betonu. Do popuštanja elementa došlo je zbog sloma polimernih kompozitnih spona, a lom je nastao neposredno uz nosivi sloj betona. Prvi slom nastao je pri opterećenju od 6,5 kN, drugi pri 7,1 kN, a treći pri 6,5 kN.

Masa vanjskog sloja izrađenog od betona u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom (oznaka mješavine RB50) je približno 140 kg, prema tome, težina vanjskog sloja iznosi 1,37 kN. Tu silu polimerne kompozitne spona prenesu prije početka opterećenja, odnosno od trenutka kada je element postavljen za ispitivanje.



Slika 11-23 Tijek ispitivanja uzorka dinamičkim opterećenjem



Slika 11-24 Ovisnost sile i pomaka vanjskog sloja u odnosu na unutarnji pri kvazistatičkom opterećivanju

Ukupna sila koju polimerne kompozitne spone prenose u trenutku kada je došlo do loma prve spona je 7,87 kN što je 5,7 puta veće od vlastite težine vanjskog sloja. Do loma druge spona dolazi pri ukupnoj sili od 8,47 kN što je 6,2 puta veće od vlastite težine vanjskog sloja.

Pomak vanjskog elementa, u odnosu na početni položaj, nastao pri djelovanju samo vlastite težine vanjskog elementa, u trenutku pucanja prve spona pri sili od 6,5 kN iznosi 64 mm. Nakon sloma polimerne kompozitne spona pri sili od 6,5 kN povećava se vertikalni pomak vanjskog sloja, ali nosivost elementa se ne smanjuje budući da do sljedećih lomova polimernih kompozitnih spona dolazi kod sila od 7,1 kN i 6,5 kN. To pokazuje da se, u slučaju loma pojedine polimerne kompozitne spona, opterećenje preraspodjeljuje na spona, što cijelom sustavu omogućava duktilno ponašanje. Nakon prestanka djelovanja opterećenja vanjski sloj se vraća prema početnom položaju.

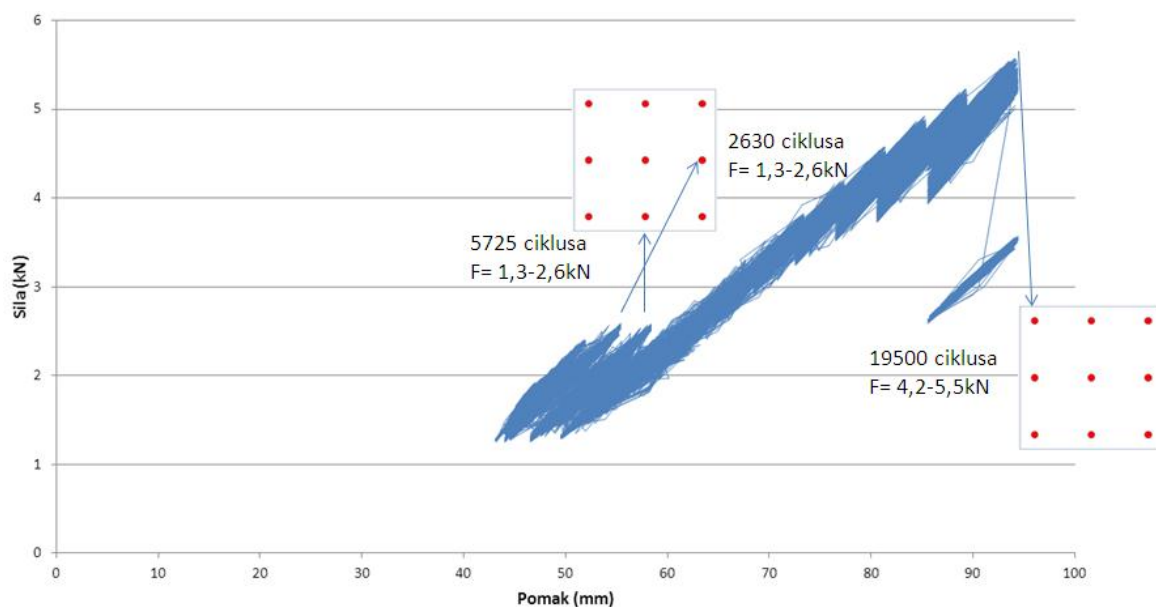
Slom pojedinih spona tijekom opterećivanja može biti posljedica lošije kvalitete, tj. manje čvrstoće slomljenih spona u odnosu na ostale ili nejednolikog opterećenja spona koje nastaje kao posljedica geometrijskih odstupanja pri izradi elemenata.

11.4.2. ISPITIVANJE PRI CIKLIČKOM OPTEREĆENJU ZIDNOG PANELA

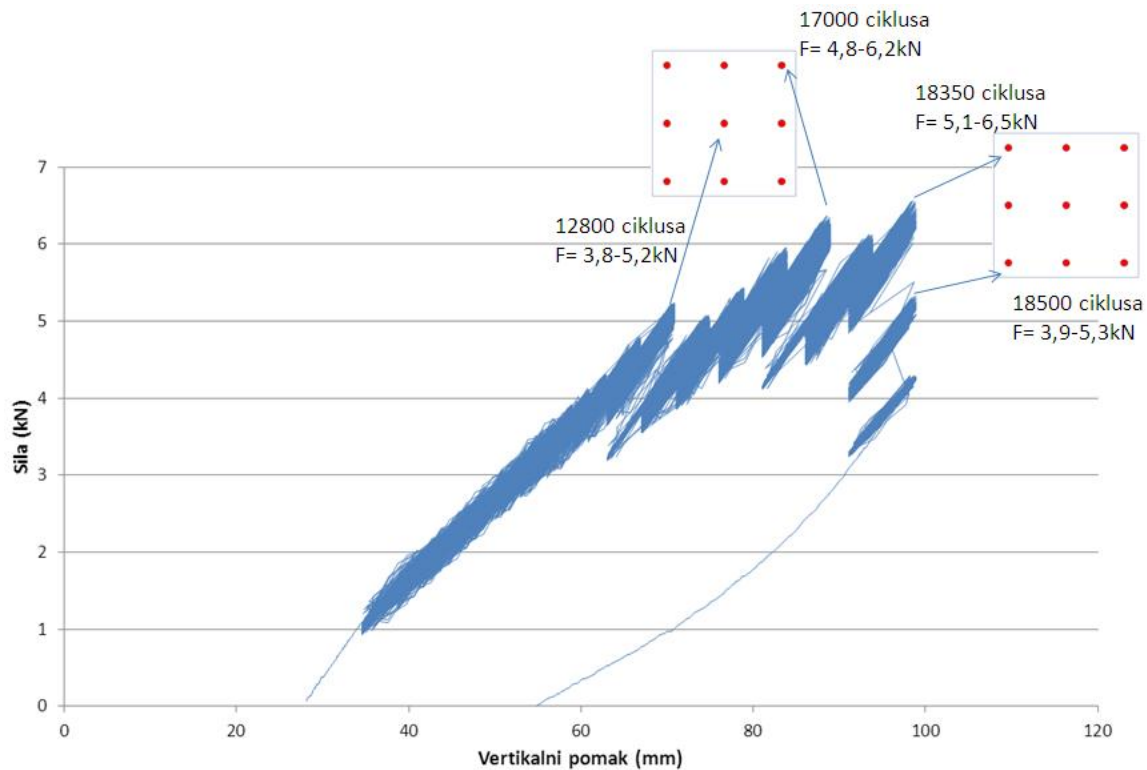
Ispitivanje je provedeno uz sljedeće uvjete:

- Frekvencija osciliranja od 2 Hz
- Amplituda pomaka od 4 - 4,5 mm je odabrana tako da promjena sile kojom se opterećuje uzorak bude u granicama od jedne vlastite težine vanjskog sloja. Vlastita težina vanjskog sloja elementa izrađenog s betonom oznake RO50 je približno 1,25 kN, a elementa izrađenog s betonom oznake RB50 1,37 kN.
- Opterećenje se povećava svakih 1000 ciklusa povećanjem pomaka vanjskog elementa u odnosu na unutarnji za 2 - 4 mm

Rezultati ispitivanja pri cikličkom opterećivanju prikazani su na slikama 11-25 i 11-26. Na spomenutim slikama je naznačen broj ciklusa pri kojem je došlo do sloma polimernih kompozitnih spona u elementu i redoslijed njihova otkazivanja. Slika 11-25 prikazuje raspon opterećenja unutar kojeg su provođeni ciklusi opterećivanja.



Slika 11-25 Zavisnost pomaka vanjskog panela u odnosu na unutarnji i opterećenja pri cikličkom ispitivanju za uzorak izrađen s betonom od reciklirane opeke



Slika 11-26 Zavisnost pomaka vanjskog panela u odnosu na unutarnji i opterećenja pri cikličkom ispitivanju za uzorak izrađen s betonom u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom

Slika 11-25 prikazuje rezultate ispitivanja uzorka u kojem je vanjski sloj izrađen od betona s recikliranom opekom. Lom prve polimerne kompozitne spona nastupa u rasponu opterećenja od 1,30 - 2,60 kN pri 2630 ciklusa, a lom druge spona pri istom rasponu opterećenja pri 5725 ciklusa. Nakon loma prve dvije spona opterećenje raste do raspona od 4,20 - 5,50 kN gdje nakon 19500 ciklusa dolazi do loma treće spona.

Pretpostavlja se da je razlog loma prvih dviju spona pri relativno malom opterećenju uzrokovan nejednolikim preuzimanjem opterećenja među polimernim kompozitnim sponama nastalim kao posljedica geometrijskih odstupanja pri izradi elemenata.

Slika 11-26 prikazuje rezultate ispitivanja uzorka u kojem je vanjski sloj izrađen od betona s recikliranim betonom. Lom prve spona nastao je u rasponu opterećenja 3,80 - 5,20 kN pri 12800 ciklusa, lom druge spona u rasponu 4,80 - 6,20 kN pri 17000, lom treće spona u rasponu 5,10 - 6,50 kN pri 18350 ciklusa i četvrte u rasponu 3,90 - 5,30 kN pri 18500 ciklusa.

Na temelju provedenog ispitivanja uočeno je da se sustav ponaša duktilno i pri promjenjivom opterećenju. Prilikom ispitivanja nisu uočena oštećenja betona na mjestima oko polimernih kompozitnih spona.

12. NUMERIČKI MODEL

Razvojem „snažnijih“ računala kao i programskih paketa, inženjeri (znanstvenici, istraživači i ostali) imaju veće mogućnosti za rješavanje različitih zadataka i problema. Uz sofisticiranije programe i jednostavniji grafički prikaz rezultata, postoje veće mogućnosti obrade znatno više podataka nego prije. Osnova većine programa je metoda konačnih elemenata. Metodom konačnih elemenata se realno tijelo diskretizira na konačni broj elemenata jednostavnog oblika. Elementi su međusobno spojeni u čvorovima ili rubom elementa. Nepoznanice problema su pomaci čvorova, a pomaci unutar elementa se određuju interpolacijom. Iz određenih pomaka određuju se ostale veličine (sile, naprezanja,...) [40].

Kako bi se usporedili rezultati dobiveni eksperimentalnim istraživanjem korišten je programski paket CSI SAP 2000 v.20.2.0. Izabran je zbog mogućnosti korištenja uz valjanu licencu u sklopu Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu te 3D modeliranja kao i ostalih parametara.

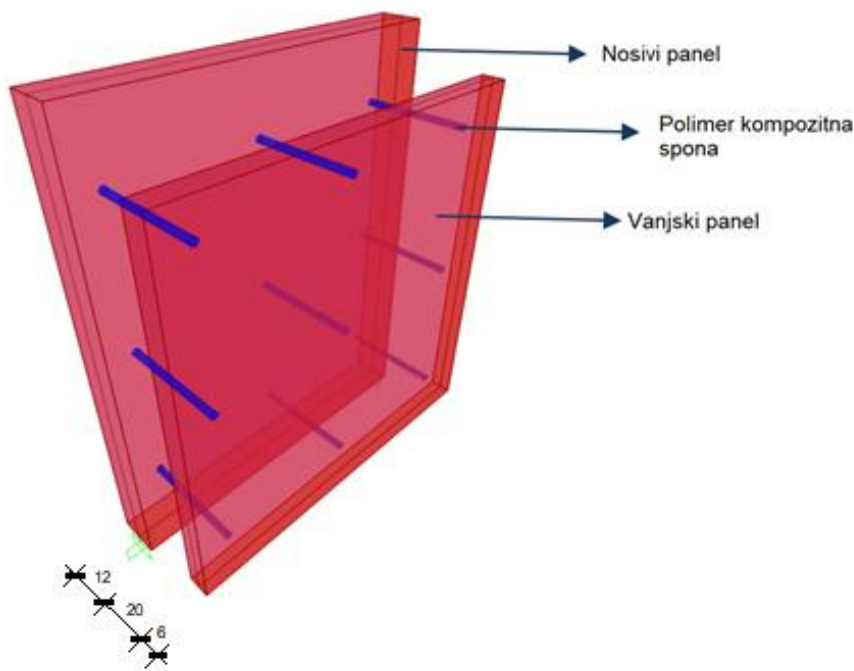
Cilj modela je uz odgovarajuću geometriju ispitivanih zidnih panela, rubnih uvjeta te poznatih karakteristika materijala, dobiti odgovarajuće vrijednosti pomaka. Kod izrade modela pristupilo se linearnom i nelinearnom proračunu zidnog panela. U nastavku su dani svi parametri važni za definiranje modela. Geometrijske karakteristike modela su definirane prema poznatim svojstvima materijala, dimenzijama elemenata i početnim uvjetima koji su bili tijekom eksperimentalnog istraživanja. Kod eksperimentalnog istraživanja, u slučaju polimernih kompozitnih spona, došlo je do početnog progiba vanjskog panela uslijed vlastite težine elementa, u iznosu od 10,00 mm. Početni progib vanjskog elementa uvelike može predstavljati problem prilikom montaže i korištenja ECO-SANDWICH® zidnih panela te ga je potrebno prijevremeno otkloniti. Zbog tih razloga izrađeni su numerički modeli kod kojih će se promatrati nekoliko varijantnih rješenja za sprječavanje prekomjernih progiba i funkcionalnosti elementa.

Izvršena je statička analiza, koja uključuje opterećenje uzrokovano vlastitom težinom vanjskog zidnog panela, dinamička analiza prema načinu opterećenja iz eksperimentalnog istraživanja (prema podacima iz poglavlja 11.4.1) te su izrađene varijante ojačanja zidnog panela prema pretpostavljenoj lokaciji ugradnje. Kod varijanti ojačanja biti će dana usporedba rezultata dobivenih modelom bez ojačanja, gdje će se promatrati vertikalni progibi i pomaci u X smjeru. Analizirat će se utjecaj dijagonalnih ojačanja u vertikalnom smjeru u kombinaciji s horizontalnim dijagonalama postavljenim po panelu.

12.1. ULAZNI PARAMETRI

Numerički model ECO-SANDWICH® zidnog panela se sastoji od vanjskog i nosivog sloja, međusobno povezanih polimernim kompozitnim sponama (slika 12-1). Dimenzije vanjskog i nosivog sloja, podaci sastava betona, međusobni razmak i broj spona su definirani prema poznatim podacima iz eksperimentalnog istraživanja (poglavlje 10).

Mreža konačnih elemenata modela je podijeljena na plošne elemente jednakih dimenzija. Veličina konačnih elemenata u ravnini vanjskog i nosivog sloja je određena prema ranije definiranoj mreži spajanja polimernih kompozitnih spona i betona. Važno je ispravno podijeliti i napraviti raster mreže konačnih elementa da bi se jednostavnije mogle pratiti vrijednosti dobivene eksperimentalnim istraživanjem i onima dobivenim u numeričkom modelu. Kod ovog modela je mreža podijeljena na jednake plošne konačne elemente dimenzija 10 x 10 cm.



Slika 12-1 3D prikaz modela (Extrude View)

U tablicama 12-1 i 12-2 se mogu vidjeti unesene karakteristike nosivog panela i vanjskog panela, te polimernih kompozitnih spona za linearni i nelinearni proračun.

Tablica 12-1 Mehaničke karakteristike nosivog i vanjskog panela

Mehaničke karakteristike nosivog i vanjskog panela	
Težina po jedinici volumena [kN/m ³]	21,5
Modul elastičnosti [MPa]	33800
Poissonov koeficijent	0,2

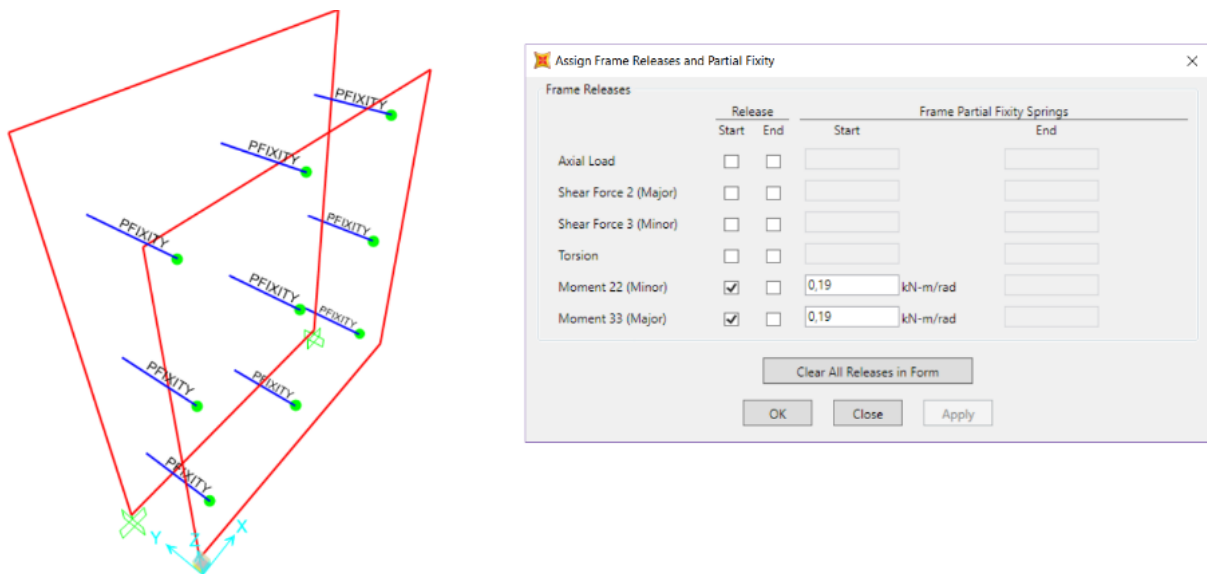
Tablica 12-2 Mehaničke karakteristike polimer kompozitnih spona

Mehaničke karakteristike polimer kompozitnih spona	
Težina po jedinici volumena [kN/m ³]	1,25
Modul elastičnosti [MPa]	12000
Poissonov koeficijent	0,2

Osim materijalnih karakteristika potrebno je definirati i rubne uvjete, kao što su načini oslanjanja na podlogu te način spajanja polimernih kompozitnih spona i betona.

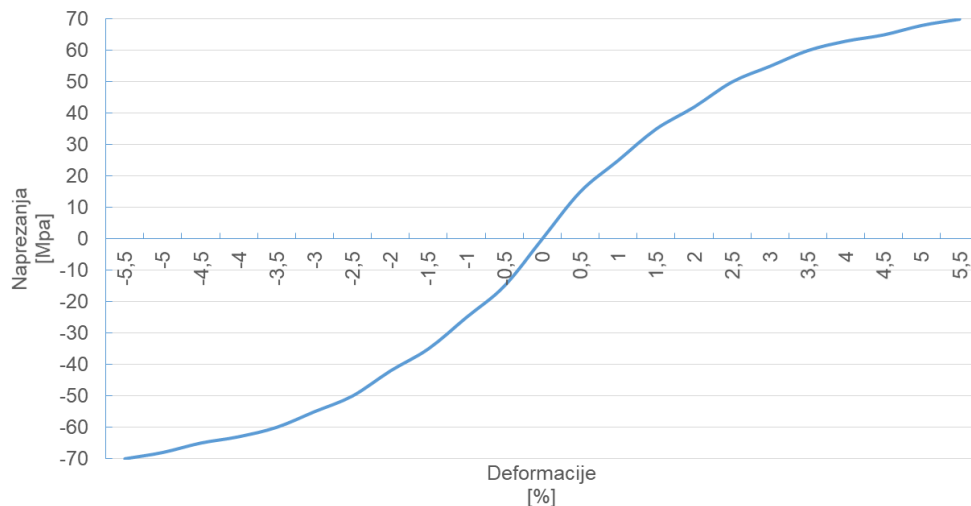
Kod nosivog panela ostvarena je upetost između podloge i elementa. Spoj je definiran kao upeti. U stvarnosti je on popustljiv, ali zbog vrlo male vrijednosti je zanemaren. Veza spona i vanjskog panela je popustljiva s ostvarenom rotacijskom krutošću. Zaključci su dobiveni iz nagiba tangente na deformacijsku liniju polimerne kompozitne spona opterećene težinom vanjskog panela (slika 10-3 b).

Ukupna vrijednost rotacijske krutosti za linearni proračun zidnog panela određena je iz poznatih vrijednosti težine vanjskog sloja, nagiba tangente na deformirani oblik spona te razmaka između vanjskog i nosivog sloja. Vrijednost rotacijske krutosti iznosi 0,19 kN m/rad za svaku polimer kompozitnu sponu. Na slici 12-2 se mogu vidjeti definirana svojstva spoja.



Slika 12-2 Definirani rubni uvjet spajanja spona i vanjskog panela za linearni proračun

Materijalna nelinearnost spona je definirana preko pojave plastičnog zgloba na promatranoj duljini i ona je važna zbog integracije deformacije i dobivanja progiba. Duljina kod koje dolazi do pojave plastičnog zgloba se može opaziti iz eksperimentalnog istraživanja i ona iznosi 2 cm od ruba nosivog i vanjskog panela. Poprečni presjek polimerne kompozitne spona je podijeljen na 32 jednaka dijela, gdje je u težište kružnih isječaka dodana materijalna karakteristika poznata iz dijagrama vlačne čvrstoće (slika 11-4), a u programskom paketu je nacrtana prema slici 12-3.



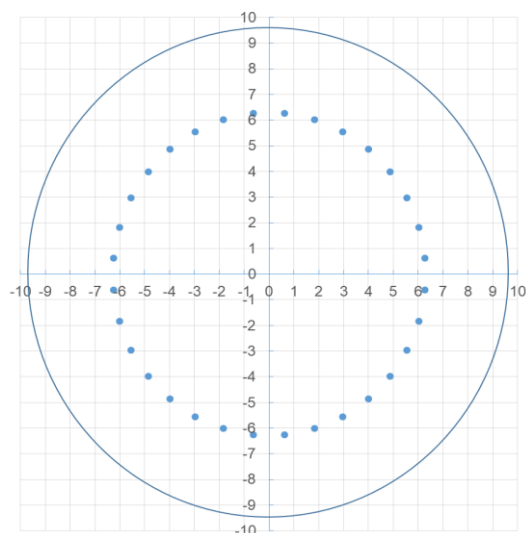
Slika 12-3 Prikaz definiranog dijagrama polimerne kompozitne spona

U tablici 12-3 su raspisane koordinate svakog od težišta kružnog isječka, a na slici 12-4 je prikazan raspored težišta.

Tablica 12-3 Vrijednosti koordinata težišta kružnih isječaka

Naziv vlakna	Koordinata X – os [mm]	Koordinata Y – os [mm]
1	6,26	0,62
2	6,02	1,83
3	5,55	2,97
4	4,86	3,99
5	3,99	4,86
6	2,97	5,55
7	1,83	6,02
8	0,62	6,26
9	-0,62	6,26
10	-1,83	6,02
11	-2,97	5,55
12	-3,99	4,86
13	-4,86	3,99
14	-5,55	2,97
15	-6,02	1,83
16	-6,26	0,62
17	-6,26	-0,62
18	-6,02	-1,83
19	-5,55	-2,97
20	-4,86	-3,99
21	-3,99	-4,86
22	-2,97	-5,55
23	-1,83	-6,02
24	-0,62	-6,26
25	0,62	-6,26
26	1,83	-6,02
27	2,97	-5,55
28	3,99	-4,86

29	4,86	-3,99
30	5,55	-2,97
31	6,02	-1,83
32	6,26	-0,62



Slika 12-4 Definirane materijalne karakteristike za svaki od kružnih isječaka

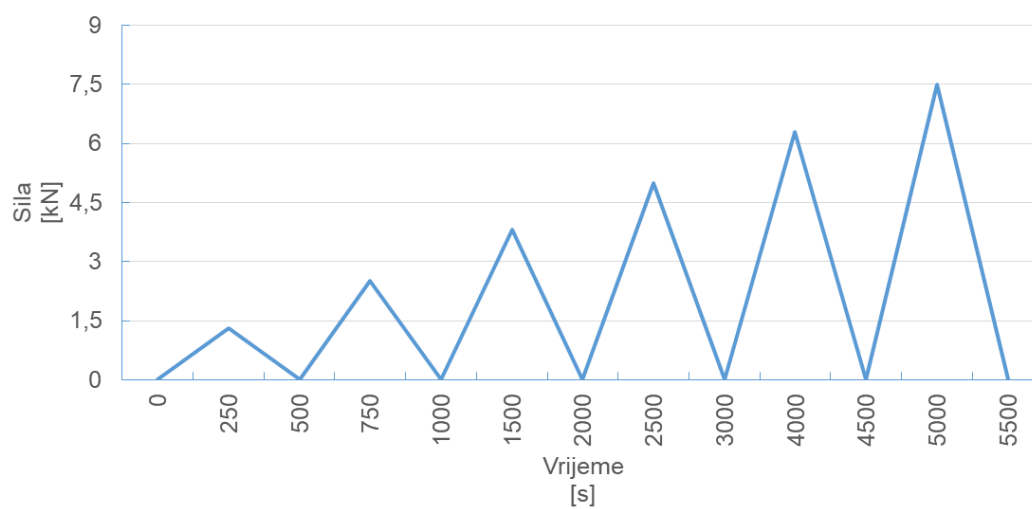
Prilikom izrade numeričkog modela, definirala se vremenska krivulja prema poznatim podacima iz eksperimentalnog istraživanja. Promatrat će se za svaki ekstrem vremenske krivulje maksimalni progib vanjskog panela zbog kontrole numeričkog modela te će njihove vrijednosti biti dane u nastavku. Slika 12-5 prikazuje definiranu vremensku krivulju. Promatra se period od 5500 sekundi prema podacima iz tablice 12-4

Tablica 12-4.

Tablica 12-4 Vrijednosti sile za definiranu vremensku krivulju za dinamičko opterećenje

Vrijeme [s]	Vrijednost sile [kN]
0	0,00
250	1,30
500	0,00
750	2,50
1000	0,00
1500	3,80

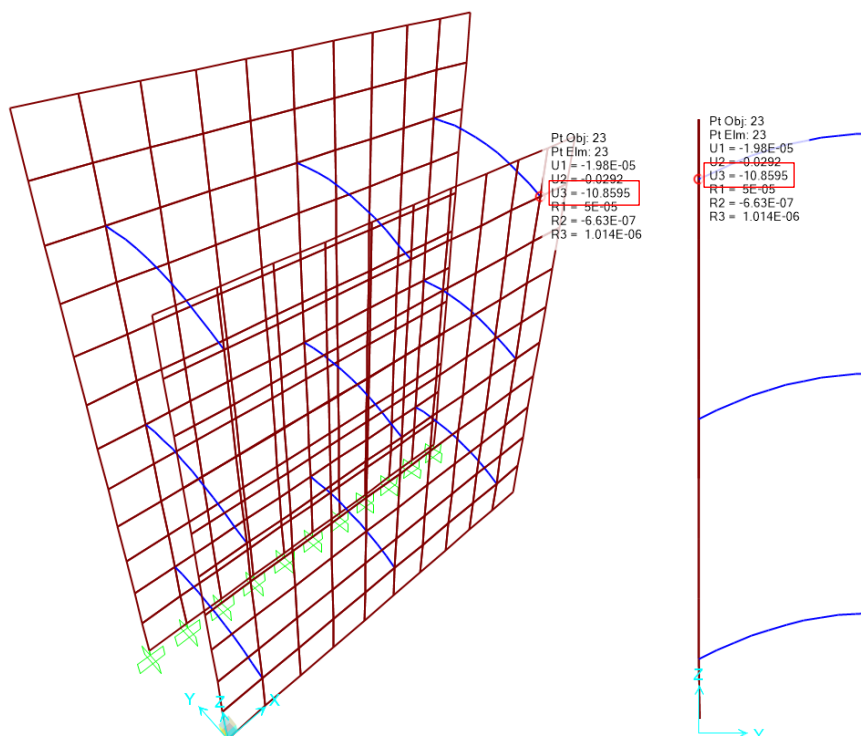
2000	0,00
2500	5,00
3000	0,00
4000	6,30
4500	0,00
5000	7,50
5500	0,00



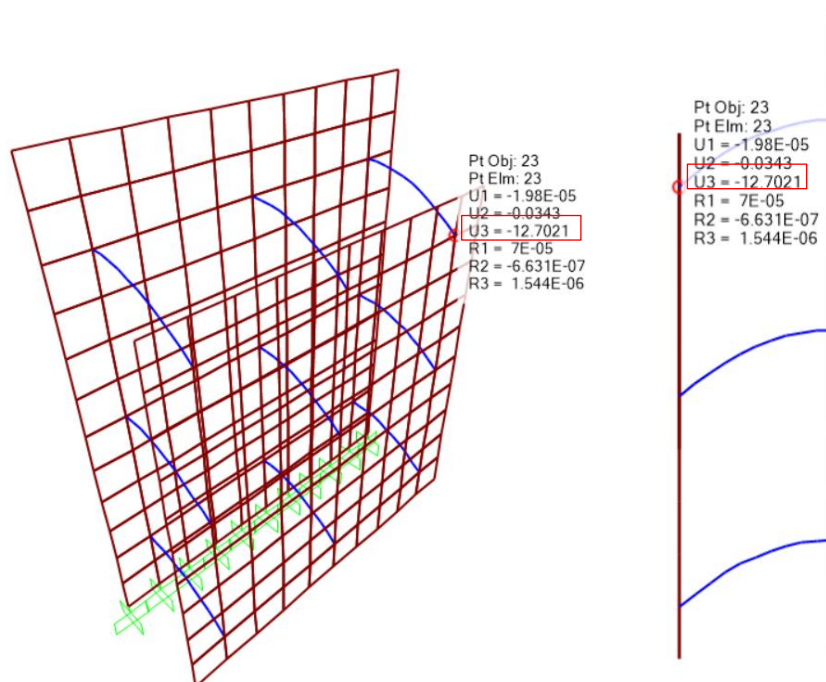
Slika 12-5 Definirana vremenska krivulja za dinamičko opterećenje

12.2. ANALIZA REZULTATA

Za opterećenje vlastitom težinom elemenata (DEAD), progib vanjskog elementa za linearni proračun iznosi 10,85 mm, a za nelinearni proračun 12,70 mm (slika 12-6 i Slika 12-7). Razlika između rezultata proračuna javlja se jer je u obzir kod nelinearnog proračuna uračunata materijalna nelinearnost.



Slika 12-6 Prikaz progiba vanjskog panela – linearni proračun

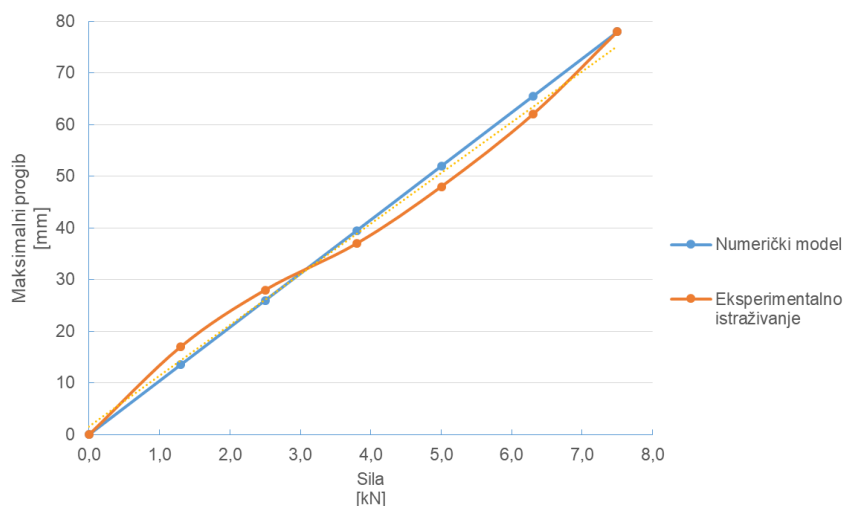


Slika 12-7 Prikaz progiba vanjskog panela – nelinearni proračun

Promotri li se dinamičko opterećenje koje je nanošeno na zidni panel prema prikazanoj krivulji na slici 12-5, vidi se kako maksimalni progib vanjskog panela iznosi 77,97 mm u 5000 sekundi. U nastavku su u tablici 12-5 navedene maksimalne vrijednosti progiba u određenim periodima, koji su određeni eksperimentalnim istraživanjem.

Tablica 12-5 Prikaz maksimalnih progiba prema definiranoj krivulji opterećenja

Vrijeme [s]	Sila [kN]	Maksimalni progib eksperimentalno istraživanje [mm]	Maksimalni progib numerički model [mm]
0	0	0	0
250	1,30	17,00	13,51
750	2,50	28,00	25,99
1500	3,80	37,00	39,50
2500	5,00	48,00	51,98
4000	6,30	62,00	65,49
5000	7,50	72,00	77,97



Slika 12-8 Usporedba maksimalnog progiba dobivenih eksperimentalnim istraživanjem i izradom numeričkog modela

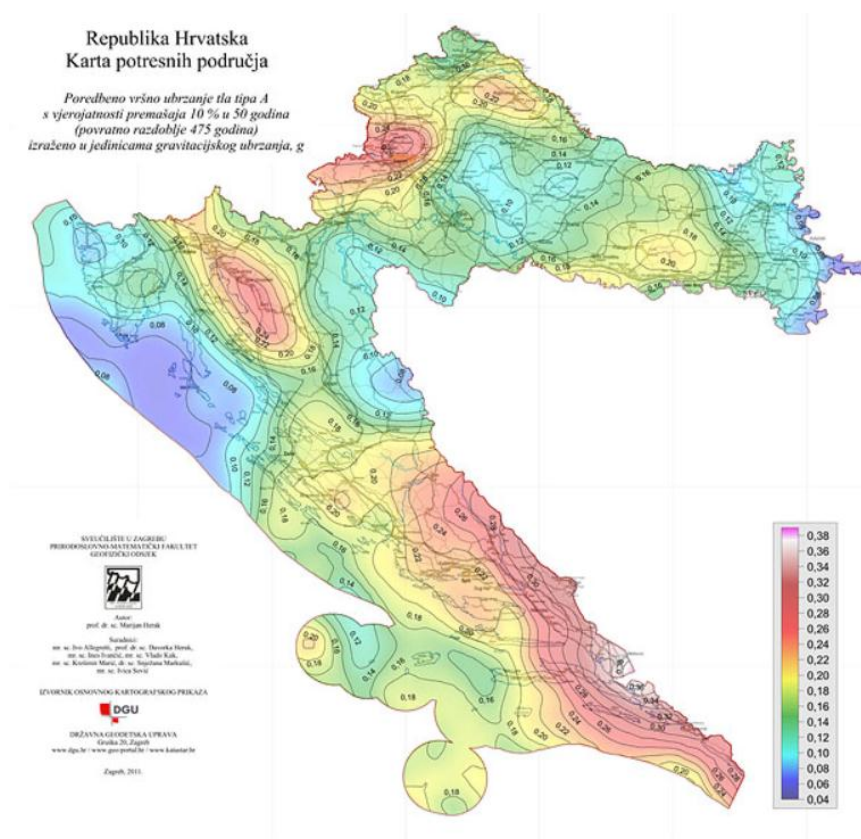
Pri dinamičkom opterećenju progib za vrijeme od 5000 s iznosi 68 mm. Slika 12-8 prikazuje razlike vrijednosti maksimalnih progiba uslijed dinamičkog ispitivanja za maksimalne vrijednosti opterećenja. Kod usporedbe rezultata za eksperimentalno istraživanje u obzir je uzeta vrijednost početnog progiba od 10 mm uslijed vlastite težine elementa. Može se uočiti odstupanje od numeričkog modela, koje iznosi 2,38 %.

12.3. VARIJANTE OJAČANJA ZIDNOG PANELA

S obzirom na to da je uočen nedostatak, odnosno početni progib vanjskog panela od 10 mm, u nastavku su dana varijantna rješenja ojačanja zidnog panela.

Pravila za proračun i projektiranje inženjerskih objekata u seizmičkim područjima dani su u Eurokodu 8, prema nacionalnom dodatku HRN EN 1998-1:2004+AC:2009. Republika Hrvatska je na seizmički aktivnom području pa je ono često mjerodavno za dimenzioniranje elemenata konstrukcije. Osim kod dimenzioniranja novih građevina, postojeće građevine se često, ne i nužno, proračunavaju prema spektralnoj analizi kako bi se utvrdila njihova otpornost na buduće potresne nepogode.

Budući da je namjena navedenih zidnih panela novogradnja objekata i rekonstrukcija postojećih, za promatrani zidni panel će biti dane vrijednosti progiba uslijed potresnog djelovanja.



Slika 12-9 Karta potresnih područja Hrvatske (povratno razdoblje 475 godina) [41]

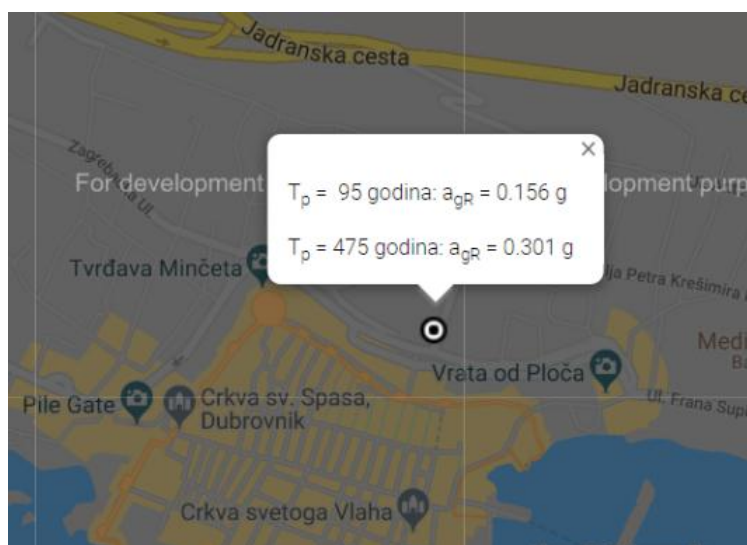
Potresno djelovanje se određuje uz pomoć vrijednosti vršnog ubrzanja temeljnog tla koje se razlikuje ovisno o seizmičkom području. S Karte potresnih područja Hrvatske (slika 12-9) očitane su vrijednosti vršnog ubrzanja, a_g [m/s^2], za odabranu lokaciju (Dubrovnik):

$$a_g = 0,156 \cdot g \text{ [m/s}^2\text{]} - \text{ za povratno razdoblje od 95 godina}$$

$$a_g = 0,301 \cdot g \text{ [m/s}^2\text{]} - \text{ za povratno razdoblje od 475 godina}$$

gdje je:

g [m/s^2] – gravitacijsko ubrzanje



Slika 12-10 Vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja za povratne razdoblje 95g. i 475g. [42]

Povratno razdoblje od 95 godina se koristi kod uporabljivosti sustava jer su bitne vrijednosti pomaka. Konstrukcija ne smije biti oštećena, a štete na fasadi moraju biti minimalne da bi bila uporabljiva. Kod povratnog razdoblja od 475 godina se ne smije dogoditi otkazivanje sustava kako se ljudski životi ne bi doveli u opasnost, a u proračunu su mjerodavne vrijednosti kritičnih sila. Zbog navedenih razloga, u numeričkom modelu uzete su vrijednosti vršnog ubrzanja tla za povratno razdoblje od 475 godina ($a_g = 0,301 g$).

Faktor ponašanja konstrukcije ovisi o duktilnosti konstrukcije, odnosno o sposobnosti da prihvati reducirane seizmičke sile bez krhkih lomova u postelastičnom području deformiranja. S obzirom na to da ne postoji poznat tlocrtni oblik zgrade i nepravilnosti po visini, već se promatra samo jedan zidni element, kao faktor ponašanja uzima se vrijednost koja iznosi $q = 1,0$ jer će se promatrati samo elastični odaziv konstrukcije za nenosivi element. Tlo na kojem se nalazi promatrana građevina je u kategoriji tla „A“. Potresno djelovanje na promatranoj

lokaciji, općenito se prikazuje elastičnim spektrom odziva. U radu se promatraju samo pomaci vanjskog panela (od slike 12-11 do slike 12-22). Svi pomaci zidnih panela su dani u mm.

Za svaki od panela je računata potresna sila u smjeru osi x i z prema formuli (12.1) [43].

$$F_a = \frac{S_a \cdot W_a \cdot \gamma_a}{q_a} \quad (12.1)$$

gdje je:

F_a [kN] – horizontalna potresna sila koja djeluje u središtu mase nekonstrukcijskog elementa u najnepovoljnijem smjeru

W_a [kN] – težina elemenata

S_a – potresni koeficijent primjenjiv na nekonstrukcijske elemente

γ_a – faktor važnosti elementa (1,00)

q_a – faktor ponašanja elemenata (1,00).

$$S_a = \alpha \cdot S \cdot \frac{(3 \cdot (1 + \frac{z}{H}))}{(1 + (1 - \frac{T_a}{T_1})^2)} - 0,5 \quad (12.2)$$

gdje je:

α – omjer proračunskog ubrzanja temeljnog tla na temeljnom tlu tipa A, a_g i gravitacijskog ubrzanja g

S – koeficijent tla

T_a [s] – osnovni period elementa vibracija nekonstruktivnog elementa

T_1 [s] – osnovni period vibracija zgrade u odgovarajućem smjeru

z [m] – visina nekonstrukcijskog elementa iznad razine primjene potresnog djelovanja (temelj i gornji rub krutog podruma)

H – visina zgrade mjerena od temelja ili gornjeg ruba krutog podruma [m].

Kao što je već i ranije navedeno, za razmatranje sustava zamišljena je zgrada pravilnih dimenzija, ukupne visine nekonstruktivnog elementa iznad razine primjene potresnog djelovanja

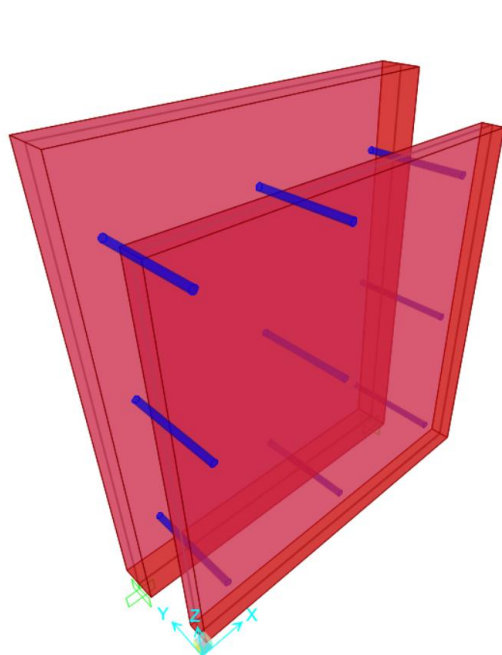
od 15 m (oznaka u formuli 12.3, H) te visine zgrade mjerena od temelja iznosi 14,2 m (oznaka u formuli 12.4, z). Za period zgrade je uzeta proizvoljna vrijednost u iznosu od 0,4 s. Vrijednosti perioda panela promatrani su za svaki slučaj ojačanja posebno te su vrijednosti perioda i u konačnici potresnih sila dani u tablici 12-6.

Tablica 12-6 Vrijednosti perioda i potresnih sila

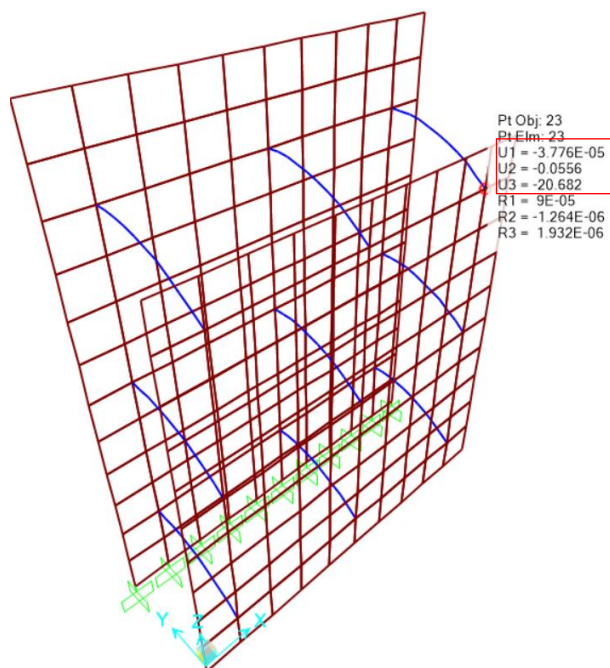
Numerički model		Period [s]	Potresna sila [kN]
Bez ojačanja	Potres X – smjer	0,205	1,155
	Potres Z - smjer	0,209	1,666
br. 1	Potres X – smjer	0,191	1,120
	Potres Z - smjer	0,049	0,769
br. 2	Potres X – smjer	0,181	1,094
	Potres Z - smjer	0,027	0,720
br. 3	Potres X – smjer	0,049	0,769
	Potres Z - smjer	0,208	0,722
br 4	Potres X – smjer	0,021	0,706
	Potres Z - smjer	0,026	0,716

U nastavku je prikazan tijek pronalaska optimalnog ojačanja za rješenje poboljšanja karakteristika zidnog panela.

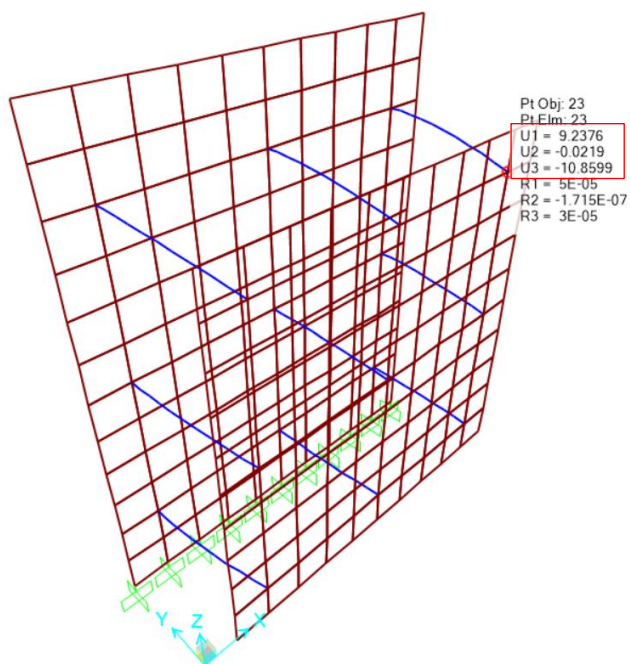
Promatrajući početni numerički model, zaključuje se da su potrebne određene mjere ojačanja sustava. Uslijed djelovanja potresnih sila, dobivene vrijednosti za vertikalni progib iznosi 20,68 mm (slika 12-12), a za horizontalni pomak 9,23 mm (slika 12-13). Dobivene vrijednosti su prevelike te su u nastavku dana rješenja ojačanja sustava. Prvo rješenje je da se gornje spone dodatno ojačaju dijagonalama, kako bi se spriječio vertikalni progib uslijed djelovanja vlastite težine elementa i kako bi se dodatno povećala potresna otpornost elementa.



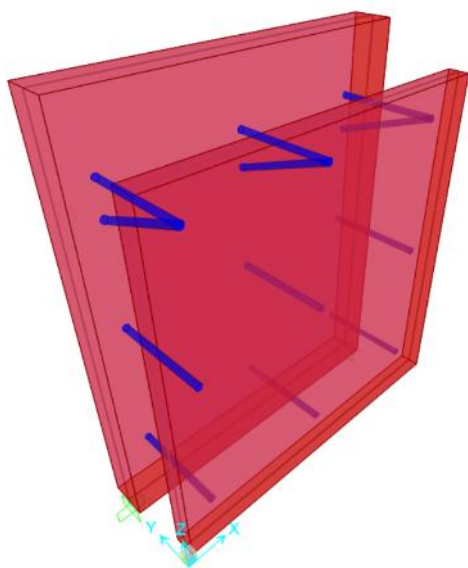
Slika 12-11 Numerički model bez ojačanja



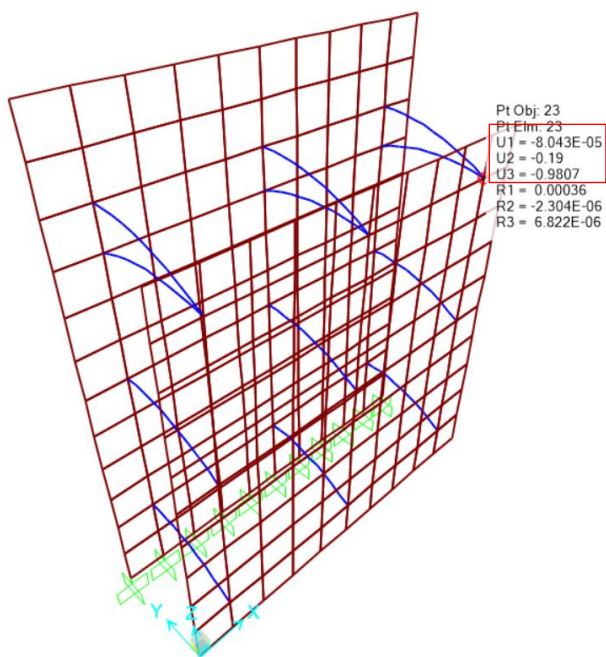
Slika 12-12 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer



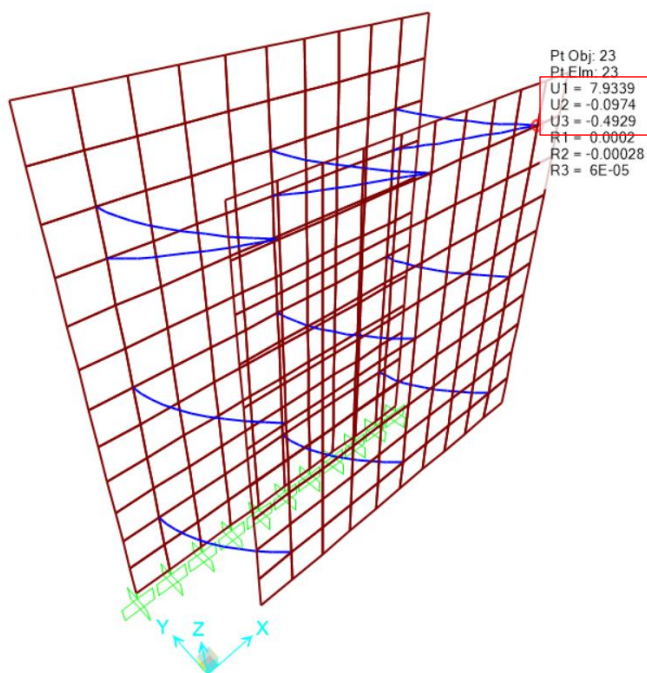
Slika 12-13 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer



Slika 12-14 Numerički model varijantnog rješenja br. 1



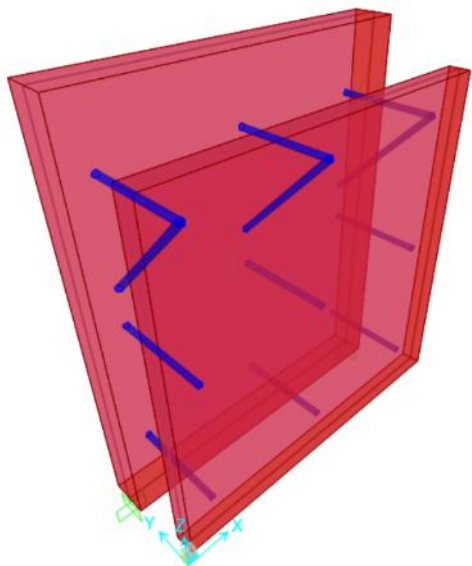
Slika 12-15 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer



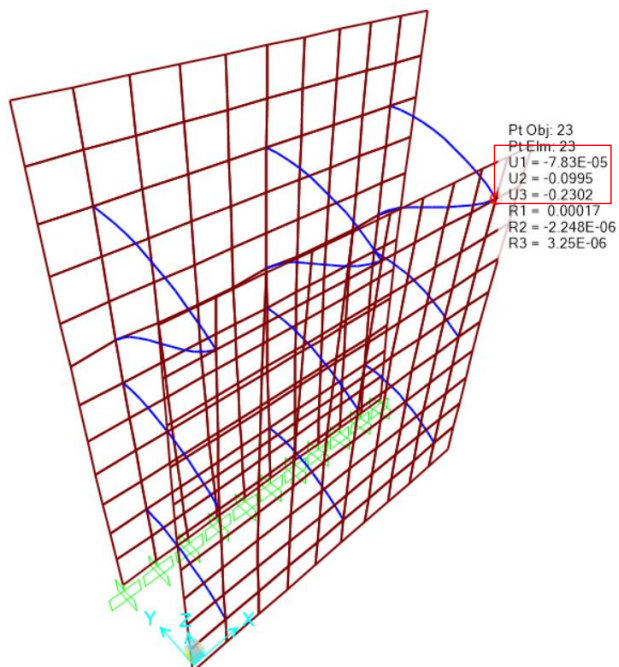
Slika 12-16 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer

Slika 12-14 pokazuje prvo rješenje ojačanja. Uočava se da se vertikalni progib uslijed djelovanja vlastite težine vanjskog panela i sile potresa znatno smanjio i iznosi 0,98 mm (slika 12-15). Problem koji nastaje tijekom djelovanja potresnog opterećenja u x smjeru je prevelik

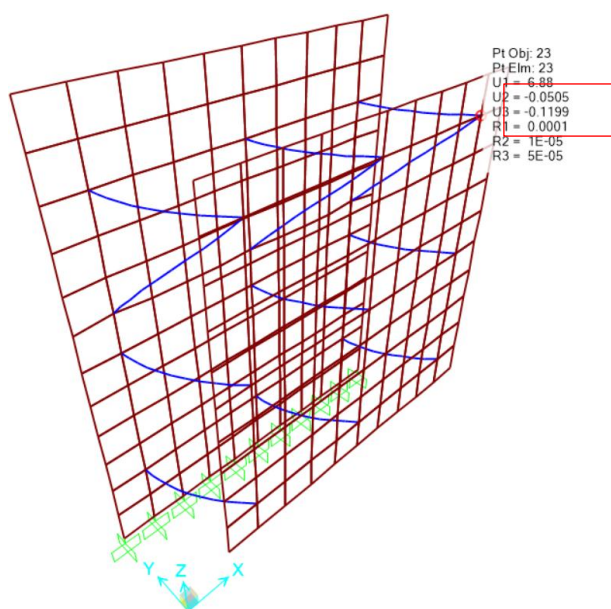
pomak jer iznosi 7,93 mm (slika 12-16). Vertikalna dijagonala, zbog svog kosog položaja u prostoru, ne doprinosi povoljno prijenosu opterećenja. Prijedlog je da se nagib poveća na 45° iz razloga da su komponente uzdužne sile polimerne kompozitne spone (horizontalna i vertikalna) podjednako istih vrijednosti.



Slika 12-17 Numerički model varijantnog rješenja br.2

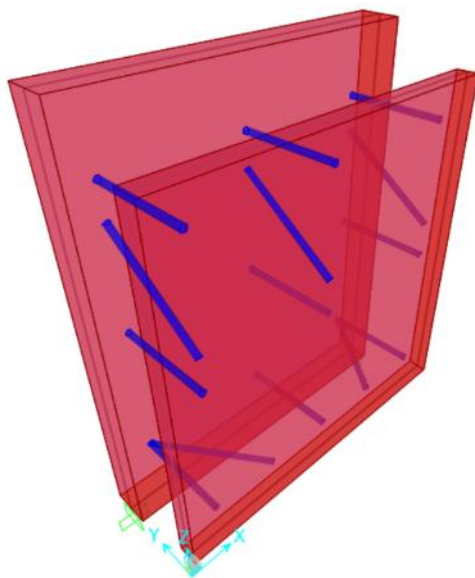


Slika 12-18 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer

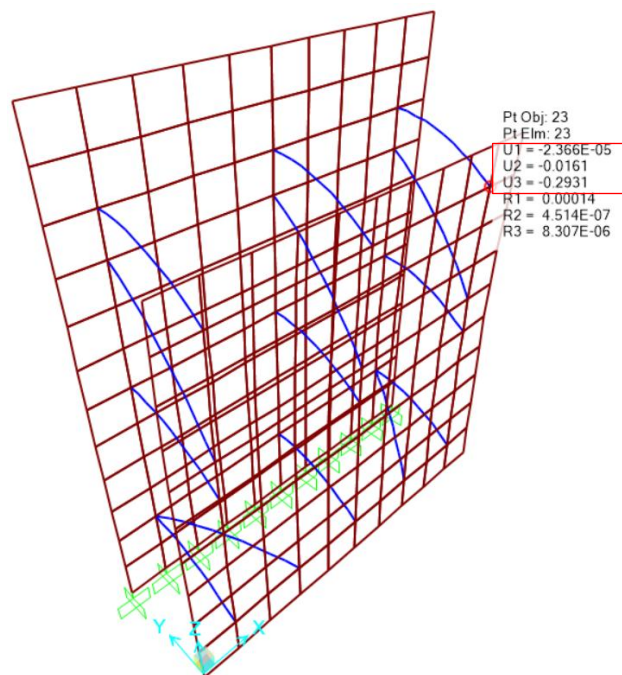


Slika 12-19 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer

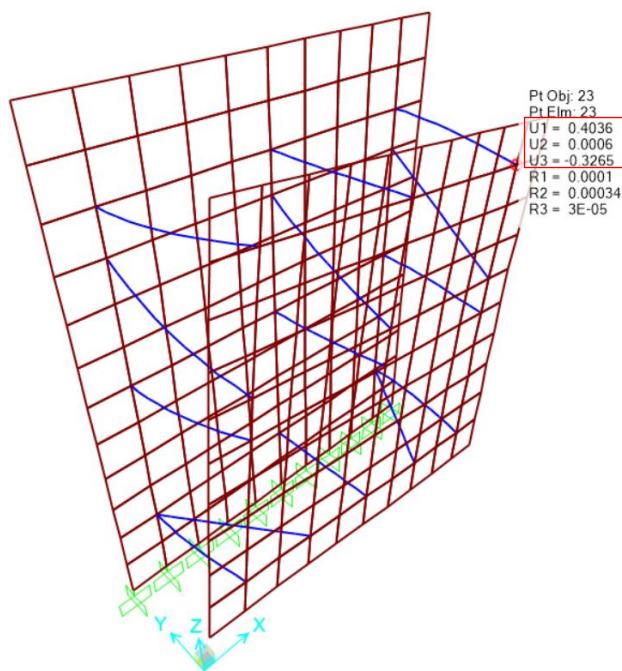
Numerički model drugog varijantnog rješenja je definiran tako da vertikalne dijagonale zadržavaju nagib od 45° . Posljedica navedenog kuta je smanjenje vertikalnog progiba koji iznosi 0,23 mm (slika 12-18). Međutim, postoji problem s krutošću elementa u horizontalnom smjeru. Horizontalna potresna sila uzrokuje pomak od 6,88 mm (slika 12-19). Ovaj problem će se riješiti dodatnim dijagonalama u horizontalnom smjeru, koje će spriječiti pomak. Definirane polimerne kompozitne spone imaju zadovoljavajuću vlačnu čvrstoću pa je sljedeći prijedlog ojačanja stavljanje vlačnih dijagonala. Jedan od razloga zbog kojeg se pristupa analizi je taj što postoji mogućnost izvijanja pojedinih elemenata, prilikom dugotrajnog opterećenja.



Slika 12-20 Numerički model varijantnog rješenja br.3

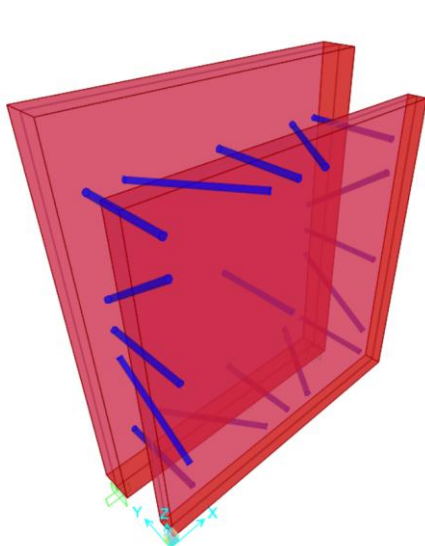


Slika 12-21 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer

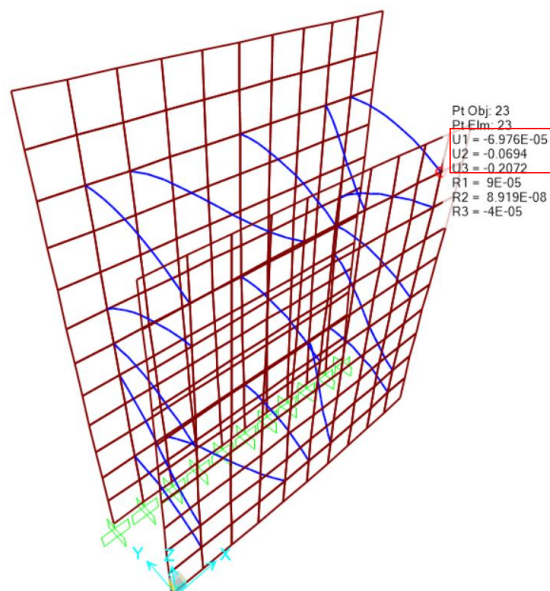


Slika 12-22 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer

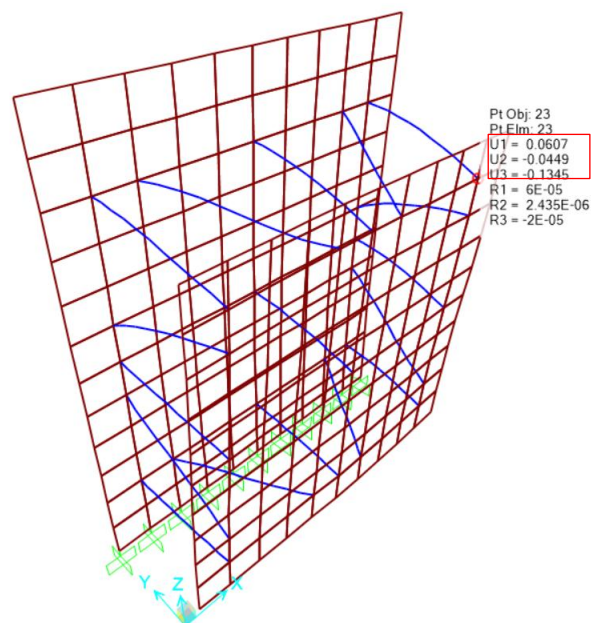
U konačnici, vrijednost vertikalnog progiba iznosi 0,29 mm (slika 12-21) i horizontalnog pomaka 0,40 mm (slika 12-22). Vlačne dijagonale se nisu pokazale povoljnije za smanjenja vertikalnog progiba sustava, ali za način prijenosa opterećenja jesu. Promotri li se treće varijantno rješenje, može se uočiti problem nesimetrije sustava, odnosno težišta zidnog panela. Posljedica toga je da se pojavljuje torzija sustava.



Slika 12-23 Numerički model varijantnog rješenja br.4



Slika 12-24 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer

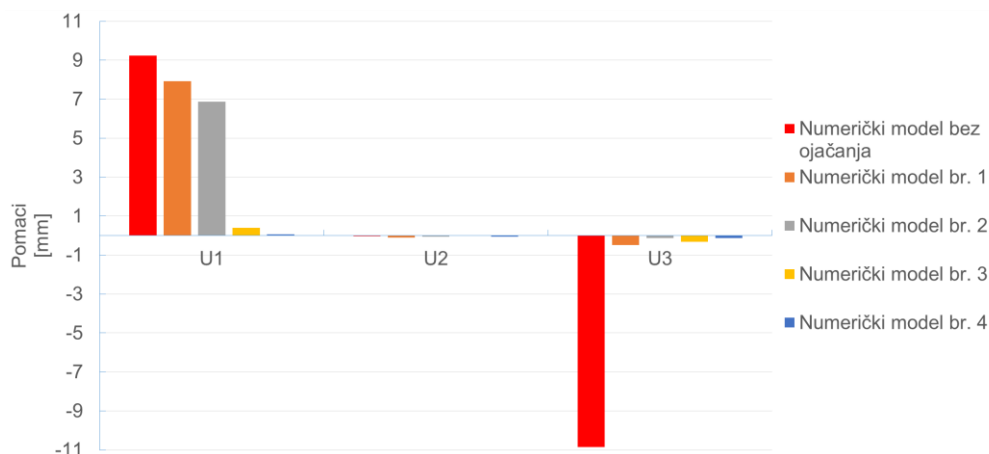


Slika 12-25 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer

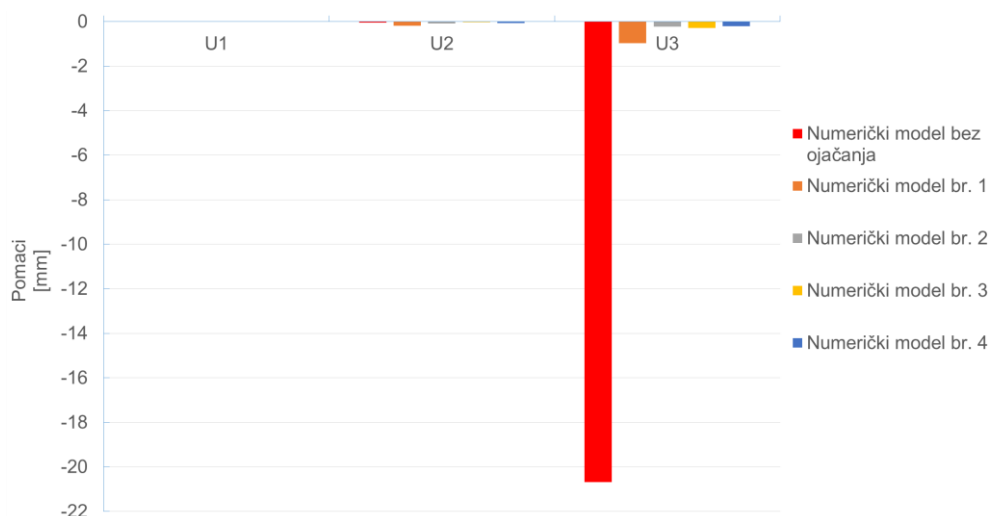
Kalibracijom modela, dobiveni su u konačnici vertikalni progibi uslijed potresnog opterećenja u iznosu od 0,21 mm (slika 12-24 i horizontalni pomaci od 0,06 mm (slika 12-25).

Tablica 12-7 Vrijednosti pomaka za definirane varijante ojačanja

Numerički model		Pomak U1 [mm]	Pomak U2 [mm]	Pomak U3 [mm]
Bez ojačanja	Potres X – smjer	9,238	-0,022	-10,860
	Potres Z - smjer	-3,776x10 ⁻⁵	-0,056	-20,682
br. 1	Potres X – smjer	7,934	-0,097	-0,493
	Potres Z - smjer	-8,043x10 ⁻⁵	-0,190	-0,981
br. 2	Potres X – smjer	6,880	-0,051	-0,120
	Potres Z - smjer	-7,830x10 ⁻⁵	-0,099	-0,230
br. 3	Potres X – smjer	0,404	0,001	-0,327
	Potres Z - smjer	-2,366x10 ⁻⁵	-0,0161	-0,293
br 4	Potres X – smjer	0,061	-0,045	-0,135
	Potres Z - smjer	-6,976x10 ⁻⁵	-0,069	-0,207



Slika 12-26 Grafički prikaz pomaka za potres X - smjer



Slika 12-27 Grafički prikaz pomaka za potres Z - smjer

Promotre li se vrijednosti dobivene iz tablice 12-7, te njihovi grafički prikazi slika 12-26 i slika 12-27, uočava se da su optimizacijom rasporeda polimernih kompozitnih spona ostvareni manji pomaci u vertikalnom i horizontalnom smjeru. Smanjenje vertikalnog progiba između numeričkog modela bez ojačanja te modela br. 1 je 95 %, dok je horizontalni pomak umanjen za 15%. Relativno smanjenje vrijednosti vertikalnog progiba između numeričkog modela bez ojačanja i numeričkog modela br. 4 je 100 %, dok je za horizontalni pomak to smanjenje 150 %. Može se zaključiti da je najbolje rješenje numerički model br. 4, koji daje najmanje vrijednosti progiba i horizontalnog pomaka zidnog elementa.

Kod ugradnje spona u beton je bitno pripaziti da se ostvari dobivena krutost zidnog panela. Pomaci uslijed potresnog djelovanja uvjetuju i način spajanja dvaju susjednih panela kao i njihov međusobni razmak. Da bi se izbjeglo njihovo međusobno sudaranje i u konačnici

Ijuštenje betona uz rubove zidnog panela, predlaže se međusobno razmicanje zidnih panela u ovisnosti o potresnoj zoni zgrade.

13. ZAKLJUČAK

Trenutna su nastojanja u Europskoj Uniji raznim ciljevima i mjerama smanjiti potrošnju energije. Kako je velik postotak udjela sektora građevinarstva u ukupnoj potrošnji energije, teži se pravilnom projektiranju građevina, čime se može taj postotak smanjiti. To uključuje smanjenje energetske gubitaka kroz vanjsku ovojnicu zgrade.

U radu je promatran konkretan proizvod na tržištu, predgotovljeni fasadni panel ECO-SANDWICH, s niskom U-vrijednosti, manjom od $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$. Fasadni panel ima ugrađene čelične spona kao poveznice slojeva. Kako čelik ima veliku toplinsku provodljivost, $16 \text{ W}/(\text{m K})$, nastaju točkasti toplinski mostovi u panelu. Zbog toga je ispitana mogućnost zamjene čeličnih spona polimernim kompozitnim, koje imaju značajno manju vrijednost toplinske provodljivosti, $0,35 \text{ W}/(\text{m K})$.

Proračun točkastih mostova je izvršen najprije algoritmom smišljenim za potrebe rada, temeljenim na metodi kontrolnih volumena, a zatim komercijalnim programom AnTherm. Za oba se slučaja modelirao dio panela, dimenzija $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 42 \text{ cm}$, koji je uključio jednu sponu i okolni materijal. Pretpostavljeno je kako će se neovisno o razlici dimenzija panela u stvarnosti i dimenzija modela, dobiti približno jednaki rezultati.

Od rezultata dobivenih za dvije metode proračuna, najprije su uspoređene vrijednosti temperatura u promatranom segmentu panela, dobivenih za rubne uvjete od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ i $-10 \text{ }^\circ\text{C}$. Temperature na rubovima modela s čeličnim sponama, za zadane vanjske rubne uvjete, daju razliku između dva načina proračuna od $1 \text{ }^\circ\text{C}$, što je u odnosu na temperaturni raspon od $30 \text{ }^\circ\text{C}$ $3,3 \%$. U modelu s polimernim kompozitnim sponama temperature daju razliku od $0,16 \text{ }^\circ\text{C}$, što je u odnosu na temperaturni raspon $0,53 \%$. Zatim su uspoređene vrijednosti koeficijenta toplinske veze, L_{3D} i točkasti koeficijenti prolaska topline, X . Usporedba se vršila između modela s čeličnim i modela s polimernim kompozitnim sponama. Za koeficijent toplinske veze je za model s čeličnim sponama relativna vrijednost odstupanja rezultata za dvije metode proračuna $1,1 \%$, a za model s polimernim kompozitnim sponama $0,15 \%$. Relativno odstupanje vrijednosti točkastog toplinskog koeficijenta prolaska topline je za model s čeličnim sponama $1,21 \%$, a za model s polimernim kompozitnim sponama $0,0195 \%$. Oba su proračuna dala potvrdu hipoteze kako će polimerne kompozitne spona stvarati manje toplinske gubitke, tj. toplinski mostovi koji nastaju bit će manje ozbiljni. To pokazuju dobivene vrijednosti točkastih toplinskih koeficijenata: zamjenom čeličnih spona polimernim kompozitnim, kod proračuna metodom MKV, iznos vrijednosti X smanji se sa $0,004668$ na $0,0004099 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, a kod proračuna u AnThermi sa $0,004725$ na $0,0004099 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. U prvom je slučaju iznos smanjenja $91,22 \%$, a u drugom $91,32 \%$.

Temperaturne su krivulje u oba slučaja pokazale velik pad temperature između okoliša i ruba elementa koji graniči s tim okolišem. Taj veliki pad nije u skladu sa stvarnim ponašanjem elementa. Stoga se zaključilo kako se pri proračunu obaju modela trebao uzeti veći broj kontrolnih volumena zbog toga što bi tada udio volumena spona u ukupnom volumenu modela bio manji i bliži realnom stanju. Na taj bi se način dobila rješenja bliža stvarnom stanju. Neovisno o tome, navedene poredbene vrijednosti pokazuju znatnu preciznost i poklapanje rezultata smišljenog algoritma s komercijalnim programom AnTherm.

Kako zamjena čeličnih spona polimernim kompozitnim može prouzrokovati smanjenje krutosti cijelog fasadnog panela, panel se ispitao u laboratoriju te su se njegove mehaničke karakteristike unijele u numerički model. Cilj je bio utvrditi potrebu za ojačanjima u slučaju ugradnje polimernih kompozitnih spona. Uspoređivale su se vrijednosti progiba za različite slučajeve opterećenja fasadnog panela. Kako su vrijednosti dobivene numeričkim modelima bile nezadovoljavajuće, zaključeno je da je potreban drugačiji raspored spona.

Sponama se najprije promijenio nagib u odnosu na horizontalnu os, kako bi se smanjili vertikalni pomaci, a zatim i u odnosu na vertikalnu os, kako bi fasadni panel mogao izdržati potencijalno horizontalno opterećenje prilikom eksploatacije (npr. potres, vjetar).

Rješenje poboljšanja krutosti fasadnog panela daje značajno manje vertikalne i horizontalne pomake nego pri početnoj raspodjeli spona, tj. pomaci su minimizirani. Relativno smanjenje vrijednosti vertikalnog progiba bi predloženim ojačanjima iznosilo 100 %, a horizontalnog pomaka 150 %. Minimiziranje pomaka smanjilo bi mogućnost pojave problema pri ugradnji fasadnog panela.

Dokazom smanjenja toplinskih gubitaka i minimiziranjem pomaka fasadnog elementa dokazane su obje hipoteze rada te je dan doprinos svjetskom nastojanju smanjenja potrošnje energije i održivog razvoja u građevinarstvu.

14. ZAHVALE

Veliku zahvalnost dugujemo mentorima doc.dr.sc. Bojanu Milovanoviću, dipl. ing. građ. i doc. dr. sc. Mariju Urošu, dipl. ing. građ. na nesebičnom dijeljenju znanja, savjeta i kritika, količini vremena i strpljenja uloženog u ovo istraživanje te usmjeravanju tijekom cijele izrade rada.

Puno hvala i Mergimu Gašiju, mag. ing. aedif, na velikoj susretljivosti, strpljenju i udijeljenom znanju.

Hvala i svima koji su na indirektan način potpomogli pisanje ovoga rada.

15. LITERATURA

- [1] Kloški Ž., Ištoka Otković I., Miličević I, Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrakonepropusnosti, Građevinar, sv. 65, br. 3, str. 223-233, 2013.
- [2] Milovanović B., „Građevinska Fizika, predavanja“, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2018.
- [3] Ministry of Economy, Annual Energy Report - Energy in Croatia 2012, str. 257, 2013.
- [4] Arch B., Arch M., Agenda 21 for Sustainable Construction in Developing Countries Programme for Sustainable Human Settlements", Irbnet.De, 1999
- [5] Philipp Gerbert S, Shaping the Future of Construction A Breakthrough in Mindset and Technology, World Economic Forum (WEF), str. 1-64, 2016.
- [6] Design E., Yavasbatmez S., Održivo projektiranje visokih građevina, Građevinar, sv. 65, br. 5, str. 449-461, 2013.
- [7] Sinha A., Gupta R., Kutnar A., Održivi razvoj i zelena gradnja, Drvna industrija, sv. 64, izd. 1., str. 45-53, 2013
- [8] Hrs Borković Ž. i ostali, Energetska učinkovitost u zgradarstvu: vodič za sudionike u projektiranju, gradnji, rekonstrukciji i održavanju zgrada, Energetski institut Hrvoje Požar i HEP Toplinarstvo d.o.o., Zagreb, 2007.
- [9] Kloški Ž., Ištoka Otković I., Miličević I, Klasifikacija elemenata zgrada u funkciji mjerenja zrakonepropusnosti, Građevinar, sv. 65, br. 3, str. 223-233, 2013.
- [10] Ministry of Construction and Physical Planning, Technical regulation on rational use of energy and thermal protection in buildings (OG 128/15), Official Gazette, sv. 128, str. 11–68, 2015.
- [11] Praznik M., Zbašnik-Senegačnik M., Ugrađena primarna energija i optimizacija energetske učinkovitih kuća, Građevinar, sv. 67, br. 9, str. 853-864, 2015.
- [12] „Energetska učinkovitost“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.enu.hr/>. [Pristupljeno: 10-ožu-2019].
- [13] Pavić-Rogošić L., Jagnjić M., Globalni ciljevi održivog razvoja do 2030., Odras- održivi Razvoj Zajednice, Zagreb, 2015.

- [14] C. From i ostali, A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, str. 1–25, 2018.
- [15] Ministarstvo zaštite okoliša i energetike, Pravilnik o gospodarenju otpadom, Narodne novine, 73/17, 2017
- [16] Zakon o gradnji, Narodne novine, 153/13, 2019
- [17] Europski Parlament, Direktiva 2008/98/EZ o otpadu i stavljanju izvan snage određenih direktiva, Službeni List Europse unije, sv. 15, izd. 34, str. 126, 2008.
- [18] „Hrvatska agencija za okoliš i prirodu“ [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.haop.hr/hr/pocetna-stranica>. [Pristupljeno: 22-ožu-2019].
- [19] Štirmer N., Škreb A., Procjena količina građevnog otpada i potencijala za njegovo korištenje, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2017.
- [20] Whittaker M. i ostali, Reuse and recycling of CDW materials and structures in energy efficient prefabricated elements for building refurbishment and construction - RE4, RILEM International Conference on Sustainable Materials, Systems and Structures (SMSS 2019), Rovinj, 2019.
- [21] „nZEB korak u prostor“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://korak.com.hr/nzeb>. [Pristupljeno: 10-ožu-2019].
- [22] Kalšan D., Milovanović B., Hrvatska udruga proizvođača toplinsko-fasadnih sustava, Kontinuirana izobrazba građevinskih radnika u okviru energetske učinkovitosti, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2016.
- [23] Huljev A., Sanacija kamenih fasada, Završni rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2017.
- [24] edutorij e-Škole, „Unutarnja energija i toplina“ [Na internetu]. Dostupno na: <https://edutorij.e-skole.hr/>. [Pristupljeno: 20-ožu-2019].
- [25] Kulišić P., Mehanika i toplina, Školska knjiga, Zagreb, 2005.
- [26] Strojarski toplinski sustavi – podloge za studij strojarstva, Zagreb, str. 1–8.
- [27] Gaši M., Milovanović B., Kvantificiranje utjecaja linijskih toplinskih mostova metodom infracrvene termografije, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2018.

- [28] „What is a thermal bridge and why is it so important to break it?“, ecoHOME. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.ecohome.net/>. [Pristupljeno: 27-ožu-2019].
- [29] „ECO-SANDWICH®“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.eco-sandwich.hr/hr/>. [Pristupljeno: 15-tra-2019].
- [30] Pečur I. i ostali, Energy efficiency aspects of recycled aggregate concrete, Environmentally Friendly Concrete Eco -Crete, Island, 2014
- [31] Milovanović B., ECO-SANDWICH®: Reciklirani beton za gradnju gotovo nula energetske zgrade, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, 2014.
- [32] Knauf, „Staklena mineralna vuna“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.knaufinsulation.hr/>. [Pristupljeno: 02-ožu-2019].
- [33] „Indoor Air Quality, katalog Eco-sandwicha“.
- [34] Jelenić D., Hozmec S., Skazlić M., Primjena arhitektonskog betona u predgotovljenim betonskim elementima, 1st International Conference on Construction Materials for Sustainable Future, Zadar, 2017.
- [35] Blomberg T., Heat conduction in two and three dimensions, Department of Building Physics Lund University, Švedska, 1996.
- [36] Jasak H., Tuković Ž., Metoda kontrolnih volumena na domenama promjenjivog oblika, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2005.
- [37] Ninić N., Jurjević D., Ispitivanje točnosti metode elementarnih bilanci u provođenju topline, Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu, sv. 46, str. 25-39, 2004.
- [38] „AnTherm“. [Na internetu]. Dostupno na: <http://www.antherm.at>. [Pristupljeno: 30-ožu-2019].
- [39] „Svojstva polimer kompozitnih spona“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://hkties.com/products/hk-standard-system/standard-8-inch-tie-st200/>. [Pristupljeno: 12-ožu-2019].
- [40] Mirković V., Užar J., Primjena metode konačnih elemenata u građevinarstvu, Tehnički list, sv. 43, br. 5., str. 202-206, 1992.
- [41] „Karta potresa Hrvatske“. [Na internetu]. Dostupno na: http://seizkarta.gfz.hr/files/A475_2011_800k_FINAL.jpg. [Pristupljeno: 20-tra-2019].

- [42] „Vrijednost horizontalnih vršnog ubzanja tla“. [Na internetu]. Dostupno na: <http://seizkarta.gfz.hr/karta.php>. [Pristupljeno: 20-tra-2019].
- [43] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija - 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade (EN 1998-1:2004+AC:2009)

POPIS SLIKA

<i>Slika 1-1 Energetska bilanca zgrade [2]</i>	1
<i>Slika 3-1 Metodologija rada</i>	5
<i>Slika 4-1 Životne faze materijala/građevnog proizvoda</i>	7
<i>Slika 4-2 Strateški ciljevi EU do 2020.godine [2]</i>	9
<i>Slika 4-3 Provedbeni plan gospodarenja otpadom [18]</i>	11
<i>Slika 4-4 Sustav otpada uključujući iskop zemljanog materijala</i>	11
<i>Slika 4-5 Sustav otpada isključujući iskop zemljanog materijala</i>	12
<i>Slika 4-6 Tijek rada RE4 organizacije</i>	13
<i>Slika 5-1 nZEB [21]</i>	14
<i>Slika 5-2 Prolazak topline kroz zid bez toplinske izolacije i sa toplinskom izolacijom [22]</i>	15
<i>Slika 5-3 Struktura ETICS sustava [22]</i>	16
<i>Slika 5-4 Dijelovi ventilirane fasade [23]</i>	17
<i>Slika 5-5 Prijelaz topline</i>	17
<i>Slika 5-6 Količina topline [2]</i>	18
<i>Slika 5-7 Vrste prijenosa topline [2]</i>	19
<i>Slika 5-8 Prijenos topline vođenjem (kondukcijom) [26]</i>	19
<i>Slika 5-9 Strujanje (kondukcija) [26]</i>	20
<i>Slika 5-10 Zračenje (radijacija) [26]</i>	21
<i>Slika 6-1 Toplinski mostovi [2]</i>	24
<i>Slika 6-2 Primjer točkastog toplinskog mosta [27]</i>	25
<i>Slika 6-3 Geometrijski toplinski most [2]</i>	25
<i>Slika 6-4 Geometrijski toplinski mostovi [2]</i>	26
<i>Slika 6-5 Kombinirani toplinski mostovi [28]</i>	26
<i>Slika 6-6 Konstruktivni toplinski mostovi [2]</i>	27
<i>Slika 6-7 Zračni toplinski most [2]</i>	27
<i>Slika 6-8 Toplinski mostovi uvjetovani okolinom [2]</i>	28
<i>Slika 7-1 ECO-SANDWICH® [29]</i>	30
<i>Slika 7-2 Mineralna vuna [32]</i>	32
<i>Slika 7-3 Prva kuća izgrađena sa Eco-sandwich-om® [34]</i>	35
<i>Slika 7-4 Dječji vrtić Ribica u Sarvašu [34]</i>	36
<i>Slika 8-1 Normala na unutarnju granicu dvaju materijala različitih toplinskih provodljivosti [35]</i>	38
<i>Slika 8-2 Kontrolni volumeni (i, j, k) i (i, j, k+0.5) [35]</i>	40
<i>Slika 8-3 3D prikaz toplinskih provodljivosti između pojedinih kontrolnih volumena</i>	41
<i>Slika 9-1 Diskretizacija ECO-SANDWICH® zidnog panela kontrolnim volumenima</i>	44
<i>Slika 9-2 Prikaz numeriranja kontrolnih volumena na unutarnjem rubu karakterističnog elementa panela</i>	44

<i>Slika 9-3 Adijabatske ravnine</i>	46
<i>Slika 9-4 Susjedni kontrolni volumeni za čvor 1</i>	47
<i>Slika 9-5 Poprečni presjek zidnog panela s čeličnim sponama</i>	52
<i>Slika 9-6 Aksonometrijski prikaz zidnog panela</i>	53
<i>Slika 9-7 Poprečni presjek zidnog panela</i>	53
<i>Slika 9-8 Aksonometrijski prikaz zidnog panela</i>	53
<i>Slika 9-9 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]</i>	54
<i>Slika 9-10 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]</i>	54
<i>Slika 9-11 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]</i>	55
<i>Slika 9-12 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s čeličnim sponama [°C]</i>	55
<i>Slika 9-13 Prikaz toplinskog mosta na granici elementa s čeličnim sponama s vanjskim okolišem</i>	55
<i>Slika 9-14 Prikaz toplinskog mosta na granici elementa s čeličnim sponama s unutarnjim okolišem</i>	55
<i>Slika 9-15 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]</i>	56
<i>Slika 9-16 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]</i>	56
<i>Slika 9-17 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s vanjskim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]</i>	56
<i>Slika 9-18 Vrijednosti temperatura čvorova koji graniče s unutarnjim okolišem za model s polimernim kompozitnim sponama [°C]</i>	56
<i>Slika 9-19 Prikaz toplinskog mosta na vanjskoj strani modela s polimernim kompozitnim sponama</i>	57
<i>Slika 9-20 Prikaz toplinskog mosta na unutarnjoj strani modela s polimernim kompozitnim sponama</i>	57
<i>Slika 9-21 Rezultati proračuna L3D za karakteristični model</i>	58
<i>Slika 9-22 Usporedba vrijednosti točkastih koeficijenata prolaska topline, X</i>	59
<i>Slika 9-23 Temperaturna krivulja za element s čeličnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C</i>	60
<i>Slika 9-24 Temperaturna krivulja za element s čeličnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C</i>	61
<i>Slika 9-25 Temperaturna krivulja za element s polimernim kompozitnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C</i>	61
<i>Slika 9-26 Temperaturna krivulja za element s polimernim kompozitnim sponama za rubne uvjete 20 °C i -10 °C</i>	62
<i>Slika 9-27 Slojevi zidnog panela</i>	64
<i>Slika 9-28 Aksonometrijski prikaz zidnog panela</i>	64
<i>Slika 9-29 Poprečni presjek zidnog panela</i>	65
<i>Slika 9-30 Aksonometrijski prikaz zidnog panela</i>	65
<i>Slika 9-31 3D prikaz zidnog panela sa čeličnim sponama</i>	65

<i>Slika 9-32 Poprečni presjek zidnog panela</i>	66
<i>Slika 9-33 Aksonometrijski prikaz zidnog panela</i>	66
<i>Slika 9-34 3D prikaz zidnog panela s polimernim kompozitnim sponama</i>	67
<i>Slika 9-35 Rezultati proračuna L_{3D} za cijeli panel u AnThermu</i>	69
<i>Slika 9-36 Toplinski mostovi s unutarnje strane panel sa čeličnim sponama</i>	70
<i>Slika 9-37 Toplinski mostovi s vanjske strane panela sa čeličnim sponama</i>	70
<i>Slika 9-38 Toplinski mostovi s unutarnje strane za panel s polimernim kompozitnim sponama</i>	70
<i>Slika 9-39 Toplinski mostovi s vanjske strane za panel s polimernim kompozitnim sponama</i>	70
<i>Slika 9-40 Temperaturna krivulja zidnog panela bez spona</i>	71
<i>Slika 9-41 Temperaturna krivulja zidnog panela s čeličnim sponama</i>	71
<i>Slika 9-42 Temperaturna krivulja za panel s polimernim kompozitnim sponama</i>	71
<i>Slika 9-43 Usporedba koeficijenta prolaska topline</i>	72
<i>Slika 10-1 Spona ST200 izrađena od polimera visokih uporabnih svojstava</i>	73
<i>Slika 10-2 Tijek izvedbe uzoraka ECO-SANDWICH® panela upotrebom polimernih kompozitnih spona</i>	76
<i>Slika 10-3 Nedostaci u uzorcima panela nastale tijekom izvođenja</i>	77
<i>Slika 11-1 Uzorci za ispitivanje dobiveni iz polimernih kompozitnih spona ST200</i>	78
<i>Slika 11-2 Dimenzije uzorka za ispitivanje vlačne čvrstoće pri direktnom vlakom</i>	79
<i>Slika 11-3 Tijek ispitivanja vlačne čvrstoće polimernih kompozitnih spona direktnim vlakom</i>	80
<i>Slika 11-4 Radni dijagrami uzoraka polimera</i>	80
<i>Slika 11-5 Radni dijagrami uzoraka obzirom na udaljenost čeljusti kidalice</i>	81
<i>Slika 11-6 Uzorci za ispitivanje na odrez</i>	82
<i>Slika 11-7 Izrada uzoraka za ispitivanje na odrez: a) postavljanje uzoraka na ploču EPS-a; b) postavljanje uzoraka u kalup; c) uzorak nakon vađenja iz kalupa i uklanjanja EPS-a</i>	83
<i>Slika 11-8 a) ispitivanje na odrez; b) shema opterećivanja uzorka</i>	83
<i>Slika 11-9 Usporedba rezultata ispitivanja glave na odrez za uzorke ugrađene u beton</i>	84
<i>Slika 11-10 Usporedba rezultata ispitivanja vrha na odrez za uzorke ugrađene u beton</i>	85
<i>Slika 11-11 Oštećenja nastala zakazivanjem tijekom ispitivanja</i>	85
<i>Slika 11-12 Ispiljeni uzorci nakon ispitivanja na odrez ugrađeni u reciklirani beton ili u recikliranu opeku</i>	86
<i>Slika 11-13 Linija loma polimerne kompozitne spona nastala tijekom ispitivanja</i>	86
<i>Slika 11-14 Uzorci za ispitivanje čupanjem</i>	87
<i>Slika 11-15 Projektirane dimenzije uzoraka za ispitivanje čupanjem</i>	87
<i>Slika 11-16 Izrada uzoraka za ispitivanje čupanjem</i>	88
<i>Slika 11-17 Ispitivanje čupanjem</i>	88
<i>Slika 11-18 Tipični oblici sloma prilikom ispitivanja čupanjem: a) plastične deformacije ; b) krti lom uz površinu</i>	89
<i>Slika 11-19 Usporedba rezultata ispitivanja glava čupanjem za uzorke ugrađene u beton</i>	90
<i>Slika 11-20 Usporedba rezultata ispitivanja vrha čupanjem za uzorke ugrađene u beton</i>	90
<i>Slika 11-21 Raspored polimernih kompozitnih spona u uzorcima</i>	91

<i>Slika 11-22 Shema sustava za pridržanje tijekom ispitivanja i slika uzorka prije opterećivanja</i>	91
<i>Slika 11-23 Tijek ispitivanja uzorka dinamičkim opterećenjem</i>	93
<i>Slika 11-24 Ovisnost sile i pomaka vanjskog sloja u odnosu na unutarnji pri kvazistatičkom opterećivanju</i>	93
<i>Slika 11-25 Zavisnost pomaka vanjskog panela u odnosu na unutarnji i opterećenja pri cikličkom ispitivanju za uzorak izrađen s betonom od reciklirane opeke</i>	95
<i>Slika 11-26 Zavisnost pomaka vanjskog panela u odnosu na unutarnji i opterećenja pri cikličkom ispitivanju za uzorak izrađen s betonom u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom</i>	96
<i>Slika 12-1 3D prikaz modela (Extrude View)</i>	98
<i>Slika 12-2 Definirani rubni uvjet spajanja spone i vanjskog panela za linearni proračun</i>	100
<i>Slika 12-3 Prikaz definiranog dijagrama polimerne kompozitne spone</i>	100
<i>Slika 12-4 Definirane materijalne karakteristike za svaki od kružnih isječaka</i>	102
<i>Slika 12-5 Definirana vremenska krivulja za dinamičko opterećenje</i>	103
<i>Slika 12-6 Prikaz progiba vanjskog panela – linearni proračun</i>	104
<i>Slika 12-7 Prikaz progiba vanjskog panela – nelinearni proračun</i>	105
<i>Slika 12-8 Usporedba maksimalnog progiba dobivenih eksperimentalnim istraživanjem i izradom numeričkog modela</i>	106
<i>Slika 12-9 Karta potresnih područja Hrvatske (povratno razdoblje 475 godina) [41]</i>	107
<i>Slika 12-10 Vrijednosti horizontalnih vršnih ubrzanja za povratne razdoblje 95g. i 475g. [42]</i>	108
<i>Slika 12-11 Numerički model bez ojačanja</i>	111
<i>Slika 12-12 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer</i>	111
<i>Slika 12-13 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer</i>	111
<i>Slika 12-14 Numerički model varijantnog rješenja br. 1</i>	112
<i>Slika 12-15 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer</i>	112
<i>Slika 12-16 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer</i>	112
<i>Slika 12-17 Numerički model varijantnog rješenja br.2</i>	113
<i>Slika 12-18 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer</i>	113
<i>Slika 12-19 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer</i>	113
<i>Slika 12-20 Numerički model varijantnog rješenja br.3</i>	114
<i>Slika 12-21 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer</i>	114
<i>Slika 12-22 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer</i>	115
<i>Slika 12-23 Numerički model varijantnog rješenja br.4</i>	115
<i>Slika 12-24 Progib uslijed djelovanja potresne sile z – smjer</i>	115
<i>Slika 12-25 Pomaci uslijed djelovanja potresne sile x – smjer</i>	116
<i>Slika 12-26 Grafički prikaz pomaka za potres X - smjer</i>	117
<i>Slika 12-27 Grafički prikaz pomaka za potres Z - smjer</i>	117

POPIS TABLICA

Tablica 7-1 Slojevi ECO-SANDWICH®	31
Tablica 7-2 Svojstva slojeva ECO-SANDWICH® zidnog panela [29].....	33
Tablica 9-1 Debljine i vrijednosti koeficijenata provodljivosti pojedinih slojeva ECO-SANDWICH® elementa (od vanjskog sloja prema unutarnjem) [29]	45
Tablica 9-2 Karakteristike spona.....	45
Tablica 9-3 Koeficijenti propustljivosti za slučaj s čeličnim sponama.....	50
Tablica 9-4 Koeficijent toplinske veze L3D [W/K]	58
Tablica 9-5 Vrijednosti točkastih koeficijenata prolaska topline, X.....	59
Tablica 9-6 Usporedba točkastih koeficijenata prolaska topline, X, za ručni i proračun AnThermom [W/K]	59
Tablica 9-7 Koeficijent toplinske provodljivosti U za numerički model bez spona.....	68
Tablica 9-8 Koeficijenti prolaska topline za dva modela	72
Tablica 10-1 Svojstva polimerne kompozitne spona za debljinu izolacije od 20 cm [39].....	73
Tablica 10-2 Sastav betona sa zamjenom 50% agregata recikliranog betona (RB50).....	74
Tablica 10-3 Sastav betona sa zamjenom 50% agregata recikliranom opekom (RO50).....	75
Tablica 11-1 Čvrstoće polimera dobivene ispitivanjem direktnim vlakom.....	81
Tablica 11-2 Rezultati ispitivanja na odrez za uzorke ugrađene u beton s recikliranim betonom	84
Tablica 11-3 Rezultati ispitivanja na odrez za uzorke ugrađene u beton s recikliranom opekom.....	84
Tablica 11-4 Rezultati ispitivanja čupanjem za uzorke ugrađene u beton s recikliranim betonom.....	89
Tablica 11-5 Rezultati ispitivanja čupanjem za uzorke ugrađene u beton s recikliranom opekom	89
Tablica 12-1 Mehaničke karakteristike nosivog i vanjskog panela	99
Tablica 12-2 Mehaničke karakteristike polimer kompozitnih spona.....	99
Tablica 12-3 Vrijednosti koordinata težišta kružnih isječaka	101
Tablica 12-4 Vrijednosti sila za definiranu vremensku krivulju za dinamičko opterećenje	102
Tablica 12-5 Prikaz maksimalnih progiba prema definiranoj krivulji opterećenja	105
Tablica 12-6 Vrijednosti perioda i potresnih sila.....	110
Tablica 12-7 Vrijednosti pomaka za definirane varijante ojačanja	116

16. SAŽETAK

Autori: Lucija Martinić, Valentina Pogačić, Katarina Marić

Naslov rada: Utjecaj vrste spona na točkaste toplinske mostove i optimizacija njihova rasporeda za povećanje krutosti predgotovljenih zidnih panela

Čelične spona, koje povezuju nosive i vanjske slojeve predgotovljenog zidnog panela, zbog visoke toplinske provodljivosti čelika, uzrokuju nastanak točkastih toplinskih mostova. Zbog toga se javila potreba za proučavanjem mogućnosti zamjene čeličnih spona polimernim kompozitnim materijalom, znatno niže toplinske provodljivosti. Analiza točkastih toplinskih mostova u slučaju čeličnih i u slučaju polimernih spona provedena je programiranim algoritmom, temeljenim na metodi kontrolnih volumena, te programskim alatom AnTherm. S obzirom na različite mehaničke karakteristike čelika i polimera, tj. očekivanu manju krutost panela s polimernim sponama, zidni je panel laboratorijski ispitan u cilju dobivanja mehaničkih karakteristika čitavog elementa, a podaci su iskorišteni kao osnova za numeričko modeliranje panela s polimernim sponama pomoću programskog paketa SAP2000. Analizom rezultata zaključeno je kako bi se, radi izbjegavanja komplikacija pri ugradnji predgotovljenog elementa te pri eksploataciji, trebala izvesti ojačanja dodatnim polimernim sponama. Nadalje, zaključeno je da će se utjecaj točkastih toplinskih mostova na toplinske gubitke uvelike smanjiti zamjenom čeličnih spona polimernim.

Ključne riječi: ECO-SANDWICH®, predgotovljeni element, toplinski mostovi, metoda kontrolnih volumena, polimerne kompozitne spona

17. SUMMARY

Authors: Lucija Martinić, Valentina Pogačić, Katarina Marić

Title: The impact of ties on point thermal bridges and optimisation of their arrangement for increasing the stiffness of precast wall panels

Steel ties are used for fixing the external facade layers of precast wall panels to the load-bearing structure. These steel ties have a significantly higher thermal conductivity than the surrounding materials and lead to higher heat losses through building elements, i.e. point thermal bridges. Therefore, there is a need for researching the possibility of replacing the steel ties with the ties made out of polymer composites, which have a relatively lower thermal conductivities compared to steel. The comparison of the numerical calculation of point thermal bridges with both steel and polymer ties were made by hand using the Finite Volume Method and with commercial software – AnTherm. Because of the different mechanical characteristics of steel and polymer, and assuming the panels with the polymer ties would have lower stiffnesses, four laboratory tests were carried out for determining the mechanical characteristics of the entire panel. The laboratory results were then compared with the results obtained by the numerical simulation in the commercial software SAP2000. After analysing the results, it has been concluded that the wall panel with polymer ties would have much lower heat losses due to the presence of the point thermal bridges. Also, ties need to be properly reinforced to avoid complications during the installation and exploitation of panels.

Key words: ECO-SANDWICH®, prefabricated element, thermal bridges, Finite volume method, polymer composite ties

18. ŽIVOTOPISI

Lucija Martinić rođena je 24. listopada 1995. godine u Zaboku gdje je nakon završenog osnovnoškolskog obrazovanja 2010. upisala tehničku Srednju školu Bedekovčina. Srednjoškolsko obrazovanje završava s odličnim uspjehom 2014. godine. Iste godine nakon položene državne mature upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstva na Sveučilištu u Zagrebu. Po završetku Preddiplomskog sveučilišnog studija s diplomom „magna cum laude“, upisala je diplomski studij Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu te trenutno pohađa 2. godinu Diplomskog studija na usmjerenju Teorija i modeliranje konstrukcija. Uz studij je zaposlena u Niskogradnji Hren, izvoditeljskoj firmi, kao stručni suradnik u izvođenju.

Katarina Marić rođena je 1. studenog 1995. godine u Zagrebu. Opću gimnaziju upisala je 2010. godine u Srednjoj školi Ivan Švear u Ivanić-Gradu te ju završila s odličnim uspjehom i nagradom za učenicu generacije. Nakon položene državne mature, 2014. godine upisala je Preddiplomski studij na Građevinskom fakultetu u Zagrebu. Dekanovu nagradu za izvrsnost dobila je nakon prve i druge godine studija. Nakon treće godine završila je preddiplomski studij građevinarstva s odličnim uspjehom, s diplomom „summa cum laude“ i dobila priznanje za studenticu generacije na preddiplomskom studiju. Diplomski studij nastavila je na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija, gdje trenutno pohađa drugu godinu. Uz studij je zaposlena u Institutu IGH d.d., u odjelu za Projektiranje konstrukcija, kao stručni suradnik.

Valentina Pogačić rođena je 27. studenog 1995. godine u Karlovcu, gdje nakon osnovnoškolskog obrazovanja 2010. godine upisuje tehničku srednju Mješovito industrijsko – obrtnička školu, smjer Građevinski tehničar. Srednjoškolsko obrazovanje završava s odličnim uspjehom 2014. godine. Iste godine, nakon položene državne mature upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Građevinarstva na Sveučilištu u Zagrebu. Nakon treće godine završava preddiplomski studij građevinarstva u roku s diplomom „cum laude“. Diplomski studij nastavlja na Građevinskom fakultetu u Zagrebu, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija, gdje trenutno pohađa drugu godinu. Uz studij je zaposlena u Institutu IGH d.d., u odjelu za Projektiranje konstrukcija kao stručni suradnik.

19. PRILOZI

19.1. PRILOG A

Prikaz unosa ulaznih vrijednosti (λ) u algoritam za formiranje matrice propustljivosti [K] te automatski izračun koeficijenta toplinske propustljivosti K . Ovdje prikazan unos je za karakterističan model s čeličnim sponama.

ULAZNI PARAMETRI	Toplinska provodljivost [W/m K]			Protok topline u smjeru	
				x/ y	z
Nosivi beton	0,858		K_1	0,01716	0,00429
Mineralna vuna	0,034		K_2	0,03257	0,00814
Zrak	0,226		K_3	0,32000	0,08000
Fasadni beton	0,746		K_4	0,00131	0,00033
Spona	16,00		K_5	0,00136	0,00034
			K_6	0,00068	0,00017
			K_7	0,00118	0,00030
Unutarnji otpor prolasku topline	0,13		K_8	0,00891	0,00223
Vanjski otpor prolasku topline	0,04		K_9	0,00452	0,00113
			K_{10}	0,00694	0,00173
			K_{11}	0,02851	0,00713
			K_{12}	0,01492	0,00373
			$K_{1,out}$		0,00071
			$K_{2,out}$		0,00187

Nakon unosa navedenih vrijednosti, formira se matrica propustljivosti kao što je prikazano u nastavku. Kako je prevelik broj ćelija ($336 \times 336 = 112\ 896$), prikazan je samo isječak matrice, kako bi se prikazao uzorak njezinog popunjavanja.

Kao što je vidljivo sa slike, matrica je simetrična, na dijagonali su pozitivne vrijednosti, a ostali su članovi ili nula ili negativne vrijednosti.

Rješenja temperatura se dobiju u sljedećem obliku za svih 336 čvorova (kontrolnih volumena):

Čvor	Temperatura u čvoru (°C)
1	7,026
2	6,968
3	6,968
4	7,026
5	6,968
6	6,810
7	6,810
8	6,968
9	6,968
10	6,810
11	6,810
12	6,968
13	7,026
14	6,968
15	6,968
16	7,026
17	5,352
18	5,225
19	5,225
20	5,352
21	5,225
22	5,002
23	5,002
24	5,225
25	5,225
26	5,002
27	5,002
28	5,225
29	5,352
30	5,225
(...)	(...)

Koeficijent toplinske veze dobiva se u obliku:

0,43247	0,00070594	3,05298E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43247	0,00070594	3,05298E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43965	0,00070594	3,10370E-04
0,43965	0,00070594	3,10370E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43965	0,00070594	3,10370E-04
0,43965	0,00070594	3,10370E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43247	0,00070594	3,05298E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43439	0,00070594	3,06655E-04
0,43247	0,00070594	3,05298E-04
delta T	K	L3D
	Koeficijent toplinske veze	0,004916

Grafički su prilozi prikazani u poglavljima analize rezultata.