

# Numerički proračun i analiza osjetljivosti toplinskih mostova kod LSF konstrukcija

---

**Kragulj, Teodora**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:444762>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET  
DIPLOMSKI STUDIJ

NUMERIČKI PRORAČUN I ANALIZA OSJETLJIVOSTI TOPLINSKIH MOSTOVA

KOD LSF KONSTRUKCIJA

Diplomski rad

Teodora Kragulj

Zagreb, veljača 2024

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GRAĐEVINSKI FAKULTET  
DIPLOMSKI STUDIJ

NUMERIČKI PRORAČUN I ANALIZA OSJETLJIVOSTI TOPLINSKIH MOSTOVA

KOD LSF KONSTRUKCIJA

Diplomski rad

Teodora Kragulj

Mentor: izv. prof. dr. sc. Bojan Milovanović

Zagreb, veljača 2024

## IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja, Teodora Kragulj, studentica Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, JMBAG 0007177896, ovim putem izjavljujem da je moj diplomski rad pod naslovom „Numerički proračun i analiza osjetljivosti toplinskih mostova kod LSF konstrukcija“, izvorni rezultat mojeg rada, te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

U Zagrebu,

Potpis:

## Sadržaj

SAŽETAK.....	9
ABSTRACT .....	9
1. UVOD .....	10
2. Zgrade gotovo nulte energije (nZEB) .....	11
3. Energetska učinkovitost LSF zgrada .....	14
3.1. Klima .....	15
3.2. Ovojnica zgrade .....	16
3.3. Čimbenici ljudi .....	17
3.4. Sustavi zgrada .....	17
4. POVIJESNI ZNAČAJ LSF KONTRUKCIJA.....	18
5. KOMPONENTE LSF KONSTRUKCIJA .....	19
5.1. Hladno oblikovani čelični elementi (CFS) .....	19
5.1.1. Proizvodnja hladno oblikovanih čeličnih profila .....	21
5.1.3. Poprečni presjeci CFS elemenata .....	23
5.1.4. UTJECAJ TOPLINSKIH MOSTOVA NA CFS .....	25
5.2. PLOČE ZA OBLAGANJE .....	25
5.2.1. OSB ploče.....	26
5.2.2. Gips ploče (GB).....	27
5.2.3. Ploče od magnezijevog oksida .....	27
5.2.4. Ploče s magnezijevim sulfatom.....	28
5.2.5. Ploče od kalcijeva silikata .....	28
5.2.6. Perlitne ploče.....	28
5.2.7. PCM gips ploče.....	28
5.3. Materijali za toplinsku izolaciju .....	29
5.3.1 Mineralna vuna .....	30
5.3.2. Ekspandirani i Ekstrudirani polistiren (EPS I XPS.....	31
5.3.3. Poliuretanska (PUR) I Poliizocijanuratna (PIR) pjena .....	31
5.3.4. Celulozna vlakna .....	32
5.3.5. Pluto .....	32
5.3.6. Ovčja vuna .....	32
5.3.7. Ostalo .....	33
5.4. Membrane za zaštitu od zraka i vjetra .....	34
5.5. Sloj zraka .....	36

5.6. Materijali za spajanje i pričvršćivanje .....	36
5.7. Mogućnosti završnih obloga.....	37
6. KLASIFIKACIJA LSF KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA.....	37
7. PREDNOSTI I NEDOSTACI LSF KONSTRUKCIJA .....	39
7.1. Prednosti LSF konstrukcija.....	39
7.2. Nedostaci LSF konstrukcija .....	40
8. UTJECAJ TOPLINSKIH MOSTOVA NA ENERGETSKU UČINOVITOST KOD ZGRADA .....	42
8.1. Toplinski mostovi .....	42
8.1 Strategije za smanjenje utjecaja toplinskih mostova.....	43
8.2. Toplinska tromost (inercija) .....	48
8.3. Mjere za smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje .....	52
9. METODE PROCJENE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI .....	53
9.1. Analitičke metode za procjenu toplinske provodljivosti LSF-stijenki.....	53
9.2. Pojednostavljena analitička metoda.....	55
9.3. ISO 6946 Kombinirana metoda .....	56
9.3.1. Gornja granica ukupnog toplinskog otpora: Metoda paralelnog puta.....	56
9.3.2. Donja granica ukupnog toplinskog otpora: Metoda izotermnih ravnina .....	57
9.3.3. Ukupni toplinski otpor: kombinirana metoda .....	58
9.4. Metode Gorgolewskog .....	59
9.4.1. Gorgolewski Metoda 1.....	59
9.4.2. Gorgolewski Metoda 2.....	59
9.4.3. Gorgolewski Metoda 3.....	60
9.5. ASHRAE metode .....	60
9.6. ASHRAE Zonska metoda .....	61
9.7. Metoda modificirane zone.....	63
9.8. Proračun efektivnog koeficijenta prolaska topline .....	64
10. Analiza osjetljivosti: Toplinska učinkovitost LSF zidova .....	65
10.1. Materijali i metode .....	66
10.1.1 Referentni zidovi .....	66
10.1.2. Čelični nosači .....	67
10.1.3. Granični uvjeti.....	70
10.2. Veličina čeličnog profila i debljina čelika.....	71
10.3. Dobiveni rezultati.....	71
10.3.1. Unutarnji zidovi.....	73
10.3.2 Vanjski zidovi .....	75
10.3.3. Osnovni zaključci.....	76

11.	Numerički proračun karakterističnih detalja .....	90
11.1.	DETALJI .....	90
11.1.1.	Spoj dva vanjska zida u kutu .....	91
11.1.2.	Spoj unutarnjeg i vanjskog zida.....	95
11.1.3.	Spoj vanjskog zida sa temeljnom pločom.....	100
11.1.4.	Spoj unutarnjeg zida sa temeljnom pločom .....	104
	Spoj vrata u temelju / vertikalni presjek vrata .....	108
11.1.6.	Horizontalni presjek vrata .....	112
11.1.7.	Vertikalni presjek prozora .....	115
11.1.8.	Horizontalni presjek prozora .....	120
11.1.9.	Detalj Atike .....	123
11.1.10.	Spoj unutarnjeg zida sa stropnom pločom .....	127
11.2	Obrada rezultata .....	130
12.	ZAKLJUČAK.....	132
	LITERATURA .....	133
	POPIS SLIKA.....	137
	POPIS TABLICA.....	141
	POPIS OZNAKA .....	142
	Grčki simboli.....	143

## SAŽETAK

U usporedbi s tradicionalnim građevinskim metodama, LSF sustav donosi značajne prednosti u područjima održivosti, ekonomske isplativosti, procesa izgradnje i sigurnosti na radu. Međutim, ove LSF elemente treba dobro dizajnirati i zaštititi od neželjenih toplinskih mostova uzrokovanih visokom toplinskom vodljivošću čelika. U ovom radu proučava se utjecaj LSF-a na izvedbu nZEB-a. Provedena je analiza rješenja toplinskih mostova korištenjem dostupnih numeričkih modela. Pri tome je proračunato 10 karakterističnih detalja. Analizirale su se učinkovitosti takvih struktura u pogledu njihovog toplinskog mosta na U-vrijednost neprozirnih dijelova ovojnice, linearnih gubitaka topline na spojevima, rizika od kondenzacije vlage, te toplinskog mosta na ukupne energetske performanse zgrade. Glavni zaključak je bio da se toplinski mostovi minimaliziraju zahvaljujući toplinskoj izolaciji koja pokriva čelične nosače, a u gotovo svim slučajevima  $\Psi$ -vrijednosti su ispod  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  i slobodne su od kondenzacije vlage. Provedena je i analiza osjetljivosti nekoliko geometrija te nekoliko materijala, došlo je do zaključka da dodatna vanjska toplinska izolacija poboljšava toplinsku učinkovitost zgrade, te da je bolji čelični nosač sa što tanjim presjekom i što manjom duljinom. Rad sadržava i pregled literature vezano uz zgrade gotovo nulte energije, naročito u području aspekta energetske učinkovitosti i toplinskih mostova kod sustava zgrada koje integriraju LSF.

Ključne riječi: LSF sustavi, energetska učinkovitost, toplinski mostovi, toplinska provodljivost, nZeb.

## ABSTRACT

In comparison to traditional construction methods, the LSF system brings significant advantages in the areas of sustainability, economic viability, construction processes, and workplace safety. However, these LSF elements need to be well-designed and protected against undesired thermal bridges caused by the high thermal conductivity of steel. This study investigates the impact of LSF on the performance of nZEB. An analysis of thermal bridge solutions was conducted using available numerical models, calculating 10 characteristic details. The efficiencies of such structures were analyzed concerning their thermal bridge effect on the U-value of opaque envelope elements, linear heat losses at junctions, moisture condensation risk, and overall energy performance. The main conclusion was that thermal bridges are minimized thanks to thermal insulation covering steel studs, and in almost all cases,  $\Psi$ -values are below  $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  and free from moisture condensation. Sensitivity analysis of several geometries and materials concluded that additional external thermal insulation improves the building's thermal efficiency, and a better steel stud with a thinner cross-section and shorter length is preferable. The paper also includes a literature review related to nearly zero-energy buildings, particularly focusing on the aspect of energy efficiency and thermal bridges in systems integrating LSF.

Key Words: LSF Systems, Energy Efficiency, Thermal Bridges, Thermal Conductivity, nZeb.



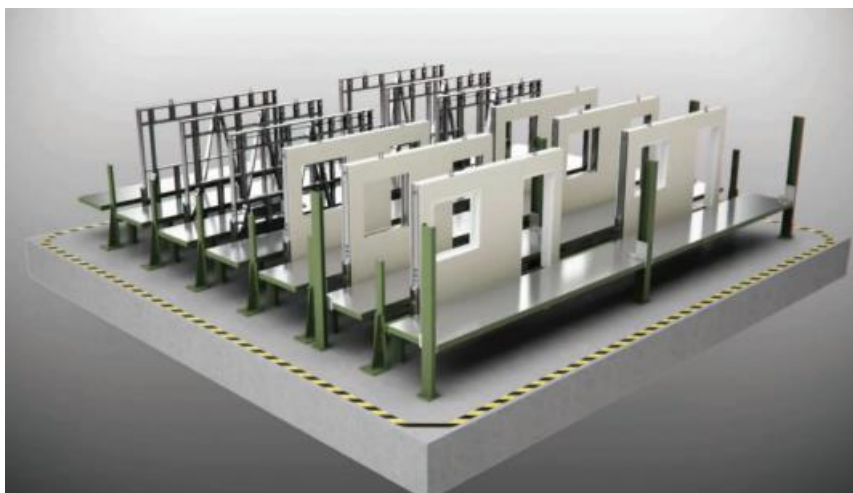
## 1. UVOD

Građevinski sektor predstavlja jedan od najvažnijih segmenata globalnog gospodarstva, no istovremeno se ističe i sa svojim značajnim uticanjem na potrošnju energije, čineći ga jednim od najvećih potrošača energije širom svijeta. [1] Danas nema sumnje u povezanost između sagorijevanja fosilnih goriva i posljedičnog ispuštanja ugljikovog dioksida s klimatskim promjenama, primjerice globalnim zatopljenjem i ekstremnim klimatskim događajima. Stoga se posljedično povećala potražnja za smanjenjem potrošnje energije u zgradama i upotreba reciklirajućih materijala u posljednjih nekoliko desetljeća. Zgrade imaju ogroman potencijal za smanjenje stakleničkih plinova u usporedbi s drugim sektorima djelatnosti. Stoga su korištenje obnovljivih izvora energije i smanjenje potrošnje energije dva glavna prioriteta i izazovi 21. stoljeća za razvijene zemlje i zemlje u razvoju. U tom kontekstu Europska unija je postavila nekoliko ciljeva u Direktivi o energetske učinkovitosti zgrada – EPBD u vezi „gotovo nultih energetskih zgrada“ za 2020 godinu.

U Europskoj uniji (EU), energetska potrošnja u sektoru zgradarstva čini više od 40% ukupne konačne energije potrošene u EU, pri čemu stambene zgrade čine čak 36% ukupne potrošnje energije u tom sektoru [1]. Radi promicanja energetske učinkovitosti i održivosti u ovom sektoru, ključno je smanjenje potrošnje energije u zgradama, posebno tijekom njihove operativne faze, koja čini između 80% i 85% ukupne potrošnje energije tijekom njihovog životnog ciklusa [2]. Veliki dio ove potrošnje zauzima potreba za grijanjem i hlađenjem, koji čine od 55% do 74% potrošnje, ovisno o klimatskim uvjetima, te proizvodnja tople vode. [2]. Za nove zgrade, treba uložiti napore kako bi se smanjila potrošnja energija za grijanje i hlađenje i koristili ekološki prihvatljivi materijali. Pandemija COVID-19 promijenila je svakodnevni život ljudi i donijela mnoge promjene u održivim zahtjevima građevinske industrije [1]. Tri glavna aspekta stambenih zgrada koji uključuju - zdravlje i sigurnost, okoliš i udobnost – doživljavaju značajnije transformacije prema održivosti. Za mnoge ljude, dulji periodi koje su morali provoditi u izolaciji rezultirali su novim načinom života koji je dovelo do veće potrošnje resursa, kao što je potrošnja energije. Ističe se važnost ispunjavanja strogih normi za uštedu energije za nove kuće te za preuređenje i poboljšanje energetske učinkovitosti ovojnice zgrada [1]. Stoga je imperativ razviti ili optimizirati konstrukcijske sustave i metode koje pružaju značajne prednosti u smanjenju energetskih troškova zgrada tijekom njihove operativne faze.

U proteklih godinama, pojavili su se alternativni pristupi tradicionalnom građevinskom sektoru koji su postali sveprisutni. S obzirom na brojne prednosti koje metalne konstrukcije nude tijekom cijelog životnog ciklusa zgrade, upotreba čelika kao konstrukcijskog materijala i elemenata postala je znatno značajnija u građevinskom sektoru. Lagani čelični okvir (LSF), koji se karakterizira upotrebom hladno oblikovanih čeličnih profila i montažnih a ne strukturalnih ploča, predstavlja primjer ovog novog i brzo rastućeg trenda. Osnovni građevni materijal za nosivu konstrukciju jest čelik. [3] Od lima visoke čvrstoće, koji se doprema u traci namotanoj na kolut, primjenom novih inovativnih tehnologija na sofisticiranim strojevima proizvode se tankostjeni C profili i detalji spojeva i priključaka za izradu krovnih ili stropnih rešetki te zidnih nosača. Riječ je o osnovnim elementima nosive konstrukcije sa svim rupama i dijelovima za prihvat završnih obloga i fasade. Na čeličnu konstrukciju ugrađuju se unutarnje i vanjske obloge, OSB ploče, ploče otporne na požar, termopaneli te ispuna kojom se postižu potrebna toplinska i vatrootporna svojstva zgrade gotovo nulte energije. (slika 1) U tvornici se u zidne i stropne panele ugrađuju sve instalacije: elektroinstalacije, grijanje, hlađenje, sustav za vodovod i kanalizaciju te unutarnja i vanjska stolarija. Također se ugrađuje aluminijska potkonstrukcija i elementi za ventiliranu fasadu (ili za neku drugu vrstu fasade koja je predviđena projektnim rješenjem), dok se na gradilištu izvode završni elementi interijera (parket, keramika itd.) prema odabiru investitora te završno bojenje zidova i stropova. Gotovi zidni paneli montiraju se na gradilištu na ugrađene anker-

sklopove za priključak na armiranobetonsku konstrukciju ili čelične pilote. Zidni elementi u proizvodnome pogonu su pod strogim nadzorom kvalitete proizvoda. [3]



*Slika 1: Inovativna tehnologija građenja LSF konstrukcija [3]*

Unatoč očitim prednostima Laganih čeličnih okvira (LSF), nedostatan projektiranje i nepravilna izgradnja mogu rezultirati pojavom toplinskih mostova zbog intenzivne upotrebe čelika, što može ozbiljno narušiti toplinsku izolaciju vanjske ovojnice zgrade te njezinu ukupnu energetska učinkovitost.

Danas nije dovoljno samo smanjiti potrošnju energije u zgradama, primjerice, povećanjem debljine izolacije na vanjskim zidovima kako bi se smanjili gubici topline. Potrebno je istovremeno razmotriti i postići optimalan kompromis između primarne energije i energije za grijanje i hlađenje, uzimajući u obzir ekonomske aspekte različitih građevinskih komponenata. To znači da trebamo maksimalno iskoristiti toplinska svojstva materijala kako bismo postigli visoku energetska učinkovitost zgrada, ali istovremeno minimizirali resurse i ekološki utjecaj.

## 2. Zgrade gotovo nulte energije (nZEB)

Direktiva 2010/31/EU europskog parlamenta i vijeća od 19. svibnja 2010. o energetska učinkovitosti zgrada / (engl. Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings - EPBD II)[4] navodi nužnost utvrđivanja konkretnih mjera kako bi se ostvario veliki neiskorišteni potencijal ušteda energije u zgradama i kako bi se povećao broj zgrada koje, ne samo da ispunjavaju trenutne minimalne zahtjeve energetska učinkovitosti, već su i energetska učinkovitije, a sve u cilju smanjenja potrošnje energije i emisije stakleničkih plinova. U navedenoj Direktivi uvodi se pojam zgrade gotovo nulte energije (engl. nearly zero-energy building, nZEB) što je pojam za zgradu koja ima vrlo visoku energetska učinkovitost.

Tehnički propis Republike Hrvatske definira Zgrade gotovo nulte energije na sljedeći način: " 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 ovim propisom". [5] Od 31. prosinca 2020. sve nove zgrade moraju biti „zgrade gotovo nulte energije“; a nakon 31. prosinca 2018. nove zgrade koje kao vlasnici koriste tijela javne vlasti moraju biti „zgrade gotovo nulte energije“.

Energetska učinkovitost jedna je od pet dimenzija europske energetske unije. Kroz načelo „Prvo energetska učinkovitost“ (engl. energy efficiency first), Europska unija je prepoznala i potvrdila da je upravo energetska učinkovitost europski najznačajniji izvor energije. U svjetlu aktivnosti koje je Europska unija pokrenula Zelenim planom, poseban značaj za energetske obnovu zgrada ima usvajanje Inicijative vala obnove (engl. Renovation wave) 14. listopada 2020. godine. Val obnove je inicijativa za pokretanje dekarbonizacije zgrada u Europi. Cilj inicijative je barem udvostručiti godišnju stopu energetske obnove stambenih i nestambenih zgrada do 2030. godine i poticati dubinske energetske obnove. Kako bi se to postiglo, strategija prepoznaje sedam područja intervencije s vodećim akcijama koje su ključne za omogućavanje takvih razmjera obnove, od kojih se tri smatraju prioritetom za politiku i financiranje:

- rješavanje energetske siromaštva;
- obnavljanje javnih zgrada i
- dekarbonizacija grijanja i hlađenja.

Ovime se prepoznaje da se obnova zgrada ne može dogoditi sama, već mora ići istovremeno s dekarbonizacijom opskrbe grijanjem i hlađenjem. Inicijativa također poziva na integraciju obnovljivih izvora energije (OIE), za proizvodnju energije za pokrivanje vlastite potrošnje.

Područje energetske učinkovitosti u zgradarstvu u Republici Hrvatskoj regulirano je Zakonom o energetske učinkovitosti (Narodne novine, broj 127/14, 116/18, 25/20, 32/21, 41/21), Zakonom o gradnji (Narodne novine, broj 153/13, 20/17, 39/19, 125/19), i podzakonskim aktima koji slijede iz tih Zakona. [6]

Postoje četiri principa za projektiranje zgrada nulte energije (NZEB). Ovi principi mogu se primijeniti na različitim razinama i mogu uključivati detaljne metrike poput ugrađene energije i utjecaja na okoliš. Ovisno o tipologiji zgrade i klimatskom kontekstu, projektanti moraju primijeniti ova četiri principa [7] kako bi identificirali najprikladnije mjere koje poštuju ove korake ili principe, koji su navedeni u nastavku: (slika 2)

- Prvo, smanjenje isporučene energije za sve novoizgrađene zgrade. Vrijednost isporučene energije odnosi se na zbroj potreba zgrade, grijanja prostora, hlađenja prostora, tople vode za domaćinstvo, pomoćne energije, ventilacije, osvjetljenja i uređaja.
- Drugo, poboljšanje unutarnje kvalitete okoline omogućujući maksimalnu termalnu udobnost i izbjegavanje pregrijavanja. To uključuje kontrolu kvalitete zraka putem mehaničke ventilacije.
- Treće, određivanje postotka obnovljive energije koja će pokriti godišnju ravnotežu obnovljive energije. Također je važno izmijeniti dodatne mjere za rješavanje problema podudaranja i pohrane energije.
- Četvrto, smanjenje opće vrijednosti potrošnje primarne energije i emisija ugljika godišnje. Također je važno izmijeniti dodatne mjere za rješavanje mobilnosti i pitanja ugrađene energije materijala.



Slika 2: Principi pri projektiranju Nzeb-a

Ti principi su priznati diljem svijeta i dovode do odabira setova rješenja, sustava i proizvoda usmjerenih prema energetske učinkovitosti, zadovoljavajući ukupnu potrošnju primarne energije i osiguravajući IEQ. Optimalna ravnoteža između potražnje i ponude, ili između uštede energije i proizvodnje energije, uvijek će biti izazovna i ovisi o lokalnom kontekstu i isplativosti različitih primjena. [7]

U Europi postoji širok spektar različitih koncepata i dobrovoljnih standarda za visoko energetske učinkovite zgrade, pa čak i klimatski neutralne zgrade. Ovi koncepti uključuju pasivne kuće, zgrade s nultom potrošnjom energije, zgrade s potrošnjom od 3 litre, plus-energetske zgrade, Minergie standard, Effnergie i mnoge druge. [8] Osim toga, ovi koncepti se odnose na različite aspekte kao što su potrošnja energije na mjestu, izvor energije, troškovi i emisije. Također, zahtjevi ovih standarda mogu varirati ovisno o tome radi li se o novogradnji ili obnovi te o tome je li riječ o stambenim ili nestambenim zgradama.

U suštini, postoje različita stajališta o tome koliko bi zgrade s nultom potrošnjom energije trebale biti jasno definirane, u kojem aspektu treba postaviti temelje, te koje tehnike i sredstva su prikladni. Tipično, niskoenergetske zgrade će uključivati visoku razinu izolacije, vrlo energetske učinkovite prozore, visoku razinu hermetičnosti zraka i prirodnu/mehaničku ventilaciju s visokoučinkovitim povratom topline kako bi se smanjila potreba za grijanjem/hlađenjem. Dizajn pasivnih solarnih zgrada može dodatno povećati njihovu energetske učinkovitost, omogućujući zgradi da zimi prikuplja sunčevu toplinu i ljeti je odbija, ili putem integracije aktivnih solarnih tehnologija kao što su solarni kolektori za toplu vodu ili PV-paneli za proizvodnju električne energije. [8] Također, mogu se primijeniti i druge mjere za uštedu energije i resursa, kao što su vjetrenjače za proizvodnju električne energije ili sustavi za prikupljanje kišnice.

Uvođenje nZEB zgrada ima dubok i pozitivan utjecaj na današnji sustav gradnje. To potiče inovacije u građevinskoj industriji, promiče upotrebu visokokvalitetnih izolacijskih materijala i sustava za energetske učinkovitost, te potiče razvoj obnovljivih izvora energije. Ovo dovodi do bolje kvalitete života za stanovnike, smanjenja emisija stakleničkih plinova i smanjenja ovisnosti o fosilnim gorivima. [8]

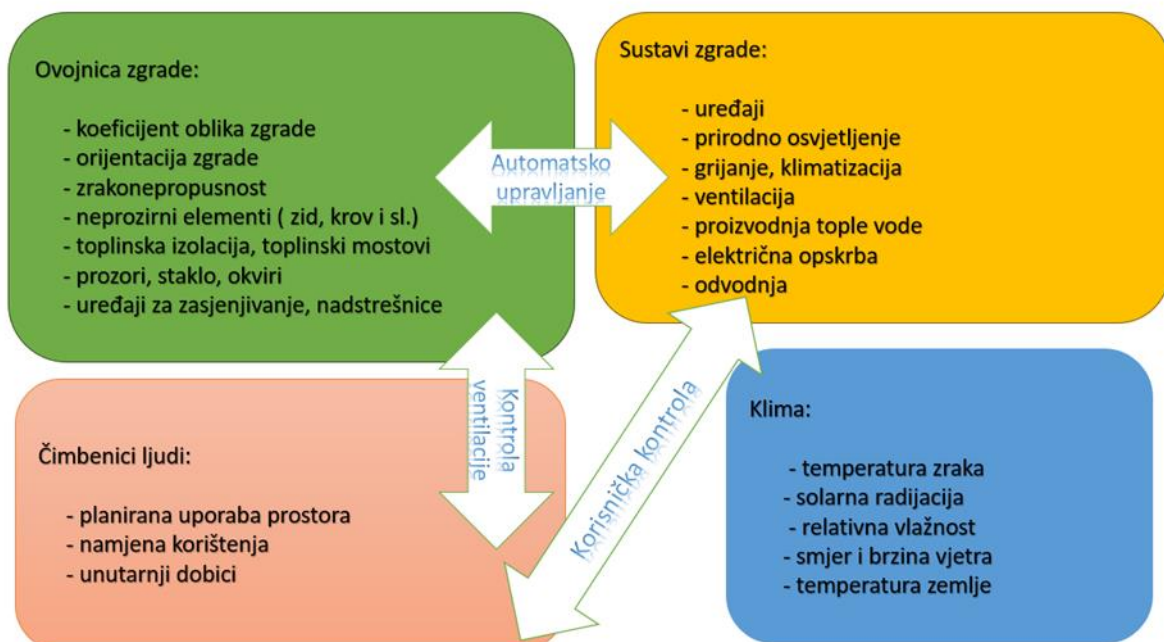
Prednosti nZEB zgrada su u tome da pomažu smanjivanju emisije staklenih plinova i doprinose borbi protiv klimatskih promjena, zgrade su energetske učinkovite, što smanjuje troškove grijanja, hlađenja i općenito održavanja, visoka energetska učinkovitost rezultira boljom temperaturnom kontrolom i udobnošću za stanovnike, imaju višu tržišnu vrijednost zbog niskih operativnih troškova, te također stvaranje i primjena nZEB tehnologija otvara nove poslovne prilike u sektoru obnovljive energije i građevinske industrije.

Nedostaci nZEB zgrada uključuju visoke početne troškove, veće tehničke izazove zbog složenijih tehničkih sustava, te su takve zgrade ovisne o obnovljivim izvorima energije, što može biti izazov u slučaju nestanka energije.

Zgrade gotovo nulte energije predstavljaju ključnu komponentu održive i energetske učinkovite budućnosti. Iako postoje izazovi u pogledu početnih troškova i tehničke složenosti, nZEB zgrade donose brojne prednosti, uključujući smanjenje emisija, niže troškove energije i poboljšanu kvalitetu života. Njihova primjena je ključna za postizanje ciljeva održivog razvoja i borbe protiv klimatskih promjena.

### 3. Energetska učinkovitost LSF zgrada

Toplinsko ponašanje i energetska učinkovitost zgrada ovise o mnogo faktora. (slika 3) Osim toga, njihova procjena trebala bi se provoditi na holistički način, što čini njihovu točnu evaluaciju izazovnom. Ovi parametri mogu se grupirati u četiri glavna ključna faktora kako je prikazano na slici : (a) klima; (b) ovojnica zgrade; (c) sustavi zgrade; i (d) čimbenici ljudi. [9] Ovi će faktori biti kratko opisani u sljedećim odjeljcima.



Slika 3: Ključni čimbenici koji utječu na potrošnju energije u zgradama

Za postizanje nZEB standarda, je ključno ispuniti određene zahtjeve ovisno o vrsti (namjeni) zgrade, lokaciji zgrade i o faktoru oblika zgrade.

Zahtjevi za zgradu gotovo nulte energije određeni su:

- godišnjom potrebnom toplinskom energijom za grijanje po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade,  $Q''_{H,nd}$  [kWh/(m<sup>2</sup>·a)],
- godišnjom primarnom energijom po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade  $E_{prim}$  [kWh/(m<sup>2</sup>·a)] koja ovisno o namjeni uključuje energiju za grijanje, hlađenje, ventilaciju, pripremu potrošne tople vode i rasvjetu,
- minimalnim udjelom isporučene energije podmirenim iz obnovljivih izvora energije,
- ispunjavanjem zahtjeva o zrakopropusnosti koji se dokazuje ispitivanjem na zgradi prije tehničkog pregleda zgrade.

### 3.1. Klima

S obzirom na klimu, koja je ključan vanjski faktor s izraženim utjecajem na toplinsko ponašanje i energetske učinkovitost zgrada, posebice kad je riječ o potrošnji energije za grijanje i hlađenje, nužno je uzeti u obzir geografski položaj zgrade. Klima se sastoji od različitih parametara, među kojima su zračna temperatura, solarno zračenje, relativna vlažnost, brzina i smjer vjetra, temperatura tla i broj sunčanih sati.

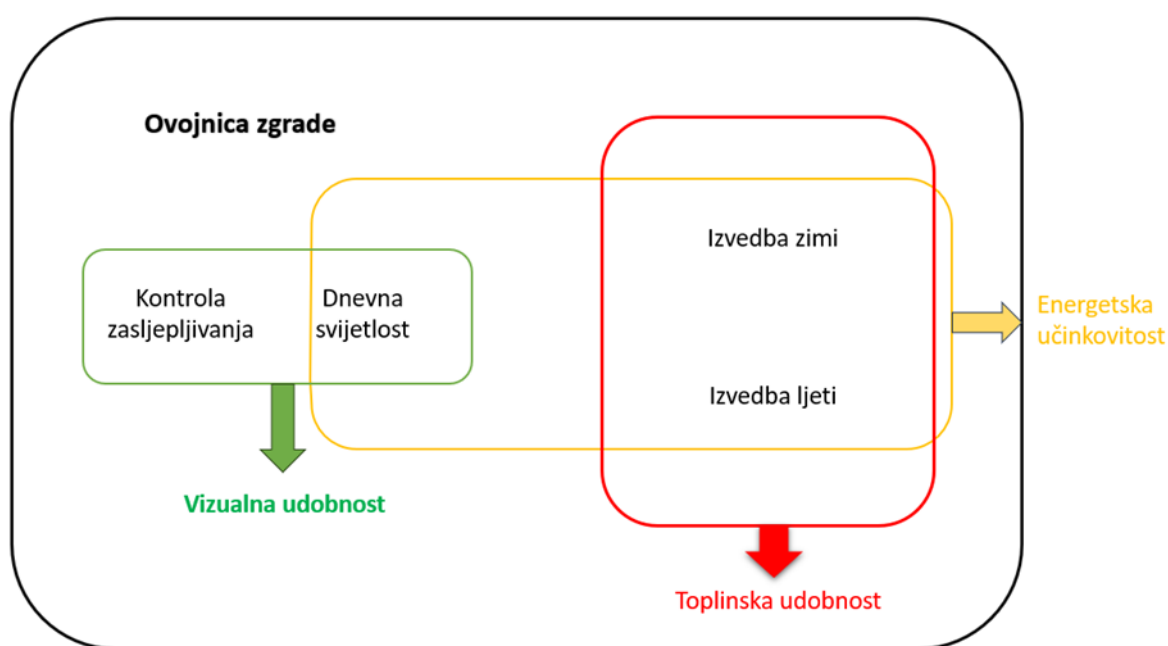
Jedna od najraširenijih metoda za klasifikaciju klimatskih zona je Köppen-Geiger klasifikacija [8], koja svaku klimu označava pomoću skupa od tri slova. Prvo slovo predstavlja glavnu klasifikaciju klime, a označava se sa slovima kao što su A (ekvatorska), B (aridna), C (toplo umjerena), D (snježna) i E (polarna). Drugo slovo identificira uobičajenu količinu oborina i označava se sa slovima poput W (pustinja), S (stepa), f (potpuno vlažna), s (suhi ljeti), w (suhi zimi) i m (monsunska). Treće slovo kategorizira temperaturu i koristi se za označavanje klime poput h (vruća aridna), k (hladno ljeti), a (toplo ljeti), b (umjereno toplo ljeti), c (svježije ljeti), d (izrazito kontinentalna), F (polarni mraz) i T (polarna tundra).

U Hrvatskoj postoje dvije klimatske zone odnosno referentne klime – kontinentalna i primorska klima. Referentna klima jest klima meteorološke postaje preuzete kao karakteristične za područje kontinentalnog i za područje primorskog dijela Hrvatske. Referentna meteorološka postaja za kontinentalnu Hrvatsku je Zagreb - Maksimir, a referentna meteorološka postaja za primorsku Hrvatsku je Split - Marjan. Kontinentalna klima uzima se kao referentna kada je srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade prema podacima iz Meteoroloških podataka za najbližu klimatski mjerodavnu meteorološku postaju  $\Theta_{mm}$  jest  $\leq 3$  °C. [4] Primorska klima uzima se kao referentna kada srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade prema podacima iz Meteoroloških podataka za najbližu klimatski mjerodavnu meteorološku postaju  $\Theta_{mm}$  jest  $> 3$  °C.[4]

U svrhu procjene i povezivanja vanjskih temperatura s potrebom energije za grijanje i hlađenje, često se koriste koncepti dana grijanja i dana hlađenja (HDD i CDD, redom). Ovi koncepti se odnose na broj dana u godini kada temperatura prelazi određenu referentnu baznu temperaturu, kao što je 18°C. U literaturi je opisano da hladnije klime, karakteristične za središnje i nordijske europske zemlje ( $C_{fb}$  i  $D_{fb}$ ), zahtijevaju znatno više energije za grijanje nego za hlađenje. S druge strane, južne europske zemlje ( $C_{sa}$  i  $C_{sb}$ ) imaju manje potrebe za grijanjem u usporedbi s potrebama za hlađenjem.

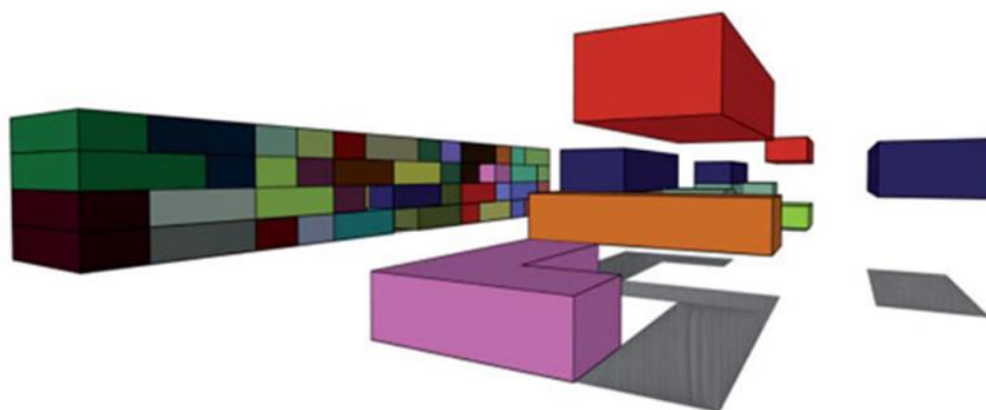
### 3.2. Ovojnica zgrade

Iz zgrada toplina se gubi prolaskom kroz ovojnicu (zidove, prozore, krov, pod). Ti gubici topline nazivaju se transmisijski gubici. Gotovo 10% ukupne potrošnje energije otpada na kompenzaciju transmisijskih gubitaka topline. Oni se ograničavaju dovoljnim debljinama toplinske izolacije i višestrukim IZO staklima.[4] Ove nepoželjne prijenose topline/gubitke moguće je još ublažiti odabirom stakala s nižim vrijednostima toplinske provodljivosti i okvira s trakama za brtvljenje, korištenjem izoliranih vanjskih roleta tijekom noći, dizajniranjem odgovarajućih nadstrešnica i bočnih zaklonaca, te primjenom prikladnih uređaja za kontrolu sjenčanja (vanjski uređaji su učinkovitiji). Toplina se također gubi zbog provjetravanja, odnosno izlaska toplog zraka i ulaska hladnog zraka u prostor. Ti toplinski gubici nazivaju se ventilacijski gubici. Ventilacijski gubici su neizbježni zbog potrebe za provjetravanjem prostora, a postoje i neželjeni gubici uslijed infiltracije zraka zbog lošeg brtvljenja ovojnice. Neželjeni ventilacijski gubici (infiltracijski) ograničavaju se pravilnim brtvljenjem prilikom ugradnje prozora, a nužni ventilacijski gubici (zbog provjetravanja) mogu se smanjiti ugradnjom mehaničke ventilacije s rekuperacijom. Prozirna ovojnica zgrade je vrlo važna za toplinsku i vizualnu udobnost korisnika zgrade, kao što je prikazano na Slici 4. Naime, unutarne okruženje zgrade, kao što su kontrola zaslijepljenosti, dnevna svjetlost i pogledi, snažno ovise o karakteristikama prozora.



Slika 4: Važnost staklenih površina: energetska učinkovitost i okoliš zgrade

S obzirom na veću prikladnost LSF sustava za modularnu konstrukciju, Murtinho i suradnici [11] razvili su arhitektonski koncept višekatne stambene zgrade s LSF sustavom, koji je prikazan na Slici 5. Glavne značajke ovog koncepta projektiranja su modularnost, jednostavnost izgradnje, energetska učinkovitost i pristupačnost, osiguravajući posebnu fleksibilnost, optimizaciju netto površine i prilagodljivost.



Slika 5: Modularni arhitektonski koncept za višekatne zgrade s Laganim čeličnim okvirom (LSF-om)

### 3.3. Čimbenici ljudi

Utjecaj čovjeka je još jedna iznimno važna tema koja utječe na energetska učinkovitost zgrada. Naime, zgrade se naseljavaju i upravljaju od strane ljudi koji mogu doprinijeti povećanju ili smanjenju potrošnje energije u objektu. Neki primjeri povezani s ovim aspektom uključuju raspored korištenja prostora (npr. danju, noću ili 24 sata na dan), vrstu upotrebe (npr. uredi, stambene zgrade, bolnice) i unutarnje dobitke (npr. broj stanara, razina metaboličke aktivnosti i korištenje opreme). Očito, ista zgrada koja se koristi od strane različitih ljudi može imati vrlo različite vrijednosti potrošnje energije zbog razlika u ponašanju stanara i zahtjevima za udobnošću, primjerice, postavkama temperature grijanja i hlađenja.

U uredu su obično prisutni veći interni dobitci topline zbog intenzivne uporabe informacijske tehnološke opreme (npr. računala i monitori) i posljedičnog otpuštanja topline. Također, uredi su obično zauzeti tijekom dana, kada su vanjske temperature više. Ove dvije karakteristike ureda mogu rezultirati većim potrebama za hlađenjem u usporedbi s drugim vrstama zgrada. Dobar primjer povezan s metaboličkom aktivnošću stanara je sportska dvorana. U ovom slučaju, toplina i vlaga koju ispuštaju stanari mogu biti vrlo visoke zbog visoke metaboličke aktivnosti i možda veće gustoće ljudi. Stoga se potreba za hlađenjem može povećati, a ventilacija se treba pojačati, ne samo radi uklanjanja vlage iz zraka, već i zbog uklanjanja ispuštene metaboličke CO<sub>2</sub>. Osim toga, ovi stanari mogu zahtijevati niže postavke temperature za osjećaj toplinske udobnosti, što je dodatan razlog zašto potrošnja energije za hlađenje prostora može biti veća u sportskim dvoranama.

### 3.4. Sustavi zgrada



Još jedan važan čimbenik energetske učinkovitosti su sustavi zgrada. Tehnički sustavi u zgradi jesu sustavi namijenjeni za grijanje, hlađenje, pripremu potrošne tople vode (PTV), ventilaciju, klimatizaciju, rasvjetu te sustav automatizacije, dok pod termotehničkim sustavima podrazumijevamo samo sustave za grijanje, hlađenje, pripremu potrošne tople vode, ventilaciju i klimatizaciju.

Kontrola i učinkovitost opreme koja se koristi, trebaju biti što bolji kako bi se smanjila potrošnja energije u zgradi. Primjerice, potrošnja električne energije grijača s termalnom otpornosti ( $COP \cong 1$ ) u usporedbi s klima uređajem u načinu grijanja ( $COP \cong 4$ ) [9] bit će otprilike četiri puta veća za istu količinu proizvedene topline u zgradi.

Za rad tehničkih sustava potrebni su nam energenti – energija koja ih pokreće i time osigurava njihov rad. Energenti koje koristimo u zgradama mogu biti obnovljivi i neobnovljivi.

*Neobnovljivi izvori energije*, zvani još i fosilna goriva, jesu izvori energije koji se ne mogu ponovno obnoviti, poput ugljena, nafte i prirodnog plina.

*Obnovljivi izvori energije (OIE)*, jesu izvori energije koji se dobivaju iz prirodnih procesa i koji se stalno obnavljaju.

U zgradama najčešće koristimo energiju sunca, energiju vode (podzemne vode, more, rijeke, jezera,...), energiju zemlje te biomasu.

Odabir termotehničkih sustava i energenata uvelike utječe na energetske svojstvo zgrade i ispunjavanje zahtjeva za zgradu gotovo nulte energije. Ispunjavanje uvjeta za gotovo nulte energetske zgrade (nZEB) može se postići različitim kombinacijama tehničkih sustava i korištenjem različitih energenata. [10] Ne postoje propisani tehnički sustavi i energenti kojima se ostvaruje nZEB standard, već postoje propisani zahtjevi na energetske svojstvo zgrade koje mora biti ispunjeno za postizanje nZEB standarda. Pri odabiru tehničkih sustava uzimamo u obzir više čimbenika. Jedan od najvažnijih jest dostupnost energenata na lokaciji zgrade, kao i sama lokacija zgrade. Tehničke (ne)mogućnosti ugradnje pojedinog sustava su također važan čimbenik pri odabiru energenata i tehničkih sustava. [10]. Ukoliko želimo ugraditi solarne kolektore za grijanje i pripremu potrošne tople vode, potrebno je imati dostatnu slobodnu površinu krova odgovarajuće orijentacije ili eventualno prikladno mjesto na vlastitoj parceli pokraj zgrade. Isto vrijedi i za fotonaponske panele za proizvodnju električne energije.

## 4. POVIJESNI ZNAČAJ LSF KONTRUKCIJA

“Lagani čelični okviri” ili LSF je međunarodno poznata oznaka za konstruktivni sustav u kojem se konstrukcija sastoji od hladno oblikovanih pocinčanih metalnih profila smanjene debljine (cca 1 mm) i, posljedično, vrlo male težine. Prve građevine izgrađene u LSF-u datiraju iz ranog dvadesetog stoljeća, gdje se pokušalo preslikati drvenu konstrukciju, koja je u to vrijeme bila najčešći konstruktivni sustav, primjerice u Sjedinjenim Američkim Državama (SAD). Sustav gradnje u LSF-u omogućio je prevladavanje nekih nedostataka u drvenoj konstrukciji, kao što je njegova osjetljivost na vatru, termite i varijacije vlage, uz dodatnu prednost superiorne mehaničke čvrstoće, vrlo korisne tijekom pojave ekstremnih atmosferskih uvjeta, npr. uragana i tornada.

Prvi prototipovi stambenih objekata u LSF-u predstavljeni su na Svjetskoj izložbi u Chicagu (SAD) 1933. godine, na kojoj su te kuće predstavljene kao “Kuće budućnosti” [12]. Također je u SAD-u nastao prvi kodeks/propis o dimenzioniranju strukture u LSF-u koji je 1946. objavio AISI “American Iron and Steel

Institute”, [12] nazvan “Specifikacija za projektiranje čeličnih konstrukcijskih elemenata laganog promjera”.

Nakon Drugog svjetskog rata, zbog goleme devastacije objekata koja se dogodila u istom razdoblju, hitne potrebe za obnovom u zemljama poput Njemačke, Francuske i Japana, brige za okoliš zaštite šuma, povećanja cijene drvene građe i iskustva stečenog upotreba čelika tijekom godina rata, prefabrikacija i masovna izgradnja struktura u LSF-u doživjela je novi impuls.

Izgradnja unutarnjih pregradnih elemenata (npr. pregradni zidovi) u LSF-u još je jedna tržišna niša na kojoj je ovaj konstruktivni sustav dobio vrlo značajan izražaj zbog njegove konkurentske prednosti. Na primjer, SFA “Steel Framing Alliance [12]” objavila je da je 2004. godine u SAD-u 81% unutarnjih pregradnih zidova bilo izvedeno u LSF-u. Trenutno, prema izvješćima SFIA “Steel Framing Industry Association [12]”, 30 do 35% svih nestambenih zgrada u SAD-u izgrađeno je sa strukturalnim i nestrukturalnim elementima u LSF-u

Nacionalna gradnja, kao posljedica međunarodne ekonomske krize na kraju prvog desetljeća ovog tisućljeća, dovela je do toga da mnoge građevinske tvrtke "zatvore vrata", druge traže nove prilike u inozemstvu, a treće se i dalje klade na inovativne konstruktivne sustave kako bi se istaknule od konkurencije, predstavljajući nekoliko dobitaka kao što je slučaj s LSF konstrukcijama (npr. ekonomičnost, brzina izvedbe, bolja izvedba, primjerenost industrijskoj prefabrikaciji u seriji, poboljšano osiguranje i kontrola kvalitete, smanjena težina i jednostavnost transporta, trajnost i mogućnost servisiranja itd.). S obzirom na inherentne karakteristike sustava gradnje u LSF-u, posebice njegovu lakoću i veliki potencijal za prefabrikaciju, ovaj sustav ima veliki potencijal za korištenje na tržištu obnove zgrada, ali i za izvoz u zemlje u kojima je stambeno tržište još uvijek željni novih domova i gdje su sredstva za njihovu izgradnju na tradicionalan način vrlo rijetka ili nepostojeća (npr. neke zemlje afričkog kontinenta).

## 5. KOMPONENTE LSF KONSTRUKCIJA

Lako čelične okvire često koristimo u građevinskoj industriji zbog svoje praktičnosti i izdržljivosti. Međutim, za postizanje niskoenergetskih zgrada s ovim sustavom zahtjeva se pažljivo projektiranje toplinskom izolacijom i eliminacija toplinskih mostova. Nadalje će se analizirati tri glavne komponente LSF zgrada i njihov utjecaj na postizanje Nzeb standarda. Osim tri glavne komponente koje su: hladno oblikovani čelični elementi, ploče za oblaganje i izolacijski materijali. Pored toga tu su još i materijali za pričvršćivanje kao što su samobušeci vijci, zakovice, čavli, spajalice i sl. kao i zrakonepropusne i vodonepropusne membrane te završni pokrovni slojevi. [12] Završni slojevi mogu biti žbuka, pločice, opeka, obložene ploče i sl. ovisno o željenoj namjeni i konstrukciji. Kako bi se izbjegli problemi povezani s vlagom u tlu LSF zgrada treba prizemnicu, obično betonsku ploču, a temeljni radovi obavljaju s konvencionalnim metodama .

### 5.1. Hladno oblikovani čelični elementi (CFS)

CFS se danas smatra najodrživijim građevinskim proizvodom u građevinskoj industriji i uglavnom se koristi u komercijalnom sektoru gdje se cijele zgrade konstruiraju.

Hladno oblikovani čelični elementi, CFS se smatraju najodrživijim i sve popularnijim modernim građevinskim proizvodom u građevinskoj industriji [12] i uglavnom se koristi u komercijalnom sektoru gdje se grade cijeli objekti. Presjeci CFS-a imaju inherentne prednosti, kao što su visoki omjer nosivosti i težine te izvrsna mogućnost recikliranja i ponovne upotrebe. CFS elemente moguće je valjati u različite poprečne oblike, a optimizacija tih oblika može dodatno poboljšati njihovu nosivost i otpornost na opterećenja, rezultirajući ekonomičnijim i učinkovitijim rješenjima za izgradnju. Hladno oblikovan čelik smatra se pogodnim materijalom za izgradnju energetski učinkovitih zgrada [13]. Čelik ima gotovo stopostotnu stopu recikliranja, što maksimizira učinkovitost materijala i smanjuje otpad. Reciklirani čelik koristi se u većini čeličnih proizvoda, uključujući čelične okvire, koji sadrže najmanje 25% recikliranog čelika [13]. Tokom recikliranja, čelik očuva sve svoje osobine na molekularnoj razini, pružajući veću čvrstoću [13]. Osim toga, čelični profili imaju visok omjer čvrstoće i težine, a za čelične konstrukcije potrebno je manje održavanje jer nisu osjetljive na vlagu ili biološke aktivnosti [2]. CFS elementi valjaju se na sobnoj temperaturi iz tankih čeličnih limova [14]. Imaju mnoge prednosti u odnosu na tradicionalne čelične profile valjane na visokoj temperaturi, kao što su veći omjer čvrstoće i težine, iznimno fleksibilan proces proizvodnje i lakoća rukovanja, prijevoza i montaže zbog manje težine. CFS sekcije široko se koriste u krovovima i zidovima, čeličnim regalima za skladištenje i mnogim drugim sličnim nosivim elementima [13]. U posljednjim godinama upotreba CFS-a također je popularan izbor u modularnoj izgradnji, što je alternativa konvencionalnoj izgradnji na gradilištima



Slika 6 : Primjer stambene zgrade s Laganim čeličnim okvirom tijekom izgradnje [9]. (a) Čelični okvir; (b) vanjski sloj sastavljen od OSB ploča.

Povećanje svjetske populacije i ograničenost prirodnih resursa postavili su veće zahtjeve za strukturalnim sustavima koji su ekonomičniji, kako bi se ostvarila održiva ekonomija i društvo. Hladno-oblikovani čelik (CFS) može se oblikovati u različite konfiguracije, što pruža jedinstvenu priliku za dodatno povećanje nosivosti tih poprečnih presjeka putem procesa optimizacije [13]. Međutim, CFS elementi pokazuju određene nedostatke u toplinskom ponašanju, posebno zbog visoke toplinske provodljivosti čelika, što može rezultirati značajnim gubicima ili dobitcima topline putem termalnih mostova i negativno utjecati na toplinske karakteristike zgrada. Stoga je od suštinskog značaja unaprijediti dizajn CFS konstrukcija kako bi se postigao visok stupanj održivosti i energetske učinkovitosti. Dublje razumijevanje optimizacije i toplinske učinkovitosti može pomoći istraživačima u provođenju održivog projektiranja s obzirom na energetske disipaciju, nosivost i materijalne troškove.

Predviđanje i kvantifikacija toplinske učinkovitosti CFS struktura općenito se smatraju izazovima. Primjena odgovarajuće izolacije uvijek se smatra najučinkovitijim načinom smanjenja toplinskog mosta i potrošnje energije. Osim korištenja izolacijskog materijala istraženo je da i promjena poprečnog presjeka CFS-a može imati veliki utjecaj na njegova toplinska svojstva. U ovom radu će se istražiti kako različiti poprečni presjeci u kombinaciji sa drugim vrstama izolacijskog materijala utječu na toplinska svojstva LSF sustava i na smanjenje toplinskih mostova istog tog sustava.

CFS je obično tanak u odnosu na svoju širinu i može se izvijati pri naprezanjima ispod granice tečenja. Posljednjih godina, deformacijsko izvijanje se smatra jednim od najvažnijih graničnih stanja za projektiranje CFS greda i stupova. Budući da su poprečni presjeci CFS-a relativno tanki i u nekim dijelovima težište i strmo središte se ne poklapaju, savijanje i torzijsko izvijanje mogu biti kritičan faktor za kompresijske elemente. Zakrivljenost mreže također je poznati problem koji često postaje kritičan u projektiranju. Učinkovitost korištenja visokotlačnog čelika ovisi o vrsti načina kvara. Pod određenim uvjetima, kao što su stupci s velikim omjerima vitkosti, slom je obično ograničen elastičnim izvijanjem; stoga, korištenje čelika visoke čvrstoće nije uvijek opravdano u smislu ukupnih troškova. Glavni nedostatak CFS-a kada gledamo projektiranje Zgrada nulte energije je visoka toplinska vodljivost čelika. Značajan gubitak topline (toplinski most) može se minimizirati oblaganjem, izolacijom i pažljivim detaljiziranjem. Bolja toplinska učinkovitost može se postići i na druge načine povećanjem debljine izolacije i obloge.

#### 5.1.1. Proizvodnja hladno oblikovanih čeličnih profila

Hladno oblikovani profili mogu se proizvoditi pomoću tri procesa: vučenje, savijanje i valjanje [15]. Vučenje uključuje povlačenje čelične trake kroz neaktivirane valjke koji se koriste čeljustima. Ovaj jeftin proces proizvodnje pogodan je za proizvodnju vrlo tankih i složenih profila. Savijanje čeličnog lima može se postići pomoću kočnica, savijača ili preša za sile pada. Glavna razlika između ovog procesa proizvodnje i druga dva jest što čelična traka ne treba biti valjana. Naime, postupak valjanja više se koristi u industrijskoj proizvodnji hladno oblikovanih čeličnih profila zbog veće produktivnosti. Procesi vučenja i valjanja slični su; međutim, valjci za oblikovanje u potonjem su aktivirani. Hladno oblikovani čelični profili obično se proizvode duljine do 12 metara [13].

Hladno oblikovani čelik (CFS)—također nazvan lagani čelik ili metalni klinovi—hladno je oblikovan u elemente u obliku slova "C" ili "Z" koji mogu izdržati velika opterećenja. "Hladno oblikovani" znači da su dijelovi oblikovani na sobnoj temperaturi provođenjem čelika kroz niz valjaka.

Ovi čelični elementi s laganim okvirom, u načelu, dijele sličnosti s konstrukcijama od drvenih okvira. Koriste se za uokvirivanje zidova, podova i krovova na gotovo isti način kao i drveni nosači standardnih dimenzija. Zbog svoje izvanredne čvrstoće, lagani čelik također zahtijeva manji broj nosača jer se mogu postaviti na većem razmaku jedan od drugoga. Kao posljedica toga, lagani čelik generalno proizvodi manje otpada, što čini ovu opciju ekološki prihvatljivijom i financijski isplativijom u usporedbi s drvenim alternativama.

S druge strane, konstrukcijski čelik je čelik koji je proizveden vrućim valjanjem, što znači da su elementi oblikovani dok je čelik bio rastaljen i u tekućem stanju. Projekti koji uključuju konstrukcijski čelik uključuju teže i masivnije elemente te se primjenjuju za izgradnju većih otvorenih prostora, građevina, mostova i industrijskih objekata.

U kombinaciji s betonom, najtrajnije konstrukcije koriste konstrukcijski čelik. Budući da je deblji i teži od lakog čelika, najbolje metode pričvršćivanja uključuju zavarivanje, spajanje vijcima ili zakivanje.

Kvalitete čelika koje se koriste za dizajn hladno oblikovanih elemenata i profiliranih limova proizvedenih od čelika propisane su u Eurokodom EN1993-1-3 [16]. Kako bi se izbjegla korozija i povećala trajnost, čelični lim obično je pocinčan, prema propisima u EN10326 [17]. Prema tom standardu, kontinuirano pocinčana traka čelika za vruće uranjanje označena je kao S220GD+Z, S250GD+Z, S280GD+Z, S320GD+Z, S350GD+Z ili S550GD+Z. U tim slučajevima osnovna čvrstoća materijala mijenja se od 220 do 550 N/mm<sup>2</sup> i postoji minimalni sloj premaza G275, s normalnom debljinom cinka od 0,04 mm (275 g/m<sup>2</sup>), što dovodi do izvrsne trajnosti za trenutne primjene LSF-a.

### 5.1.2. Prednosti čeličnih nosača (CFS) u usporedbi s trenutnim tradicionalnim građevinskim materijalima

Čelični nosači imaju široku primjenu u građevini zbog svojih brojnih prednosti u odnosu na druge, tradicionalnije, građevinske materijale. Sve više se usvaja ovaj materijal u metodi građenja zbog svoje održivosti. Prednosti koje ćemo navesti se izravno uspoređuju s vruće valjanim čelikom (HRS) kao sljedećim proizvodom u smislu performansi.

- Lako prilagodljiv projektu: Čelični nosači omogućavaju jednostavnu prilagodbu različitim projektima zbog svoje fleksibilnosti i mogućnosti oblikovanja prema specifičnim zahtjevima.
- Otpornost na koroziju: Čelični nosači su izuzetno otporni na koroziju, što ih čini dugotrajnijima od tradicionalnih materijala poput drva ili betona, posebno u agresivnim okolišima.
- Manji ekološki utjecaj (proizvodni proces): Proizvodnja čeličnih nosača ima manji ekološki utjecaj u usporedbi s tradicionalnim materijalima, doprinoseći održivijem građevinskom sektoru.
- Niži dugoročni trošak (održavanje i trajnost): Unatoč početnim troškovima, čelični nosači pružaju niže dugoročne troškove zbog svoje izdržljivosti na opterećenja/savijanje i potrebe za manjim održavanjem.
- Lako prefabriciranje (automatizacija): Automatizirani procesi prefabriciranja čeličnih nosača omogućavaju bržu i učinkovitiju proizvodnju, smanjujući vrijeme izgradnje.
- Lako proširenje: Čelični nosači omogućuju jednostavno proširenje zgrada ili struktura, pružajući veću fleksibilnost u prilagodbi budućim potrebama.
- Manje čelika s istim performansama: Čelični nosači pružaju visoke performanse uz manju količinu materijala u usporedbi s tradicionalnim nosačima, čime se smanjuje ukupna potrošnja resursa.
- Bez širenja uzrokovana vlagom: Za razliku od nekih tradicionalnih materijala, čelični nosači ne podliježu širenju ili oštećenju uslijed utjecaja vlage.
- Reciklažni: Čelični nosači se mogu u potpunosti reciklirati, doprinoseći održivom krugu života materijala.
- Ne doprinosi razvoju požara: Za razliku od drva, čelični nosači ne pridonose razvoju požara, što povećava sigurnost zgrada.
- Visoka čvrstoća i krutost: Čelični nosači pružaju iznimnu čvrstoću i krutost, čime se osigurava stabilnost i strukturalna integritet zgrada.
- Sigurnost u prirodnim katastrofama (potres): Zbog svoje čvrstoće, čelični nosači pružaju povećanu otpornost na potresne sile, čineći zgrade sigurnijima u slučaju prirodnih katastrofa.
- Brza gradnja (montaža): Montaža čeličnih nosača je brza i učinkovita, što dovodi do smanjenja vremena izgradnje i smanjenja ukupnih troškova.

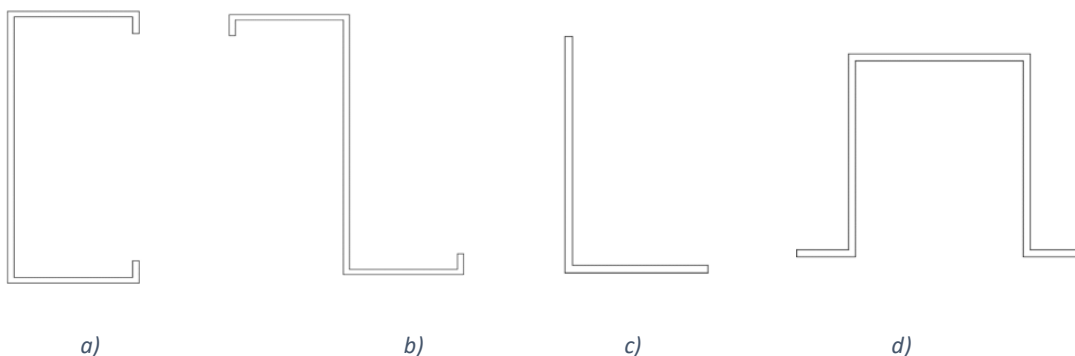
- Lako postavljanje instalacija: Unutarnja šupljina između čeličnih nosača omogućava jednostavno postavljanje cijevi, kanala i kabela, olakšavajući instalacije unutar zgrada.
- Otpornost na plijesan: Čelični nosači su otporni na plijesan, sprječavajući razvoj gljivica i održavajući unutarnji zrak čistim i zdravim.
- Ekonomičnost u transportu i rukovanju: Čelični nosači pružaju ekonomičnost u transportu zbog svoje relativne lagane težine i jednostavnosti rukovanja, smanjujući troškove logistike.

### 5.1.3. Poprečni presjeci CFS elemenata

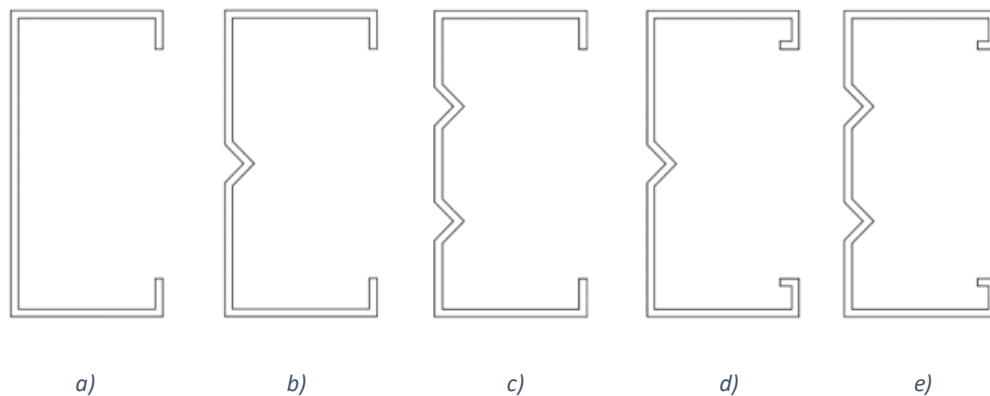
Postoje dvije glavne vrste čeličnih okvira od laganih čeličnih profila (CFS): okviri i paneli, često nazivani špilovi. Okvirni članovi koriste se za formiranje ljuske ili okvira konstrukcije i obično dolaze u različitim oblicima kao što su C-presjeci, Z-presjeci, I-presjeci, kutovi, šeširi, T-presjeci i segmenti cijevi [12]. Među navedenim oblicima, C-presjeci su najčešće korišteni u konstrukciji od laganih čeličnih profila. Osnovna funkcija svakog okvirnog elementa je podržavanje tereta i osiguravanje potrebne čvrstoće i stabilnosti konstrukcije. Sekundarni elementi izrađeni od laganih čeličnih profila uključuju grede, klinove, palube i ploče te se obično koriste za izgradnju krovova, podova, zidova, obloga i mostova. Postoji nekoliko profila od hladno oblikovanog čelika s različitim presjecima, većina ih je označena slovima (npr. U, Z, C). [9] Strukturalna i funkcionalna svojstva ovise o obliku presjeka, a postoje i posebni profili s poboljšanim toplinskim svojstvima (npr. Profili s otvorima u rešetki) i akustičnim svojstvima (npr. Elastični profili). Kako bi se spriječila korozija i povećala trajnost, čelični stupovi obično su pocinčani. Proces pocinčavanja često uključuje tehniku uranjanja u vrući cink. [9]. Ti čelični stupovi koriste se u svim komponentama LSF konstrukcije, uključujući vanjske i unutarnje zidove, krovove i ploče, osim temeljne ploče, koja je obično u armiranom betonu.

#### 5.1.3.1 Jednostruki CFS profili

Slika 7. prikazuje nekoliko tipičnih poprečnih presjeka članova izrađenih od hladno-oblikovanog čelika (CFS). U skladu s trenutačnim trendovima, CFS sekcije postaju sve tanje i istovremeno više ojačane, što ih čini podložnijima lokalnom savijanju i distorzionalnom savijanju [13]. Kako bi se povećala njihova otpornost na savijanje, razvijaju se sve složeniji oblici, a jedan takav primjer prikazan je na slici 8. Ovi kompleksniji oblici uključuju više segmenata, ojačavala i usnica. Temeljita istraživanja, obuhvaćajući eksperimentalna i numerička istraživanja ponašanja CFS sekcija, ukazuju na to da dodavanje srednjih web pojačivača i rubnih pojačivača značajno poboljšava čvrstoću ovih sekcija [13].



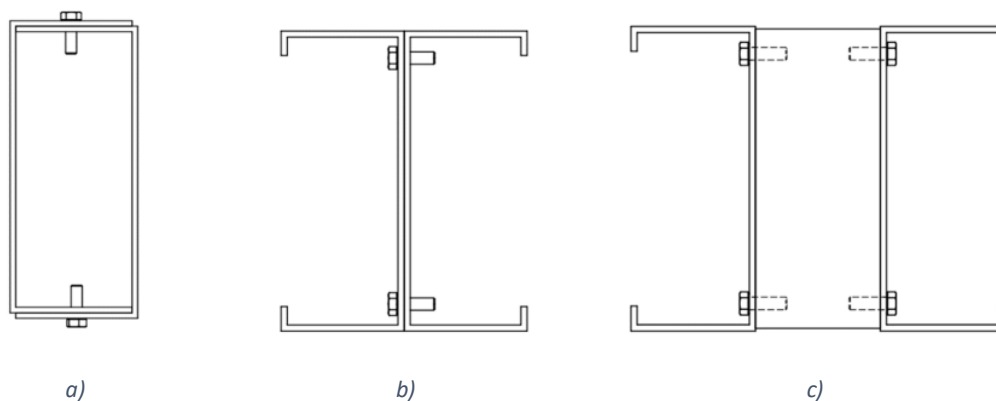
Slika 7: tipični poprečni presjeci CFS elemenata. a) poprečni presjek „C“ oblika; b) poprečni presjek „Z“ oblika; c) poprečni presjek „L“ oblika; d) poprečni presjek „šešir“ oblika.



Slika 8: Različiti poprečni presjeci a) jednostavnog usnog kanala; b) Usni kanal s jednom mrežom za ukrucenje; c) Kanal s usnom s dva mrežna ukrucenja; d) Dio kanala s jednim ukrucenjem mreže i povratnim usnim kanalom; e) Dio kanala s dva rebra za ukrucenje i povratnim rubovima.

#### 5.1.3.2.. Složeni CFS profili

U relevantnoj literaturi su se analizirale različite poprečne geometrije složenih CFS sekcija [13]. Kao što se može vidjeti na slici 9. složeni kanalni profili formiraju se kombiniranjem dva identična šuplja kanala licem prema licu kako bi se stvorio kutni presjek, ili se spajaju leđa prema leđa kako bi se formirao I-presjek. Također su proučavani složeni kanalni profili koji se formiraju leđa prema leđa s određenim razmakom između njih kako bi se dobili složeni kutni presjeci. Ovi složeni CFS profili omogućavaju premošćivanje znatno većih raspona i postizanje viših nosivih količina u kompresiji i savijanju [18].



Slika 9: spajanje kutnih presjeka „face to face“ metodom; b) I-presjek, složen tehnikom „back to back“ c) složeni kutni presjek odmaknutom „back to back“ metodom

Danas su na tržištu dostupni čelični nosači s utorima kako bi se poboljšala toplinska učinkovitost [19]. Također postoje i zvučni nosači s određenom konfiguracijom poprečnog presjeka (npr. utori u sredini rebara [20] ili elastični kanali [19]), koji omogućuju elastičniju vezu i stoga poboljšavaju akustično ponašanje u smislu izolacije od buke. Unutarnja šupljina između čeličnih nosača idealna je za umetanje cijevi, kanala i kabela (Slika 10) [19].



Slika 10: Tehnički uređaji između čeličnih okvira [19]

#### 5.1.4. UTJECAJ TOPLINSKIH MOSTOVA NA CFS

Unatoč raznim prednostima i visokom potencijalu za održivost, CFS konstrukcija može imati određene probleme u vezi s toplinskom izvedbom zbog visoke toplinske provodljivosti čelika [19]. Čelični elementi ugrađeni u ovojnicu zgrade mogu stvarati toplinske mostove, gdje se toplina i energija prenose s jedne strane elementa na drugu [13]. Toplinski mostovi značajno mogu povećati potrošnju energije zbog disipacije topline i negativno utjecati na ukupnu ugrađenu energiju u konstrukciji [19]. Roque i Santos [2] su pokazali da zanemarivanje učinka prijenosa topline u čeličnim konstrukcijama može precijeniti toplinski otpora do 50%. Ako im se ne pristupi na odgovarajući način, toplinski mostovi uzrokovani čeličnim nosačima mogu značajno smanjiti energetske učinkovitost svake zgrade s čeličnim nosačima (CFS) te povećati potrošnju energije i pripadajuće troškove tijekom njezine operativne faze [2]. Osim povećane potrošnje energije, lokalizirani gubici topline također mogu utjecati na higrotermičko ponašanje zgrada, što može rezultirati patologijama u konstrukciji, degradacijom elemenata zgrade, smanjenjem kvalitete zraka u unutrašnjim prostorima, te pojavom kondenzacije na površini i između slojeva [13]. Osim toga, slaba toplinska učinkovitost može izazvati kondenzaciju, što može pridonijeti nelagodi stanovnika [150]. Ovi nedostaci su posebno kritični u regijama s velikim varijacijama dnevnih temperatura [21]. Dalje u radu su opisane tehnike za smanjivanje utjecaja toplinskih mostova.

#### 5.2. PLOČE ZA OBLAGANJE

Ploče za oblaganje često se koriste kako bi se osigurala požarna otpornost, zvučna izolacija, otpornost na vlagu, trajnost i ekonomičnost LSF struktura. Glavni izazov s ovim vrstama obloga za oblaganje je činjenica da se većina proizvodi u fiksnim duljinama koje rijetko prelaze 3,5 metra [12]. To stvara dodatne probleme za LSF sustav, budući da spojevi između ploča mogu stvarati dodatne toplinske mostove ili omogućiti prodor vlage, plamena i prašine u slučaju požara i drugih čestica u unutrašnjost LSF struktura. Ovisno o vrsti zgrade i zahtjevima, koriste se različite vrste ploča za oblaganje uključujući orijentirane iverice (OSB), konstrukcijsku šperploču, čelični omotač i druge.



Tablica 1. pruža usporedbu svojstava najčešće korištenih nemetalnih ploča za oblaganje na sobnoj temperaturi. Većina tih nemetalnih ploča za oblaganje, osim OSB ploča i šperploča, posebno se koristi kao slojevi za pasivnu zaštitu od požara. Budući da su OSB ploče i šperploče kompoziti na bazi drva, osjetljivi su na zapaljivost [12], što zahtijeva dodatni protupožarni sloj.

Tablica 1: Termofizikalna svojstva najčešće korištenih nemetalnih obloženih materijala za LSF [12]

Materijal	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\nu$ [-]	$\lambda$ [W/mK]	$C_p$ [J/kgK]
OSB	600-620	0,3	0,12	1420-1550
Gips ploče	700-1000	0,27	0,21	880-1000
Ploče od Magnezijevog oksida	1000-1100	0,35-0,37	0,30-0,60	1400
Ploče s Magnezijevim sulfatom	1000-1101	0,35-0,37	0,30-0,60	1400
Ploče od Kalcijeva silikata	800-1100	N.A.	0,25	1000-1100
Perlitne ploče	200-280	N.A.	0,1	750-900

### 5.2.1. OSB ploče

OSB ploče su kompozitne višeslojne ploče izrađene od drvenih niti određenih oblika, debljina i čvrstoće prijanjanja, vrlo sličnih šperploči, s jedinom značajnom razlikom u cijeni stoga se OSB ploče sve više koristi kao alternativa šperploči; [21] prednosti OSB-a u odnosu na šperploču uključuju odsutnost praznina u jezgri, uniformnost, preciznu certifikaciju (uključujući Izjavu o Performansama i označavanje CE-om) te pouzdane tehničke informacije. Glavna primjena šperploče i OSB ploča je vanjsko oblaganje, često slično čeličnim oblogama, te ih projektanti danas koriste kao završni sloj za zidove i stropove [12], često i u niskim stambenim zgradama. Budući da su OSB ploče na bazi drva kompozitni laminati, osjetljivi su na termita i plijesan, što može dovesti do bubrenja i dezintegracije i posljedičnog gubitka strukturne čvrstoće. Osnovne definicije OSB ploča, zahtjevi i klasifikacije navedeni su u europskoj normi EN 300 [22]. Najčešća vrsta panela za oblikovanje vanjskih i unutarnjih slojeva LSF sustava. Treba napomenuti da osim svoj funkcije oblaganja ovi paneli također mogu imati važnu strukturalnu ulogu u nosivim zidovima u smislu horizontalnih opterećenja, kao što je vjetar [9]. OSB ploče imaju različite debljine ako se koriste u zidovima (manju) za razliku njihove uloge u podovima/krovovima (veću). Nadalje, kako bi se povećala toplinska inercija i smanjile vibracije podova, korisno je koristiti tanji sloj betona/ morta na vrhu [oko 5 cm] [9].



*Slika 11: Oblaganje OSB ploče oko LSF-a [9]*

### 5.2.2. Gips ploče (GB)

Dok se OSB ploče koriste za vanjske obloge, GB ploče često se koriste kao unutarnje obloge u LSF strukturama. Budući da su OSB i GB ploče nemetalni materijali, problemi s toplinskim mostovima lakše se prevladavaju zbog njihove znatno niže toplinske provodljivosti u usporedbi s čelikom. Naravno gips ploče nisu dovoljne za rješavanje problema oko toplinske učinkovitosti zato koristimo dodatno i jednu vrstu materijala za toplinsku izolaciju. Ploče su također pričvršćene za čeličnu konstrukciju samoreznim vijcima. GB ploče su poznate po svojim protupožarnim svojstvima kao pasivni protupožarni sloj [12]. Standardne gipsane ploče sastoje se uglavnom od oko 80% gipsa (kalcijev sulfat dihidrat), koji sadrži 15-18% kemijski vezane vode i 4-5% slobodne vode [23]. Tijekom zagrijavanja, za isparavanje slobodne vode potrebna je znatna energija, što dovodi do porasta temperature na drugoj strani ploče. Drugim riječima, ova reakcija je endotermna, što znači da apsorbira energiju koja bi inače povisila temperaturu materijala. Kada se zagrijava, gips prolazi kroz dvije glavne kemijske razgradnje. Prva reakcija dovodi do razgradnje gipsa u kalcijev sulfat hemihidrat pri temperaturama između 80 i 120 °C, dok se druga reakcija odvija pri temperaturama između 200 i 240 °C i razgrađuje hemihidrat kalcijevog sulfata u anhidrit kalcijevog sulfata, što utječe na promjenu specifične topline [12]. Za dodatno poboljšanje vatrootpornosti GB pločama mogu se dodati različiti aditivi, poput celuloznih vlakana i letećeg pepela. Trenutni europski standard koji regulira zahtjeve i klasifikaciju GB ploča je EN 520 [24], dok za ostale nemetalne ploče, kao što su vlaknaste ploče, perlitne ploče, ploče od kalcijevog silikata i ploče s materijalima za promjenu faze (PCM), također postoje norme.

### 5.2.3. Ploče od magnezijevog oksida

Ploče od magnezijevog oksida obično se koriste za poboljšanje akustičkih svojstava, otpornosti na udarce i strukturne čvrstoće panelnih sustava [25]. Njihov kemijski sastav uglavnom se sastoji od dva

elementa: magnezijevog oksida (MgO) i magnezijeva klorida (MgCl<sub>2</sub>). Kao i kod GB ploča, ove ploče se obično koriste kao unutarnje obloge za LSF elemente.

Rusthi i suradnici [25] proveli su istraživanje na dvije vrste MgO ploča koje su se razlikovale samo po postotku MgO u pločama kako bi se procijenila njihova toplinska svojstva i ponašanje u požaru. U novijem istraživanju, istraživanja su pokazala da MgO ploče prolaze kroz endotermne reakcije slične GB pločama zbog značajne količine slobodne i kemijski vezane vode. Prema Rusthi i suradnicima [25], prva dva vrhunca rezultiraju dehidracijom magnezijeva oksiklorida i isparavanjem vode, treći i četvrti vrhovi proizlaze iz hidrolize i pirolize, a posljednji vrhunac nastaje zbog otpuštanja kemijski vezane vode.

Iako MgO ploče imaju prednost pred GB i OSB pločama u pogledu akustičkih svojstava, navedeni autori zaključuju da je glavni nedostatak ovih ploča visoki gubitak mase pri visokim temperaturama, oko 15% veći u usporedbi s GB pločama. Stoga, pod visokim toplinskim opterećenjem, dolazi do pucanja na površini ploče i ugrožava se integritet cijelog sustava. Drugi nedostatak ove vrste obloga je kemijska degradacija materijala kada su izloženi povećanoj vlažnosti. Nakon kontakta s vodom, na površini se formira solna voda koja može uzrokovati koroziju i značajna oštećenja. Budući da je ovo relativno nova protupožarna ploča, do danas ne postoji usklađena europska norma koja definira uvjete, zahtjeve i testove za ovu vrstu ploče.

#### 5.2.4. Ploče s magnezijevim sulfatom

Varijanta MgO ploča su ploče s magnezijevim sulfatom koje imaju sličan kemijski sastav kao i MgO ploče. Sastoje se od magnezijevog oksida (oko 55%), sulfata (oko 25%) i staklenih vlakana (oko 18%) [12]. Zamjena MgCl<sub>2</sub> u osnovi MgO ploča s MgSO<sub>4</sub> eliminira korozivni učinak klorida [12]. Ponašanje ploča magnezijeva sulfata u požaru neznatno je bolje od ploča s magnezijevim oksidom, ali su i dalje podložne brzom pucanju i gubitku mase. Budući da su ploče od magnezijeva oksida i magnezijeva sulfata slične, njihova kemijska razgradnja pri povišenim temperaturama je identična. Kao i kod ploča s magnezijevim oksidom, do danas ne postoji usklađena europska norma koja definira uvjete, zahtjeve i ispitivanja za ovu vrstu ploče.

#### 5.2.5. Ploče od kalcijeva silikata

Ploče od kalcijeva silikata koje su dostupne na tržištu mogu se podijeliti u tri kategorije: niske gustoće (200–500 kg/m<sup>3</sup>), srednje gustoće (500–1000 kg/m<sup>3</sup>) i visoke gustoće (1000–1800 kg/m<sup>3</sup>) [43]. Općenito su čvršće od GB ploča, što ih ponekad čini atraktivnijim izborom. Njihov glavni materijal je kalcijev silikat, a pri visokim temperaturama postižu slične vrhunce specifične topline kao i GB ploče zbog isparavanja vode.

#### 5.2.6. Perlitne ploče

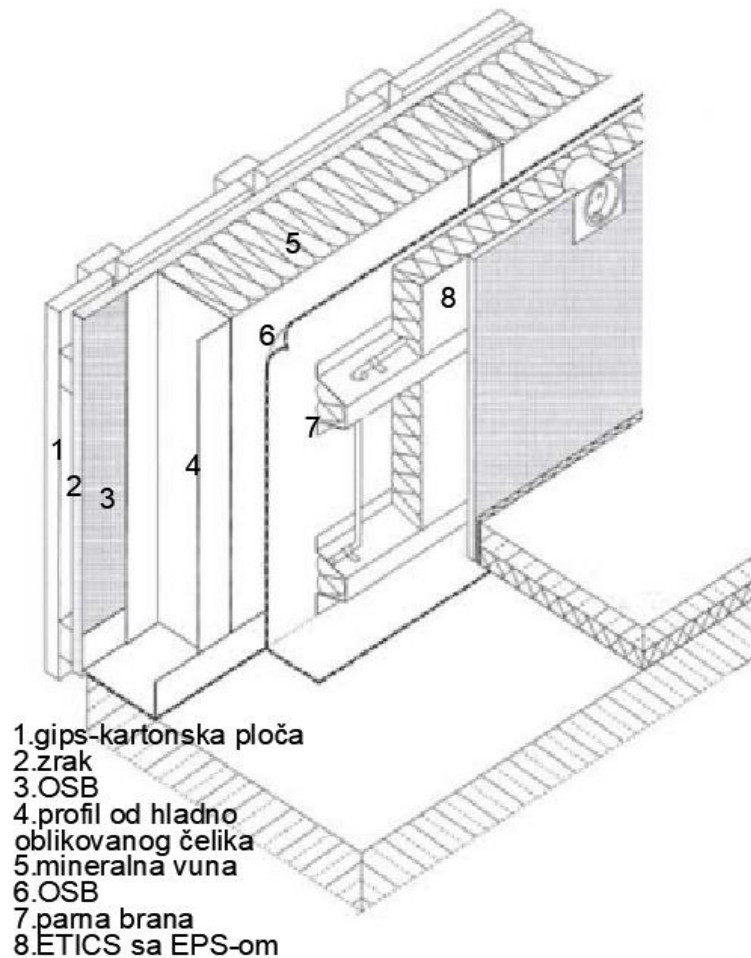
Osim toga, perlitne ploče su također alternativa oblogama od vulkanskog stakla. Perlitne ploče su lagane, jednostavne za rukovanje i nude nisku cijenu, visoku čvrstoću i kemijsku stabilnost [10].

#### 5.2.7. PCM gips ploče

Moderne ploče za oblaganje također uključuju PCM gips ploče koje sadrže mikrokapsulirane PCM-ove, jezgru od gipsa i male količine aditiva [12]. PCM-ovi apsorbiraju ili otpuštaju značajnu količinu energije

tijekom faznih prijelaza, topeći se tijekom dana i stvrdnjavajući se noću, što pomaže održavanju unutarnje toplinske udobnosti [12]. Iako se očekuje da će PCM gips ploče imati veći Količina apsorpcije topline pri visokim temperaturama zbog njihovog većeg specifičnog toplinskog Količina, njihova učinkovitost u požaru može biti manja u usporedbi s izolacijskim materijalima zbog većeg gubitka mase i toplinske provodljivosti [12]. PCM gips ploče imaju vrlo visok gubitak mase pri povišenim temperaturama zbog dehidracije i isparavanja PCM-ova.

S obzirom na različite mogućnosti oblaganja dostupne na tržištu, važno je pažljivo razmotriti najbolji izbor ovisno o specifičnim zahtjevima i okolišu zgrade u kojoj će se ploče koristiti."



Slika 12: Materijali u presjeku zida s Laganim čeličnim okvirom

### 5.3. Materijali za toplinsku izolaciju

Značajna razlika između LSF sustava i tradicionalnih građevinskih metoda leži u činjenici da se toplinska izolacija LSF zgrada uglavnom oslanja na materijale koji imaju znatno manji toplinski otpor, poput polistirena ili mineralne vune. Gervásio i suradnici [19] su proveli parametarsku studiju kako bi analizirali utjecaj izolacije na energetska učinkovitost LSF. Iz toga proizlazi da se primjena izolacije u građevinskim projektima mora pažljivo planirati i pridržavati određenih kriterija kako bi se izbjegli nepotrebni troškovi smanjenja energetske učinkovitosti, uzimajući u obzir i aspekt isplativosti.

Kada se razmatraju Zgrade gotovo nulte energije (NZEB), izolacijski materijali postaju ključna komponenta sustava laganih čeličnih okvira (LSF). Oni igraju presudnu ulogu u osiguravanju potrebnih toplinskih karakteristika i udobnosti u smislu topline. Izolacijski materijali u LSF konstrukcijama mogu se podijeliti u tri kategorije prema njihovoj poziciji u konstrukciji: topli okvir, hladni okvir i hibridni okvir. Svaka od ovih kategorija može zahtijevati upotrebu različitih materijala za termoizolaciju, a detaljnije ćemo ih razmotriti u nastavku.

U LSF konstrukcijama toplih okvira, često se primjenjuje sustav vanjske termoizolacije (ETICS), koji obično uključuje ekspanzirani polistiren (EPS). Tablica 2. prikazuje termofizička svojstva različitih izolacijskih materijala koji se koriste u LSF konstrukcijama. Primjećujemo da Vakuum-izolacijske ploče imaju znatno manju toplinsku vodljivost od ostalih izolacijskih materijala, ali se ne primjenjuju često u struci zbog svoje visoke cijene na tržištu, imaju i prednost u dimenziji jer su tanje od ostalih izolacijskih materijala pa se upotrebljavaju više u obnovi stanova kada se želi više uštediti na kvadraturi nego na cijeni materijala.

Koeficijent prolaska topline građevnog dijela  $U$  [ $W/(m^2 \cdot K)$ ] obrnuto je proporcionalan debljini toplinske izolacije.[4] Ipak, veće debljine toplinske izolacije neće proporcionalno smanjiti potrebnu energiju za grijanje iz razloga što se dio topline gubi i provjetranjem. Debljina toplinske izolacije iznad 20 - 25 cm prestaje imati značajan utjecaj na uštedu energije, stoga se daljnja ušteda ostvaruje strojarskim mjerama, odnosno mehaničkom ventilacijom s rekuperacijom

Tablica 2: Termofizička svojstva različitih izolacijskih materijala koji se koriste u LSF konstrukcijama [12]

Materijal	$\rho$ [ $kg/m^3$ ]	$\lambda$ [ $W/m \cdot K$ ]	$C_p$ [ $kJ/kgK$ ]
Mineralna vuna	12-200	0,030-0,040	0,8-1,0
EPS	10-80	0,032-0,045	1,25 -
XPS	15-85	0,025-0,040	1,45-1,7
PUR	30-160	0,022-0,035	1,3-1,45
PIR	28-40	0,020-0,035	1,4-1,5
Celulozna vlakna	30-70	0,038-0,040	1,3-1,6
Vakuum - izolacijske ploče	180-210	0,008	0,8
Aerogel	100-150	0,013-0,021	1,0

### 5.3.1 Mineralna vuna

Mineralna vuna (MW) često se primjenjuje kada je potrebna povećana vatrootpornost cijelog zgrade, te se često koristi u LSF konstrukcijama. U Europi, MW čini oko 60% tržišta izolacijskih materijala [12], što ukazuje na široku primjenu ovog materijala. Osim svoje visoke vatrootpornosti, MW također nudi odlične zvučnoizolacijske karakteristike zbog svoje fleksibilne i porozne strukture. No, valja napomenuti da MW može apsorbirati vlagu pod uvjetima visoke vlažnosti, što može smanjiti njegova izolacijska svojstva i zahtijevati dodatne mjere opreza. Osnovna svojstva mineralne vune može se definirati europskim standardom EN 13,162 [26].



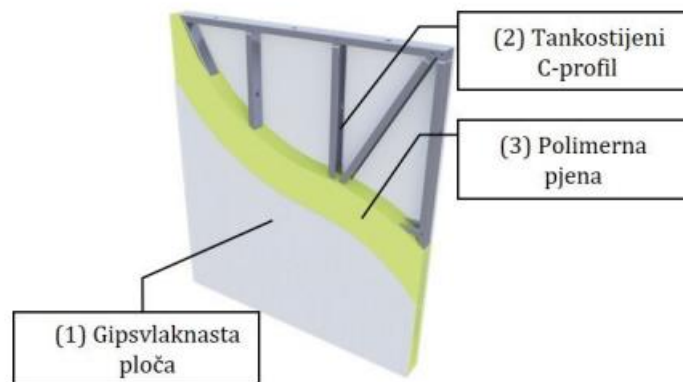
Slika 13: Mineralna vuna između čeličnih nosača

### 5.3.2. Ekspandirani i Ekstrudirani polistiren (EPS I XPS)

EPS i XPS, koji se koriste u ETICS-u LSF sustava, su polimerni materijali sličnih svojstava i strukture. Oba materijala su klasificirana kao visoko goriva pjena zatvorenih ćelija i ne pružaju značajne akustične karakteristike. EPS je paronepropusan materijal, ali ne upija vlagu, postojan je i trajan. U trajnom opterećenju otporan je na temperaturi do 75°C. EPS i druge petrokemijske pjene čine oko 27% europskog tržišta [12]. XPS se izrađuje od polistirena koji ima zatvorenu staničnu strukturu, od EPS se razlikuje po tome što je izrađen u jednom komadu. Prednosti su mu što ne upija vodu, ima visoku tlačnu čvrstoću, dugi vijek trajanja, lagan je i ima jednostavnu obradu. Europski standard za EPS se nalazi u EN 13,163 [27] za EPS i u EN13,164 [28] za XPS

### 5.3.3. Poliuretanska (PUR) I Poliizocijanuratna (PIR) pjena

PUR pjena nastaje kemijskom reakcijom poliola i poluenizocijanata, uz prisustvo aditiva. Kada se razmatraju sendvič ploče za oblaganje u LSF sustavima, poliuretanska pjena (PUR) i poliizocijanuratna pjena (PIR) su materijali koji često dolaze u obzir zbog njihove ekonomske isplativosti, čvrstoće, praktičnosti i visoke toplinske izolacije. PUR i PIR su postali popularni izolacijski materijali u LSF sustavima jer omogućuju tanje zidove i maksimalno iskorištavanje prostora. PUR pjena ima visoku elastičnost, veliku postojanost i malu masu, te najbitnije od svega nije štetna za zdravlje. Međutim, treba napomenuti da je ponašanje PUR-a u slučaju požara izazovno i zahtijeva dodatne mjere opreza. S druge strane, PIR pjena ima bolju vatrootpornost i nižu toplinsku vodljivost u usporedbi s PUR-om [12]. PUR pjena je postala dosta popularna u konstrukcijskoj primjeni. U sklopu ranije završenog industrijskog projekta PoC7 (2019.), tvrtka Tehnoplast profili d.o.o., Palijan d.o.o i Građevinski fakultet u Rijeci predložili su prototip novog i inovativnog panelnog konstruktivnog sustava zgrada (Slika 14). [39] Kompozitna ploča sastoji se od tri osnovne komponente: (1) obloge izrađene od montažnih gipsvlaknastih ploča i jezgre kao (2) čelične konstrukcije izrađene od otvorenih tankostijenih C-profila ispunjenih i (3) polimernom pjenom. Europski standard za PUR i PIR pjene se nalazi u EN 13,165.[30].



Slika 14: Prototip panelnog sustava

#### 5.3.4. Celulozna vlakna

Sastoji se od celulozних pahuljica koje su dobivene preradom starog papira. Celulozna vlakna su materijali koji se koriste za termalnu i zvučnu izolaciju, a svojstva i primjena ovih materijala ovise o njihovoj gustoći i strukturi. Međutim, važno je obratiti pozornost na mogućnost kondenzacije i vlagu koja može utjecati na toplinska svojstva tih materijala.

#### 5.3.5. Pluta

Materijali poput pluta mogu se koristiti za podne sustave u LSF konstrukcijama. [12] Ploče od pluta se dobivaju zagrijavanjem zrnaca pluta do visokih temperatura i njihovim komprimiranjem u blokove. Materijali izrađeni od pluta također se odlikuju dobrim akustičkim svojstvima, uključujući izolaciju od udarne buke, izolaciju od zračne buke i sposobnost apsorpcije zvuka. Ovi materijali su dostupni u obliku ploča, traka, rastresitog materijala i žbuke aditiva, a moguć ga je reciklirati ali je poželjno izbjegavati korištenje recikliranog pluta, zbog ljepila koji sadrži štetne tvari a koji se koristi za vezanje zrna pluta. Toplinska vodljivost ovih materijala kreće se u rasponu od 0,045 do 0,055 W/m·K.

#### 5.3.6. Ovčja vuna

Često se koristi kao materijal za izolaciju šupljina. Ovčja vuna je organski materijal koji se miješa s poliesterom ili pričvršćuje na polipropilensku rešetku. Dobiju se mehaničkim vezivanjem ovčjeg runa kako bi se stvorili vuneni pramenovi ili vunene trake. Ovčja vuna je higroskopan materijal, može upiti vlagu od 30-40% vlastite težine bez da postane mokra na dodir. Slično plutu, ovaj materijal se obično prodaje u rolnama, a njegova elastičnost omogućuje ga kao izvanredan izbor za elastični materijal u plivajućim podovima [31]. Prije upotrebe u građevinarstvu, ovčja vuna mora proći kroz tretman usporivačima plamena, repelentima protiv moljaca i parazitocidima, no materijal se može lako reciklirati i ponovno koristiti [12]. Toplinska vodljivost ovog materijala kreće se u rasponu od 0,035 do 0,050 W/m·K [12].



*Slika 15: ovčja vuna [32]*

### 5.3.7. Ostalo

Također su razvijeni inovativni materijali s ciljem smanjenja toplinske vodljivosti izolacijskih materijala i povećanja ukupne toplinskog otpora građevinskih komponenata. Neki od tih materijala uključuju vakuumske izolirane ploče, ali su još uvijek vrlo skupe te se primjenjuje najviše kod sanacija objekata gdje nije moguće ugraditi veće debljine izolacije, 3 -7 puta efikasnije su od klasičnih toplinsko-izolacijskih materijala sa toplinskom provodljivošću  $\lambda=0,005 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , još su tu i ploče ispunjene plinom i Aerogel ploče. Njihova svojstva, trajnost i ukupna sigurnost trenutno su predmet istraživanja i razvoja [12].

Kao što vidimo, izolacijski materijali za LSF građevinske sustave razlikuju se po svojim svojstvima, pri čemu svaki od njih ima svoje prednosti i nedostatke. Među konvencionalnim materijalima za izolaciju, polimerni materijali kao što su PUR i PIR nude najbolja izolacijska svojstva pri sobnoj temperaturi zbog njihove znatno manje toplinske vodljivosti. S druge strane, moderni izolacijski materijali poput vakuumske izolirane ploče, ploča ispunjenih plinom i aerogel također pokazuju velik potencijal za izolaciju, ali zahtijevaju daljnja istraživanja kako bi se njihova svojstva potpuno razumjela i iskoristila.

Kada se razvijaju novi izolacijski materijali, važno je dodatno istražiti njihovu primjenu i kompatibilnost s LSF strukturama, uzimajući u obzir specifične izazove kao što su visoka zapaljivost polimernih materijala i niska propusnost MW-a. Ovo će pomoći u optimizaciji sustava i poboljšanju energetske učinkovitosti zgrada u različitim okruženjima.

Također, treba napomenuti da odabir izolacijskog materijala ovisi o specifičnim zahtjevima i okolini zgrade, te ga treba pažljivo razmotriti kako bi se osigurala energetska učinkovitost i udobnost prostora.

Izbor materijala za toplinsku izolaciju mora se usmjeriti prema nanoizolacijskim materijalima.[33] Dakle, umjesto korištenja 20-30 ili čak više centimetara tipične toplinske izolacije, može se koristiti tanji sloj kako bi se postigao isti toplinski učinak. Još jedan aspekt koji treba razmotriti je očuvanje toplinskih svojstava tih materijala, što može biti negativno pogođeno prilikom prodiranja fiksnih komponenti. Treba se također baviti položajem toplinske izolacije u konstrukcijskom detalju i negativnim utjecajem točkovnih toplinskih mostova koji oblikuju takve strukture. Iako te LSF zgrade pokazuju odgovarajuću toplinsku izvedbu u usporedbi s drugim postojećim rješenjima, moguće je provesti dodatna istraživanja pasivnih mjera kojima se može smanjiti potrošnja energije, izravno povezana s kriterijima oblikovanja ovojnice zgrada, tj. oblikom, orijentacijom, zbijenošću, omjerom



prozora i zida, konstrukcijskim detaljima, magnitudom  $\psi$  i  $\chi$ , smanjenjem negativnog utjecaja područja toplinskog mosta i drugih.[33]

#### 5.4. Membrane za zaštitu od zraka i vjetra

Čuvanje zrakonepropusnosti ovojnice zgrade igra ključnu ulogu u postizanju energetske učinkovitosti, što je važno za sigurnost i kvalitetu života stanara [34]. Unutar LSF sustava, posebna pažnja se mora posvetiti problemu infiltracije zraka, što često proizlazi iz unutarnjeg korištenja prostora za komunalne instalacije. Ova situacija može rezultirati otvorima i pukotinama u ovojnici zgrade kroz koje mogu prodrijeti onečišćenja i štetne čestice.

Kako bi se smanjila infiltracija zraka i intersticijska kondenzacija, preporučuje se primjena dvoslojnih membrana duž vanjske ovojnice LSF zgrada. Prva membrana, poznata kao parna brana, trebala bi se postaviti na toplu stranu izolacijskog sloja kako bi spriječila ulaz vlage iz zraka u unutrašnjost LSF elemenata i kondenzaciju na hladnim površinama, obično na čeliku. Efektivne su samo kada kontinuirano pokrivaju vanjsku ovojnicu zgrade. Najčešće su napravljene od PE papira ili metalnih folija. Druga membrana, poznata kao zračna barijera, trebala bi se postaviti na hladnu stranu i biti paropropusna kako bi omogućila vlazi da izlazi iz LSF elemenata. Ove membrane su napravljene od polietilena i polipropilena ojačani vlaknima. Najčešća mjesta za curenje zraka su spojevi između vanjskih zidova i stropa ili podova, spojevi između vanjskih zidova i prozora ili vrata, te prolazi kroz slojeve barijera [12]. Brtvene trake često se koriste zajedno s membranama kako bi se poboljšala hermetičnost.

Pravilna uporaba ovih membrana izuzetno je važna za kontrolu gubitka toplinske energije uzrokovanog prodiranjem zraka u LSF građevinama, posebno u hladnim klimama [34]. Kako bismo osigurali da su ove membrane pravilno postavljene i da se smanjuje stopa prodiranja zraka, treba provesti "blower door test" ili „fan pressurised method“ [9]. „Blower-door“ je test gdje se mjesta eventualnog propuštanja zraka određuju termografskim snimanjem, anemometrom ili metodom suhog dima. Ispitivanje se provodi u dvije etape – prva nakon zatvaranja ovojnice i žbukanja zidanih zidova, druga nakon završetka zgrade. Ispitivanje se ponavlja nakon brtvljenja eventualnih mjesta propuštanja zraka dok se ne zadovolji vrijednost  $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$  kod zona s mehaničkim uređajem za ventilaciju, odnosno  $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$  kod zona s prirodnim provjetravanjem. Osim smanjenja potrošnje energije za grijanje, još jedna prednost adekvatne uporabe ovih membrana je smanjenje rizika od intersticijske kondenzacije, s obzirom na smanjenje vlage unutar LSF elementa. [19] Ova vrsta kondenzacije javlja se kada topli vlažni zrak prodre kroz vanjski sloj materijala i susreće hladne unutarnje slojeve, gdje se zrak ohladi i kondenzira u obliku vode. To može dovesti do problema s vlagom, povećanog rizika od plijesni, te potencijalnog oštećenja materijala i konstrukcije. s obzirom na smanjenje vlage unutar LSF elementa.

Važno je primijetiti da vanjski sloj koji štiti od vjetra treba biti propustan za vlagu kako bi omogućio izlazak vlage kad god se nalazi unutar LSF elementa, čime se sprječava njezino nakupljanje unutar zidova i ploča (Slika 16).



Slika 16: Vanjski sloj vjetrootpornih membrana oko otvora na vanjskoj fasadi LSF-a prije izvođenja ETICS-a [19]

Lagani čelični okviri (LSF), kao i bilo koje druge zgrade s gotovo nultom potrošnjom energije (nZEB) ili pasivne kuće, trebaju imati hermetički zatvorene ovojnice kako bi se smanjili gubici topline kroz ventilaciju, smanjio rizik od kondenzacije, osigurala kvaliteta zraka u zatvorenom prostoru, eliminirali propuhe i poboljšala udobnost, poboljšala zvučna izolacija građevinskih komponenata i zadržala učinkovitost ventilacijskog sustava. [35] S druge strane, dišući, ali vjetronepropusni sloj smješten na vanjskom zidu trebao bi biti instaliran kako bi se smanjio utjecaj vjetra na performanse izolacijskog sloja. Vjetronepropusnost i hermetičnost zahtijevaju pažnju i moraju se optimizirati u fazi projektiranja. Kod projektiranja treba paziti da vjetronepropusnost kod Nzeb zgrada mora biti više nego skoro dvostruko bolja nego kod običnih zgrada.[36]

Zahtjevi za zgrade smještene uz more ili u planinskim područjima trebali bi se razlikovati od zahtjeva za zgrade smještene u unutrašnjosti ili nizinskom terenu. Stroži zahtjevi (manji n50) trebali bi se preporučiti za zgrade smještene na otvorenom prostoru ili visoke zgrade u urbanim naseljima. Manja ograničenja (veći n50) mogu biti dopuštena za zgrade koje su zaštićene drugima, smještene u šumi ili u gusto naseljenim urbanim područjima.[34]

Pri razvoju LSF sustava, važno je uzeti u obzir vatrootpornost kao ključni faktor. Hladno valjani čelični profili (CFS), koji su često korišteni kao glavni nosači u LSF konstrukcijama, zahtijevaju dodatnu zaštitu od visokih temperatura. Ostale komponente poput OSB (Oriented Strand Board) ploča i šperploča, koje se koriste za oblaganje, također mogu utjecati na vatrootpornost konstrukcije. Odabir materijala, kao što su polimerni izolacijski materijali, može poboljšati termalnu izvedbu, ali također može smanjiti vatrootpornost.

Nadalje, trošak je važan čimbenik prilikom odabira komponenata za LSF sustav. Različite komponente mogu imati različite cijene zbog razlika u materijalima i procesima proizvodnje, stoga je važno pažljivo razmotriti kako odabrane komponente utječu na ukupne troškove izgradnje.

Optimizacija toplinsko-strukturnog odgovora sustava i povećanje razmaka između čeličnih klinova mogu biti rješenja za smanjenje troškova i poboljšanje toplinske učinkovitosti. Također, razvoj kompozitnih panela koji kombiniraju polimernu pjenu za izolaciju s eliminacijom čeličnih profila iz vanjskog omotača može pružiti bolju toplinsku zaštitu i smanjiti toplinske mostove.

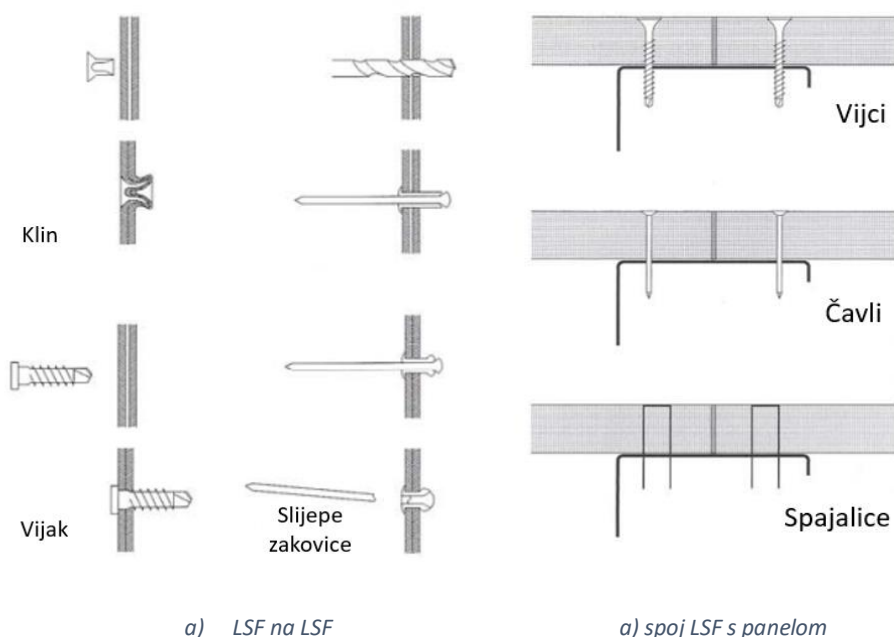
Konačno, niska U-vrijednost ima ključnu ulogu u postizanju energetske učinkovitosti i toplinske zaštite zgrade, te je potrebno provesti daljnja istraživanja kako bi se postigao optimalni toplinsko-konstruktivni LSF sustav.

### 5.5. Sloj zraka

Sloj zraka je takozvani ventilirani prostor u ventiliranim fasadama između završne obloge i zida. Infiltracija zraka obično proizlazi iz razlike u tlaku između unutarnjeg i vanjskog dijela ovojnice, a dodatno je potencirana vjetrom i "efektom dimnjaka" kod visokih zgrada [34]. Zimi kontinuirani izolacijski sloj smanjuje gubitak topline prema van i pojavu toplinskih mostova, a ljeti se smanjuje prijenos topline u unutarnji prostor jer vanjska obloga štiti unutarnje prostorije od direktnog toplinskog opterećenja.

### 5.6. Materijali za spajanje i pričvršćivanje

Pravilno pričvršćivanje je temeljno pitanje koje je povezano s konkurentnošću sustava LSF konstrukcije [19]. Odabir određene metode pričvršćivanja ovisit će o: vrsti i debljini povezanih materijala, uvjetima opterećenja i potrebnoj čvrstoći spoja, dostupnosti pričvršnih sredstava i alata, mjestu montaže, troškovima, trajnosti zahtjeva i prihvatljivosti prema normama [15]. Slika 17 prikazuje nekoliko metoda za spajanje i pričvršćivanje. Najčešća metoda pričvršćivanja temelji se na vijcima za samobušenje (ili samobušecim vijcima) [15]. Ovi pričvršnici, u usporedbi s čavlima, pružaju znatno jači i trajniji spoj. Ova vijci mogu se koristiti s podlošcima kako bi se povećala nosivost opterećenja i/ili količina brtvljenja. Za potonje, često se koristi dodatna elastična podloga (npr. guma). S obzirom na visoke temperature koje se generiraju trenjem tijekom procesa bušenja, ovi vijci obično su izrađeni od toplinski obrađenog ugljičnog čelika (premazanog cinkom radi zaštite od korozije i podmazivanja) ili od nehrđajućeg čelika s vršnim dijelom od ugljičnog čelika, također premazanim cinkom radi podmazivanja [19].



Slika 17: Opcije spajanja LSF struktura

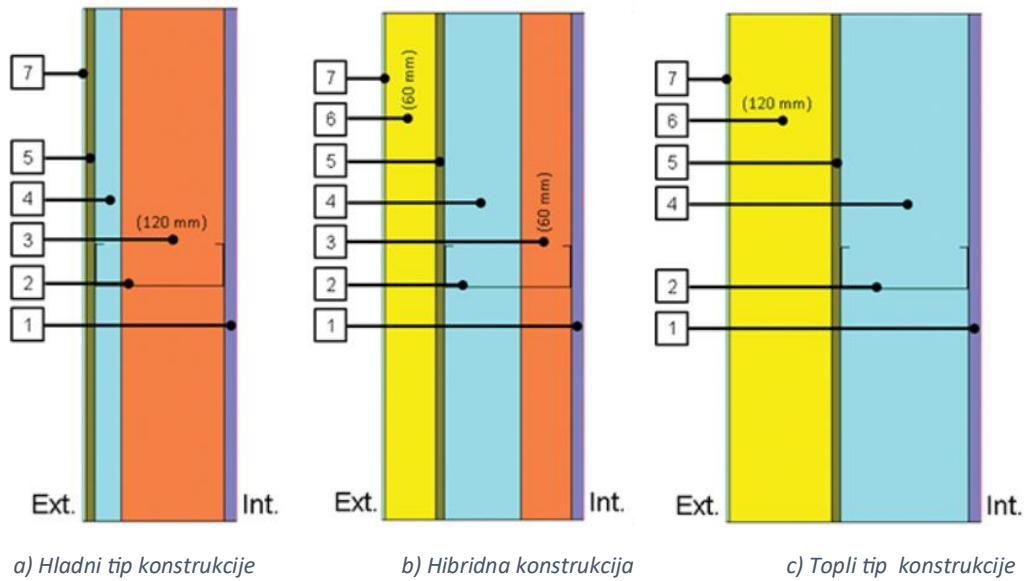
Postoji nekoliko metoda za spajanje i pričvršćivanje građevinskih elemenata (npr. dvaju čeličnih profila ili panela na LSF konstrukciju), pri čemu je ovo pitanje izuzetno važno za brzinu montaže i mehaničku čvrstoću sastavljene strukture. Najčešća metoda pričvršćivanja je upotreba samobušecih vijaka zbog njihovih prednosti, kao što su jača veza i veća trajnost u usporedbi s upotrebom čavala [19]. Samobušeci vijci obično su izrađeni od toplinski obrađenog ugljičnog čelika ili nehrđajućeg čelika. Postoje različite vrste samoreznih vijaka uključujući one za pričvršćivanje tankih limova na tanke limove i za pričvršćivanje na čelične osnove veće debljine (veće od 2 mm ili do 4 mm) [19].

### 5.7. Mogućnosti završnih obloga

Najčešće korištene završne obloge su ETICS i gipskartonske ploče za vanjske i unutarnje strane vanjskih zidova, pri čemu su gipskartonske ploče također vrlo uobičajene na stropovima. Međutim, konstrukcija s Laganim čeličnim okvirom može imati bilo koju završnu oblogu kao i tradicionalna zgrada s armirano-betonskom konstrukcijom i zidovima od keramičkih opeka [9].

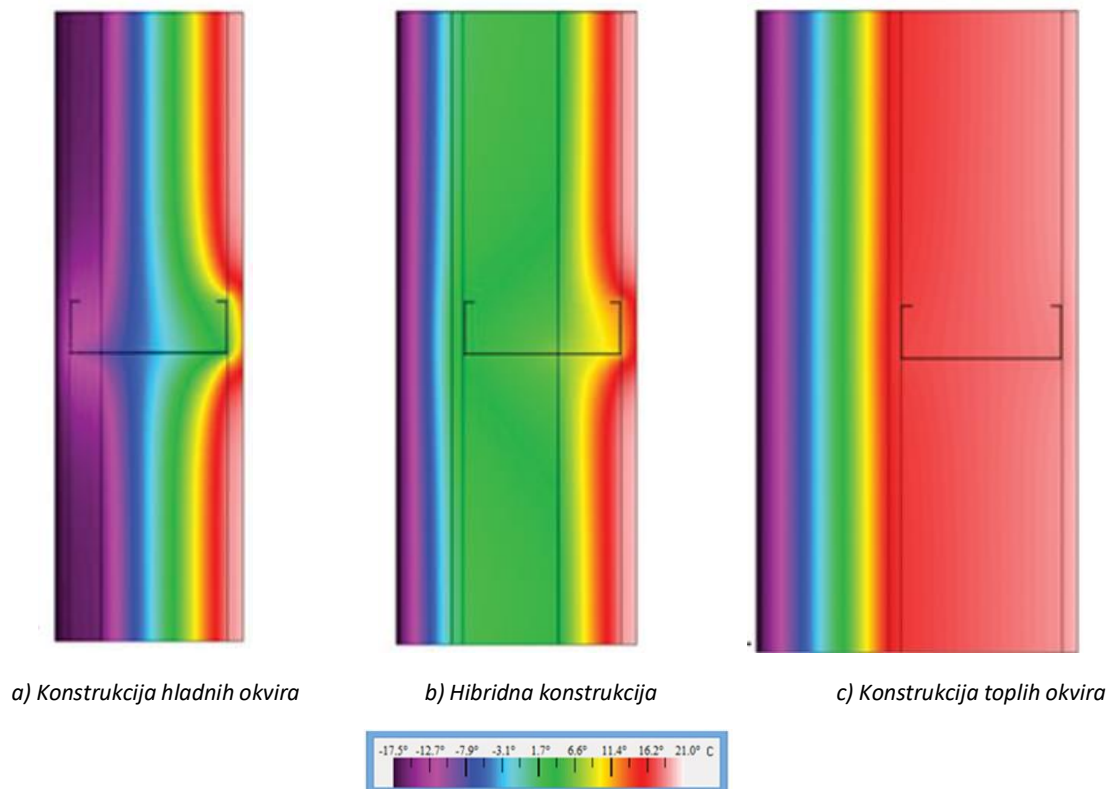
## 6. KLASIFIKACIJA LSF KONSTRUKCIJSKIH ELEMENATA

Konstruktivni elementi laganih čeličnih okvira kao što su zidovi, mogu se klasificirati u tri osnovne kategorije, ovisno o položaju izolacijskih materijala.[34] Na slici 18. prikazani su primjeri hladnog, hibridnog i toplog konstrukcijskog tipa, što ovisi o položaju izolacijskih materijala. Prikazani primjeri razlikuju se po položaju zidnih materijala: gips; lagani čelični okvir (LSF); kamena vuna; OSB (Oriented Strand Board); EPS (ekspandirani polistiren); ETICS (vanjski toplinsko-izolacijski kompozitni sustavi). U hladnom tipu konstrukcije sva je izolacija uključena unutar debljine čelika, što je izolacijski sloj preko kojeg prelaze čelični klinovi. (*Slika 19a*) ilustrira ovu konfiguraciju. Ovaj vrsta konstrukcije se ne preporučuje za hladnu klimu, s obzirom na nižu unutrašnju temperaturu zida postoji veći rizik od pojave međuprostorne kondenzacije, posebno u čeličnim klinovima i u njihovoj blizini. (*Slika 19b*) prikazuje primjer hibridne konstrukcije, u kojoj je izolacija provučena između čeličnih okvira. Debljina vanjske kontinuirane toplinske izolacije treba biti maksimizirana za bolje ublažavanje toplinskih mostova. U trećem tipu, toploj konstrukciji (*slika 19c*), izolacija je sva postavljena izvan čeličnog okvira. Ovo je najbolja opcija, koja smanjuje rizik od kondenzacije međuprostora i maksimiziranje toplinske mase ovojnice zgrade.[37] Međutim, u ovoj opciji, zidovi su deblji, što može smanjiti neto površinu poda.



Slika 18: Klasifikacija LSF konstrukcija, ovisno o položaju izolacijskih materijala [9] (Materijali: 1-Gips; 2-LSFrame; 3-Kamena vuna; 4- Zračni raspor; 5-OSB; 6-EPS; 7-ETICS) [37]

Tijekom projektiranja nZEB zgrada, postavlja se niz pitanja u vezi s termalnom izolacijom, uključujući njezin položaj, debljinu, broj slojeva i vrstu materijala. Stoga je od iznimne važnosti razumjeti i karakterizirati razlike u toplinskim svojstvima LSF fasadnih zidova ovisno o položaju izolacije kako bismo optimizirali njihovu izvedbu.



Slika 19: Raspodjela unutarnje temperature i vrijednosti toplinske propusnosti ( $U$ ) s obzirom na klasifikaciju LSF sustava. (a) Konstrukcija hladnog okvira;  $U = 0,5255 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . (b) Hibridna konstrukcija;  $U = 0,3856 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . (c) Konstrukcija toplih okvira;  $U = 0,2828 \text{ W/m}^2/\text{K}$  [37]

Više nije dovoljno samo poznavati toplinske karakteristike materijala i sustava koji se koriste u zgradama, već je ključno razumjeti njihovu efikasnost u stvarnom okruženju i primjeni. Stoga je razvoj alata i smjernica koji pomažu inženjerima i arhitektima odabrati najisplativija rješenja od iznimne važnosti za analizirano područje.

## 7. PREDNOSTI I NEDOSTACI LSF KONSTRUKCIJA

### 7.1. Prednosti LSF konstrukcija

Prednosti korištenja laganog čeličnog okvira su:

#### 1. Niska težina

Čelik ima veliku nosivost u odnosu na težinu, te se zbog toga mogu koristiti lakši temelji. [35]

#### 2. Ekonomičnost

Čelični okvir povijesno je bio jeftiniji od konkurentskih oblika gradnje. Čelični okvir se proizvodi od čeličnog lima na kontinuiranim strojevima za oblikovanje valjaka velikom brzinom. Proces proizvodnje je brži i ekonomičniji nego kod drugih materijala za uokvirivanje. Također se vide prednosti i kod transporta materijala na gradilište zbog njegove težine, te povećanja brzina izgradnje. [7]

#### 3. Energetska učinkovitost

S gledišta uticaja na okoliš, ova tehnika gradnje omogućuje usvajanje politika održivosti koje omogućuju dugoročno očuvanje prirodnih resursa, harmonizirajući odnos između prirodnog okoliša i ljudske gradnje. Održivost se odnosi na optimalno korištenje resursa na zemlji, što uključuje izbjegavanje prekomjerne eksploatacije resursa, smanjenje štete za okoliš i atmosferu i osiguravanje prihvatljive kvalitete života za svako ljudsko biće, sada i u budućnosti. Čelik je postao izrazito održiv materijal, kroz modernizaciju proizvodnih procesa koji optimiziraju potrošnju energije i minimiziraju zagađenje, kao i kroz recikliranje odbačenih metala. Masa zida u zgradi s čeličnim okvirom manja je od 10% mase zida od dvoslojne žbukane opeke. Iz toga proizlazi da se značajne uštede energije postižu već samo u transportu materijala do gradilišta. Nadalje, rasipanje materijala na gradilištu je svedeno na najmanju moguću mjeru, opet se štedi energija eliminirajući potrebu za uklanjanjem kamiona natovarenog s hrpom građevinskog šuta nakon završetka procesa izgradnje.

Ipak, najznačajnije uštede energije postižu se tijekom životnog vijeka zgrade. Zgrade od čeličnog okvira mogu se optimalno izolirati za svaku vrstu zgrade, što rezultira uštedom energije za grijanje i hlađenje.

#### 4. Oblikovanje

Lagani čelični okviri mogu se lako modificirati kako bi odgovarali strukturi zgrade [37], a osim toga, dostupne su različite veličine čelika za svaku konstrukciju. Čelik je lako podesiti, proizvesti ispravnu veličinu i težinu za podnošenje opterećenja.

#### 5. Recikliranje i ponovna upotreba

Ima veliki potencijal za recikliranje i ponovnu upotrebu.[37] Smanjenje otpada čelika u fazi izgradnje i čelika uklonjenog tokom faze rušenja može se potpuno reciklirati i/ili ponovno koristiti, s očitim prednostima održivosti. Jednostavno i brzo rastavljanje zbog mogućnosti primjene vijčanih spojeva. Ovo doprinosi očuvanju prirodnih resursa

#### 6. Otpornost na štetočine i insekte

Za razliku od drveta čelik ne privlači termite i druge biološke štetnike koje mogu oštetiti unutarnju i vanjsku strukturu materijala.

#### 7. Stabilnost u vlažnim uvjetima

Većinu vremena, konstrukcijski čelik je izrađen s drugim komponentama kako bi izdržao ekstremne vremenske uvjete, poput ugljika. Neki proizvođači čeličnih okvira dodaju dodatne komponente kao što je vrući cink ili višak praha za otpornost na hrđu kako bi se prevladalo izlaganje teškoj vodi. Nema varijacija u dimenziji uzrokovanih vlagom.[37]

#### 8. Brža gradnja

Čelični profili su lagani i jednostavni za montažu, što može znatno smanjiti vrijeme izgradnje.[37] Ušteda vremena može biti čak 40%, u usporedbi s konvencionalnom gradnjom, to ovisi o veličini projekta.

#### 9. Trajnost upotrijebljenih materijala [35]

Sa svojom visokom čvrstoćom i zaštitnim premazima, čelični okvir ima veliku trajnost. Standardni premazi na čeličnom okviru u pravilno izgrađenim, ekološki kontroliranim zgradama izdržat će više od sto godina i više.

#### 10. Veća kontrola kvalitete

Tokom tvorničke proizvodnje provodi se kontrola kvalitete. Time se osigurava dosljednost i pouzdanost ugrađenih materijala i komponenata. [37]

#### 11. Sigurnost

Još jedna prednost korištenja LSF modularnih sustava je smanjenje nesreća na radu, na gradilištu, zbog laganih elemenata i vrste sklopa. Stvara sigurno i efikasno okruženje za radnike.

## 7.2. Nedostaci LSF konstrukcija

### 1. Visoka toplinska vodljivost čelika

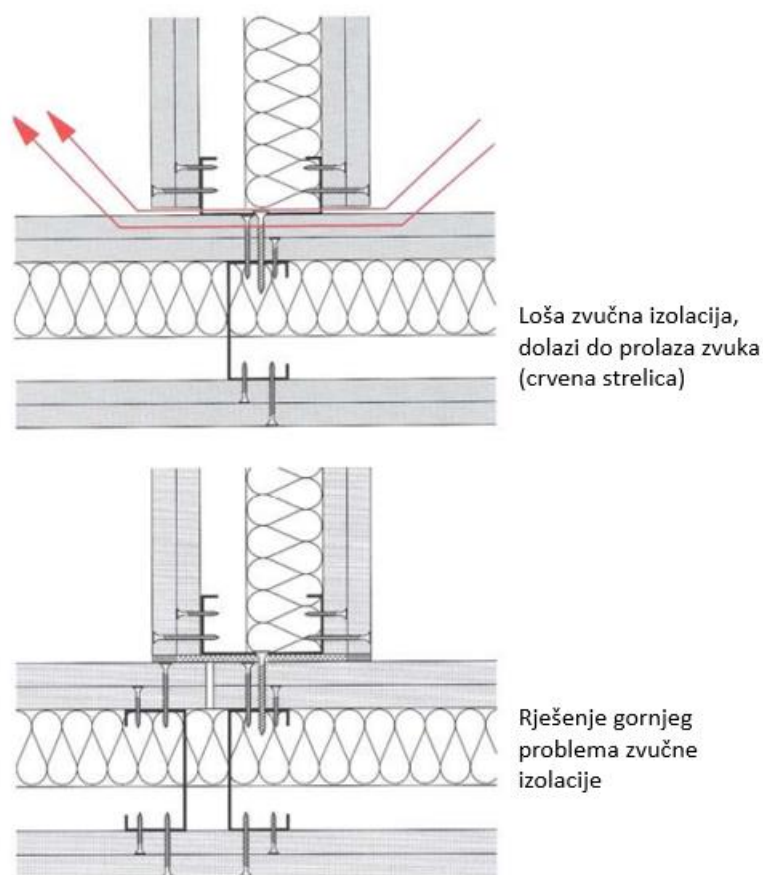
Može doći do pojavljivanja toplinskih mostova kad god konstrukcija zgrade nije dobro projektirana, stoga je bitno koristiti kontinuiranu termičku izolaciju.[36] Toplinski mostovi mogu imati negativan utjecaj na toplinsko ponašanje i energetske učinkovitost zgrada, ako se ne rješavaju ispravno, povećavajući potrošnju energije i troškove tijekom operativne faze. Povezani problemi s toplinskim mostovima uključuju konstruktivne patologije i smanjenje razine udobnosti i zdravlja povezanih s pojavom kondenzacije zbog lokalnih padova temperature unutar konstrukcijskih elemenata.

### 2. Niska toplinska masa i toplinska inercija

Može doći do većih dnevnih fluktuacija temperature, većeg neugodnog osjećaja za stanare i veće potrošnje energije.[36] To je posebno izraženo u klimama s većim dnevnim varijacijama temperature, poput mediteranskih klima, te u zgradama gdje relativna vlažnost može biti visoka i može značajno smanjiti trajnost materijala.

### 3. Zvuk

Čelik je dobar vodič zvuka, pa se moraju poduzeti dodatni koraci kako bi se osigurala zvučna izolacija.



Slika 20: Rješenje zvučne izolacije [7]

Kako bi se sačuvale akustične karakteristike konstrukcije od laganih čeličnih okvira, potrebno je posebno obratiti pažnju na poslove povezivanja pridržavajući se sljedećih točaka [7]:

- akustična separacija susjednih elemenata
- akustična separacija spojenih elemenata,
- postavljanje traka od izolacijskog materijala,
- korištenje posebnih profila opremljenih brtvama,
- pažljivo brtvljenje spojeva s brtvom.

Na slici 20 je prikazan jedan primjer pravilne izvedbe zvučne izolacije na LSF konstrukcijama.



## 8. UTJECAJ TOPLINSKIH MOSTOVA NA ENERGETSKU UČINOVITOST KOD ZGRADA

Ovaj odjeljak uključuje kratki opis toplinskog ponašanja elemenata konstrukcije s Laganim čeličnim okvirom (LSF). Lako je projektirati LSF elemente ovojnice zgrade (npr. zidove, podove i krovove) s visokim vrijednostima toplinskog otpora, čak i uz upotrebu manjih debljina, istovremeno štedeći neto površinu konstrukcije. Ovaj cilj postiže se upotrebom toplinskih izolacijskih materijala [19]. S obzirom na specifičnosti konstrukcije s Laganim čeličnim okvirom, posebna pažnja treba se posvetiti fazi projektiranja kako bi se smanjili toplinski mostovi (nastali zbog čeličnih nosača) i povećala toplinska inercija (ako je potrebno). Ova dva ključna pitanja skupa sa mjerama za smanjenje energije potrebne za grijanje i hlađenje detaljnije će se razmotriti u nastavku.

### 8.1. Toplinski mostovi

Prema Tehničkom propisu, toplinski most jest manje područje u ovojnici grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan zbog promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela.[38] Zgrada mora biti projektirana i izgrađena na način da utjecaj toplinskih mostova na godišnju potrebnu toplinu za grijanje i hlađenje bude što manji te da ne dolazi do pojave građevinskih šteta u vidu unutarnje ili vanjske površinske kondenzacije u projektnim uvjetima korištenja prostora zgrade. To dovodi do veće potrebe za grijanjem i postaje posebno važno u visoko učinkovitim zgradama. U LSF konstrukciji, toplinski mostovi često nastaju na spojevima između čeličnih elemenata. Da bi se smanjio njihov utjecaj, mogu se koristiti termički prekidači, posebni materijali koji smanjuju toplinski prijenos na spojevima. Gubitak energije zbog toplinskih mostova može biti čak veći od koristi od solarnih kolektora za proizvodnju tople vode za kućanstvo. Ukupan utjecaj toplinskih mostova na potrošnju energije za grijanje značajan je i može doseći 30% u hladnijim klimatskim uvjetima, pogotovo zimi, što je veće nego na potrošnju energije za hlađenje. [39] Što je jači stupanj toplinske izolacije zgrade, jača su i lokalne pojave toplinskih mostova.

Toplinski mostovi imaju dvije važne posljedice u usporedbi s neprekinutim strukturama: promjenu brzine prijenosa topline i promjenu unutarnje površinske temperature.[37] Dodatne posljedice su povećani gubici topline, kondenzacija vodene pare na površini, razvoj gljivica i plijesni, povećana toplinska provodljivost izolacijskih elemenata, pukotine, smrzavanje, korozija, odvajanje žbuke. Problem toplinskih mostova je delikatan i izuzetno nezgodan te može ugroziti učinkovitost bilo kojeg primijenjenog sustava izolacije. Zbog niže toplinskog otpora, unutarnja površinska temperatura komponenata sa toplinskim mostovima niža je tijekom zime, što može dovesti do problema kondenzacije i plijesni. Tijekom faze projektiranja, često se efekt toplinskih mostova i dalje smatra pitanjem koje se zanemaruje ili površno razmatra pri procjeni toplinske učinkovitosti zgrada.

Kanadski institut za čelične građevinske limove (CSSBI) proveo je usporedno istraživanje toplinske učinkovitosti između kuće s okvirom od čelika i kuće s okvirom od drva, smještenih u istoj ulici, i pregledao ih iste večeri pri vanjskoj temperaturi od 6°C i bez vjetera. Studija je pokazala da drvo kao materijal sadrži vlagu i pukotine koje mogu uzrokovati infiltraciju zraka, povećavajući gubitak topline. Budući da se čelik ne iskrivljuje niti se smanjuje u kontaktu s vlagom, čelik ovdje ima jasnu prednost koja omogućuje minimalizaciju gubitka topline i štednju energije. Kada su detaljno izolirani nekom

vrstom toplinske izolacije, tada čelične kuće troše 7% manje energije od svojih drvenih pandana koji su izgrađeni s istim nominalnim R-vrijednostima. [40]

Kao što je već spomenuto, upotreba kontinuirane vanjske toplinske izolacije važna je strategija za ublažavanje toplinskih mostova. Međutim, posebnu pažnju treba posvetiti odabiru tehnike pričvršćivanja toplinske izolacije. Preferira se metoda lijepljenja. Ako se koriste mehanički pričvršćivači, trebali bi biti, na primjer, od PVC materijala, a ne od čelika.

Smanjenje toplinskih mostova može se postići jednostavnim pravilima i strategijama projektiranja. Neki primjeri uključuju: održavanje fasadne geometrije što jednostavnijom; izbjegavanje prekida sloja izolacije; barem jedna trećina izolaciji bi trebala biti kontinuirana (po mogućnosti vanjska izolacija); na spojevima građevinskih elemenata, izolacijski spojevi se moraju spajati u punoj širini; ako je prekid izolacijskog sloja neizbježan, koristiti materijal s što manjom toplinskom provodljivošću; održavati jednostavnu geometriju fasade; i otvori (prozori i vrata) trebali bi biti postavljeni u kontaktu s izolacijskim slojem. [37]

Osim toga postoje određeni parametri koji izravno utječu na toplinsku provodljivost elemenata konstrukcije LSF-a, uključujući: poprečni presjek i broj čeličnih okvira; debljinu čelika; razmak čeličnih stupova; te duljinu nosive rešetke i rebra. Toplinski mostovi mogu imati vrlo važan utjecaj na energetska učinkovitost zgrada, posebno u hladnim klimama u pogledu potrošnje energije za grijanje prostora. Ovo pitanje postaje još relevantnije u LSF zgradama zbog visoke toplinske vodljivosti čelika.

## 8.1 Strategije za smanjenje utjecaja toplinskih mostova

U nastavku su prikazane i opisane različite tehnike koje se mogu koristiti za ublažavanje toplinskih mostova, posebno usmjerene na čelične zgrade.

### a) Kontinuirana vanjska toplinska izolacija

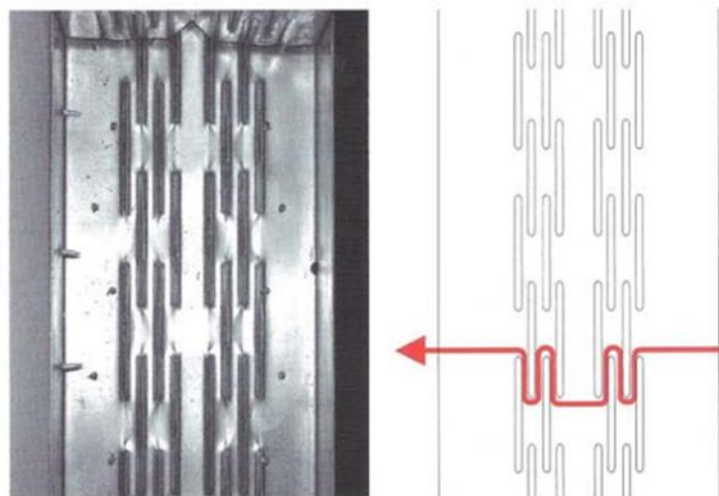
Kao što je već spomenuto, upotreba kontinuirane vanjske toplinske izolacije učinkovit je način za poboljšanje toplinske učinkovitosti i smanjenje toplinskih mostova. Povećanje razmaka između profila također omogućava povećanje toplinskog otpora (veću R-vrijednost). U ranijim istraživanjima Kosny i suradnici [37] su pokazali da je povećanje R-vrijednosti uzrokovano povećanim razmakom otprilike 20% s 1,3 cm EPS-a i otprilike 15% s 2,5 cm EPS-a. Najefikasniji način smanjenja potrošnje energije i posljedično emisije stakleničkih plinova je korištenje odgovarajućih izolacijskih materijala. Na mjestima gdje se ta kontinuitet ne može osigurati, za to prekidanje treba koristiti materijale s najmanjom toplinskom provodljivošću.[2] Prilikom projektiranja i izgradnje otvora u vanjskom omotaču, poput prozora, okvir treba instalirati u izravnom kontaktu s izolacijskim slojem. Kontinuitet toplinske izolacije lakše je uspostaviti što je jednostavnija geometrija zgrade. Mineralna vuna najčešći je materijal za toplinsku izolaciju koja se koristi unutar čeličnog okvira. Upotreba ETICS-a s ekspanziranim polistirenom (EPS) također je relativno česta. [9].



Slika 21: prikaz vanjske toplinske izolacije (EPS) [9]

#### b) Povećanje puta toplinskog toka

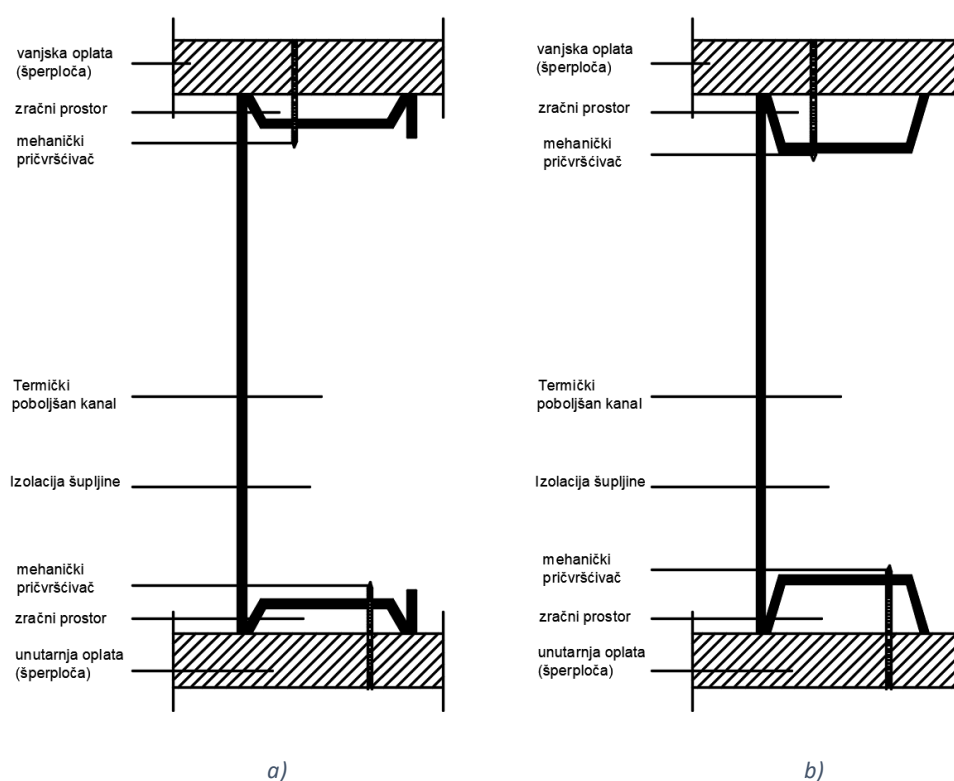
Još jedan učinkovit način smanjenja toplinskog toka je povećanje puta toplinskog toka smanjenjem površine čeličnog profila, s umetanjem utora u nosač. Osim toga, ako se duljina krila smanji, i U-vrijednost će se smanjiti. [37] U ovom slučaju u čelični nosač uvode se uzdužni utori kako bi se smanjio toplinski tok kroz čelične elemente. To mogu biti i čelični dijelovi sa prorezima, kao što je ilustrirano na slici 22. Perforacije ili praznine značajno povećavaju prijenos topline, uzrokujući da toplina putuje labirintskim putem umjesto izravno duž rebara (okomito na ravninu temperaturne razlike). Rezanje otvora može smanjiti ekvivalentnu toplinsku provodljivost rebrastog dijela s 50 na 5–10 W/m·K, ovisno o korištenom uzorku [41], zbog uklanjanja materijala iz rebrastog dijela. Ova strategija povećat će toplinsku učinkovitost LSF elemenata (niže U- vrijednosti) ali također će smanjiti njihovu mehaničku čvrstoću, što treba uzet u obzir kod nosećih elemenata.



Slika 22: Primjer čeličnog elementa s prorezima [15]

### c) Smanjenje kontaktne površine krila profila

Još jedno moguće rješenje je koristiti profil s geometrijom koja omogućava smanjenje kontaktne površine krila, stvarajući prekid u toplinskom mostu i time povećavajući R-vrijednost zida. Ovaj sustav je patentiran za termički poboljšane okvire vanjskog zida [37] i omogućava poboljšanje R-vrijednosti zida (do 16%). Treći primjer prikazan na slici 23. je uporaba utora na rebro. Geometrija rebra smanjuje kontakt površinu između panela oplata, stvarajući vrstu termičkog prekida zbog stvaranja malog zračnog prostora. Povećanje veličine utora na rebro također će poboljšati termičku izvedbu, kako je prikazano na Slici . U ovom slučaju, poboljšanja u toplinskom otporu zida iznosila su 9% i 16%, koristeći standardno rebro čeličnog profila kao referencu. [9]



Slika 23: umetanje utora u rebro: a) „1/4" kontaktne površine je smanjeno; b) „1/2" a kontaktne površine je smanjeno

### d) Prekid konstrukcije

Uvođenje prekida konstrukcije omogućuje stvaranje barijere u toplinskoj vodljivosti između vanjskih komponenata i unutarnjeg (grijanog) dijela zgrade. (npr. Schock Isokorb elementi (slika 24), Halfen...) Prekidi konstrukcije mogu se ugraditi u čelične konstrukcije omogućujući istovremeni prijenos visokih opterećenja.



Slika 24: Element za prekid konstrukcije

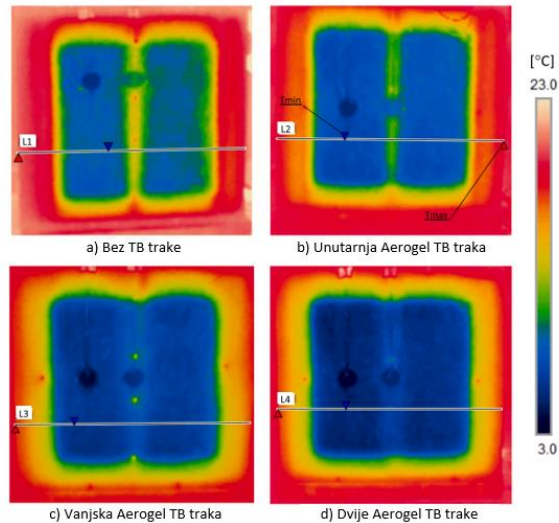
#### e) Trake za brtvljenje (TB)

Trake za brtvljenje su postale jedne od najčešće korištenih metoda za smanjivanje toplinskih mostova. [41] Postavljanje izolacijskog materijala lokalno duž nosača (slika 25) omogućava ublažavanje toplinskih mostova. [37] Ovo rješenje uključuje postavljanje izolacijske trake pričvršćene za čelični okvir pomoću vijaka ili ljepila.



Slika 25: Trake za brtvljenje postavljene duž čeličnih nosača [37]

Santos i Mateus [42] analizirali su utjecaj traka za brtvljenje na smanjivanje toplinskih mostova proračunavajući nosive i nenosive zidove, primjenu jednostruke ili dvostruke trake, proučena su tri vrste materijala brtvljenih traka i tri lokacije traka za brtvljenje duž bridova čeličnih presjeka. (Slika 25) Utvrđeno je da unutarnje i vanjske TB trake pokazuju vrlo slične termičke performanse, dok dvostruke trake imaju relativno značajan porast termičke izvedbe. Aerogel se pokazao kao najbolji materijal za TB, pokazujući značajno poboljšanje u usporedbi s recikliranom gumom i kompozitom od pluta/gume. Nadalje, performanse TB traka bile su identične za evaluirane nosive i nenosive zidove LSF-a.



Slika 26: Infracrvene snimke ocijenjenih nosivih LSF zidova: Hladna površina [40]

#### f) Korištenje reflektirajućih folija (AR)

Reflektirajuće folije su napravljene od visoko reflektirajućeg materijala koji omogućuje refleksiju do 94%. Primjenom ovih folija toplina se zimi reflektira nazad u prostor, a ljeti se zadržava izvan prostora. Ne smiju biti u kontaktu s podlogom.

Santos i Ribeiro [37] provela su eksperimentalna mjerenja toplinske učinkovitosti dvostrukih panela LSF zidova. Mjerenja su nam omogućila zaključak da je učinkovitost reflektirajuće folije (AR) veća od učinkovitosti TB traka od aerogela. Naime, korištenje AR folije (slika 27) unutar zračne šupljine dvostrukih LSF zidova mnogo je učinkovitije od korištenja TB traka od aerogela duž čeličnog presjeka, budući da samo jedna AR folija (unutarnja ili vanjska) pruža slično povećanje termičkog otpora kao i dva termička prekidača od aerogela, tj. oko  $+0,47 \text{ m}^2\text{K/W}$  (+19%). Međutim, uporaba dviju AR folija, umjesto jedne, nije učinkovita, budući da je relativno povećanje termičkog otpora samo oko  $+0,04 \text{ m}^2 \text{K/W}$  (+2%).



Slika 27: Primjena AR folija

## 8.2. Toplinska tromost (inercija)

Toplinska inercija je svojstvo tijela da, kada nastupi poremećaj spomenute toplinske ravnoteže, kroz duže vrijeme sačuva svoju početnu temperaturu tj. da je mijenja vrlo sporo, a također mjeri otpornost materijala na promjene temperature tijekom vremena. U tom smislu, može se interpretirati kao inverz toplinske difuzivnosti, koja predstavlja omjer toplinske provodljivosti prema volumetrijskoj količini topline materijala. Specifični toplinski kapacitet je fizikalna veličina koja pokazuje sposobnost tijela za spremanje topline a definira se kao omjer količine topline i promjene temperature koja zbog toga nastaje, a toplinska provodljivost je svojstvo građevinskih materijala da provode toplinu uslijed temperaturne razlike na dvije granične površine elementa. Akumulacija topline je svojstvo građevinskog dijela zgrade da može prihvatiti dovedenu mu toplinu, u sebi je akumulirati i kod hlađenja okoline ponovo je predati toj okolini. Dobra akumulacija omogućava da se temperatura zraka u prostoriji, kod privremenog prekida grijanja, značajnije ne smanji. Materijali s visokim specifičnim toplinskim koeficijentom, visokom gustoćom (i umjerenom toplinskom provodljivošću) – niskom termalnom difuzijom – pogodni su za dobru akumulaciju u zgradama. Osim toga, kako bi se učinkovito iskoristila toplinska masa, materijali se trebaju postaviti unutar slojeva izolacije. Toplinska inercija odnosi se na sposobnost materijala da zadrži toplinu. Čelik ima nisku toplinsku inerciju, što znači da brzo reagira na promjene temperature.

Osim toga, budući da su lakši i tanji od konvencionalnih elemenata ovojnice zgrade, konstrukcije od lakog čelika (LSF) imaju nižu toplinsku inerciju, čime se smanjuje mogućnost pasivnog pohranjivanja energije u ovojnici zgrade i smanjuje problem pregrijavanja u zgradama s visokim internim dobitcima, ili, s druge strane, povećava rizik od pregrijavanja ljeti, posebno u južnim europskim klimama [35].

LSF zgrade pokazuju nižu toplinsku inerciju u usporedbi s tradicionalnim zgradama s ojačanom betonskom konstrukcijom i zidovima od keramičke opeke, zbog smanjene težine i posljedično manje toplinske mase. U praksi, to znači da LSF zgrade mogu imati veće fluktuacije unutarnje temperature. Stoga je važno u fazi projektiranja adekvatno odrediti dimenzije, izloženost i strategije zasjenjenja staklenih otvora s ciljem kontrole solarnih dobitaka, uglavnom tokom sezone hlađenja kako bi se spriječilo pregrijavanje.

Trebalo bi napomenuti da viša toplinska inercija nije uvijek povoljna u zgradama u pogledu energetske učinkovitosti. Kada je zgrada povremeno zauzeta, što je često slučaj u mnogim stambenim zgradama tijekom radnog tjedna, ovaj prividni nedostatak može biti prednost. U konvencionalnim zgradama niske toplinske mase LSF, kada se uključi klima, biće puno lakše i brže hladiti ili grijati zgradu i postići temperaturu koja je ugodna za boravak čovjeka, čime se smanjuje potrošnja energije i povećava energetska učinkovitost.

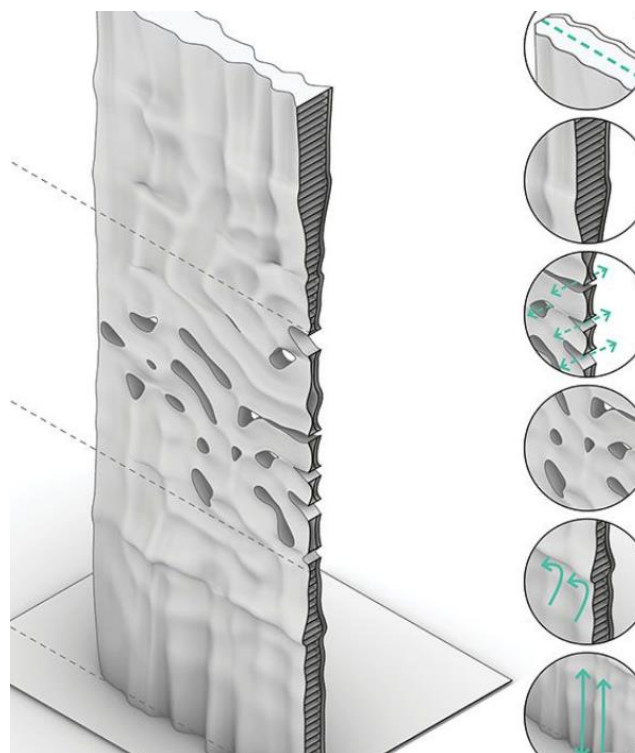
Toplinska učinkovitost ovojnice zgrade ključna je za osiguranje dobrog toplinskog ponašanja i energetske učinkovitosti te omogućuje smanjenje operativne potrošnje energije. Kao što je već spomenuto, zgrade od laganih čeličnih okvira imaju nisku toplinsku inerciju. Da bi se promijenila ova situacija, postoji nekoliko strategija za povećanje akumulacije topline kao što su: korištenje vanjske toplinske izolacije, ne samo da omogućuje povećanje toplinske inercije već i ublažava toplinske mostove, budući da je riječ o kontinuiranom sloju toplinske izolacije; upotreba masivnih građevinskih materijala; iskorištavanje ogromne toplinske mase tla; i upotreba materijala s promjenjivom fazom (PCM), kako je opisano u nastavku.

### a) Upotreba masivnih građevinskih materijala

Upotreba masivnih građevinskih materijala u zgradama od laganih čeličnih okvira nije uobičajena, međutim, postoje jednostavne strategije koje omogućuju povećanje toplinske inercije zgrade. Na slici 27. je prikazan primjer upotrebe masivnih materijala (npr. Kamena) kako bi se apsorbirala i pohranila toplina. U ovom primjeru kameni zid postavljen je ispred prozora kako bi lako uhvatio solarnu toplinu.



Slika 28: Zid od kamena [9]



Slika 29: Primjer modernog "pametnog" trombe zida

### b) Iskorištavanje toplinske mase tla



Geotermalni sustav omogućuje korištenje ogromne toplinske mase tla, iskorištavajući je tijekom ljetnih i zimskih sezona. Ti sustavi mogu se temeljiti na zraku, kao što je prikazano na slici 30, ili rashladnoj tekućini. Treba napomenuti da je tlo hladnije tijekom sezone hlađenja i toplije tijekom sezone grijanja, odnosno povoljno je u oba razdoblja. [37] Postoji nekoliko načina za iskorištavanje te razlike u temperaturi između zraka i tla. Upotreba sustava za izmjenu topline s tлом (GSHE) temeljenoj na zraku ili tekućini (npr. Glikola tekućina) kroz zakopane cijevi mogla bi biti moguća strategija.



Slika 30: Iskorištavanje ogromne toplinske mase tla kroz zakopane cijevi [37]

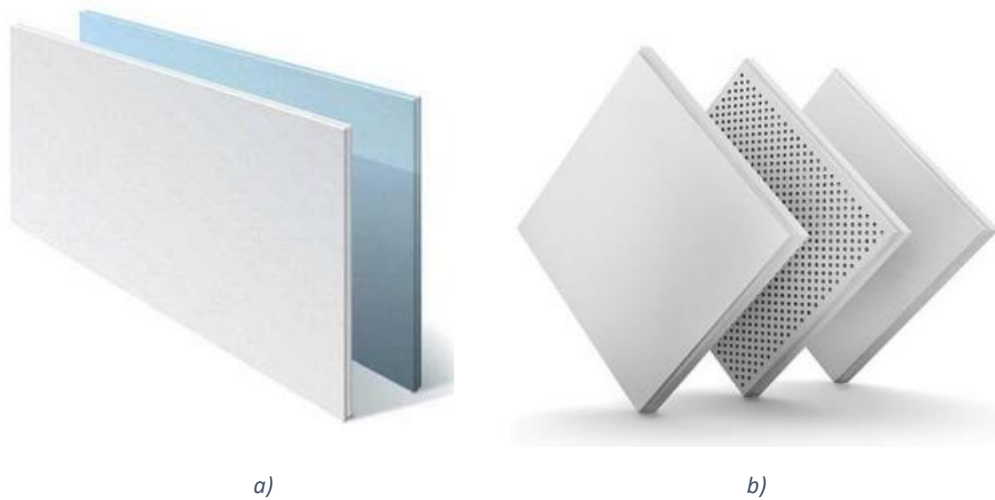
Ovaj sustav istovremeno može poboljšati kvalitetu zraka u zatvorenim prostorima i energetske učinkovitost u zgradama pružanjem svježeg vanjskog zraka i smanjenjem potrošnje energije za grijanje i hlađenje. To je relevantna značajka, posebno uzimajući u obzir hermetičnost suvremenih zgrada.

#### c) Upotreba materijala s promjenjivom fazom

PCM-ovi se mogu koristiti za povećanje toplinske inercije LSF građevina, izbjegavajući upotrebu masivnih materijala s pripadajućim nedostacima (npr. smanjenje neto površine poda zbog debljih zidova i povećanje opterećenja na konstrukciju). Nadalje, kod obnove zgrada, PCM-ovi se mogu dodati uz minimalne promjene u postojećem dizajnu zgrade (npr. dodavanjem vreća s PCM-ovima iznad suspenzivnih stropnih ploča ili dodavanjem PCM ploča na zidove).

Slika pokazuje upotrebu materijala s faznim promjenama (PCM) u stropu (aluminijem laminirani PCM panel). PCM-ovi su također odlično rješenje za povećanje toplinske mase. Imaju veliku prednost pohrane topline, djelujući kao spremnik topline zbog latentne topline.[19] Ova latentna topline omogućuje materijalu da apsorbira ili oslobađa toplinu bez povećanja temperature materijala, povećavajući tako toplinsku inerciju okolnog prostora. Postoji nekoliko vrsta PCM-ova s različitim toplinskim kapacitetima, oblicima, temperaturama otapanja, makro- i mikrokapsularnim.

Danas na tržištu možete pronaći širok raspon građevinskih materijala ili komponenata koje sadrže PCM-ove [19]: ploče za suhu gradnju zidova; žbuke (npr.: gips, cement, glina); suspenzija stropnih ploča; unutarnje lamelaste prozorske žaluzine; spremnici za pohranu topline; i sustav podnog grijanja...



Slika 31: Primjeri PCM ploča za suhu gradnju: a) zidni paneli; b) stropne ploče. [19]

S obzirom na obično nižu toplinsku masu u LSF zgradama, u ovom tipu konstrukcija poboljšana je učinkovitost PCM-a. Međutim, učinkovitost PCM-ova u zgradama ovisi o mnogo faktora. Trebali bi se uzeti u obzir neki relevantni aspekti, kao što su:

- Položaj u zgradi
- Njihov volumen i termofizičke karakteristike
- Raspon temperature fazne promjene
- Količina latentne topline
- Klimatski uvjeti
- Interni i solarni toplinski dobitci
- Refleksivnost i orijentacija površina
- Stope ventilacije
- Upravljanje HVAC sustavom
- Arhitektonske karakteristike



Slika 32: Upotreba PCM materijala [9]

### 8.3. Mjere za smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje

Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama definiramo energije za grijanje i hlađenje. [3]

*Potrebna energija za grijanje* jest količina toplinske energije koju je potrebno osigurati unutar kondicionalnog prostora kako bi se u njemu održala minimalna željena temperatura. Potrebna energija za grijanje ovisi o klimatskim uvjetima na lokaciji zgrade, arhitektonsko-građevinskim karakteristikama zgrade, načinu provjetravanja i namjeni zgrade. Potrebnu energiju za grijanje označavamo s  $Q_{H,nd}$ , a izražavamo u kWh/god ili kWh/a. Specifičnu potrebnu energiju za grijanje označavamo s  $Q''_{H,nd}$ , a izražavamo u kWh/m<sup>2</sup>·a.

*Potrebna energija za hlađenje* jest ona količina topline koju je potrebno odvesti iz kondicionalnog prostora kako bi se u njemu održala željena temperatura. Potrebna energija za hlađenje ovisi o istim uvjetima kao i potrebna energija za grijanje. Specifičnu potrebnu energiju za hlađenje označavamo s  $Q''_{C,nd}$ , a izražavamo u kWh/m<sup>2</sup>·a

Prilikom analize ukupne energetske potrošnje povezane s proizvodom, posebno s građevinom, možemo prepoznati dvije ključne vrste energije: primarnu energiju i isporučenu energiju, koja uključuje potrebne energije za grijanje i hlađenje. U zgradama s niskom energetsom učinkovitošću, udio primarne energije obično iznosi samo 10% do 15% energije potrebne za njihovo održavanje [19]. No, kako se povećava energetska učinkovitost zgrada, smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje često rezultira većim udjelom primarne energije.

Dva najutjecajna čimbenika u ekološkoj izvedbi zgrada tijekom njihova životnog ciklusa su učinkovitost materijala i učinkovitost energije. Učinkovitost materijala odnosi se na upotrebu materijala prijateljskih prema okolišu i minimizaciju materijala otpada tijekom gradnje i rušenja. Ukupna energija može biti pokazatelj za opisivanje učinkovitosti materijala. Učinkovitost energije smatra se optimizacijom energije korištene tijekom korištenja zgrade (npr. grijanje, hlađenje, osvjetljenje itd.).

U literaturi, većina istraživanja analize životnog ciklusa posvećena laganim konstrukcijskim sustavima usmjerena je na kvantifikaciju potražnje energije i emisija stakleničkih plinova tijekom operativne faze. Jedno od osnovnih rješenja za smanjenje potražnje energije za klimatizaciju tijekom operativne faze u konstrukcijama sa laganim čeličnim okvirom je razmatranje većeg broja slojeva izolacije. To može dovesti do ravnoteže između energije za grijanje i hlađenje i primarne energije. U konstrukcijama sa laganim čeličnim okvirom, relativna važnost izolacijskih materijala za globalnu ekološku izvedbu vrlo je visoka, budući da upotreba laganih okvira omogućava smanjenje ekoloških opterećenja zbog strukturnih komponenata zgrade. Stoga je ravnoteža između energija još važnija.

Kako bismo promovirali održivost u građevinskom sektoru, sveobuhvatna procjena ukupne potrošene energije tijekom životnog ciklusa zgrade postaje ključna, iako se trenutno često ograničava na analizu radne energije.

Više nije dovoljno samo minimizirati isporučenu energiju potrebnu za održavanje zgrade; sada je ključno pronaći optimalan kompromis između energije za grijanje i hlađenje i primarne energije. Kao primjer, uzmimo toplinsku izolaciju: potrebno je maksimalno iskoristiti prednosti tih materijala kako bismo postigli visoku energetska učinkovitost zgrade, istovremeno koristeći što manje resursa (ili ekološki prihvatljivije resurse). Stoga, pametna primjena toplinske izolacije postaje od suštinskog značaja, a inženjeri i arhitekti moraju maksimalno povećati učinkovitost ovih materijala kako bi postigli

optimalne energetske rezultate. Smanjenje energije grijanja i hlađenja ovisi o klimatskim uvjetima na lokaciji zgrade, arhitektonsko-građevinskim karakteristikama zgrade, načinu provjetravanja i namjeni zgrade. U hladnijim klimatskim uvjetima, važno je koristiti izolaciju visokog stupnja kako bi se smanjili gubici topline. U toplijim klimatskim uvjetima, može se koristiti manje izolacije, ali je važno koristiti reflektirajuće materijale kako bi se smanjilo zagrijavanje zgrada.

Smanjenje energije grijanja i hlađenja koja se koristi u zgradama, uz održavanje unutarnjeg komfora, ključno je za postizanje bolje oznake održivosti zgrade. Ovaj cilj se može postići pažljivim dizajnom i primjenom građevinskih tehnika koje smanjuju potrošnju energije tijekom redovnog korištenja zgrade.

Jedan od najučinkovitijih načina za testiranje različitih tehnika za poboljšavanje projektiranja jest izvođenje naprednih dinamičkih termalnih simulacija zgrade, koristeći stvarne klimatske podatke mjesta na kojem se zgrada gradi. Ove simulacije omogućuju procjenu kako različite komponente ovojnice zgrade doprinose ukupnim gubicima topline kroz godinu te identificiraju prioritete za poboljšanje.

U parametarskoj studiji koju su proveli Gervásio i suradnici [39] na stambenoj zgradi s laganim čeličnim okvirom smještenoj u Portugalu razmatrani su različiti slojevi izolacije kako bi se procijenila ravnoteža između energetske učinkovitosti i ukupne energije životnog ciklusa. U toj studiji pokazano je da su bile potrebne 16 godina da isporučena nadmaši primarnu energiju. Nadalje, povećanjem razine izolacije bilo je potrebno više vremena (do 23 godine) da isporučena energija nadmaši primarnu energiju. Autori su zaključili da je za tipične klimatske uvjete južne Europe moguće značajno poboljšati toplinsku učinkovitost stambenih zgrada povećanjem razine izolacije slabih komponenata ovojnice zgrade bez značajnog povećanja ukupne energije zgrade, ali samo do određene mjere.

Ova vrsta analize omogućuje projektantima da pronađu optimalan balans između toplinske izolacije (koja zahtijeva ugradnju materijala s visokom toplinskom izolacijom) i drugih čimbenika, poput kvalitete stakala ili učinkovitosti sustava grijanja i hlađenja. Na taj način, zgrade mogu postići visoku energetska učinkovitost uz minimalnu potrošnju energije, što pridonosi održivosti i smanjenju negativnog utjecaja na okoliš.

Cilj nam je što više iskorištene energije uzeti iz obnovljivih izvora energije. Obnovljivi izvori energije jesu obnovljivi nefosilni izvori, [4] tj. energija vjetra, sunčeva energija, aerotermalna, geotermalna, hidrotermalna energija i energija mora, hidroenergija, biomasa, deponijski plin, plin iz postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda i bioplinovi.

## 9. METODE PROCJENE TOPLINSKE PROVODLJIVOSTI

Santos i njegov istraživački tim [43] proveli su ocjenu U-vrijednosti za tri različita CFS zida koristeći tri različite metode: tehniku mjerenja toplinske provodljivosti toplinskom metodom, 2D i 3D simulacije metodom konačnih elemenata (FEM) te ASHRAE metodom zona. Za CFS zid s isključivo vertikalnim čeličnim nosačima, utvrdili su značajnu konzistentnost između rezultata dobivenih putem 2D FEM simulacija i analitičke ISO 6946 metode [44].

### 9.1. Analitičke metode za procjenu toplinske provodljivosti LSF-stijenki

Analitičke metode primijenjene na elemente s Laganim čeličnim okvirom (LSF) imaju neke specifične značajke, što je zahtjevnije za korištenje i dobivanje pouzdane točne  $U$ -vrijednosti. Točna procjena prijenosa topline ( $U$ -vrijednost) elemenata ovojnice zgrade je osnova za pouzdanu procjenu njihovog toplinskog ponašanja i energetske učinkovitosti [44]. LSF elementi su još veći izazov s obzirom na vrlo smanjenu debljinu hladno oblikovanih čeličnih profila i jak kontrast između njegovih toplinskih svojstava (npr. toplinske vodljivosti) i toplinske izolacijski materijali (npr. mineralna vuna) [45]. U zgradama, usprkos toplinskim mostovima nastalim zbog visoke toplinska vodljivost čeličnog okvira, potrebno je uzeti u obzir bočne toplinske gubitke oko i u sjecištu građevinskih LSF komponenti [44].

Postoji nekoliko pristupa za dobivanje toplinskog otpora/propusnosti zgrade elementi:[46]

- Analitička
- Numerička
- Metoda mjerenja

Što se tiče toplinske izvedbe mjerenja, mogu se provesti na licu mjesta ili u laboratoriju, što je ključno za validacija numeričkih i analitičkih metoda [44]. In-situ nedestruktivna toplinska propusnost mjerenja u postojećim zgradama vrlo su važna za energetski pregled i radnje rekonstrukcije, što je vrlo zahtjevno izvesti jer su svojstva materijala često nepoznata, komponente često degradiraju tijekom vremena, a eksperimenti bi trebali biti brzi, jednostavni i nedestruktivni. Mjerenja u laboratorijskim uvjetima imaju prednosti dobro poznatih kontroliranim uvjetima okoline, geometrijama, konfiguracijama i materijalima, ali može biti vrlo dugotrajan i skup. Postoje različite metode mjerenja, a najčešće se koriste ove [44]:

- mjerač protoka topline (HFM);
- zaštićena grijaća ploča (GHP);
- vruća kutija (HB), koja može biti kalibrirana (CHB) ili zaštićena (GHB);
- infracrvena termografija (IRT).

Numeričke simulacije mogu se izvesti s jednostavnijim dvodimenzionalnim (2D) ili složenijim trodimenzionalnim (3D) modelima. Oni imaju prednost omogućujući brzu usporedbu između nekoliko rješenja za komponente zgrade. Međutim, potreban im je specifičan softverski alat, vještine za njegovo korištenje i osiguranje pouzdanosti dobivenog rezultata. Korištene modele treba potvrditi mjerenjima ili barem potvrditi usporedbom s referentnim rezultatima. Korištenje analitičkih formula moglo bi biti najjednostavniji pristup od svih ovih metoda. Međutim, ovaj analitički pristup je obično samo dostupan za jednostavnije konfiguracije; njegova primjenjivost je najčešće vrlo ograničena. Štoviše, ove formulacije analitičkog izračuna često uzimaju u obzir jednodimenzionalno pojednostavljeno ravnotežno stanje prijenosa topline i ne uzimaju u obzir skladištenje topline unutar materijala, niti toplinu varijacije svojstava (npr. s temperaturom ili vlagom) [44]. Upotreba analitičkih metoda za izračunavanje toplinskog otpora ( $R$ -vrijednost) i prijenosa ( $U$ -vrijednost) građevinskog elementa može biti komplicirana tema, posebno kada element ima više nehomogenih slojeva s vrlo različitim toplinskim svojstvima. Za LSF konstrukcije, analitički izračuni mogu biti teži nego u drugim oblicima konstrukcije, jer metodologija mora uključivati učinke nehomogenih slojeva, toplinskih mostova i velike razlike toplinske vodljivosti između materijala.

Jedna od najčešće korištenih pojednostavljenih analitičkih metoda za izračunavanje toplinskog otpora i propusnost građevne komponente koja sadrži homogene i nehomogene slojeve je propisane standardom ISO 6946 [47]. Ukupni toplinski otpor komponente izračunava se prema kombinirajući svoje gornje i donje granice, pa se ova metodologija često označava kao *ISO 6946 kombinirana*

*metoda*. Ova ograničenja  $R$ -vrijednosti izračunavaju se korištenjem metode paralelnog puta (gornja granica) i metoda izotermnih ravnina (donja granica). Ukupna  $R$ -vrijednost zgrade se izračunava kao prosjek gornje i donje granice, kao što je prethodno spomenuto. Međutim, ova pojednostavljena analitička metodologija izračunate  $R$ -vrijednosti ne bi trebala biti primjenjiva na građevinskim elementima kod kojih je izolacija premoštena metalom [47], kao što se događa u hladnom i hibridnom LSF-u elementu.

*ASHRAE Zone Method* [44] jedna je od prvih analitičkih pojednostavljenih metoda koje treba razviti za izračunavanje  $R$ -vrijednosti LSF elementa. Metoda ASHRAE Zone je modifikacija metode paralelnog puta, gdje se umjesto razmatranja samo debljine čeličnih mreža s klinovima, razmatra zona većeg utjecaja metalnog toplinskog mosta unutar LSF stijenke. Širina područja zahvaćenog čeličnim toplinskim mostom ovisi o duljini čeličnog svornjaka i prirubnice i na udaljenosti od te metalne prirubnice do površine zida, tj. debljina slojeva obloge. S obzirom na prijavu nezadovoljavajuće točnosti ASHRAE Zone metode, Kosny et al. razvili su novu poboljšanu metodologiju, često označenu kao *Modificirana zonska metoda* [43]. Ova poboljšana metoda za procjenu  $R$ -vrijednosti zidova metalnih okvira razvijena je na temelju računalne simulacije rezultata i eksperimentalnih mjerenja različitih konfiguracija stijenki LSF-a, uzimajući u obzir nekoliko parametara zida, kao što su razmak klinova, veličina klinova (dubine) i prirubnica, debljina metalnih klinova, toplinski otpor izolacije šupljine i toplinski otpor vanjskog plašta [44]. Zaključeno je da su razlike u toplinskim proračunima uzrokovane metalnim klinom. Nedavno je Gorgolewski [45] prilagodio kombiniranu metodu ISO 6946 za točniju analitičku  $U$ -metodologiju izračuna vrijednosti za LSF građevinske komponente, uključujući hladne i hibridne okvire. U ovoj novoj predloženoj analitičkoj metodologiji, gornja i donja granica  $R$ -vrijednosti i dalje se koriste, ali umjesto prosjeka između ovih granica Gorgolewski je pronašao "algoritam" za procjenjujući odgovarajući ponder između njih [45]. Predložena je i uspoređena točnost tri analitičke metode, uzimajući u obzir neke parametre elemenata čeličnog okvira, kao što su npr. širina prirubnice, razmak klinova i dubina klinova. Za treću metodu koju je razvio Gorgolewski bilo je utvrđeno da pokazuje najbolju izvedbu točnosti i stoga je usvojen u Ujedinjenom Kraljevstvu za Kodeks prakse LSF zgrada [44].

## 9.2. Pojednostavljena analitička metoda

Kao što je prije spomenuto, dio građevine može biti sastavljen od homogenih i/ili nehomogenih slojeva. Kada se građevinski element sastoji od  $n$  homogenih ravnih slojeva ( $j$ ), koji su okomiti na toplinski tok, nastali prijenos toplinskog toka je jednodimenzionalan i ukupan toplinski otpor može se izračunati kako je propisano ISO 6946 [47],

$$R_{tot} = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se} \quad (1)$$

Gdje  $R_{si}$  i  $R_{se}$  označavaju unutarnji i vanjski otpor površine [ $m^2 \cdot K/W$ ].  $R_j$  označava toplinski otpor svakog pojedinog homogenog sloja  $j$ . Kada postoje nehomogeni slojevi u građevnoj komponenti, počinje dvodimenzionalni protok topline umjesto jednodimenzionalnog, s obzirom na različite toplinske vodljivosti i posljedično različite toplinske otpore. Ove dvodimenzionalne značajke protoka topline postaju značajnije kada su veće razlike između toplinskih svojstava materijala.

### 9.3. ISO 6946 Kombinirana metoda

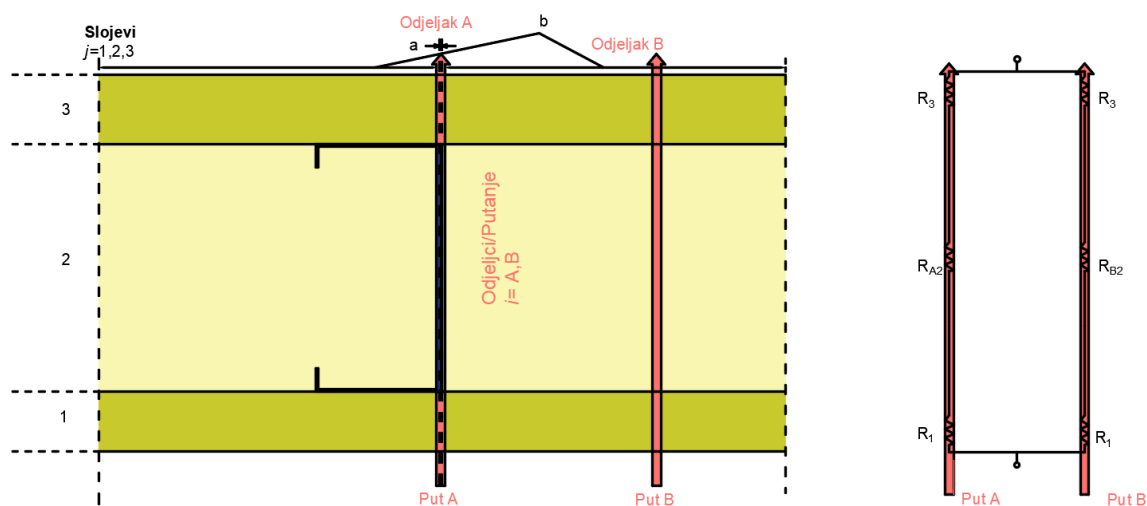
Jedna od najčešće korištenih analitičkih pojednostavljenih metoda za izračunavanje toplinskog otpora građevnih elemenata koji se sastoje od homogenih i nehomogenih slojeva, koji mogu sadržavati zrak slojeva debljine do 0,30 m, opisan je u međunarodnoj normi ISO 6946 [47] i stoga se često identificira kao kombinirana metoda ISO 6946, jer se izračunava ukupni toplinski otpor kombiniranjem dvije različite metode: (1) Metoda paralelnog puta; (2) Metoda izotermnih ravnina.

Prema ISO 6946 [46], ovaj pojednostavljeni analitički pristup vrijedi samo za slučajeve kada omjer gornje i donje granice toplinskog otpora ne prelazi 1,5. Nadalje, ova metoda nije primjenjiva na građevinske elemente kod kojih je toplinska izolacija premoštena metalom (npr. čeličnim klinovima), tj., kada postoji značajna razlika između toplinske vodljivost materijala u sloju koji osigurava najvažniji toplinski otpor građevnog elementa. Stoga kombinirana metoda ISO 6946 (teoretski) nije važeća za hladne i hibridne LSF konstrukcijske elemente.

Štoviše, ISO 6946 [14] propisuje pojednostavljene korekcije toplinske vrijednosti propusnosti za: (1) zračne šupljine, (2) mehaničke pričvršćivače i (3) obrnute krovove, kad god ukupna korekcija prelazi 3%.

#### 9.3.1. Gornja granica ukupnog toplinskog otpora: Metoda paralelnog puta

Gornja granica ukupnog toplinskog otpora ( $R_{\text{tot;upper}}$ ) određena je pomoću metoda paralelnog puta, tj. uz pretpostavku jednodimenzionalnog prijenosa topline okomito na površinu građevinskog elementa. Ova pretpostavka je prikladna kada materijali na istom sloju imaju blizak (tj. isti redoslijed veličina) vrijednosti toplinske vodljivosti, kao na primjer na zidovima od drvenih okvira. Kako je prikazano u slici 33a obično se dva glavna puta razmatraju u zidovima šupljih klinova: put A, gdje je toplinski tok obično veći s obzirom na veću toplinsku vodljivost klina kroz materijal i put B, s uobičajeno manjim toplinskim protokom s obzirom na nižu toplinsku vodljivost izolacijskih šupljina. Slika 33b prikazuje ove ekvivalentne paralelne krugove za oba puta.



Slika 33: Shematska ilustracija metode paralelnog puta: (a) poprečni presjek zida lakog čeličnog okvira (LSF); (b) Ekvivalentni krug paralelnog puta

Ova metodologija ne uzima u obzir vodoravne dijelove čeličnog klina i uzima u obzir samo mrežu klina, kako je širina *odjeljka A* omeđena mrežom klina. Uz pretpostavku ovih načela izračuna, gornja granica ukupnog toplinskog otpora dana je s jednadžbom (2),

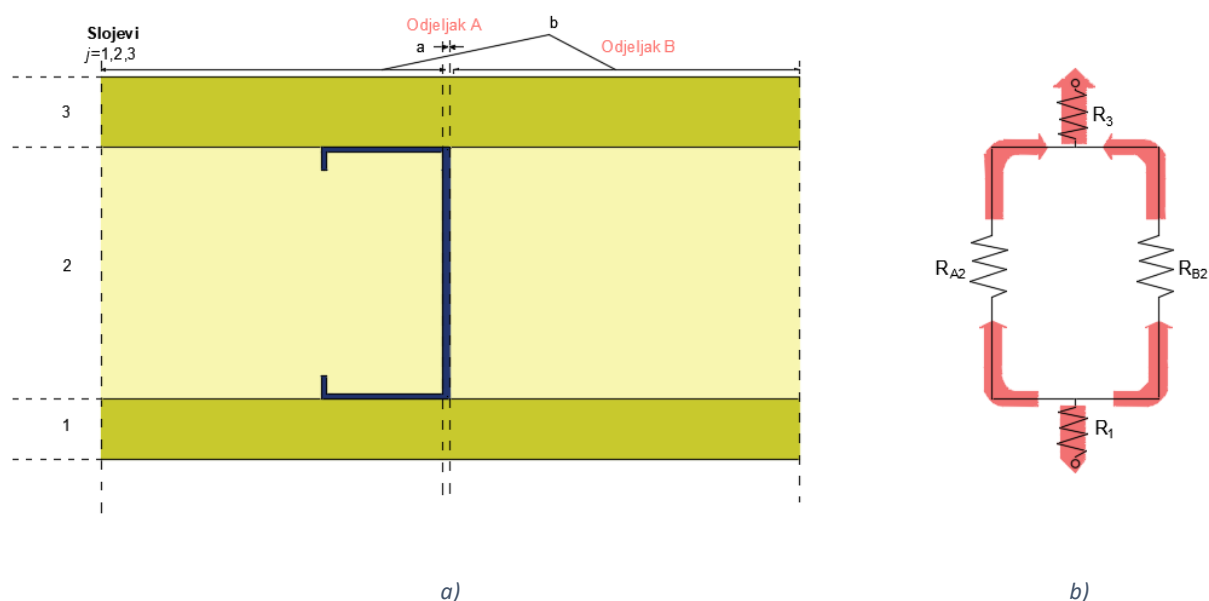
$$\frac{1}{R_{tot;upper}} = \frac{f_A}{R_{tot;A}} + \frac{f_B}{R_{tot;B}} \quad (2)$$

U navedenoj jednadžbi  $\phi_A$  i  $\phi_B$  označavaju razlom  $\cdot K_e$  u sektorima A i B pa su prema tome  $R_{tot;A}$  i  $R_{tot;B}$  potpune toplinskog otpora svakog sektora/puta [ $m^2 \cdot K/W$ ] ovi ukupni toplinski otpori su izračunati kao zbroj toplinskih otpora u nizu za svaki put, pod pretpostavkom da su homogeni slojevi okomiti na toplinski tok [14], uključujući unutarnje i vanjske površinske toplinske otpore.

### 9.3.2. Donja granica ukupnog toplinskog otpora: Metoda izotermnih ravnina

Donja granica ukupnog toplinskog otpora ( $R_{tot;lower}$ ) određuje se korištenjem metodom izotermnih ravnina, tj. uz pretpostavku da su sve ravnine koje su paralelne s površinom građevnog elementa izotermne površine. U ovoj metodi pretpostavlja se da toplina može teći bočno u bilo kojoj komponenti i toplinski otpori susjednih komponenti kombiniraju se u paraleli, što rezultira kombiniranim serijsko-paralelnim otporom. Ova pretpostavka je prikladna kada susjedni materijali istog sloja imaju umjereno različite vrijednosti vodljivosti, kao kod žiđa zidovi. Slika 1a ilustrira tri sloja (1, 2 i 3) i dva sekcije (A i B) razmatrane u hladno oblikovanom zidu šupljine klina. Kao što je spomenuto ranije, s obzirom na batt izolaciju koja je postavljena u šupljinu, toplinski otpor sektora B (izolacija šupljine) mnogo je veći nego kod sektora A (klin). Kao i u prethodnoj metodi (paralelni put), samo čelična mreža je uzeta u obzir za proračun toplinske provodljivosti. Slika 34b prikazuje ekvivalentni serijski paralelni krug pod pretpostavkom izotermne ravnine. Budući da je sloj 2 nehomogen, oba toplinska otpora ( $R_{A2}$  i  $R_{B2}$ ) se nalaze u paraleli.





Slika 34: Shematski prikaz metode izotermnih ravnina: (a) presjek stijenke LSF-a; (b) ekvivalent serijsko-paralelnog kruga.

Proračun donje granice ukupnog toplinskog otpora podijeljen je u dvije faze [47]. Prvo se izračunava ekvivalentna toplinski otpor ( $R_j$ ) svakog toplinskog nehomogenog sloja ( $j$ ). (sloj 2 na slici 1,) koristeći metodu paralelnog puta prema jednadžbi (3) [47], koja se može pojednostaviti za LSF stijenkku prikazanu na slici 1, što rezultira jednadžbom (4).

$$\frac{1}{R_j} = \frac{f_A}{R_{Aj}} + \frac{f_B}{R_{Bj}} + \dots + \frac{f_Q}{R_{Qj}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{R_2} = \frac{f_A}{R_{A2}} + \frac{f_B}{R_{B2}} \quad (4)$$

Drugo, donja granica ukupnog toplinskog otpora ( $R_{tot;lower}$ ) izračunava se kao zbroj serijskih otpora

$$R_{tot;lower} = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + R_{se} \quad (5)$$

uključujući ekvivalentni toplinski otpor nehomogenog sloja ( $R_2$ ) prethodno dobivenog u Jednadžbi (4), kao i unutarnji i vanjski površinski toplinski otpori.

### 9.3.3. Ukupni toplinski otpor: kombinirana metoda

Prema kombiniranoj metodi ISO 6946, ukupni toplinski otpor ( $R_{tot;ISO}$ ) je izračunava se kao aritmetički prosjek ukupne gornjeg ( $R_{tot;upper}$ ) i donjeg ( $R_{tot;lower}$ ) toplinskog otpora.

$$R_{tot;ISO} = \frac{R_{tot;upper} + R_{tot;lower}}{2} \quad (6)$$

što znači da dvije  $R$ -vrijednosti (gornja i donja granica) imaju istu težinu (0,5) na ukupnom proračunu otpora [47].

## 9.4. Metode Gorgolewskog

Kako ISO 6946 kombinirana metoda  $U$ -izračun vrijednosti isključuje konfiguracije zidova—u kojima su izolacijski slojevi premošteni linearnim metalnim elementima, kao na laganom čeličnom okviru (LSF) konstrukcija—iz svog opsega Gorgolewski [45] je predložio tri nove metode temeljene na sličnim načelima koje se koriste u toj normi [47], prilagođavajući je zbog povećanja točnosti za ovu vrstu konstrukcije. Koristeći istu metodologiju izračuna predloženu u ISO 6946 za postizanje gornje ( $R_{tot;upper}$ ) i donje ( $R_{tot;lower}$ ) granice toplinskih otpora, Gorgolewskijeva metoda razlikuje se u ukupnom proračunu otpora primjenom različitih težina za gornju i donju vrijednost otpora i razmatranjem faktora  $p$ , između 0 i 1, tako da je ukupni toplinski otpor ( $R_{tot}$ ) dan jednadžbom (7),

$$R_{tot;gorg} = pR_{tot;upper} + (1 - p)R_{tot;lower} \quad (7)$$

Dakle, ukupni toplinski otpori dobiveni metodama Gorgolewskog kreću se u intervalu  $[R_{tot;lower}; R_{tot;upper}]$ , kao što je ilustrirano u sljedećem izrazu:

$$R_{tot;gorg} = \begin{cases} R_{tot;upper} & \text{ako je } p = 1,0 \\ R_{tot;ISO} & \text{ako je } p = 0,5 \\ R_{tot;lower} & \text{ako je } p = 0,0 \end{cases} \quad (8)$$

jednak je ukupnom otporu ISO 6946 kada je  $p$ -vrijednost 0,5. Primijetite da za tople LSF elemente, tj. kada postoji samo vanjska izolacija, pretpostavljala se  $p$ -vrijednost jednaka 0,5. Dakle, dobiveni ukupni toplinski otpor za bilo koju Gorgolewski metodu jednaka je onoj koju daje kombinirana metoda ISO 6946 [47]. Točnost nekoliko metoda koje je predložio Gorgolewski provjerena je usporedbom s rezultati dobiveni 2D numeričkim FEM modelima za 52 različita LSF zida i krovne ploče [44].

### 9.4.1. Gorgolewski Metoda 1

$p$ -vrijednost za prvu (pročišćenu) metodu koju je predložio Gorgolewski [12] izražena je u jednadžbi (9),

$$p = 0,8 \left( \frac{R_{tot;lower}}{R_{tot;upper}} \right) + 0,1 \quad (9)$$

Ova  $p$ -vrijednost izravno ovisi o omjeru između donje i gornje granice ukupnog iznosa toplinskog otpora.

### 9.4.2. Gorgolewski Metoda 2

$p$ -vrijednosti za drugu metodu koju je predložio Gorgolewski [45] prikazane su tablici 1, Ove vrijednosti uzimaju u obzir razmak klinova, uzimajući kao referencu 500 mm, te je li LSF element hibridni ili hladni okvir.

Tablica 3: Tablične  $p$ -vrijednosti za Gorgolewski metodu 2 [44].

$p$ -vrijednosti	Tip okvira
------------------	------------

	Hibridni	Hladni
razmak klinova $\geq 500$ mm	0,50	0,30
razmak klinova $< 500$ mm	0,40	0,25

Analizirajući predložene  $p$ -vrijednosti, budući da su sve niže ili jednake 0,5, i gledajući jednadžbu (7), može se zaključiti da će ukupni toplinski otpor predviđen ovom metodom biti bliži donjoj granici,  $R_{tot;lower}$ , za konstrukciju hladnog okvira ili kad god je razmak između klinova manji od 500 mm. To je i očekivano, s obzirom na veću količinu toplinske izolacije premoštene čeličnim mrežama i veću količina čelika, odnosno, čime se smanjuje ukupni toplinski otpor LSF elementa.

### 9.4.3. Gorgolewski Metoda 3

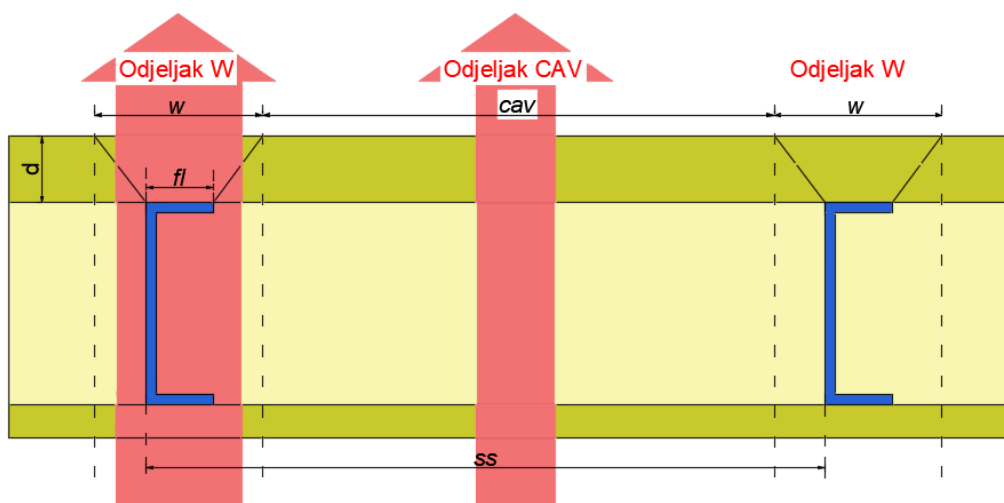
$p$ -vrijednost za treću metodu koju je razvio Gorgolewski [45] izvedena je iz prethodne jedinice i izražava se u jednadžbi (10),

$$p = 0,8 \left( \frac{R_{tot;lower}}{R_{tot;upper}} \right) + 0,44 - 0,1 \left( \frac{fl}{0,04} \right) - 0,2 \left( \frac{0,6}{ss} \right) - 0,04 \left( \frac{sd}{0,1} \right) \quad (10)$$

Kao i kod metode 1 (jednadžba (9)), vrijednost  $p$  izravno ovisi o omjeru između donje i gornje granice ukupnog toplinskog otpora. Osim toga, osim stalne parcele od 0,44, postoji još i tri varijable koje uzimamo u obzir, naime: duljina prirubnice ( $fl$ ), razmak između klinova ( $ss$ ) i dubina klinova ( $sd$ ), sve čije su dimenzije dane u metrima [m].

## 9.5. ASHRAE metode

Neke od prethodno opisanih metoda (npr. metoda paralelnog puta) pretpostavljaju da je toplinski tok okomit na zid, iako kada zidna konstrukcija sadrži elemente čeličnog okvira pokraj materijala niske toplinske vodljivosti (npr. toplinska izolacija), dvodimenzionalni učinci uzrokovani toplinskim mostovima postaju relevantniji [44]. ASHRAE metode razvijene su za konstrukcije sa široko razmaknutim metalnim elementima znatnih površina poprečnog presjeka i kada susjedni materijali imaju vrlo visoke različite vodljivosti (veličine dva ili više reda), kao što događa se na tipičnim LSF konstrukcijama [44]. Metode ASHRAE su prilagodba metode paralelnog puta, gdje je "ponderiranje područja" faktor, primjenjuje se na dio zida na koji utječe toplinski most čeličnog klina [44]. Ovaj odjeljak je definiran širinom utjecajne zone čeličnog toplinskog mosta (Slika 35) te se stoga naziva presjekom W. Preostali dio zidne šupljine bez toplinskog mosta utjecaj naziva se odjeljak CAV



Slika 35: Ilustracija presjeka LSF zida za ASHRAE metode: presjeci W i CAV.

Presjek W predstavlja područje gdje metalni klin ima utjecaja na toplinski put, budući da je centriran na metalni dio poprečnog presjeka zida, a njegova duljina,  $w$ , određena je,

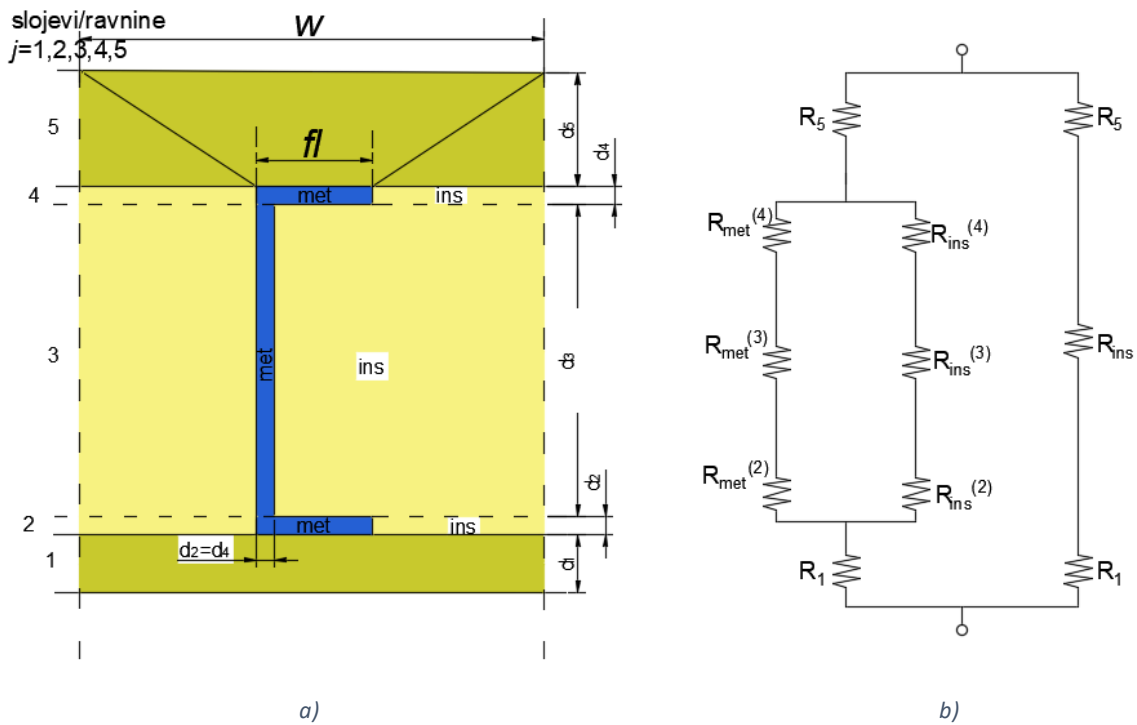
$$w = fl + 2fd \quad (11)$$

gdje je  $fl$  duljina prirubnice [m],  $zf$  faktor zone (koji će razlikovati obje ASHRAE metode kako je objašnjeno u sljedećim odjeljcima) i  $d$  je debljina [m] deblje strane obloge (unutarnje ili vanjske). Vrijednosti toplinskog otpora se izračunavaju za odjeljke obje dionice i kombiniraju pomoću metoda paralelnog puta i izračunava se prosječna toplinska propusnost po jedinici ukupne površine mijenjajući ukupni toplinski otpor [44], kao što je detaljno opisano u sljedećem pododjeljku.

## 9.6. ASHRAE Zonska metoda

Prva metoda koju je predložio ASHRAE, Zonska metoda, koristi jednadžbu (11) za izračunavanje duljina presjeka W i faktor zone,  $zf$ , jednak je 2,0. Preostali izračuni za ukupni toplinski otpor i propusnost isti su za obje ASHRAE metode i bit će predstavljeni kasnije. Detaljne dimenzije presjeka W, koje su već predstavljene u slici 36, ilustrirani su u slici 36a. Štoviše, ekvivalentni niz paralelnog kruga koji se koristi u pojednostavljenim izračunima prijenosa topline prikazan je slici 2b. Imajte na umu da je čelični okvir uzet u obzir u mreži i obje prirubnice, iako je zanemaren kod čelične usne.

## Odjeljak W



Slika 36: Shematski prikaz metoda ASHRAE: (a) presjek W presjeka zida LSF-a; (b) Ekvivalentni serijsko-paralelni krug.

Ukupni toplinski otpor,  $R_{tot}$ , generičkog LSF zida prikazanog u slici 1, izračunava se primjenom metode paralelnog puta na obje razmatrane dionice (W i CAV),

$$\frac{1}{R_{tot;ASHRAE}} = \sum_{i=1}^2 \frac{f_i}{R_i} = \frac{w/ss}{R_{tot;w}} + \frac{cav/ss}{R_{tot;cav}} \quad (12)$$

gdje su  $R_{tot;w}$  i  $R_{tot;cav}$  ukupni toplinski otpori [ $m^2K/W$ ] presjeka W i CAV,  $w$  i  $cav$  su duljine [m] presjeka W i CAV, a  $ss$  je razmak klinova [m]. Ukupni toplinski otpor homogenih slojeva LSF zidne šupljine,  $R_{tot;cav}$  je izračunava se kao zbroj toplinskih otpora svih slojeva u nizu, uključujući i unutarnje i vanjske površinski toplinske otpore,

$$R_{tot;cav} = R_{si} + R_1 + R_{ins} + R_5 + R_{se} \quad (13)$$

gdje je  $R_{ins}$  toplinski otpor izolacijskog sloja [ $m^2K/W$ ].

Ukupni toplinski otpor presjeka W,  $R_{tot;w}$ , izračunava se korištenjem metode izotermnih ravnina. Prvo, ekvivalentna toplinski otpor ( $R_j$ ) svakog toplinski nehomogenog sloja ( $j = 2, 3, 4$ ) izračunava se korištenjem metode paralelnog puta prema metalu (*met*) i izolaciji (*ins*) materijala,

$$\frac{1}{R_2} = \sum_{i=1}^2 \frac{f_i^{(2)}}{R_i^{(2)}} = \frac{fl/w}{R_{met}^{(2)}} + \frac{(w-fl)/w}{R_{ins}^{(2)}} \quad (14)$$

$$\frac{1}{R_3} = \sum_{i=1}^2 \frac{f_i^{(3)}}{R_i^{(3)}} = \frac{d_2/w}{R_{met}^{(3)}} + \frac{(w-d_2)/w}{R_{ins}^{(3)}} \quad (15)$$

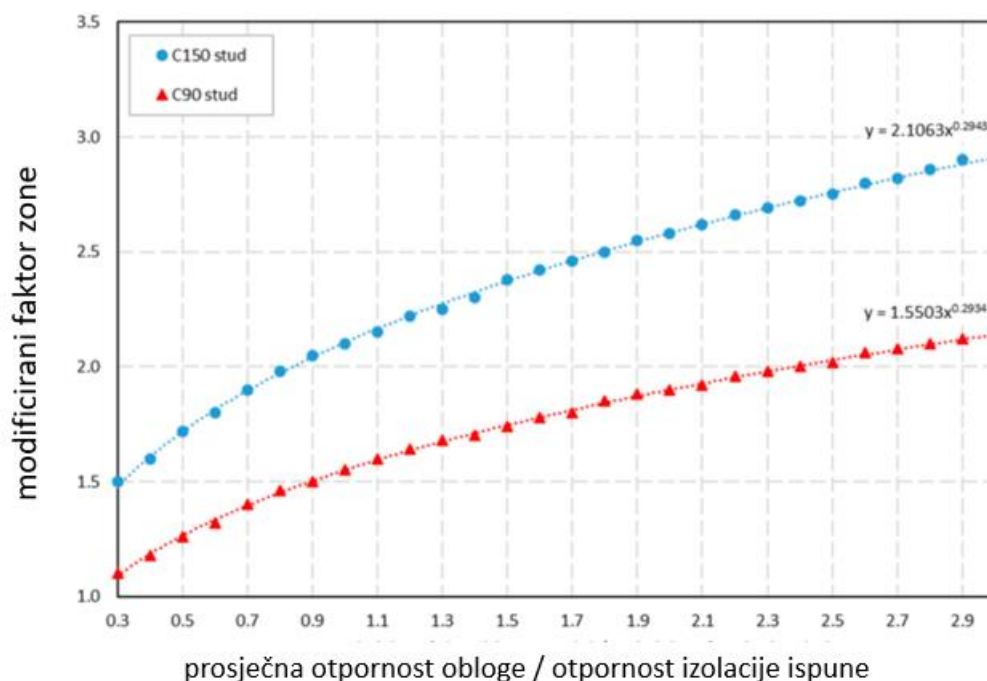
$$\frac{1}{R_4} = \frac{1}{R_2} \quad (16)$$

Zatim se ova tri ekvivalentna toplinska otpora koriste za izračunavanje ukupnog toplinskog otpora odjeljka W, uzevši u obzir svih pet razmatranih slojeva, uključujući i one za oblaganje homogenih slojeva ( $R_1$  i  $R_5$ ), kao i površinski toplinski otpori,

$$R_{tot;w} = R_{si} + \sum_{j=1}^5 R_j + R_{se} \quad (17)$$

## 9.7. Metoda modificirane zone

Metoda modificirane zone vrlo je slična metodi zone, koristeći iste jednadžbe (Jednadžbe (12)–(17)). Međutim, ova metoda koristi modificiranu vrijednost faktora zone ( $zf$ ), koja nije konstantna, niti nužno jednaka. U metodi modificirane zone, širina ( $w$ ) čeličnog klina iz zone utjecaja (Odjeljak W u slici 1), osim duljine prirubnice,  $fl$ , ovisi o tri parametra [44]: (1) omjera između toplinskih otpora materijala plašta i materijala za izolaciju šupljina; (2) veličina (dubina) klina; (3) debljina plašta. Modificirani faktor zone,  $zf$ , obično se dobiva iz grafa [43] (kada je debljina materijala plašta veća od 16 mm) i ovisi o omjeru između prosječnog otpora materijala vanjskog omotača ( $r_{sheat}$ ) i materijala za izolaciju šupljina ( $r_{ins}$ ) za prvih 25 mm, u kombinaciji s veličinom klina (obično jedna krivulja za svaki tip klina). Može se primijetiti da je toplinski otpor  $r$  materijala je recipročna vrijednost njegove toplinske vodljivosti  $\lambda$ , tj.  $r = 1/\lambda$ . Prikazat ćemo dvije prilagođene linije trenda snage na točke dobivene iz reference [11] za čelične klinove C90 i C150, kao što je prikazano u slici 37. R-kvadrat koeficijent determinacije bio je vrlo dobar, tj. jednak 0,999 u obje krivulje. Ove funkcije korištene su u izračunima za obje veličine čeličnog profila (C90 i C150). Pretpostavljena je aproksimacija da su faktori C170  $zf$  slični onima koje daje krivulja C150,



Slika 37: Modificirane krivulje faktora zone za LSF zidove sa šupljom izolacijom kad god je ukupna debljina materijala za oblaganje veća je od 16 mm

Uvjet za korištenje grafikona predstavljenog na slici 37 je li to—za barem jednu od stranica zida — ukupna debljina slojeva obloge mora biti deblja od 16 mm. Ako i unutarnje i vanjske obloge imaju ukupnu debljinu manju od 16 mm,  $z_f$  vrijednosti treba dobiti prema sljedećim uvjetima [44]:

$$z_f = \begin{cases} -0,5 & \text{ako je } r_{sheat} \leq 10,4 \text{ m} \cdot \text{K/W} \\ +0,5 & \text{ako je } r_{sheat} > 10,4 \text{ m} \cdot \text{K/W} \end{cases} \quad (18)$$

## 9.8. Proračun efektivnog koeficijenta prolaska topline

Toplinska ovojnica zgrade može imati toplinski homogene ili heterogene slojeve, a precizna procjena gubitaka topline kod konstrukcija s nosačima i toplinskom izolacijom od vitalnog je značaja za poučno izračunavanje energetske potrebe zgrade [34]. Europski standard EN ISO 14683 [48] ne uzima u obzir doprinos toplinskim mostovima u zidovima od laganih čeličnih profila, što onemogućuje procjenu doprinosa toplinskim mostovima gubicima topline korištenjem tabličnih vrijednosti. Iako standard EN ISO 6946 [47] pruža pojednostavljeni način za izračunavanje toplinske otpornosti dijela zgrade koji se sastoji od homogenih i heterogenih slojeva, situacije s čeličnim nosačima ne mogu se izračunati ovom pojednostavljenom metodom zbog značajne razlike između gornjih i donjih vrijednosti otpornosti, te je dopušten samo numerički pristup [34].

Dvodimenzionalni numerički modeli rezultirali su toplinskom prohodnošću cjelokupne strukture i efektivnom U-vrijednošću ( $U_{eff}$ ).  $U_{eff}$  [34] izvedena je iz dvodimenzionalnog toplinskog koeficijenta povezanosti  $L_{2D}$  [W/m·K], koji u osnovi predstavlja ukupnu toplinu koja se prenosi kroz građevinski element. Ako se  $L_{2D}$  odredi iz numeričkog modela prema i podijeli s duljinom geometrijskog modela  $l$ , može se dobiti vrijednost  $U_{eff}$  (Jednadžba (19)).

$$U_{eff} = \frac{L_{2D}}{l} \quad (19)$$

gdje se  $L_{2D}$  može izračunati kako je prikazano u Jednadžbi (20) [49], gdje je  $\phi$  [W/m] stopa toplinskog prijenosa koja proizlazi iz 2D izračuna, a  $T_i$  i  $T_e$  predstavljaju redom unutarnju i vanjsku temperaturu okoline.

$$L_{2D} = \frac{\phi}{(T_i - T_e)} \quad (20)$$

Razlika između efektivnog koeficijenta prolaska topline  $U_{eff}$  i jednosmjerne U-vrijednosti izračunava se prema Jednadžbi (21):

$$\nabla U = \frac{U_{eff} - U}{U} \cdot 100 \quad (21)$$

Ovdje se U-vrijednost računa prema EN ISO 6946 [47] (jednadžba 22).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{si}} + \sum_1^n \frac{d}{\lambda} + \frac{1}{h_{se}}} \quad (22)$$

Gdje  $h_{si}$  i  $h_{se}$  predstavljaju unutrašnji i vanjski plošni koeficijent prijelaza topline, koji se uzimaju prema normi ISO 6946 [47],  $d$  predstavlja debljinu, a  $\lambda$  toplinsku provodljivost svakog pojedinog  $n$  specifičnog sloja kako je predstavljeno u Tablici 4.

Obrnuto koeficijentu prolaska topline  $U$ , je otpor prolasku topline,  $R$ . Toplinski otpor je mjera materijala na otpornost protoku topline. Računa se prema jednadžbi (23).

$$R = \frac{1}{U} \quad (23)$$

Numerička analiza prijenosa topline i izračun  $L_{2D}$  izvršeni su pomoću CRORAL softvera [50], softvera koji je razvijen unutar građevinskog fakulteta u Zagrebu, a temelji se na postupcima izračuna opisanim u standardima EN ISO 10211 [35] i EN ISO 10077-2 [51]. CRORAL je validiran prema trenutnim verzijama navedenih standarda [50].

Nakon izračuna  $L_{2D}$ , može se odrediti linearni toplinski prijenos  $\psi$ -vrijednosti pomoću Jednadžbe (24) [34] radi procjene doprinosa čeličnih nosača toplinskom prijenosu i procjene kvalitete detalja konstrukcije s toplinskog stajališta.

$$\psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^n U_i \times l_i \quad (24)$$

Gdje je  $U_i$  koeficijent prolaska topline u jednom smjeru  $i$ -tog građevinskog elementa koji razdvaja dva okoliša, a  $l_i$  je duljina 2D geometrijskog modela na kojoj se primjenjuje vrijednost  $U_i$ .  $\psi$ -vrijednost određena je koristeći vanjske dimenzije.

Faktor temperature  $f_{Rsi}$ , izračunat prema Jednadžbi (25) [34], važan je iz razloga udobnosti i dobrobiti.  $f_{Rsi}$  se definira kao omjer između najniže unutarnje temperature površine ( $T_{si,min}$ ) i razlike temperature između vanjskog zraka ( $T_e$ ) te prosječne razlike unutarnje ( $T_i$ ) i vanjske ( $T_e$ ) temperature zraka:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{si,min} - T_e}{T_i - T_e} \quad (25)$$

Manja  $\psi$ -vrijednost znači da su dodatni gubici topline kroz toplinske mostove manji, a rizik od oštećenja konstrukcije, poput rasta plijesni, smanjuje se. Istodobno, vrijednost  $f_{Rsi}$  što je bliža vrijednosti 1 ukazuje na ravnomjerniju distribuciju temperature na unutarnjoj površini, odnosno da je temperatura unutarnje površine vrlo bliska temperaturi zraka u prostoru.

## 10. Analiza osjetljivosti: Toplinska učinkovitost LSF zidova

U ovoj studiji slučaja, koristit ćemo numeričke simulacije i eksperimentalne metode kako bismo ocijenili toplinsku izvedbu LSF zidova u stvarnim uvjetima. Ova analiza pomoći će nam bolje razumjeti kako različite konstrukcijske opcije i materijali utječu na energetska učinkovitost zgrada s LSF konstrukcijom.

Ovaj rad pruža pregled LSF konstrukcijskog sustava, ističe prednosti i nedostatke te se fokusira na ključna pitanja toplinske izvedbe. Važno je napomenuti da je poboljšanje energetske učinkovitosti zgrada složen proces koji zahtijeva pažljivo planiranje i implementaciju, uzimajući u obzir lokalne klimatske uvjete i zahtjeve.

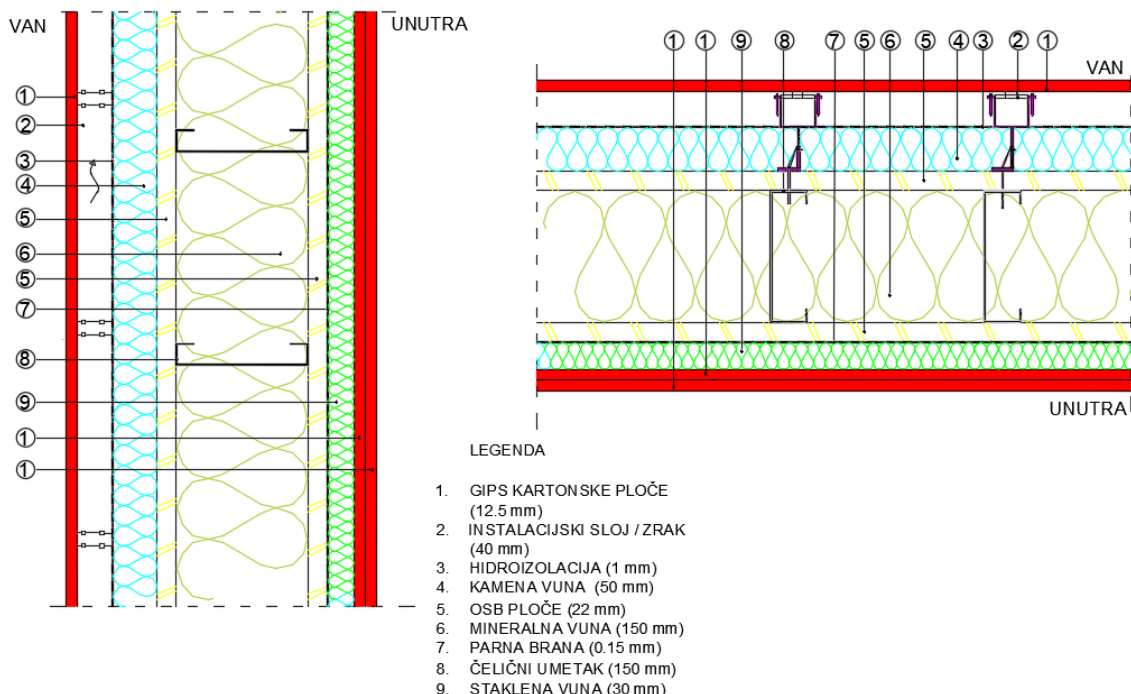


## 10.1. Materijali i metode

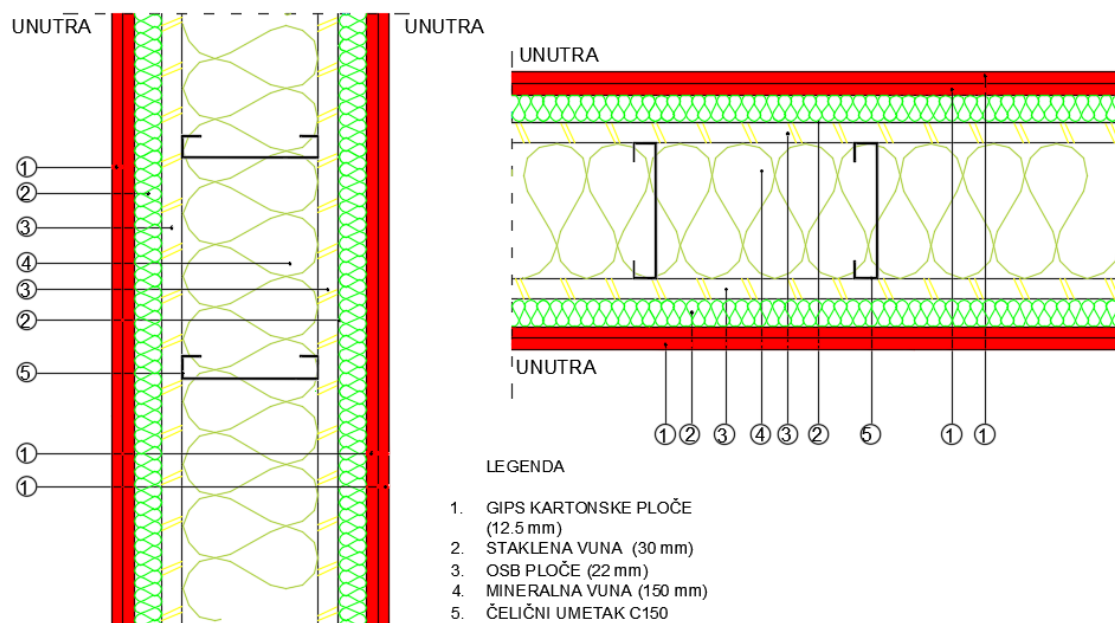
U ovom odjeljku opisani su zidovi od LSF-a, predstavljene su dvije verzije 1) unutarnji zid 2) vanjski zid. Nadalje, također je predstavljena geometrija ocijenjenih čeličnih nosača, odnosno veličine rebra s različitim debljinama čelika i oblicima rebra s različitim veličinama utora. Zatim su opisani materijali koji se koriste u ovom istraživanju, uključujući njihovu toplinsku provodljivost i koeficijent propusnosti vodene pare. Razmotrena su dva referentna čelična nosača C90 i C150, svaki razmaknuti na 300, 400 i 500 mm, na svakom čeličnom nosaču 4 duljine prirubnice i 3 debljine čeličnog presjeka, rezultirajući sa ukupno 144 numerička modela pojedino za svaku od promatrane dvije vrste toplinske izolacije (Mineralnu vunu (MW) i PUR pjenu).

### 10.1.1 Referentni zidovi

U ovom radu razmatrana su dva referentna nosiva zida od LSF-a, a njihovi presjeci prikazani su na slikama 38., za referentni vanjski zid i slici 39. za referentni unutarnji zid. Oba referentna zida imaju strukturalne C-oblike nosača visine poprečnog presjeka od 150 mm (C150), širinu prirubnice od 43 mm, povratni luk od 15 mm s debljinom čeličnog presjeka od 1,5 mm. Zračni jaz od 150 mm ispunjen je izolacijom od mineralne vune. S obje strane čeličnih nosača nalazi se strukturalna ploča od orijentirane iverice (OSB) s debljinom od 22 mm. Kod unutarnjih zidova OSB ploča je okružena sa staklenom vunom i metalnom podkonstrukcijom za instalacije (30 mm), te sa dvostrukim slojem gipskartonskih ploča (12.5 mm). Kod vanjskog zida s vanjske strane je okružen sa kamenom vunom (50 mm), hidroizolacijom (1 mm), slojem zraka (40 mm) i gipskartonskom pločom (12.5 mm), a sa druge strane sa staklenom vunom (30 mm) i gipskartonskim pločama (2x12.5 mm).



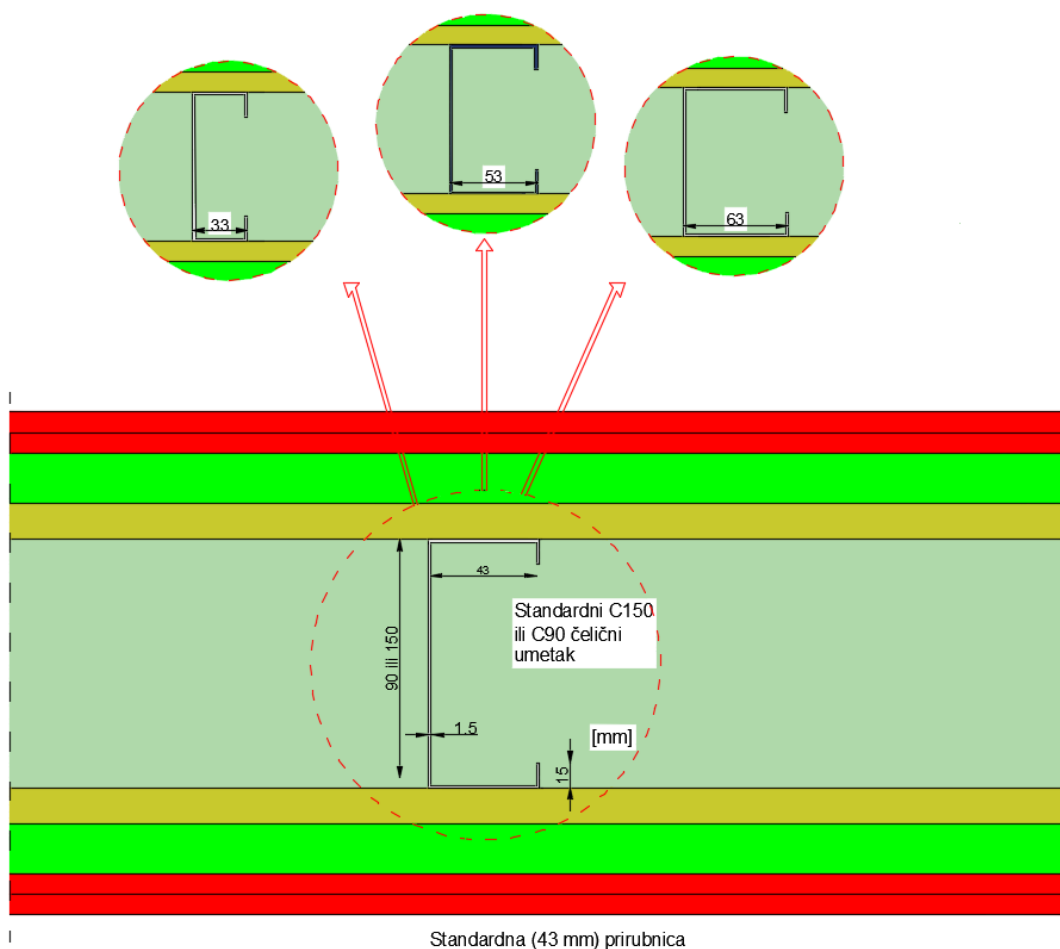
Slika 38: Prikaz vanjskog referentnog zida



Slika 39: Prikaz unutarnjeg referentnog zida

### 10.1.2. Čelični nosači

Procijenjene su različite konfiguracije čeličnih nosača kao što je prikazano na slici 40. Što se tiče duljine prirubnice, osim referentne (43 mm) razmatrane su još i (33,53,63 mm) veličine. Osim referentne debljine čeličnog nosača (1,5 mm) razmatrane su i dvije dodatne (1 i 3 mm). Treba napomenuti da se ilustracije prikazane na slikama odnose na unutarnje zidove od LSF-a, ali nosivi zidovi na vanjskoj fasadi imaju sličnu geometriju čeličnih nosača.



Slika 40: Veličine prirubnica

Materijali koji se koriste u izradi zidova ili ploča od LSF-a navedeni su u tablici 4., zajedno s debljinom svakog sloja i odgovarajućom vrijednosti toplinske provodljivosti i koeficijenta paropropusnosti.

Tablica 4: Slojevi zgrade- debljine materijala i osnovna higrotermalna svojstva

Element zgrade	materijal (slojevi)	Debljina [cm]	$\lambda$ [W/m*K]	$\mu$ [-]
Vanjski zid	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	Staklena vuna	3	0,035	1,1
	Parna brana	0,015	0,5	230000
	OSB	2,2	0,13	50
	Mineralna vuna[52]/ PUR pjena [53]	15 15	0,034 0,023	1 60
	Čelični umetak	C150/40/15	50	1000000
	OSB	2,2	0,13	50

	Kamena vuna	5	0,036	1,1
	Hidroizolacija	1	0,23	50000
	Instalacijski sloj/sloj zraka	4	0,3	1
	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
<b>Unutarnji zid</b>	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	Staklena vuna	3	0,035	1,1
	OSB	2,2	0,13	50
	Mineralna vuna/ PUR pjena	15 15	0,034 0,023	1 60
	LSF	C150/40/15	50	1000000
	OSB	2,2	0,13	50
	Staklena vuna	3	0,035	1,1
	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	<b>Zid Atike</b>	Gips kartonska ploča	1,25	0,175
Instalacijski sloj/sloj zraka		4	0,3	1
bitumenska traka		1	0,23	50000
Kamena vuna		5	0,036	1,1
OSB		2,2	0,13	50
Mineralna vuna		15	0,034	1
LSF		C150/40/15	50	1000000
OSB		2,2	0,13	50
bitumenska traka		1	0,23	50000
Gips kartonska ploča		1,25	0,175	8
<b>KROV</b>	Gips kartonska ploča	1,25	0,175	8
	Staklena vuna	3	0,035	1,1
	Parna brana - PE folija	0,02	0,6	54000
	OSB	2,2	0,13	50
	Mineralna vuna	15	0,034	1
	LSF	C150/40/15	50	1000000
	OSB	2,2	0,13	50
	bitumenska traka	1	0,23	50000
	XPS	6	0,033	80
	PE folija	0,02	0,6	54000
	Geotekstil	0,2	0,2	1000
	Substrat	4	0,4	3,4
	Trava i Cvijeće	5	1,5	50
	<b>PODNA PLOČA- VRATA</b>	Podložni beton	10	1,65
XPS		5	0,033	80
Vodonepropusna AB ploča		20	2,6	110
Hidroizolacija		0,5	0,23	50000
Mineralna vuna		11	0,034	1

	OSB	2,2	0,13	50
	Farmacell gipsvlakanske ploče	1,8	0,36	16
	LVT podna obloga	0,4	0,23	60
<b>PODNA PLOČA-ZID</b>	Nasip šljunka	10	2	50
	XPS	5	0,033	80
	Vodonepropusna AB ploča	20	2,6	110
	bitumenska izolacija	1	0,23	50000
	PE folija	0,02	0,6	54000
	Mineralna vuna	11	0,034	1
	OSB	2,2	0,13	50
	Farmacell gipsvlaknaste ploče	1,8	0,38	16
	LVT podna obloga	0,4	0,23	60

Tablica 5: Dodatni materijali koji nisu uključeno direktno u slojeve zgrade i njihova svojstva

Element zgrade	materijal (slojevi)	debljina	$\lambda$ [W/m*K]	$\mu$ [-]
<b>Dodatno</b>	Čepičasta folija	2	0,2	500000
	Paropropusna traka	0,02	0,23	10760
	Aluminij	2	237	10000000
	PVC	aluplast energeto 8000 [54]	0,037	100000
	Prozor		0,018	1000000000
	Izolacija oko prozorskog podokvira		0,036	1,1

Literatura nam govori da je pri razmatranju materijala za termalnu izolaciju, utvrđeno da poliuretanska pjena pruža znatno bolju izolacijsku učinkovitost na okolnim temperaturama u usporedbi s drugim materijalima.[55] Stoga bi korištenje poliuretanske pjene u LSF konstrukcijama smanjilo U-vrijednost građevinskog elementa, što bi pak pružilo bolju termalnu zaštitu za zgradu. Osim toga, budući da poliuretanska pjena ima bolju propusnost za vodu od hladnovaljanih čeličnih profila, zračne brane ne bi bile potrebne. Osim toga, svojstvo ljepljivosti pjene unutar šupljine pruža vezivnost između komponenata i podršku za cjelokupnu strukturu. Razmatranjem pozitivnih učinaka pjene i komponenata vanjske oplata, moglo bi se postići optimalno projektiranje komponenata hladnovaljanih čeličnih profila. U ovom radu će se usporediti razlika djelovanja poliuretanske pjene i mineralne vune na toplinsku učinkovitost LSF struktura posebitost u sklopu stvaranja nZeb konstrukcija/zgrada. Također ćemo uzet u obzir i utjecaj različitih geometrija na stvaranje nZeb-a.

### 10.1.3. Granični uvjeti

Za svaki Croral model, definirana su dva skupa graničnih uvjeta: 1) temperature okoliša 2) površinske toplinske otpornosti. Toplija temperatura unutarnjeg zida postavljena je na 20°C, dok je temperatura vanjskog zraka postavljena na 0°C za modele vanjskog fasadnog zida. Za unutarnje zidove

pretpostavljena je „vanjska“ temperatura 10°C, pretpostavljajući negrijane prostore. Međutim, dobivene R i U vrijednosti ne ovise o odabranoj temperaturnoj razlici između unutarnjeg i vanjskog okoliša, budući da se te vrijednosti računaju za jediničnu temperaturnu razliku.

Što se tiče površinskih toplinskih otpornosti, korištene su redom vrijednosti postavljene u ISO 6946 [47] za horizontalni toplinski tok tj., 0,13 i 0,04 m<sup>2</sup>·K/W za unutarnji (R<sub>si</sub>) i vanjski (R<sub>se</sub>). Valja napomenuti da su za unutarnje zidove korištene unutarnje površinske otpornosti s obje strane pregrade (0,13 m<sup>2</sup> · K/W) kako je preporučeno u ISO 6946 [47] za negrijane prostore.

## 10.2. Veličina čeličnog profila i debljina čelika

Kako bismo procijenili važnost duljine čeličnog profila na toplinski otpor LSF zidova simulirano je (umetni broj) modela pomoću Croral softvera, u kojem analiziramo dvije konfiguracije čeličnog profila (C90 i C150) u kombinaciji sa određenim razmacima (300 mm / 500 mm), četiri duljine rebra čeličnog profila (33,43,53,63 mm), tri debljine čelika (1, 1,5 i 3 mm), dvije vrste LSF zidova (unutarnji (nenosivi) i vanjski (nosivi), te dvije vrste izolacijskog materijala

U tablici (koju još moram napraviti) su dobivene vrijednosti toplinskog otpora površina na površinu, dok se u slici (toj i toj) nalazi grafički prikaz tih R-vrijednosti.

## 10.3. Dobiveni rezultati

U ovom odjeljku predstavljeni su dobiveni rezultati, u Tablici 5 su prikazani rezultati različitih veličina čeličnog nosača za unutarnje i vanjske zidove koristeći mineralnu vunu kao glavni izolacijski materijal LSF zidova, a u Tablici 6 su prikazani rezultati kada je PUR pjena korištena kao glavni izolacijski materijal.

Kako bismo procijenili važnost oblika čeličnog nosača i njihovog međusobnog razmaka simulirano je 144 numerička modela pomoću CRORAL softvera.[50] Rezultati su prikazani tablično (Tablica 6,7) i grafički (slike 63-74). Na slikama (41-62) su prikazane distribucije temperature nekih slučajno izabranih U<sub>eff</sub> rezultata da bi se slikovito mogle bolje uočiti razlike.

Tablica 5: Rezultati toplinske provodljivosti LSF-zida [W/m<sup>2</sup>K] za različite debljine čeličnog presjeka i duljine prirubnice i Mineralnom vunom kao glavnim izolacijskim materijalom

LSF zid S Mineralnom vunom kao izolacijskim materijalom	duljina prirubnice [mm]	Unutarnji zid			Vanjski zid		
		debljina čelika					
		1	1,5	3	1	1,5	3
C150 / 300	33	0,2216	0,2277	0,2366	0,2001	0,2048	0,2124
	43	0,2263	0,2336	0,2436	0,2042	0,2096	0,2180
	53	0,2311	0,2396	0,2506	0,2083	0,2144	0,2237
	63	0,2347	0,2445	0,2566	0,2115	0,2184	0,2286
C150 / 400	33	0,2054	0,2103	0,2174	0,1877	0,1915	0,1977
	43	0,2092	<b>0,2150</b>	0,2230	0,1910	<b>0,1953</b>	0,2023
	53	0,2130	0,2199	0,2286	0,1944	0,1993	0,2070
	63	0,2158	0,2237	0,2334	0,1970	0,2026	0,2110
C150 / 500	33	0,1908	0,1934	0,1987	0,1748	0,1775	0,1823
	43	0,1940	0,1972	0,2033	0,1773	0,1804	0,1857
	53	0,1974	0,2012	0,2080	0,1799	0,1835	0,1893
	63	0,2001	0,2046	0,2121	0,1818	0,1859	0,1924
C90 / 300	33	0,1650	0,1661	0,1682	0,1544	0,1555	0,1571
	43	0,1674	0,1689	0,1712	0,1565	0,1578	0,1595
	53	0,1697	0,1716	0,1741	0,1586	0,1598	0,1619
	63	0,1717	0,1741	0,1769	0,1603	0,1618	0,1642
C90 / 400	33	0,1603	0,1612	0,1628	0,1507	0,1516	0,1529
	43	0,1622	<b>0,1634</b>	0,1652	0,1524	<b>0,1535</b>	0,1548
	53	0,1640	0,1656	0,1676	0,1541	0,1551	0,1568
	63	0,1656	0,1675	0,1698	0,1555	0,1567	0,1587
C90 / 500	33	0,1558	0,1563	0,1575	0,1470	0,1477	0,1486
	43	0,1574	0,1580	0,1594	0,1482	0,1491	0,1501
	53	0,1589	0,1597	0,1612	0,1496	0,1503	0,1515
	63	0,1603	0,1613	0,1630	0,1506	0,1515	0,1530

Tablica 6: Rezultati toplinske provodljivosti LSF-zida [ $W/m^2K$ ] za različite debljine čeličnog presjeka i duljine prirubnice i PUR pjenom kao glavnim izolacijskim materijalom

LSF zid S PUR pjenom kao izolacijskim materijalom	duljina prirubnice [mm]	Unutarnji zid			Vanjski zid		
		debljina čelika					
		1	1,5	3	1	1,5	3
C150 / 300	33	0,2027	0,2093	0,2189	0,1821	0,1872	0,1955
	43	0,2084	0,2163	0,2271	0,1871	0,1929	0,2021
	53	0,2143	0,2235	0,2353	0,1921	0,1988	0,2089
	63	0,2187	0,2293	0,2423	0,1961	0,2036	0,2147
C150 / 400	33	0,1838	0,1891	0,1967	0,1674	0,1714	0,1783
	43	0,1883	<b>0,1947</b>	0,2032	0,1714	<b>0,1761</b>	0,1837
	53	0,1930	0,2005	0,2099	0,1756	0,1821	0,1893
	63	0,1964	0,2051	0,2155	0,1788	0,1849	0,1941
C150 / 500	33	0,1667	0,1694	0,1752	0,1520	0,1549	0,1602
	43	0,1707	0,1740	0,1805	0,1550	0,1584	0,1643
	53	0,1748	0,1788	0,1861	0,1578	0,1621	0,1685
	63	0,1781	0,1828	0,1909	0,1607	0,1651	0,1722
C90 / 300	33	0,1310	0,1319	0,1336	0,1233	0,1242	0,1255
	43	0,1335	0,1347	0,1366	0,1255	0,1265	0,1279
	53	0,1359	0,1374	0,1395	0,1277	0,1287	0,1303
	63	0,1380	0,1400	0,1423	0,1295	0,1308	0,1327
C90 / 400	33	0,1266	0,1273	0,1287	0,1198	0,1205	0,1216
	43	0,1286	<b>0,1295</b>	0,1310	0,1215	<b>0,1224</b>	0,1235
	53	0,1305	0,1317	0,1333	0,1233	0,1241	0,1254
	63	0,1321	0,1337	0,1355	0,1248	0,1258	0,1274
C90 / 500	33	0,1224	0,1228	0,1237	0,1162	0,1168	0,1176
	43	0,1240	0,1245	0,1256	0,1175	0,1182	0,1190
	53	0,1256	0,1262	0,1274	0,1189	0,1195	0,1205
	63	0,1270	0,1278	0,1291	0,1200	0,1208	0,1219

### 10.3.1. Unutarnji zidovi

Referentna  $U_{eff}$ -vrijednost za unutarnje zidove od laganih čeličnih profila (LSF) s C150 profilima razmaknutima 400 mm (43 mm duljina prirubnice i čelik debljine 1,5 mm) iznosi  $0,2150 W/m^2 \cdot K$  za unutarnje zidove sa mineralnom vunom kao glavnim izolacijskim materijalom, a  $0,1947 W/m^2 \cdot K$  za one sa PUR pjenom kao glavnim izolacijskim materijalom. Možemo vidjeti da promjena materijala toplinske izolacije ima veliki utjecaj na toplinsku učinkovitost materijala. Dokazujući da je za ove karakteristične presjeke učinkovitija PUR pjena kao toplinsko-izolacijski materijal, stvarajući bolje toplinske otpore i propuštajući manje topline kroz materijal. Kako se očekivalo, efektivna toplinska propusnost proporcionalna je duljini ležaja, pri čemu je ako gledamo tablicu 5. minimalna ( $0,2103 W/m^2 \cdot K$ ) za minimalnu evaluiranu duljinu prirubnice (33 mm) i maksimalna ( $0,2237 W/m^2 \cdot K$ ) za maksimalnu evaluiranu duljinu ležaja (63 mm), a ako gledamo tablicu 6. minimalna ( $0,1891 W/m^2 \cdot K$ )



za minimalnu evaluiranu duljinu prirubnice (33 mm) i maksimalna (0,2051 W/m<sup>2</sup>·K) za maksimalnu evaluiranu duljinu ležaja (63 mm). Ova varijacija  $U_{eff}$ -vrijednosti nije linearna, pokazujući manju razliku vrijednosti za veće duljine prirubnice. (slika 70.) Možemo još ustanoviti da je razlika toplinskoj propusnosti za različite debljine čelika više zastupljenija za zidove sa PUR pjennom.

Nadalje, kada se debljina čeličnog profila smanji na 1,0 mm (crvena linija na Slici 77), odgovarajuće smanjenje  $U_{eff}$ -vrijednosti manje je nego smanjenje  $U_{eff}$ -vrijednosti kada se debljina čelika poveća na 3,0 mm (zeleno linija), za 1,33%.

Kada se LSF profil u unutarnjem zidu smanji na C90 mm (Slika 83), referentna  $U_{eff}$ -vrijednost također se smanjuje na 0,1634 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 6), ili 0,1295 zbog veće količine mineralne vune/PUR pjene kao toplinske izolacije, dajući još bolje vrijednosti efektivnog koeficijenta prolaska topline.

Uspoređujući ove izračunate linije efektivnog koeficijenta prolaska topline na slici 83. s prethodnima za C150 profile (slika 77), pojavljuju se dvije glavne razlike, osim manjih vrijednosti. Jedna je veća važnost veličine prirubnice u varijaciji  $U_{eff}$ -vrijednosti, sve su prikazane linije naglašenije nagnute. Još jedna glavna razlika je manje odvajanje između tri prikazane krivulje, što ukazuje da je veća važnost debljine čelika u  $U_{eff}$ -vrijednostima unutarnjeg zida što je veća veličina poprečnog presjeka čeličnog presjeka.

Gledajući prvo veće smanjenje efektivnog koeficijenta prolaska topline (33 mm duljina ležaja i 1,0 mm debljina čelika) za C150 profile (Slika 78a), postoji veće smanjenje  $U_{eff}$ -vrijednosti od 0,0096 W/m<sup>2</sup>·K (-4,45%), dok je za prethodne C90 profile (Slika 84a) to smanjenje bilo samo 0,0031 W/m<sup>2</sup>·K (-1,92%), za primjere s mineralnom vunom C150 profile smanjenje od 0,0109 W/m<sup>2</sup>·K (-5,60%) (slika78b) a za C90 profile je to 0,0029 W/m<sup>2</sup>·K (-2,24%) (slika84b) za PUR pjene. Sada, gledajući povećanje efektivne toplinske propusnosti (63 mm duljina podružnice i 3,0 mm debljina čelika), tj. 0,0208 W/m<sup>2</sup>·K (+8,57%) za C150 profile (Slika 78a), dok je za C90 profile (Slika 84a) to smanjenje  $R$ -vrijednosti bilo samo 0,0064 W/m<sup>2</sup>·K (+3,90%) za mineralnu vunu kao toplinsko-izolacijski materijal i 0,0184 W/m<sup>2</sup>·K (+10,69%) za C150 profile (Slika 78b), dok je za C90 profile (Slika 84b) to smanjenje  $R$ -vrijednosti bilo samo 0,0060 W/m<sup>2</sup>·K (+4,67%) za PUR pjenu kao toplinsko-izolacijski materijal. Kao što je i ranije rečeno primjetno je da su razlike veće kada je u pitanju materijal od PUR pjene.

Također uspoređujući grafove (slike 76,78 i 80 te slike 82,84 i 86) sa različitim razmacima između čeličnih profila dolazi se do zaključka da su veće razlike u efektivnim vrijednostima toplinske propusnosti što su čelični profili postavljeni bliže jedni drugima.

Razmatrajući sada temperaturnu distribuciju prikazanu na Slikama (42-62, parne slike), značaj veličine podružnice jasno je vidljiv u efektu toplinskih mostova uzrokovanih čeličnim nosačima. Naime, za veće podružnice (Slika 62) postoji veća distribucija temperature duž površina LSF zida u blizini čeličnih profila, čime se povećava njihova ukupna efektivna toplinska propusnost.

Kada se razmak između čeličnih profila unutarnjeg zida od LSF smanji na 300 mm (Slika 76), referentna  $U_{eff}$ -vrijednost raste na 0,2336W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 6), 0,2163W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 7) zbog veće količine čelika po jediničnoj duljini zida.

### 10.3.2 Vanjski zidovi

Kada se razmatraju vanjski zidovi sa LSF-om vrijednosti koeficijenta efektivne toplinske propusnosti postaju značajnije manje (vidi desnu stranu Tablica 6 i 7, Slike 63-74) zbog kontinuirane vanjske toplinske izolacije od debljine 50mm od EPS-a.

Referentna  $U_{\text{eff}}$ -vrijednost za fasadne zidove od lakih čeličnih profila s C150 profilima razmaknutima 400 mm (43 mm duljina prirubnice i čelik debljine 1,5 mm) iznosi 0,1953 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 6 i žuta linija na grafikonu na slici 65a), za mineralnu vunu, i 0,1761 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 7 i žuta linija na grafikonu na slici 65b).

Uspoređujući ovu rezultate na proračunu vanjskog zida (desni stupac Tablica 6 i 7) s unutarnjim zidom (lijevi stupac Tablica 6 i 7), važnost debljine čelika sada je smanjena (tri krivulje su bliže) i važnost veličine prirubnice također je smanjena (linearnije krivulje s nižim nagibom). Ove značajke još su vidljivije na Slici 66, kako u apsolutnim razlikama  $U_{\text{eff}}$ -vrijednosti, tako i u postotnim varijacijama, sada u rasponu od -3,8% (umjesto -4,45%) do +8,05% (umjesto +8,57) za mineralnu vunu, tj za -4,95% (umjesto 5,60%) te +10,24% (umjesto 10,69%) za PUR pjenu, za debljinu čelika od 3 mm i duljinu prirubnice od 63 mm, odnosno za debljinu čelika od 1 mm i duljinu ležaja od 33 mm.

Sada, gledajući vanjski zid od laganih čeličnih profila s C90 profilima (Slika 71), referentna  $U_{\text{eff}}$ -vrijednost smanjuje se na 0,1535 W/m<sup>2</sup>·K. Ponovno, važnost debljine čelika i veličine ležaja smanjuje se, budući da su tri krivulje bliže i s nižim nagibom (Slika 72) u usporedbi s unutarnjim zidom od laganih čeličnih profila (lijevi stupac tablica 6 i 7). Ove značajke su uočljivije na Slici 72., ne samo u apsolutnim razlikama  $U_{\text{eff}}$ -vrijednosti, već i u postotnim varijacijama, sada u rasponu od -1,80% (umjesto -1,92%) do +3,38% (umjesto +3,90%) za mineralnu vunu te -2,13% (umjesto -2,24%) do +4,07% (umjesto +4,67%) za PUR pjenu .

Uspoređujući distribucije temperatura na slici 47. za vanjski i slici 48. za unutarnji zid istih referentnih vrijednosti C150, 400mm prikazano je kako duljina prirubnice čelika utječe na toplinski most nastao od čeličnog nosača. Također uspoređujući ove dvije temperaturne distribucije vidimo kako vanjska dodatna toplinska izolacija može ublažiti učinak toplinskog mosta i omogućiti ravnomjerniju temperaturu duž površine LSF zida.

Gledajući vanjske zidove s C150 profilima razmaknutima samo 300 mm, referentna  $U_{\text{eff}}$ -vrijednost iznosi 0,2096 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 6), 0,1929 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 7). Još jednom, zbog postojanja kontinuiranog sloja toplinske izolacije od EPS, važnost debljine čelika i veličine ležaja smanjuje se, sada imajući tri bliže krivulje (jedna za svaku debljinu čelika) s nižim nagibom (Slika 63) u usporedbi s unutarnjim zidom od laganih čeličnih profila. Ove značajke još su primjetnije na Slici 64, ne samo u apsolutnim razlikama  $U_{\text{eff}}$ -vrijednosti, već i u postotnim varijacijama, sada u rasponu od -4,51% (umjesto -5,15%) do +9,08% (umjesto +9,86%) za mineralnu vunu tj., -5,59% (umjesto -6,29%) do +11,31% (umjesto +12,03%) za PUR pjenu, za debljinu čelika od 3 mm i duljinu ležaja od 63 mm, odnosno za debljinu čelika od 1 mm i duljinu ležaja od 33 mm.

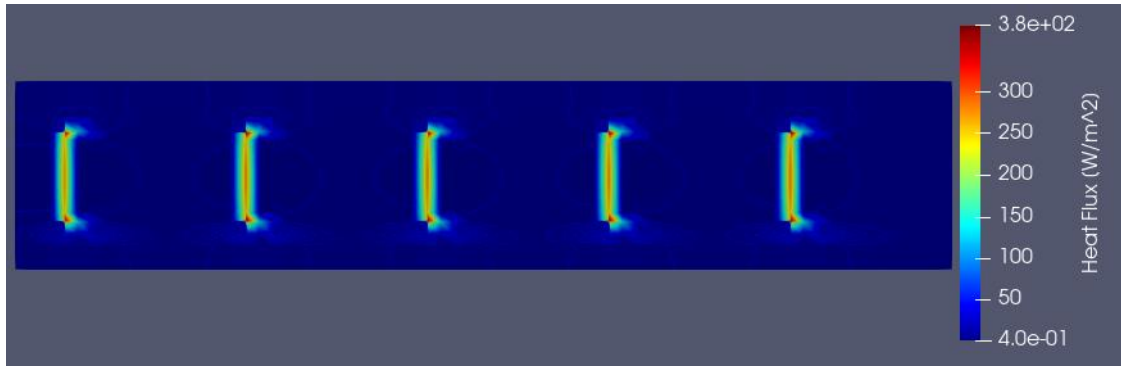
Gledajući vanjske zidove s C150 profilima razmaknutima 500 mm, referentna  $U_{\text{eff}}$ -vrijednost iznosi 0,1804 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 6), 0,1584 W/m<sup>2</sup>·K (Tablica 7). Kao što je već ustanovljeno, zbog postojanja kontinuiranog sloja toplinske izolacije od EPS, važnost debljine čelika i veličine ležaja smanjuje se, sada imajući tri bliže krivulje (jedna za svaku debljinu čelika) s nižim nagibom (Slika 67) u usporedbi s unutarnjim zidom od laganih čeličnih profila. Ove značajke još su primjetnije na Slici 68, ne samo u apsolutnim razlikama  $U_{\text{eff}}$ -vrijednosti, već i u postotnim varijacijama, sada u rasponu od -3,09% (umjesto -3,25%) do +6,65% (umjesto +7,58%) za mineralnu vunu tj., -4,04% (umjesto -4,17%) do

+8,69% (umjesto +9,73%) za PUR pjenu, za debljinu čelika od 3 mm i duljinu ležaja od 63 mm, odnosno za debljinu čelika od 1 mm i duljinu ležaja od 33 mm. Za čelični nosač profila C90, razmaka 500mm te su vrijednosti -1,40% (umjesto -1,39%) do +2,62% (umjesto +3,16%) za mineralnu vunu tj., -1,66% (umjesto -1,71%) do +3,17% (umjesto +3,72%) za PUR pjenu, za debljinu čelika od 3 mm i duljinu ležaja od 63 mm, odnosno za debljinu čelika od 1 mm i duljinu ležaja od 33 mm. Primjećujemo da razlike vanjskog i unutarnjeg zida su slične ako promatramo C90 i C150 istih duljina, što znači da razlike ovise više o duljini nego o promjeni veličine čeličnog profila. Iz priloženih rješenja također vidimo da su značajne razlike u samoj veličini ali to smo već ranije ustanovili da je zbog veće količine toplinske izolacije u C90 profilima.

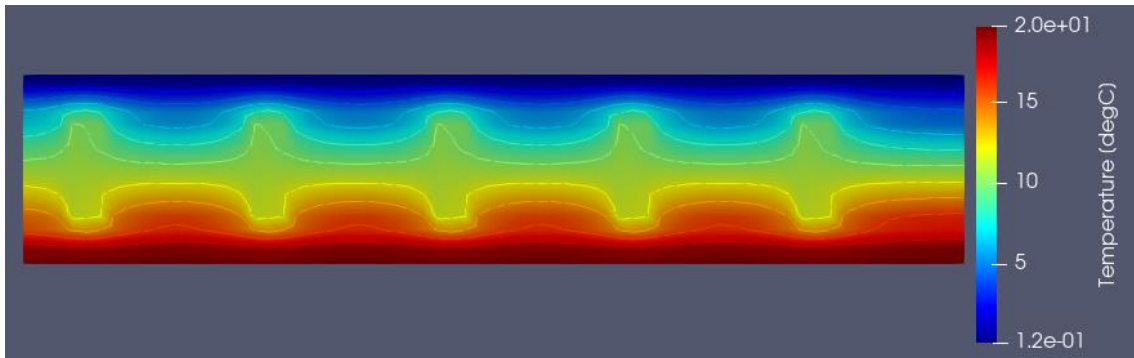
### 10.3.3. Osnovni zaključci

Što se tiče dobivenih rezultata za razlike u duljini prirubnice i debljini čelika, glavne napomene mogu se sažeti kako slijedi:

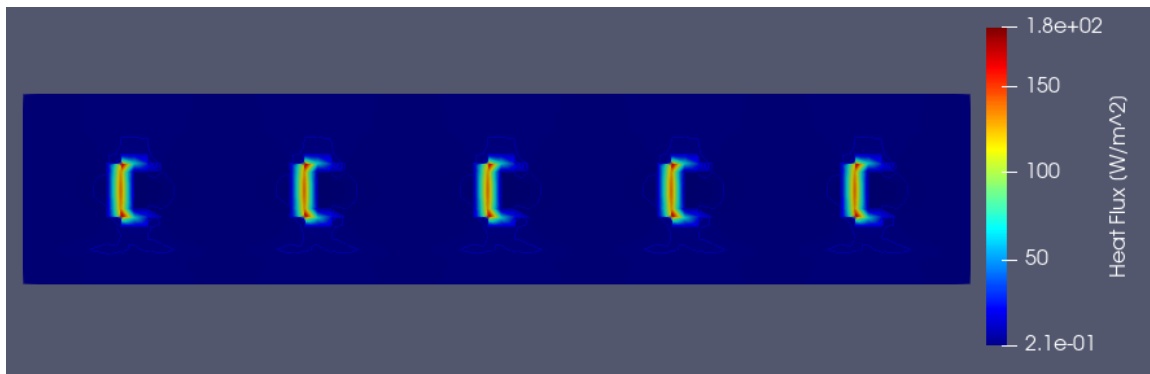
- Kao što se očekivalo, s obzirom na veću količinu čelika i povećanu kontaktnu površinu čeličnih nosača,  $U_{eff}$  -vrijednost zidova od laganih čeličnih profila su veće što su duljine prirubnice i debljine čelika veće, taj zaključak isto vrijedi bez obzira na promjenu toplinske izolacije.
- Što su veći razmaci između čeličnih profila to su vrijednosti  $U_{eff}$  niže, vrijedi isto i za veličinu čeličnog profila, za C150 čelične profile su vrijednosti  $U_{eff}$  više nego za čelične profile C90, i to je zbog toga što imamo manji utjecaj čelika na toplinsku provodljivost, a veću toplinsku izolaciju što rezultira i boljim toplinskim otporom.
- Što je veća duljina prirubnice to je veća vrijednost  $U_{eff}$
- PUR pjena daje bolje(niže) rezultate od vrijednosti  $U_{eff}$ , od mineralne vune, kako je bilo i pretpostavljeno i ima smisla zbog niže vrijednosti toplinske provodljivosti tog materijala.
- Značaj duljine i debljine čeličnog profila nije linearan, veći je za manje duljine i deblje čelične profile.
- Zbog postojanja kontinuiranog sloja toplinske izolacije od EPS u vanjskim zidovima, važnost debljine čelika i veličine ležaja smanjuje se, u usporedbi s unutarnjim zidom od laganih čeličnih profila.
- Distribucija temperature se smanjuje na strani na kojoj se čelični profil približava dodatnoj vanjskoj toplinskoj izolaciji.
- Prema analizi osjetljivosti od ponuđenih vrijednosti najbolji efektivni koeficijent toplinske propusnosti sa vrijednošću  $0,1168 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  ima: Vanjski zid, sa PUR pjenom kao glavnim izolacijskim materijalom, debljinom čelika od 1mm, duljinom prirubnice od 33mm i razmakom čeličnih profila od 500mm



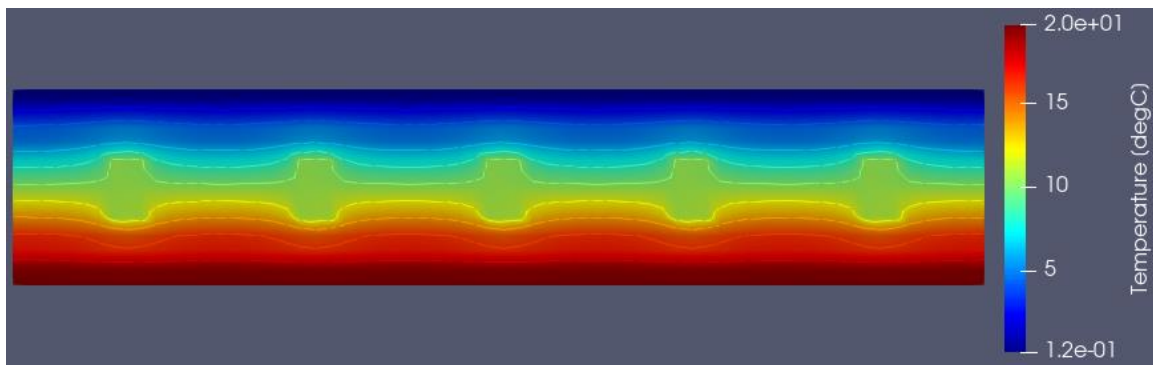
Slika 41 Distribucija toplinskog toka za model C150, 300mm, 1.5mm, 43mm



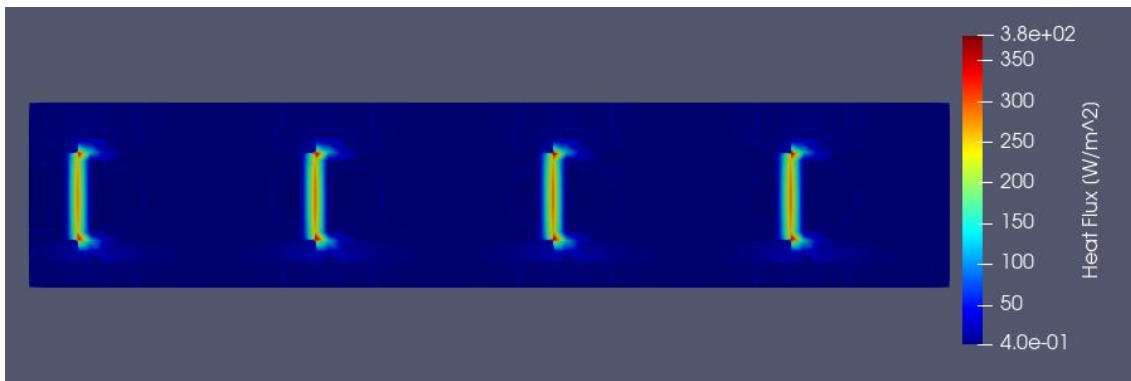
Slika 42 Distribucija temperature za model C150, 300mm, 1.5mm, 43mm



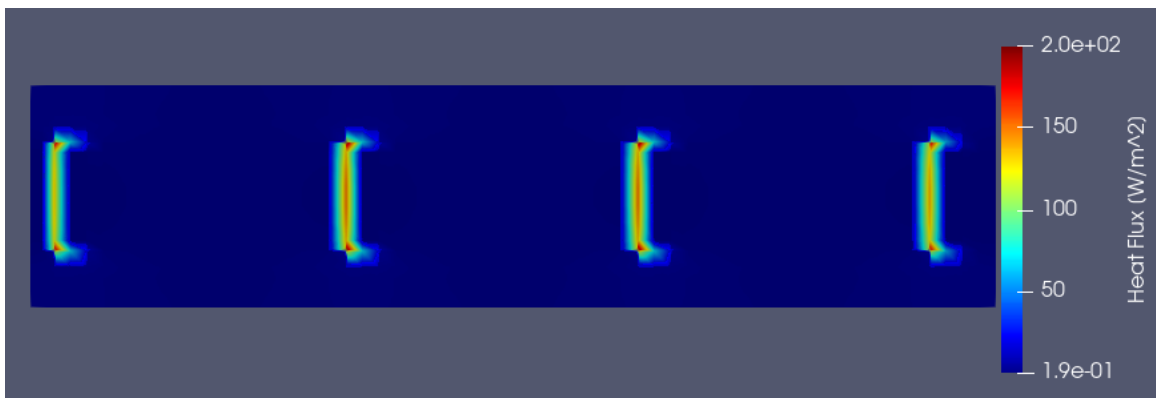
Slika 43 Distribucija toplinskog toka za model C90, 300mm, 1.5mm, 43mm



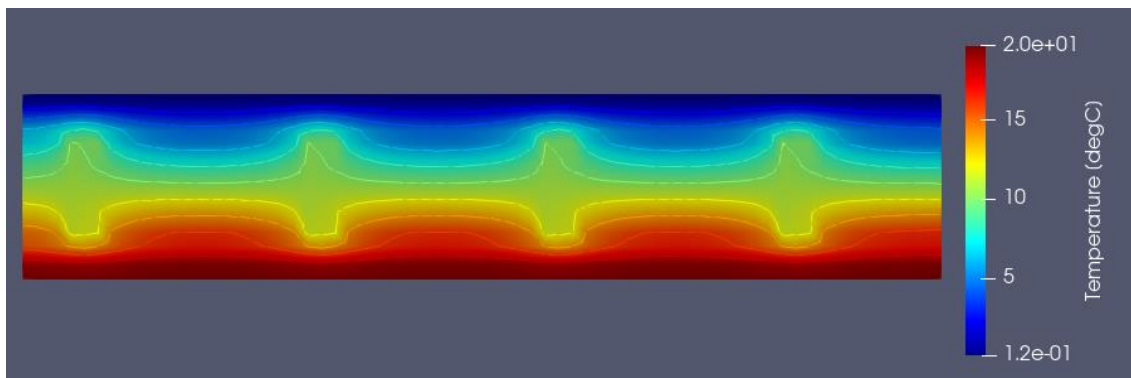
Slika 44 Distribucija temperature za model C90, 300mm, 1.5mm, 43mm



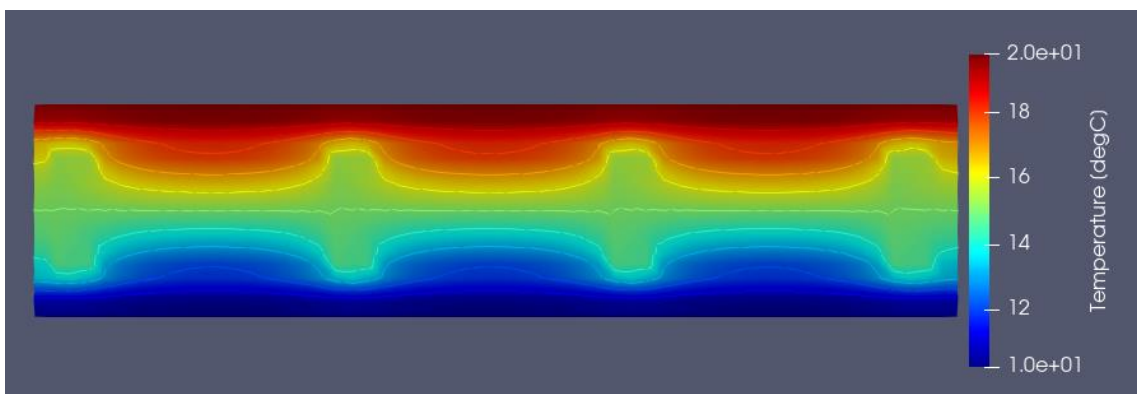
Slika 45 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm



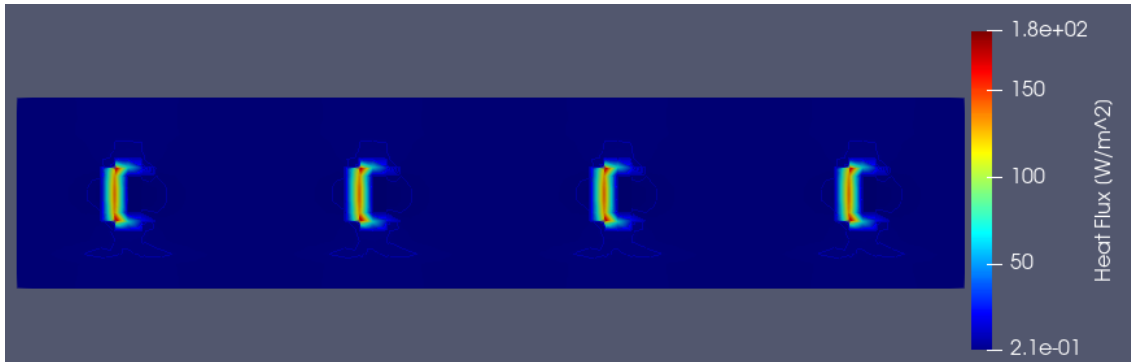
Slika 46: Distribucija toplinskog toka za model unutarnjeg zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm



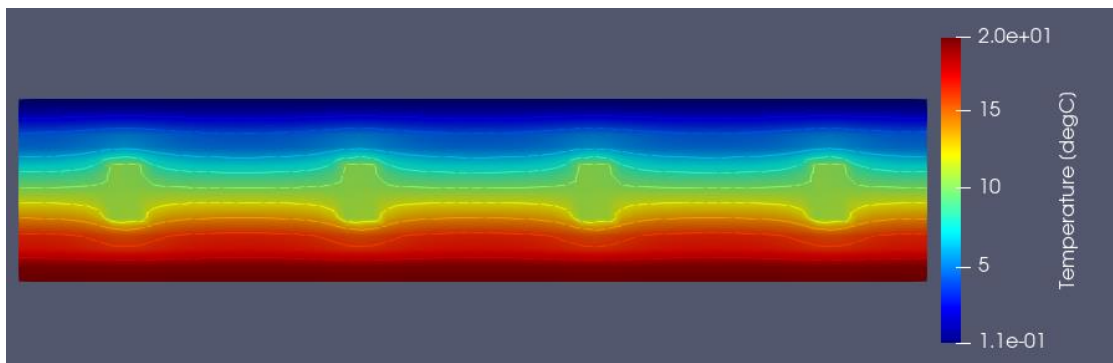
Slika 47 Distribucija temperature za model vanjskog zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm



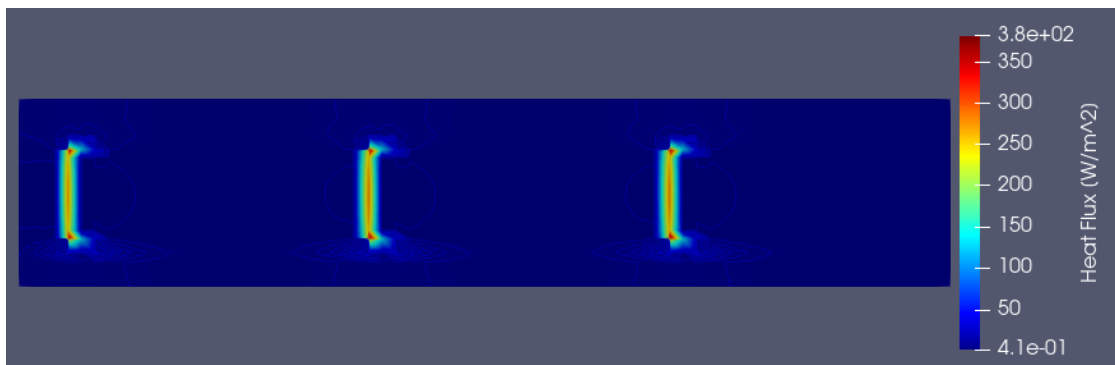
Slika 48: Distribucija temperature za model unutarnjeg zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm



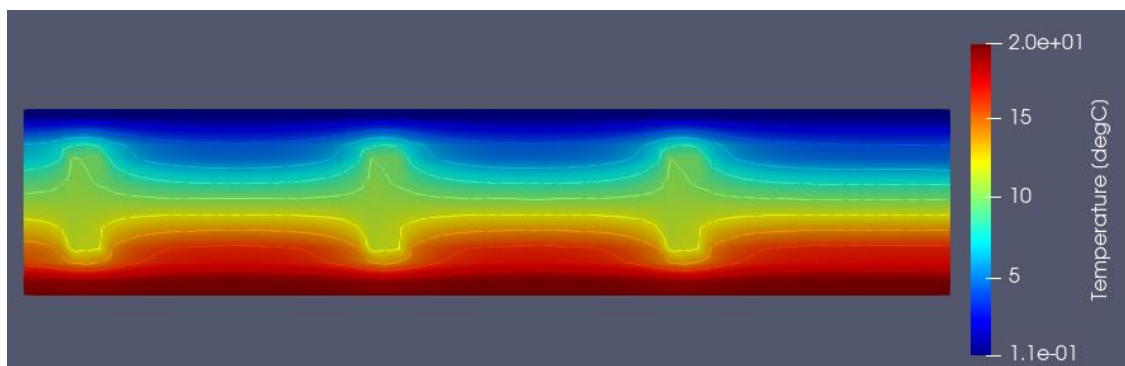
Slika 49 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.5mm, 43mm



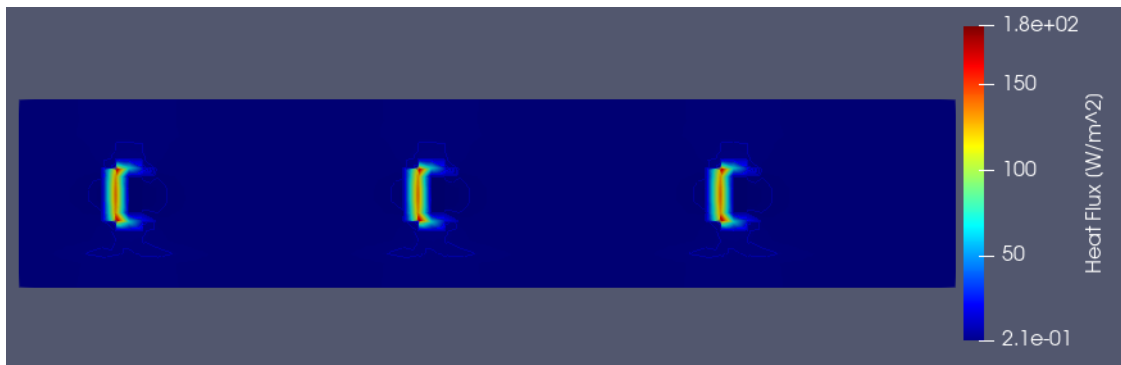
Slika 50 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.5mm, 43mm



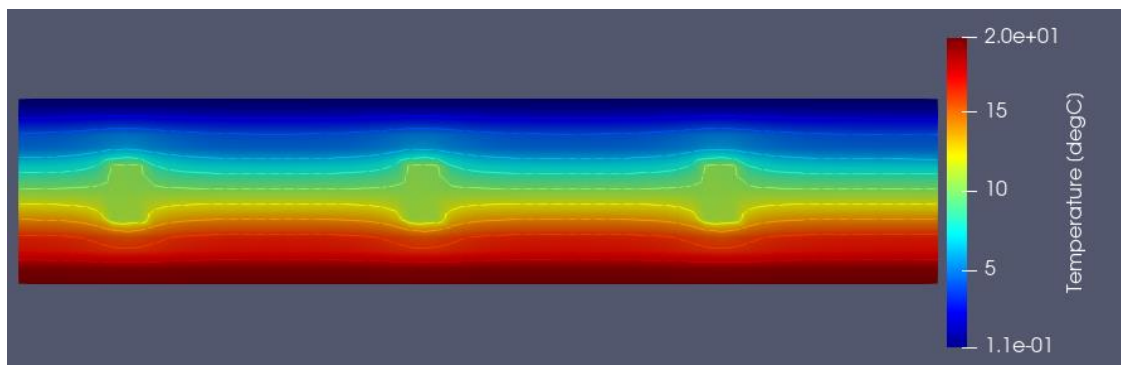
Slika 51 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C150, 500mm, 1.5mm, 43mm



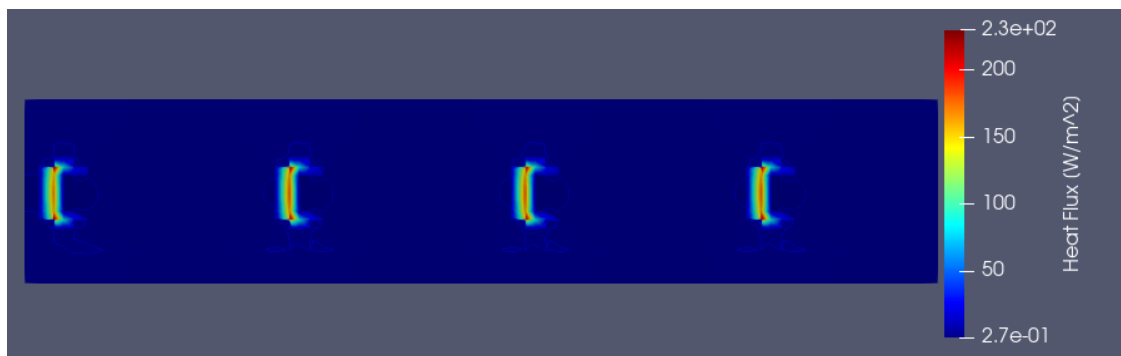
Slika 52 Distribucija temperature za model vanjskog zida C150, 500mm, 1.5mm, 43mm



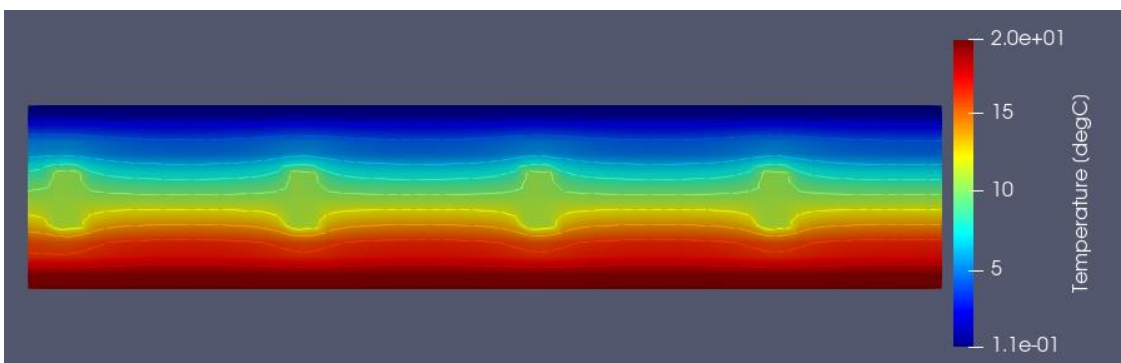
Slika 53 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.5mm, 43mm



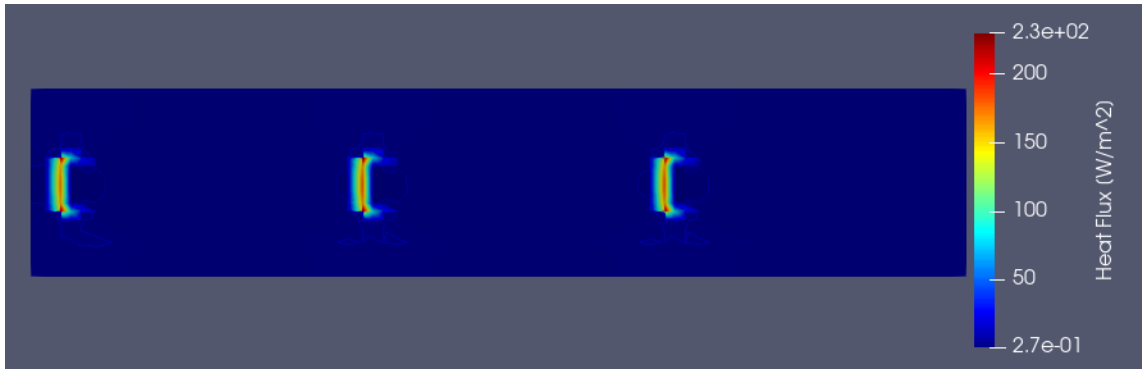
Slika 54 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.5mm, 43mm



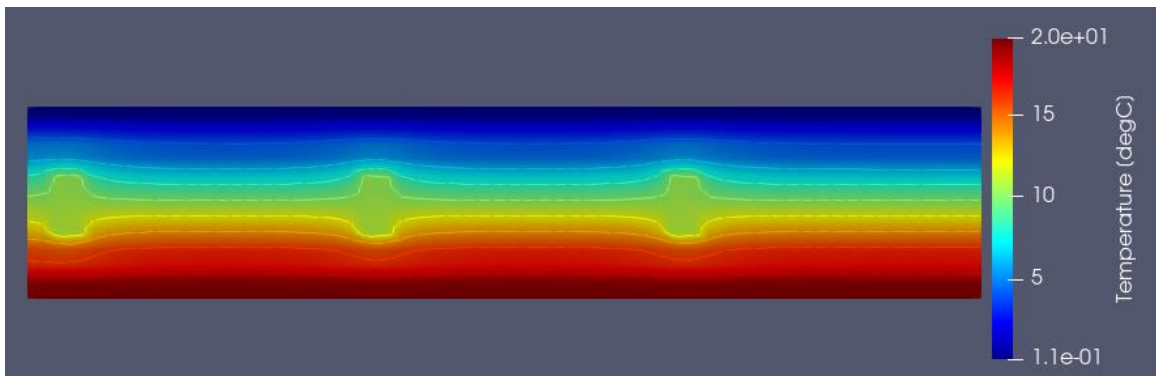
Slika 55 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.0 mm, 33 mm



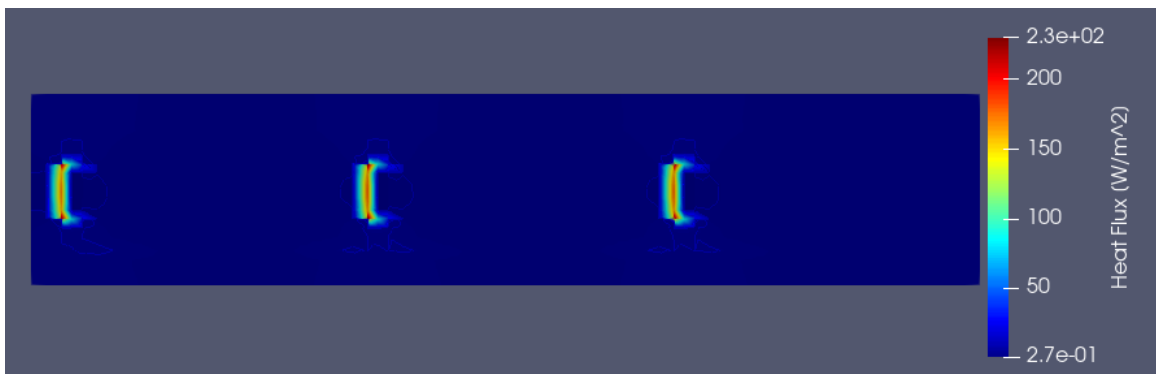
Slika 56 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.0 mm, 33 mm



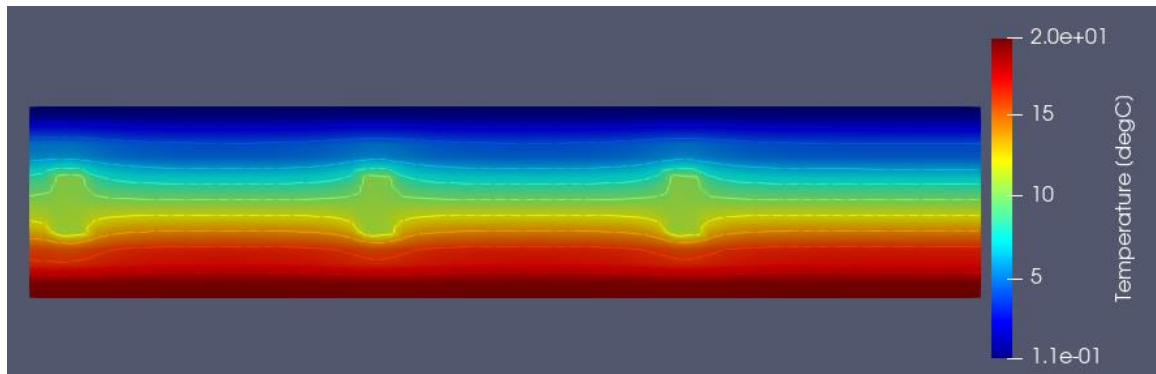
Slika 57 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm



Slika 58 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm

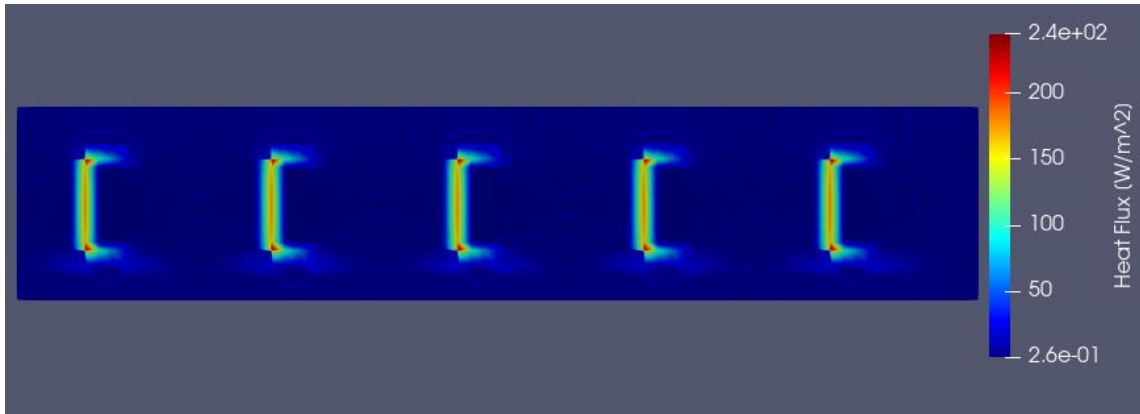


Slika 59 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm

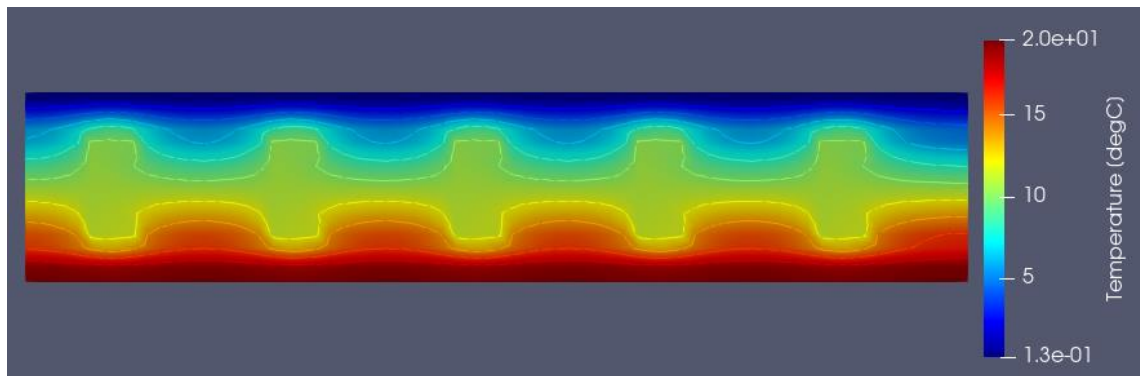


Slika 60 Distribucija temperature za mode vanjskog zida I C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm

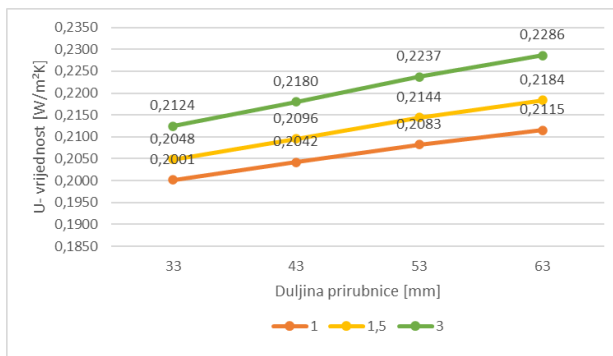




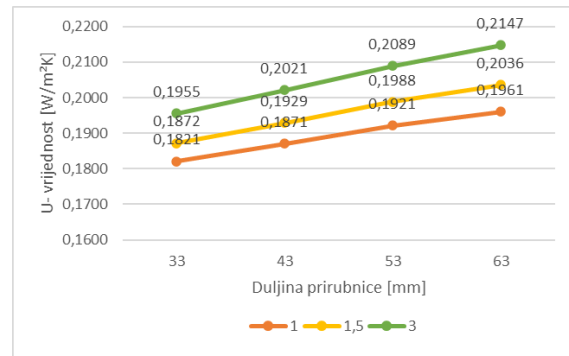
Slika 61 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C150, 300mm, 3.0 mm, 63 mm



Slika 62 Distribucija temperature za model vanjskog zida C150, 300mm, 3.0 mm, 63 mm

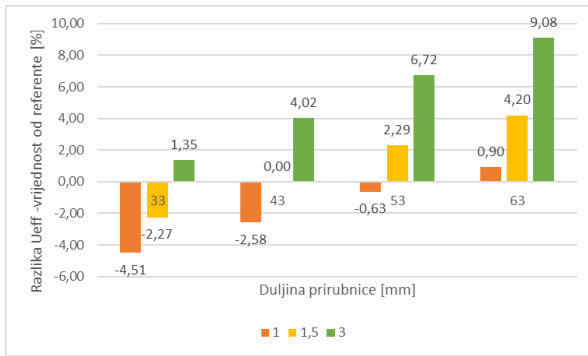


a) Mineralna vuna

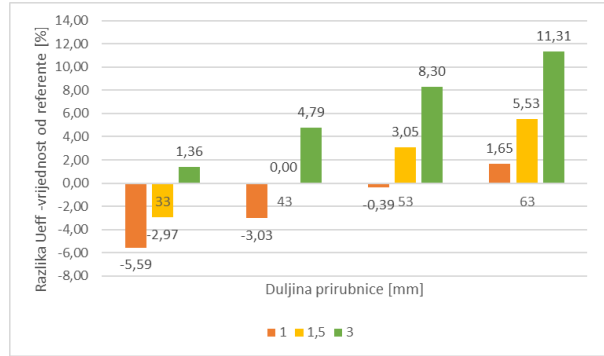


b) PUR pjena

Slika 63: Vanjski zid, C150, 300mm

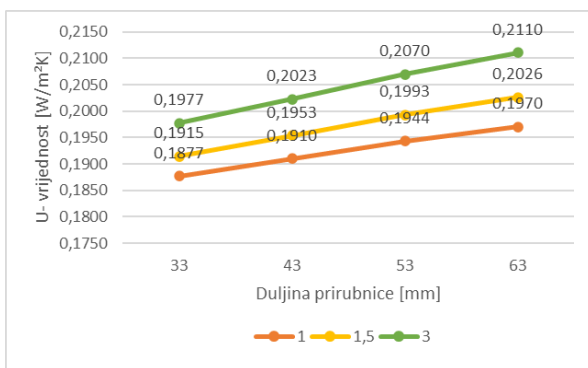


a) Mineralna vuna

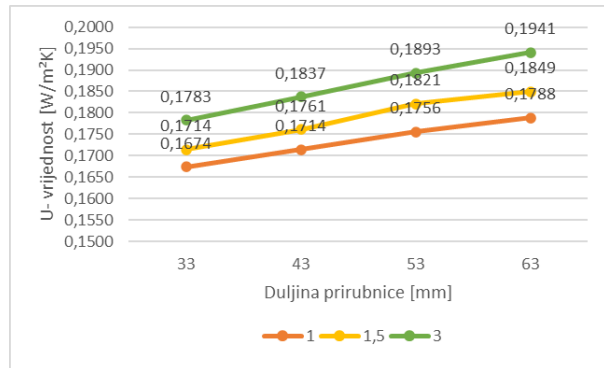


b) PUR pjena

Slika 64: Vanjski zid, C150, 300mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

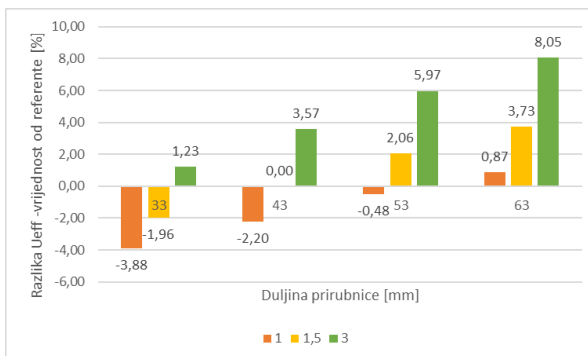


a) Mineralna vuna

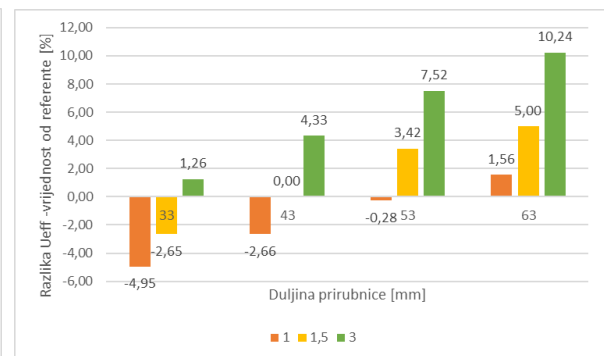


b) PUR pjena

Slika 65: Vanjski zid, C150, 400mm

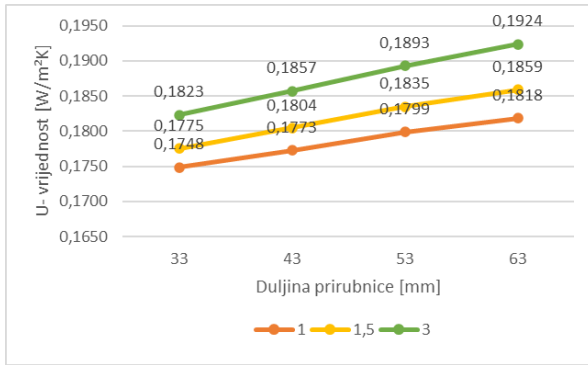


a) Mineralna vuna

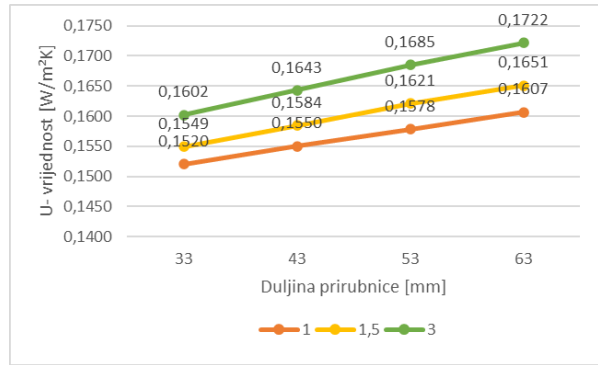


b) PUR pjena

Slika 66: Vanjski zid, C150, 400mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

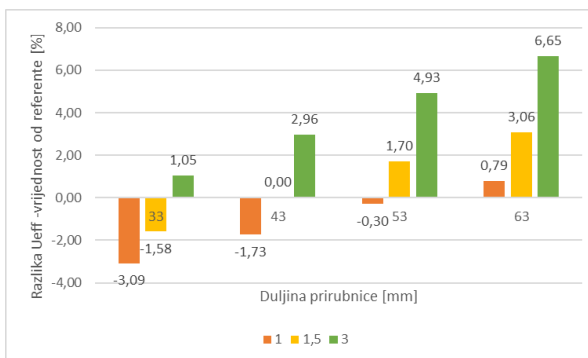


a) Mineralna vuna

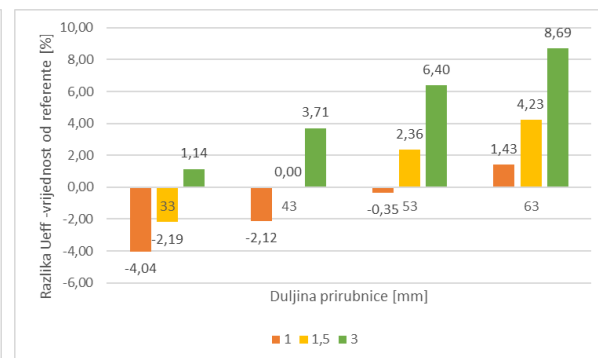


b) PUR pjena

Slika 67: Vanjski zid, C150, 500mm

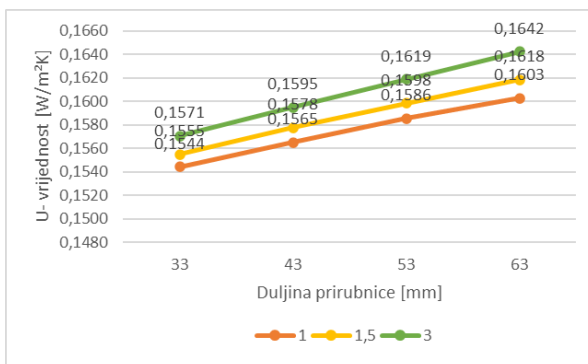


a) Mineralna vuna

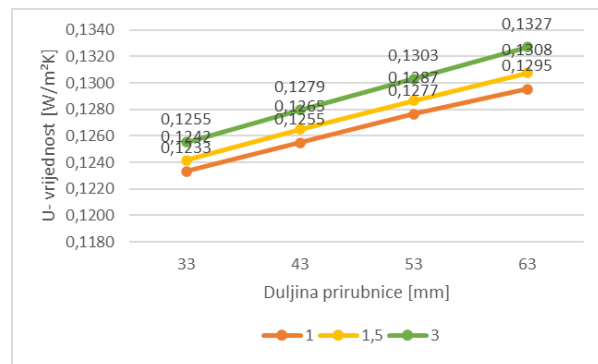


b) PUR pjena

Slika 68: Vanjski zid, C150, 500mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost

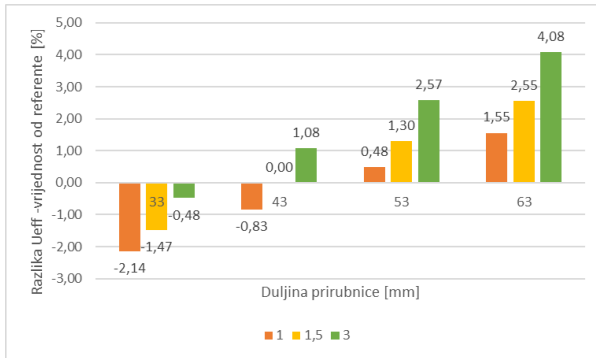


a) Mineralna vuna

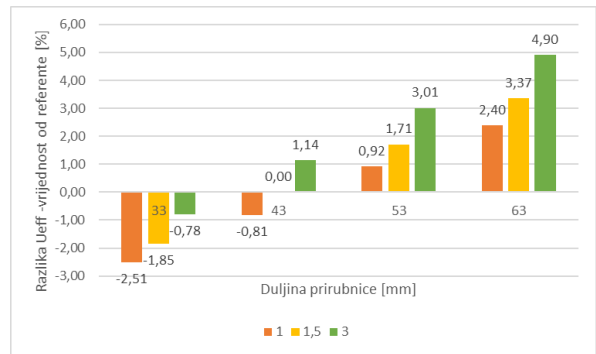


b) PUR pjena

Slika 69: Vanjski zid, C90, 300mm

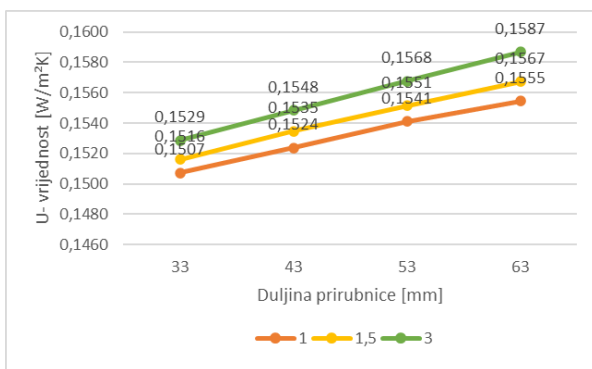


a) Mineralna vuna

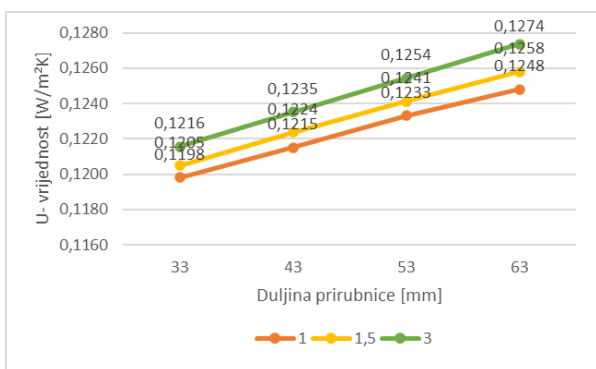


b) PUR pjena

Slika 70: Vanjski zid, C90, 300mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

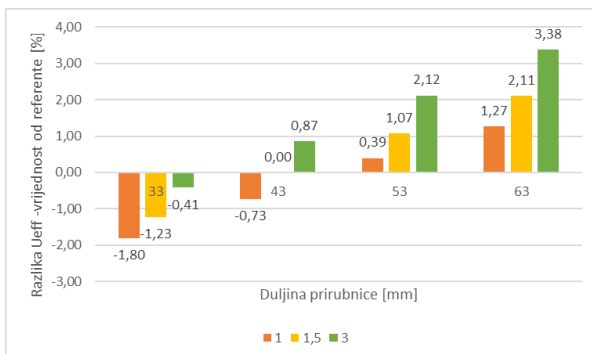


a) Mineralna vuna

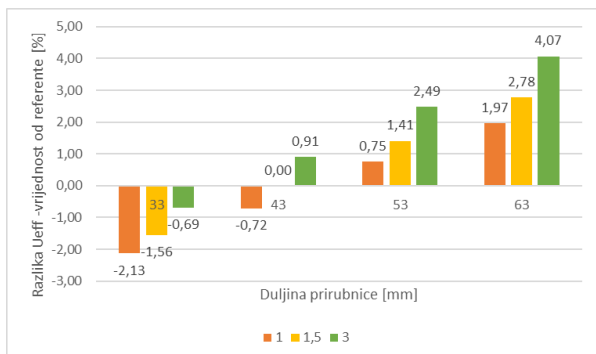


b) PUR pjena

Slika 71: Vanjski zid, C90, 400mm

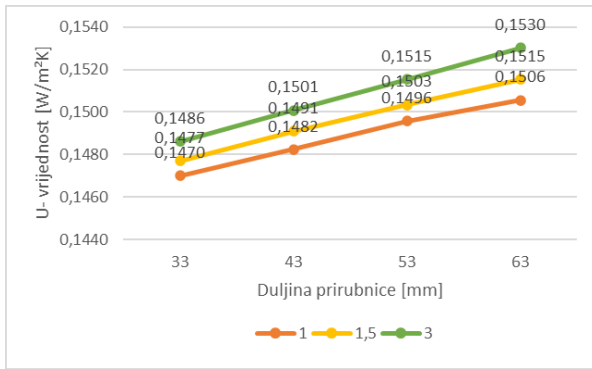


a) Mineralna vuna

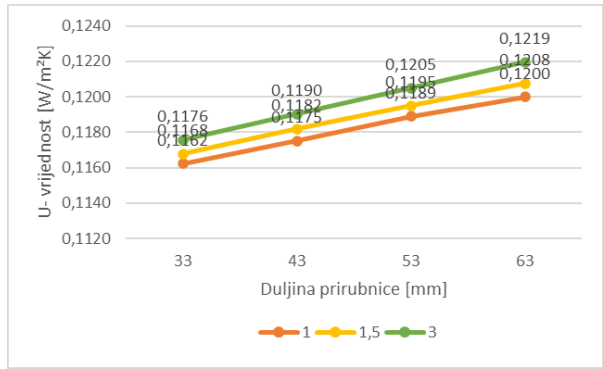


b) PUR pjena

Slika 72: Vanjski zid, C90, 400mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

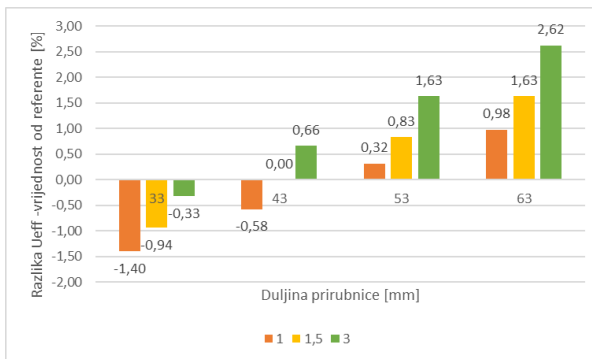


a) Mineralna vuna

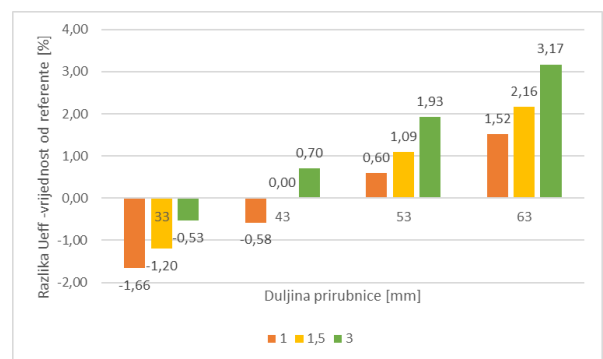


b) PUR pjena

Slika 73: Vanjski zid, C90, 500mm

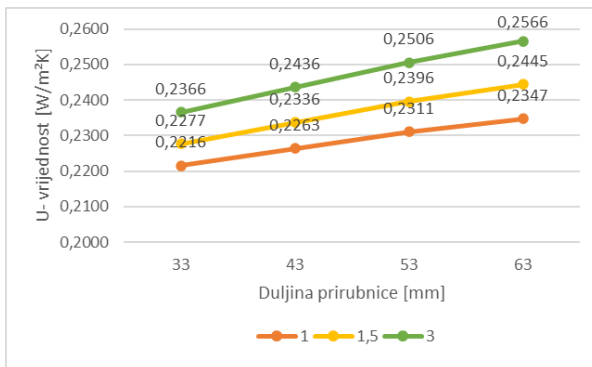


a) Mineralna vuna

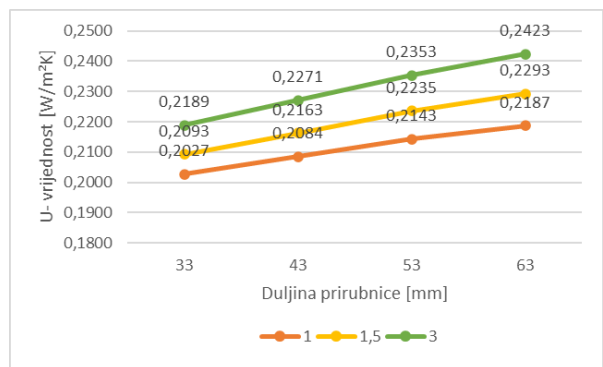


b) PUR pjena

Slika 74: Vanjski zid, C90, 500mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

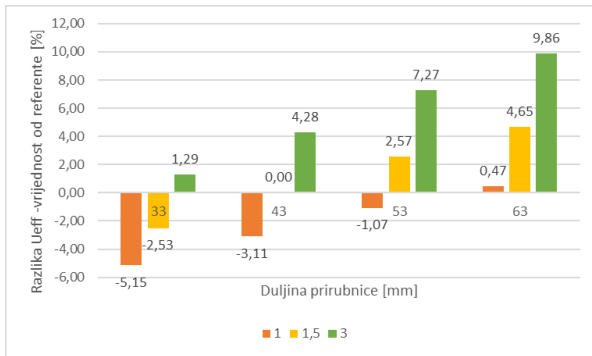


a) Mineralna vuna

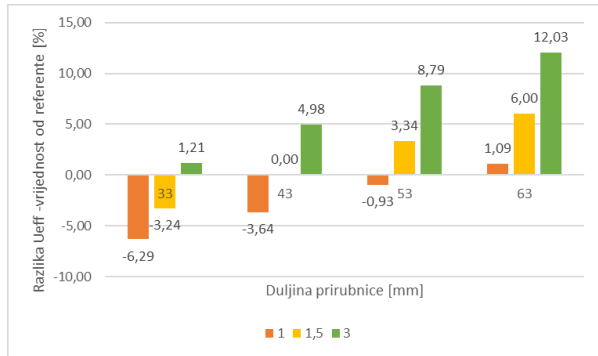


b) PUR pjena

Slika 75: Unutarnji zid, C150, 300mm

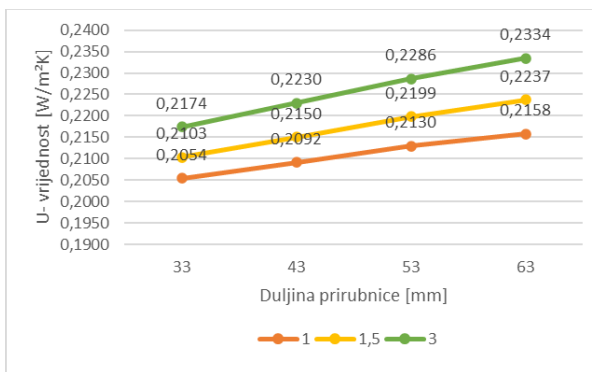


a) Mineralna vuna

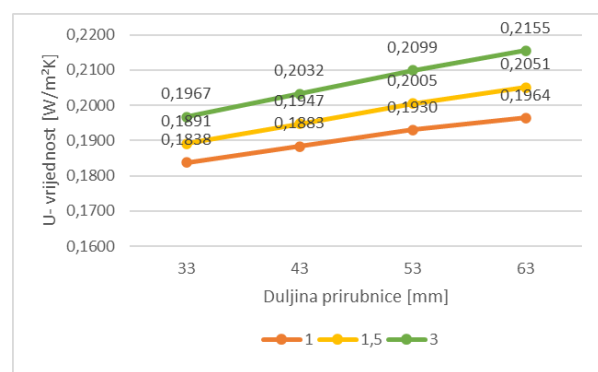


b) PUR pjena

Slika 76: Unutarnji zid, C150, 300mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost



a) Mineralna vuna

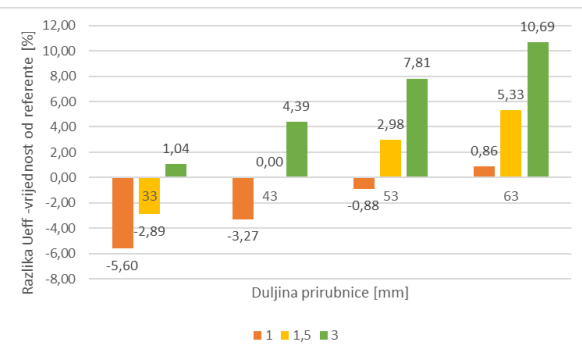


b) PUR pjena

Slika 77: Unutarnji zid, C150, 400mm

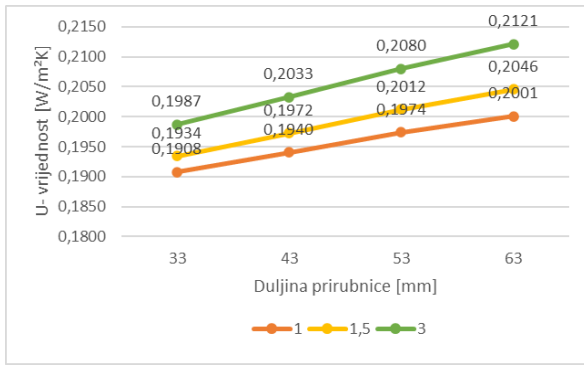


a) Mineralna vuna

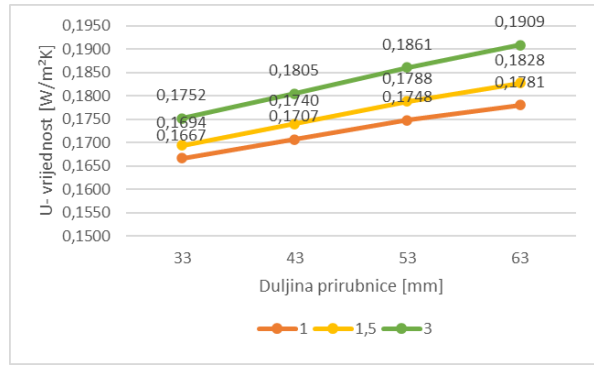


b) PUR pjena

Slika 78: Unutarnji zid, C150, 400mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

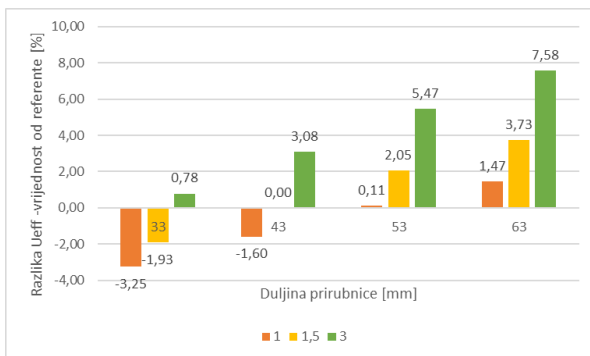


a) Mineralna vuna

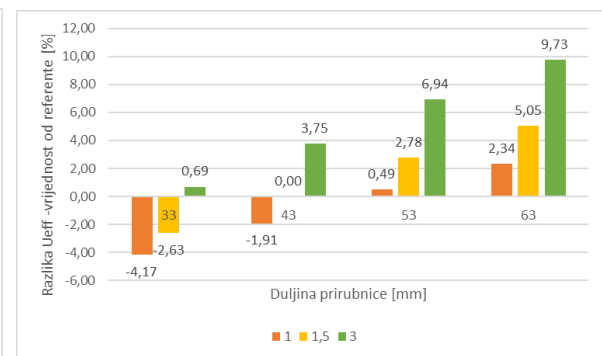


b) PUR pjena

Slika 79: Unutarnji zid, C150, 500mm

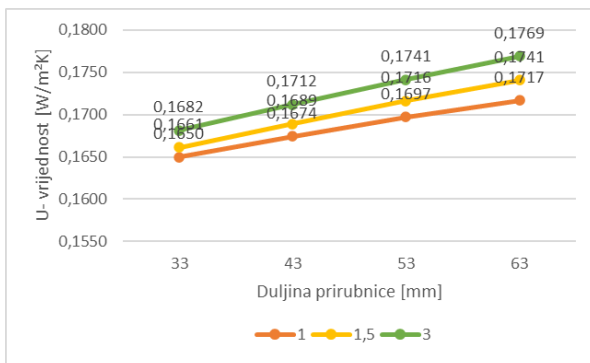


a) Mineralna vuna

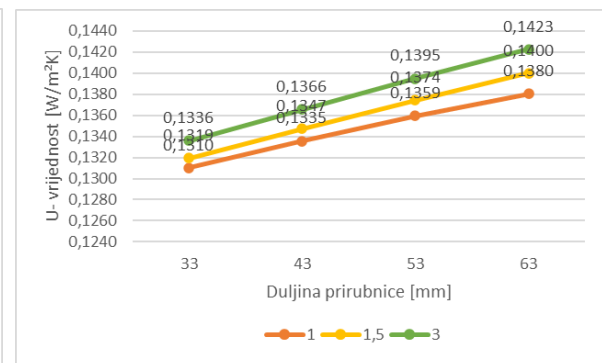


b) PUR pjena

Slika 80: Unutarnji zid, C150, 500mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost

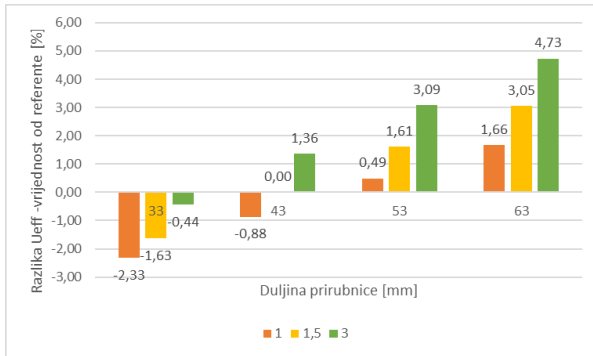


a) Mineralna vuna

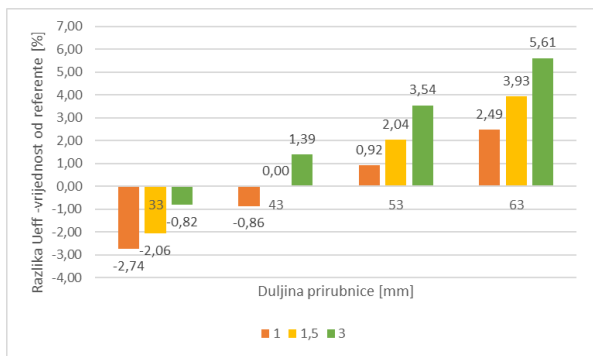


b) PUR pjena

Slika 81: Unutarnji zid, C90, 300mm

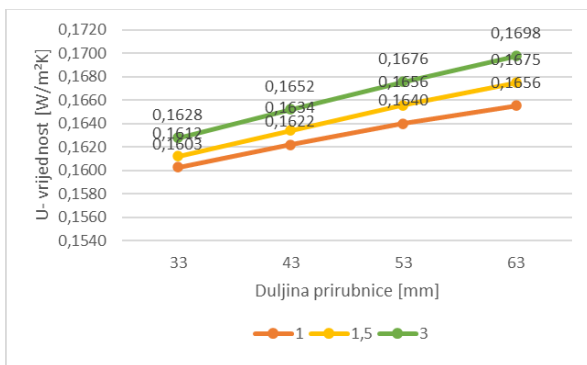


a) Mineralna vuna

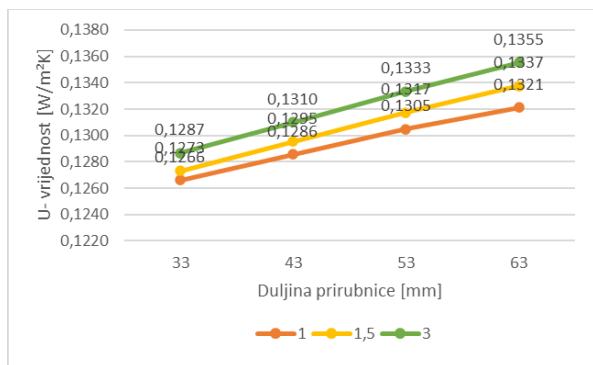


b) PUR pjena

Slika 82: Unutarnji zid, C90, 300mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost

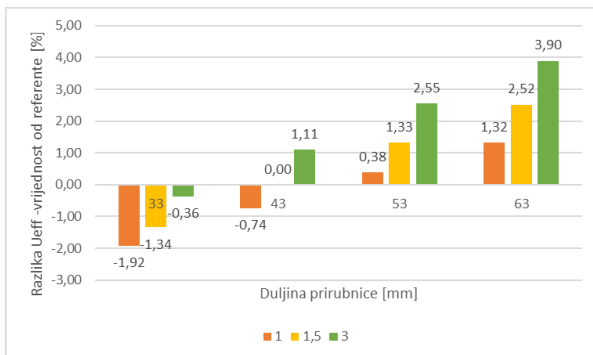


a) Mineralna vuna

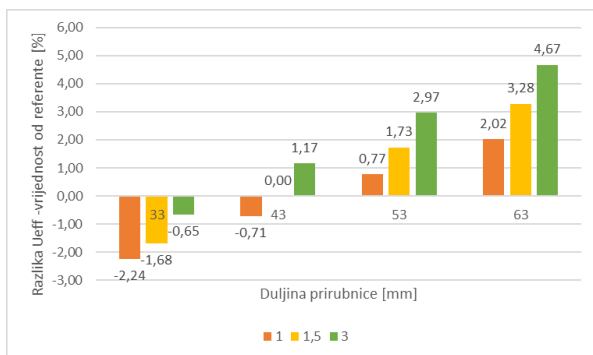


b) PUR pjena

Slika 83: Unutarnji zid, C90, 400mm



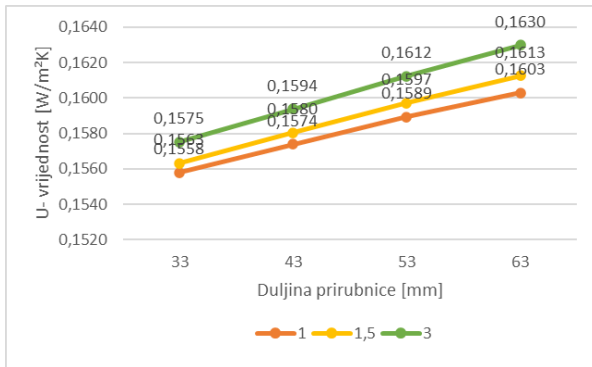
a) Mineralna vuna



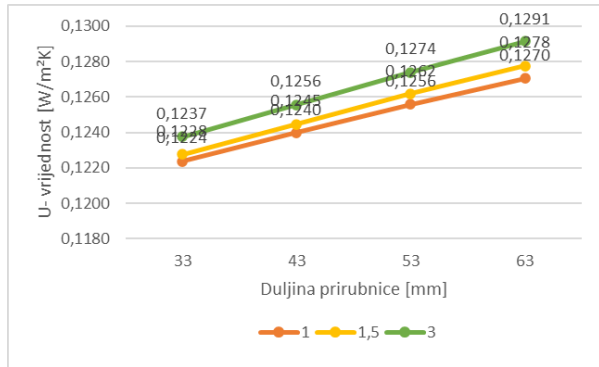
b) PUR pjena

Slika 84: Unutarnji zid, C90, 400mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost



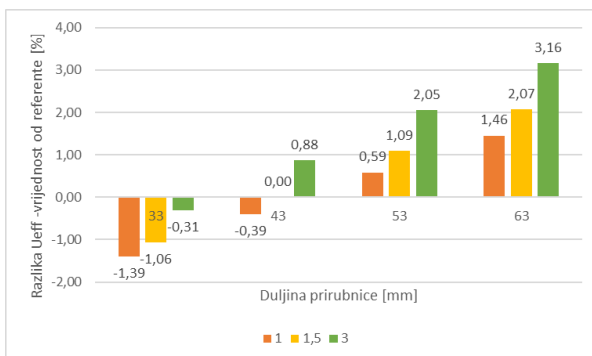


a) Mineralna vuna

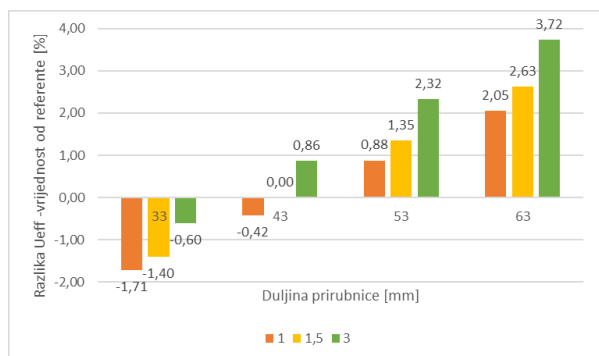


b) PUR pjena

Slika 85: Unutarnji zid, C90, 500mm



a) Mineralna vuna



b) PUR pjena

Slika 86: Unutarnji zid, C90, 500mm, razlika  $U_{eff}$  u odnosu na referentnu vrijednost

## 11. Numerički proračun karakterističnih detalja

### 11.1. DETALJI

Da bi se izbjeglo nepotrebno slobodno kretanje zraka, i gubici topline strujanjem, LSF struktura je 100% ispunjena izolacijskim materijalom. Numerički proračun svakog detalja je rađen za PUR pjenu i Mineralnu vunu kao dva najčešće korištena toplinsko-izolacijska materijala, usput ih uspoređujući.

Računat ćemo toplinske mostove nekih karakterističnih detalja, kao što su:

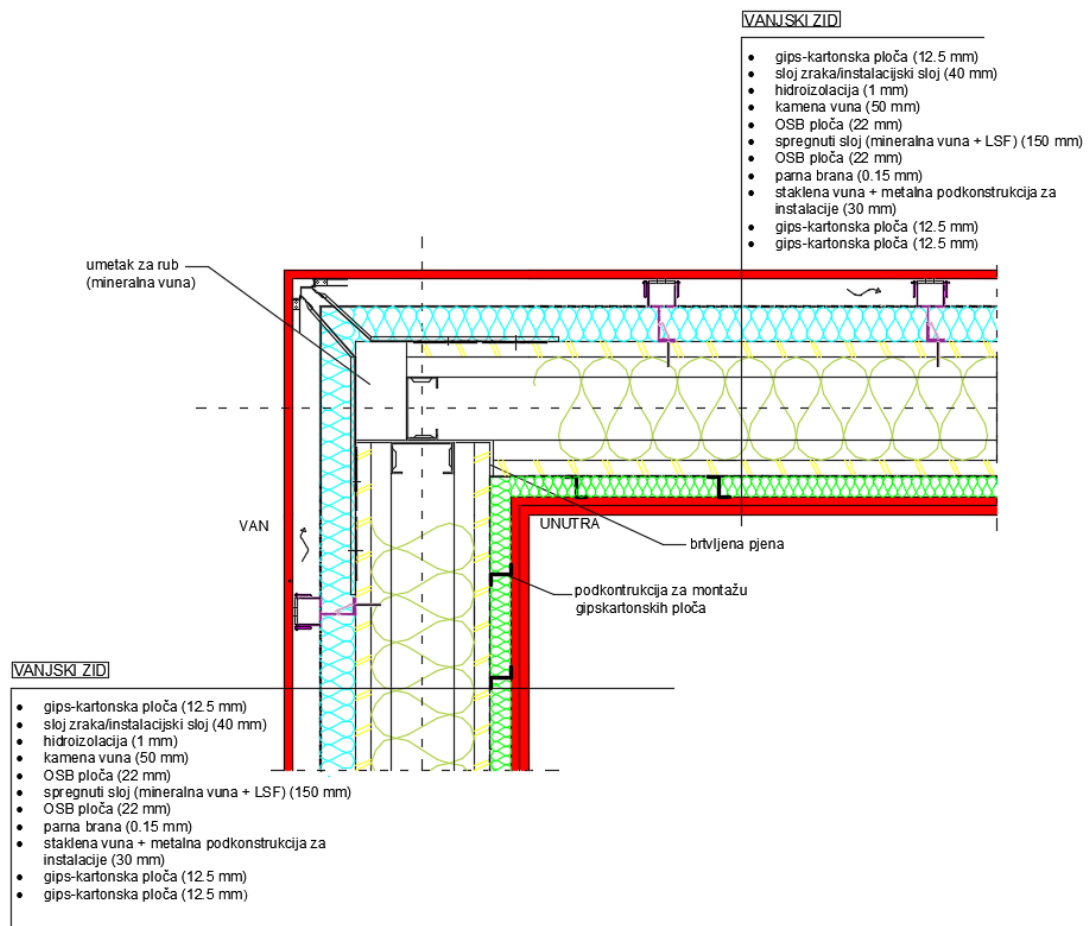
- Spoj dva vanjska zida u kutu
- Spoj unutrašnjeg i vanjskog zida
- Spoj vanjskog zida s temeljnom pločom
- Spoj unutrašnjeg zida s temeljnom pločom
- Spoj vrata u temelju
- Horizontalni presjek vrata
- Vertikalni presjek prozora
- Horizontalni presjek prozora
- Detalj Atike

- Spoj unutrašnjeg zida s stropnom pločom

Ispod svakog detalja prikazani su geometrijski modeli korišteni za numeričke proračune, te distribucije temperature, toplinskog toka i toka vodene pare dobivene proračunima.

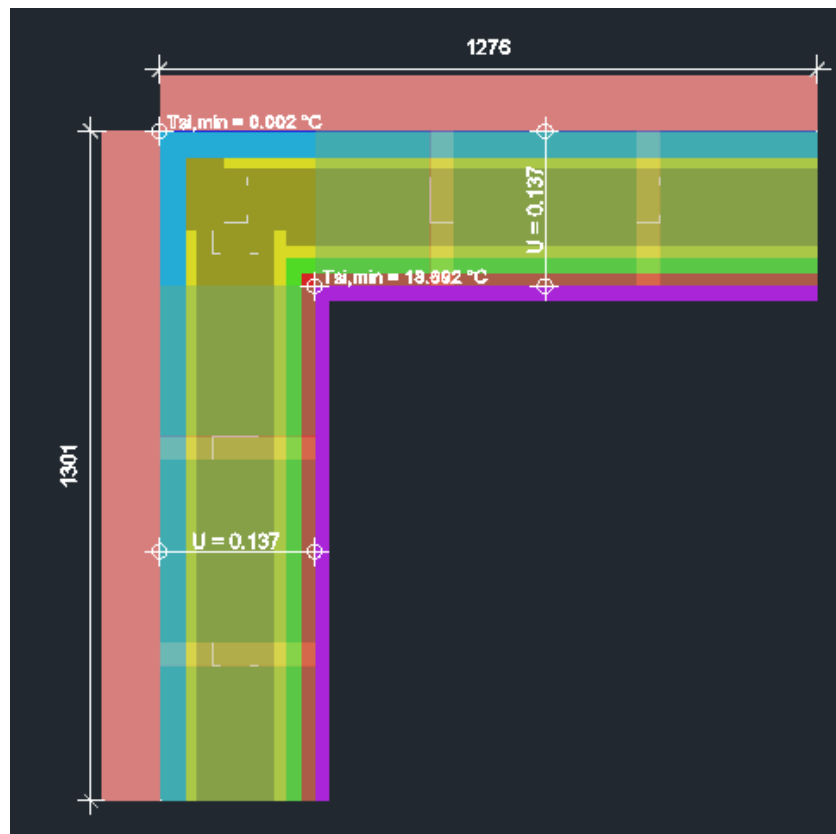
U standardu EN ISO 10211 [49] nije detaljno obrađeno modeliranje složenih komponenata poput prozora, vrata, fasada s rebrom i horizontalno-limenih fasada itd. Izračun  $\psi$ -vrijednosti u ovom radu izveden je korištenjem pojednostavljenja u geometrijskom modelu stvaranjem zamjenskog bloka s U-vrijednošću prozora. U ovom slučaju, zamjenski blok formira se s širinom okvira stvarnog prozora, koji ima ekvivalentnu toplinsku provodljivost koja odgovara toplinskom otporu prozora.

11.1.1. Spoj dva vanjska zida u kutu

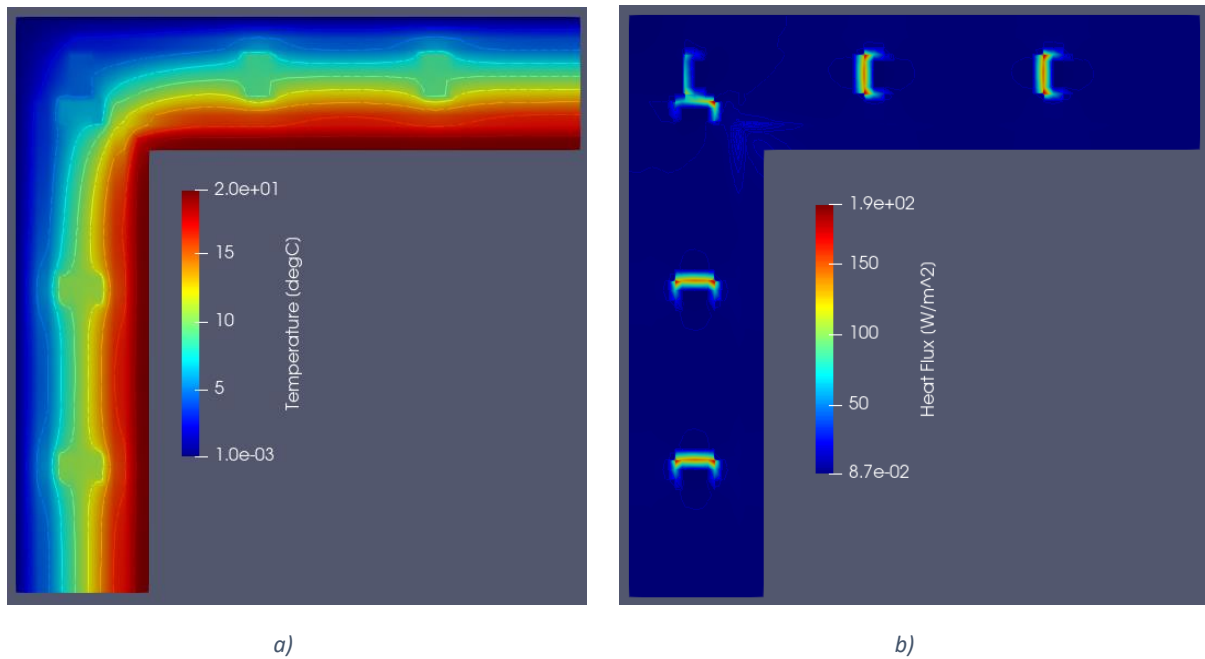


Slika 87: detalj spoja dva vanjska zida u kutu

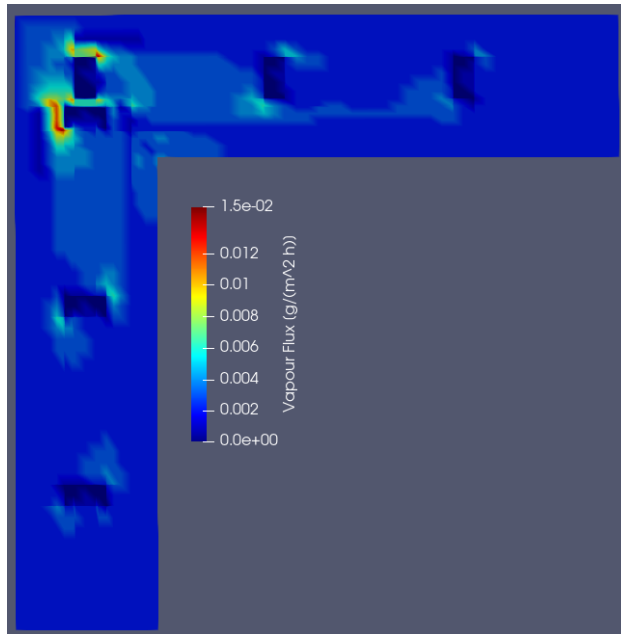
a) Mineralna vuna kao glavni izolacijski materijal



Slika 88: Geometrijski model spoja 2 vanjska zida u kutu s mineralnom vunom

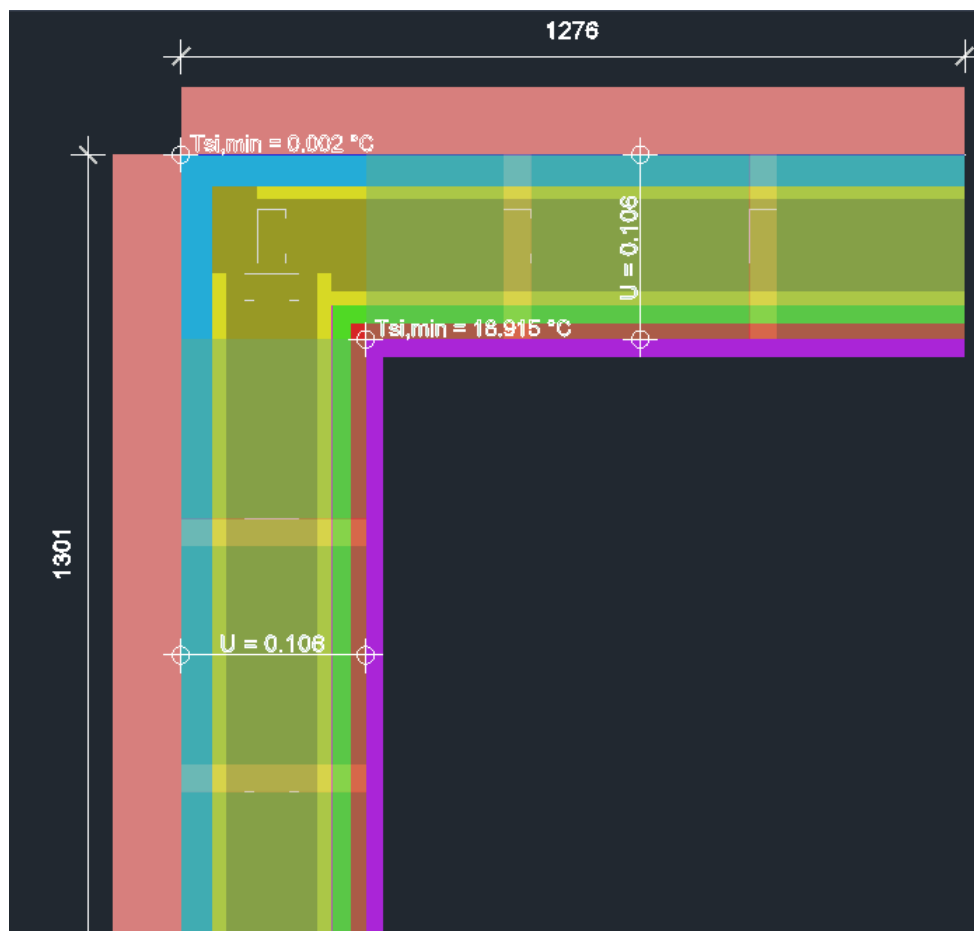


Slika 89: Detalj spoja 2 vanjska zida u kutu s mineralnom vunom. a) distribucija temperature; b) distribucija toplinskog toka

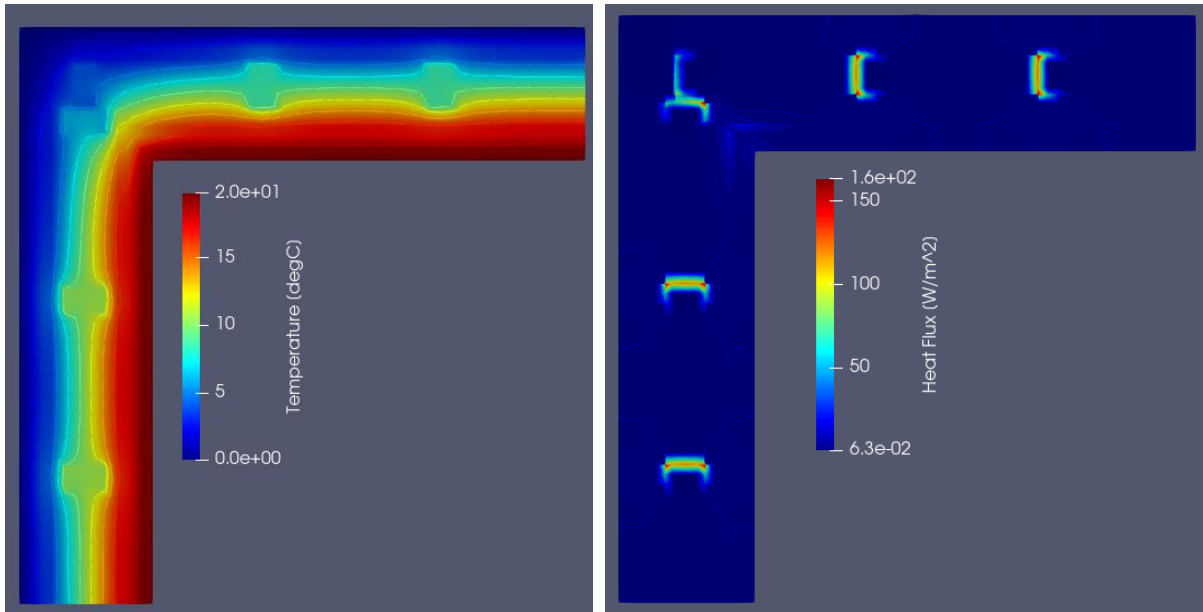


Slika 90: Tok vodene pare detalja spoja 2 vanjska zida u kutu s MW

b) Poliuretanska pjena kao glavni izolacijski materijal



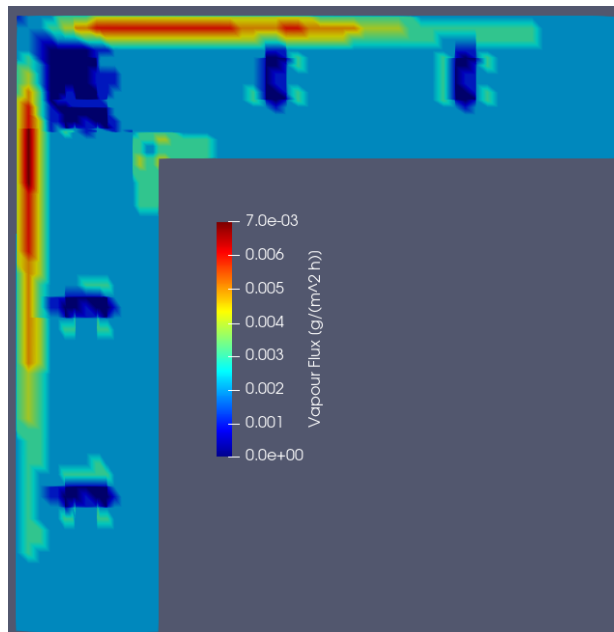
Slika 91: Geometrijski model spoja 2 zida u kutu s PUR pjenom



a)

b)

Slika 92: Detalj spoja 2 vanjska zida u kutu s mineralnom vunom. a) distribucija temperature; b) distribucija toplinskog toka



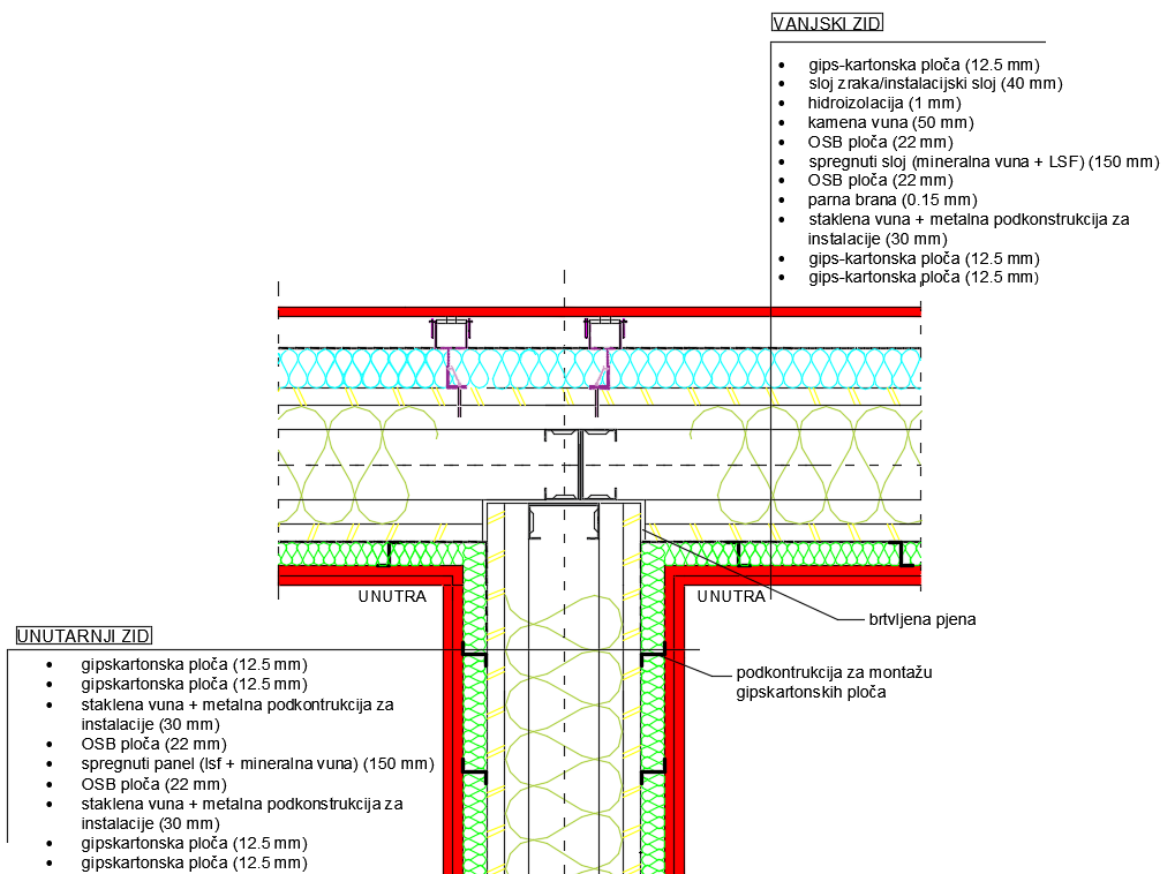
Slika 93: Tok vodene pare detalja spoja 2 vanjska zida u kutu s PUR pjenom

Tablica 7: Rezultati numeričke analize toplinskih mostova detalja 2 vanjska zida u kutu

Spoj dva vanjska zida u kutu	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\Psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,32980	-0,023	18,602	0,935
<b>S PUR pjenom</b>	0,26310	-0,010	18,915	0,946

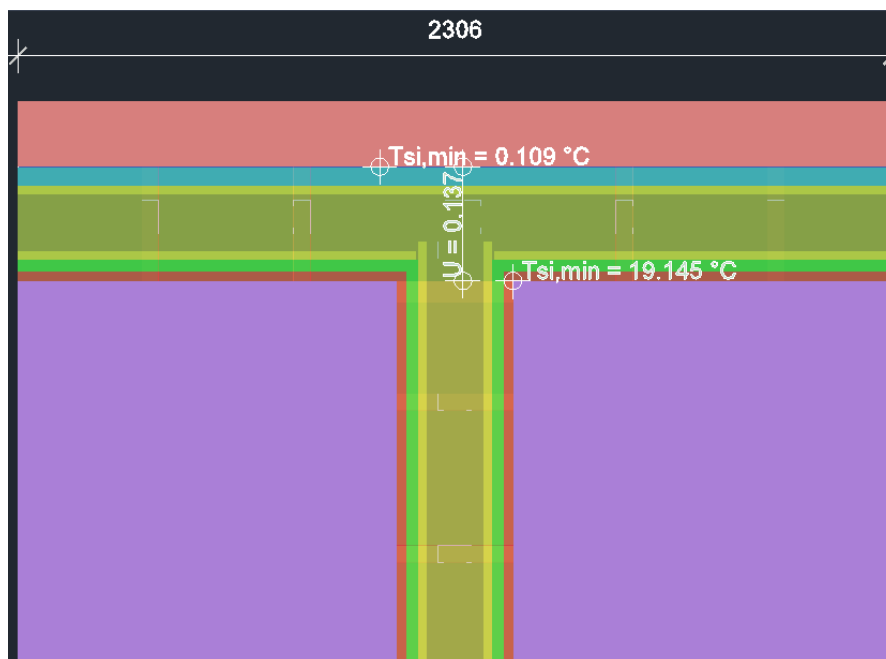
Utjecaj toplinskog mosta iskazuje se kao povećanje ili smanjenje toplinskog toka na promatranom detalju. Za linijske toplinske mostove označava se oznakom  $\Psi$  (psi), a mjerna jedinica je W/(m·K). Za točkaste toplinske mostove označava se oznakom  $\chi$  (ksi), a mjerna jedinica je W/K.

### 11.1.2. Spoj unutarnjeg i vanjskog zida

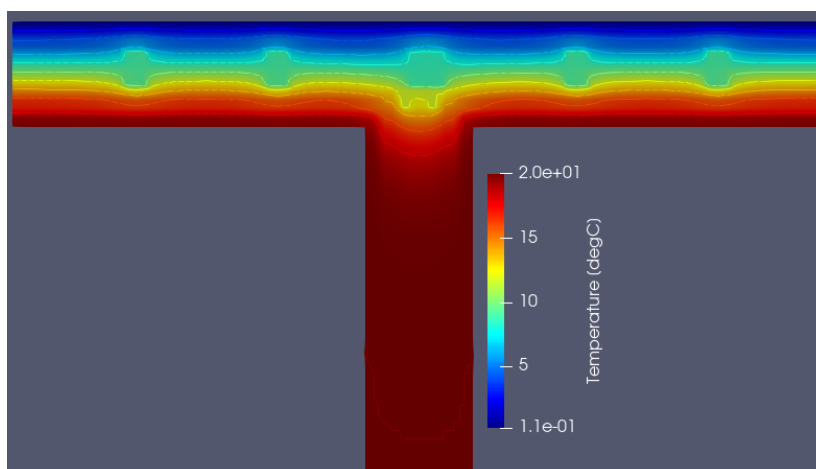


Slika 94: detalj spoja unutarnjeg i vanjskog zida

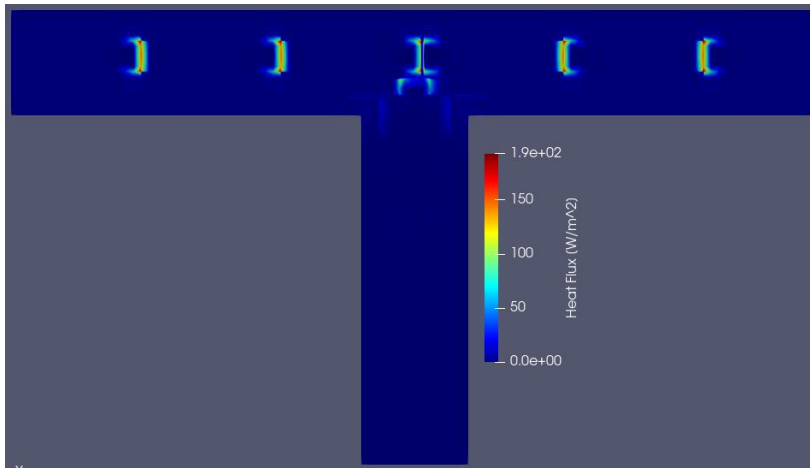
a) Upotreba mineralne vune kao glavnog izolacijskog materijala



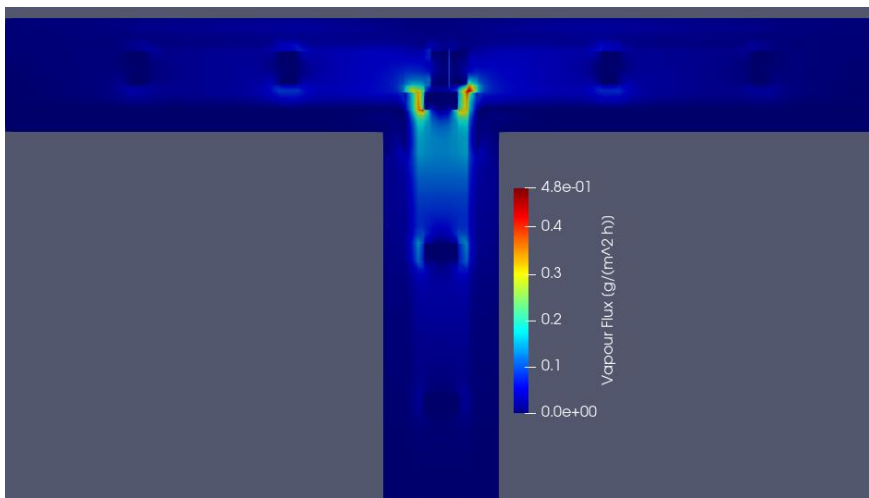
Slika 95: Geometrijski model spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom



Slika 96: Distribucija temperature spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom



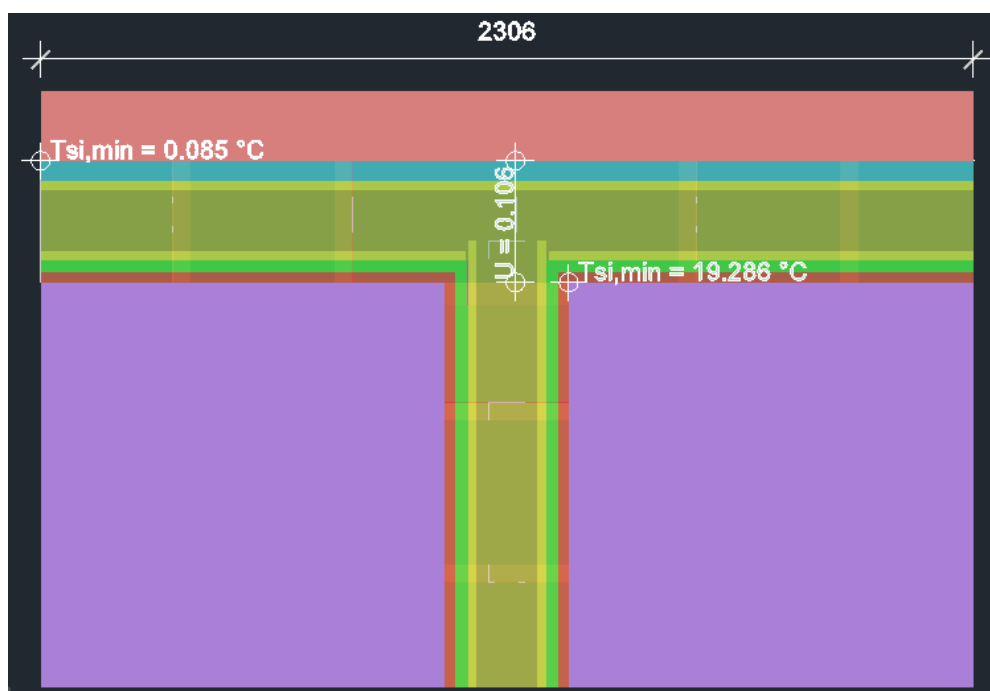
Slika 97: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom



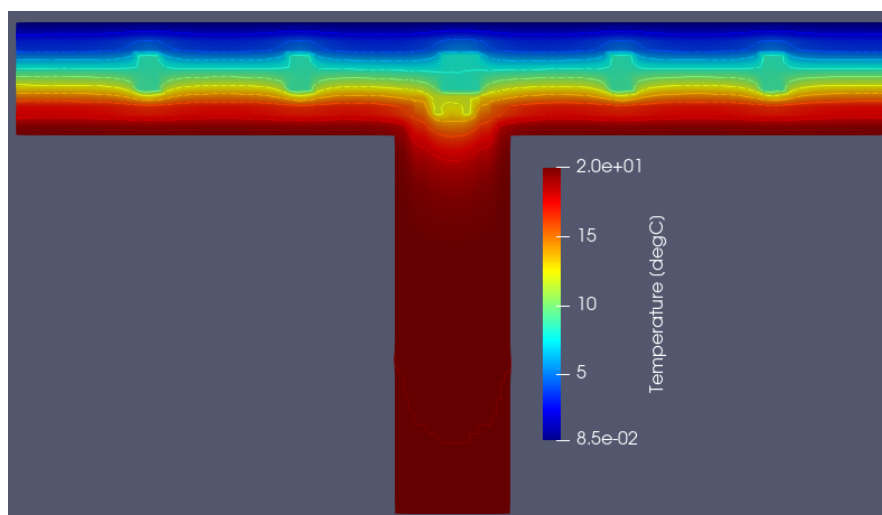
Slika 98: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom



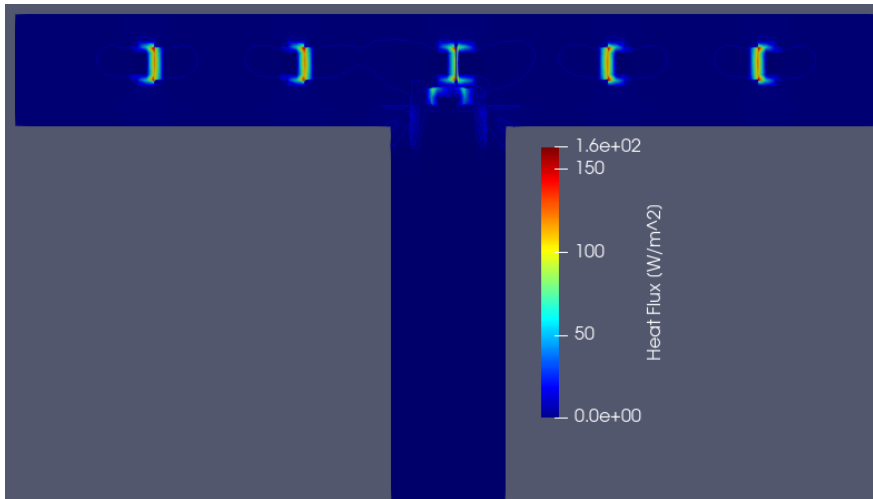
b) Upotreba poliuretanske pjene kao glavnog izolacijskog materijala



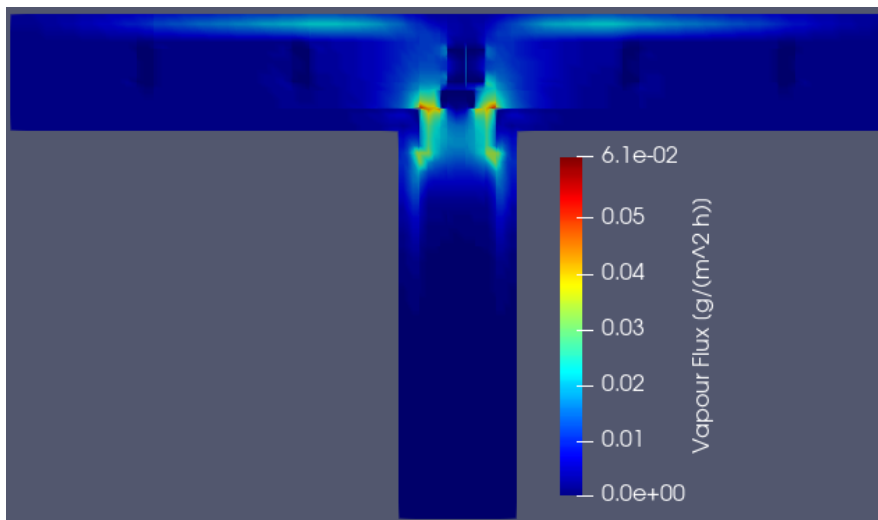
Slika 99: Geometrijski oblik spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom



Slika 100: Distribucija temperature spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom



Slika 101: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom

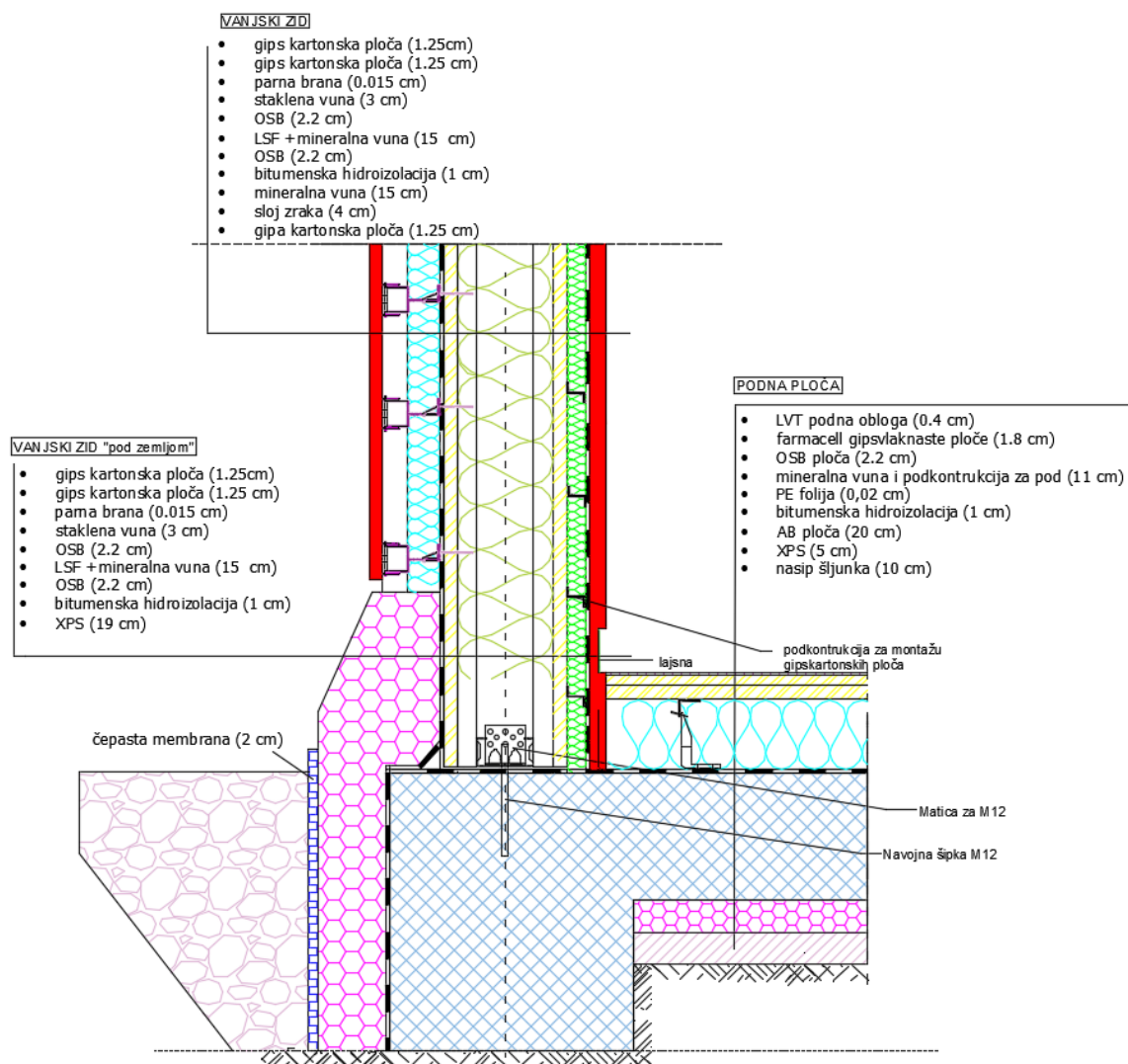


Slika 102: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom

Tablica 8: Rezultati numeričke analize toplinskih mostova spoja unutarnjeg i vanjskog zida

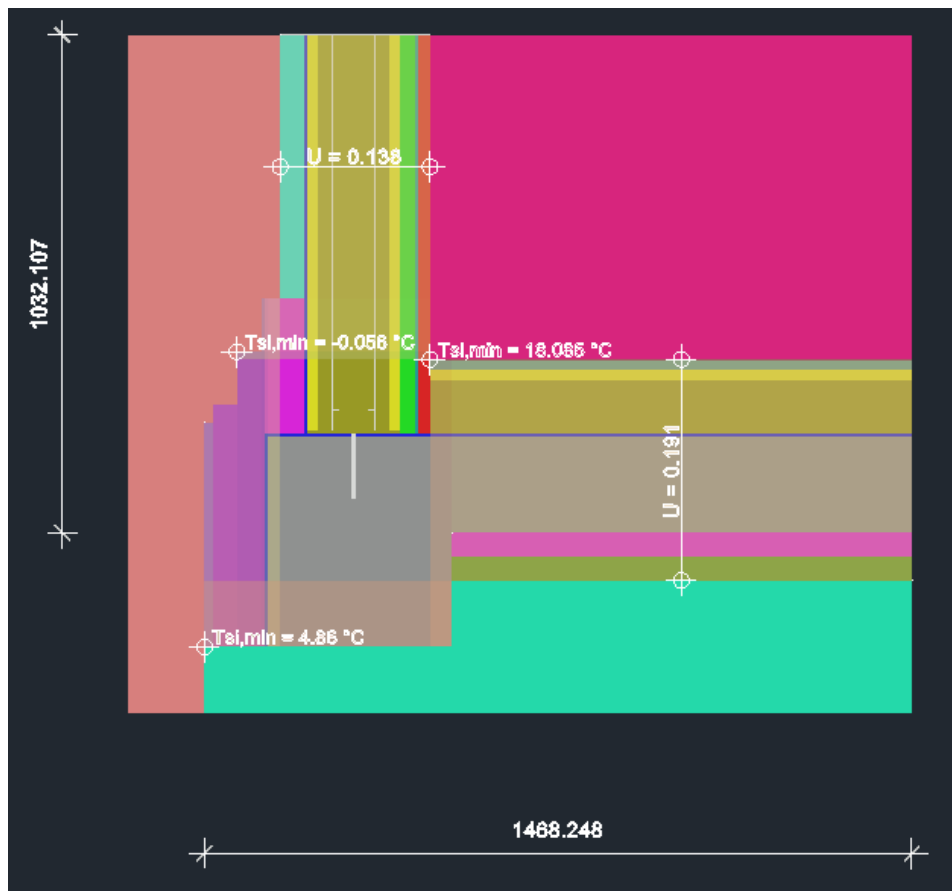
Spoj unutarnjeg i vanjskog zida	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\Psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	fRsi [-]
S mineralnom vunom	0,34977	0,034	19,145	0,957
S PUR pjenom	0,29712	0,035	19,286	0,964

### 11.1.3. Spoj vanjskog zida sa temeljnom pločom

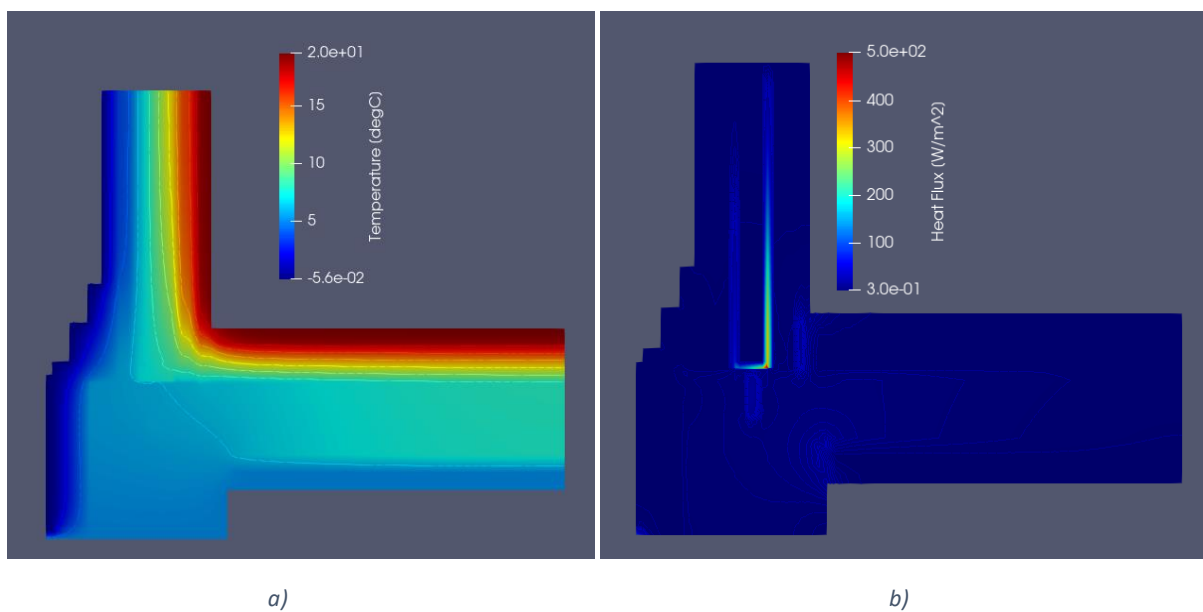


Slika 103: Detalj spoja vanjskog zida s temeljnom pločom

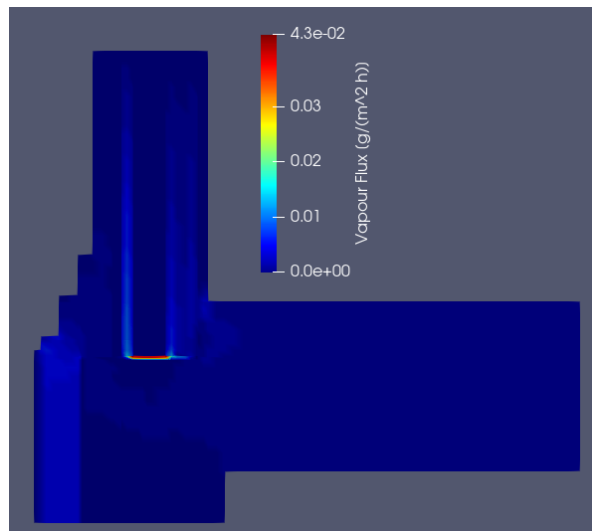
a) S mineralnom vunom kao glavnim izolacijskim materijalom



Slika 104: Geometrijski model spoja vanjskog zida s temeljom pločom, MW

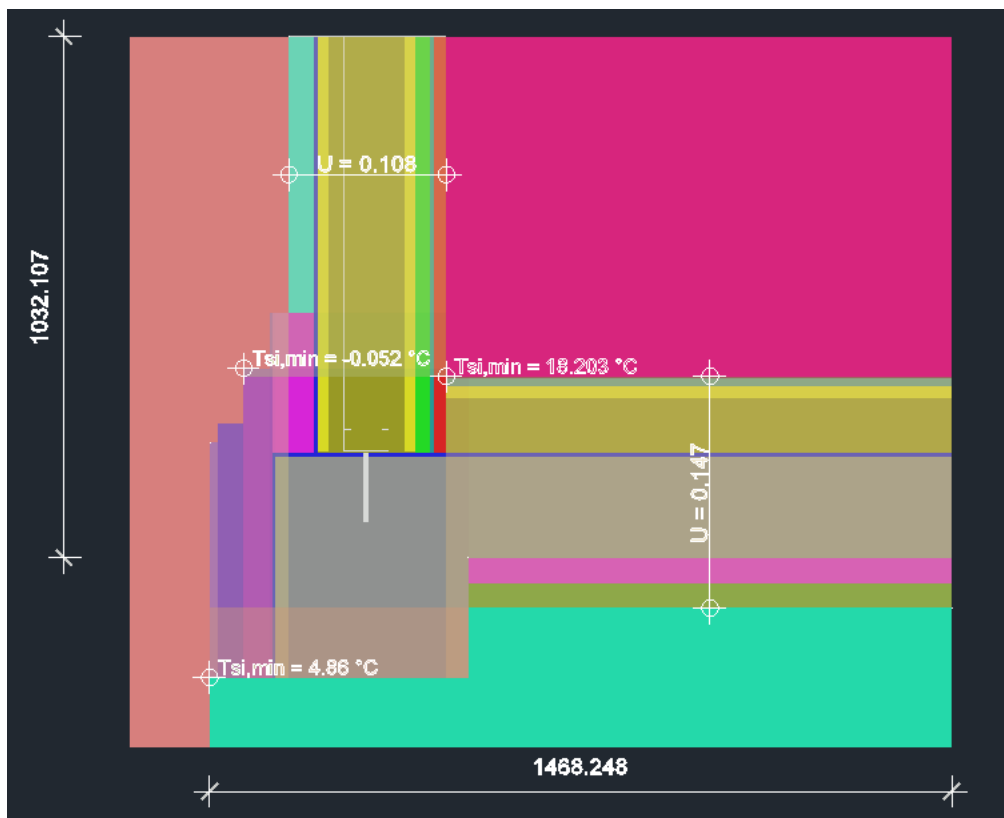


Slika 105: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, MW

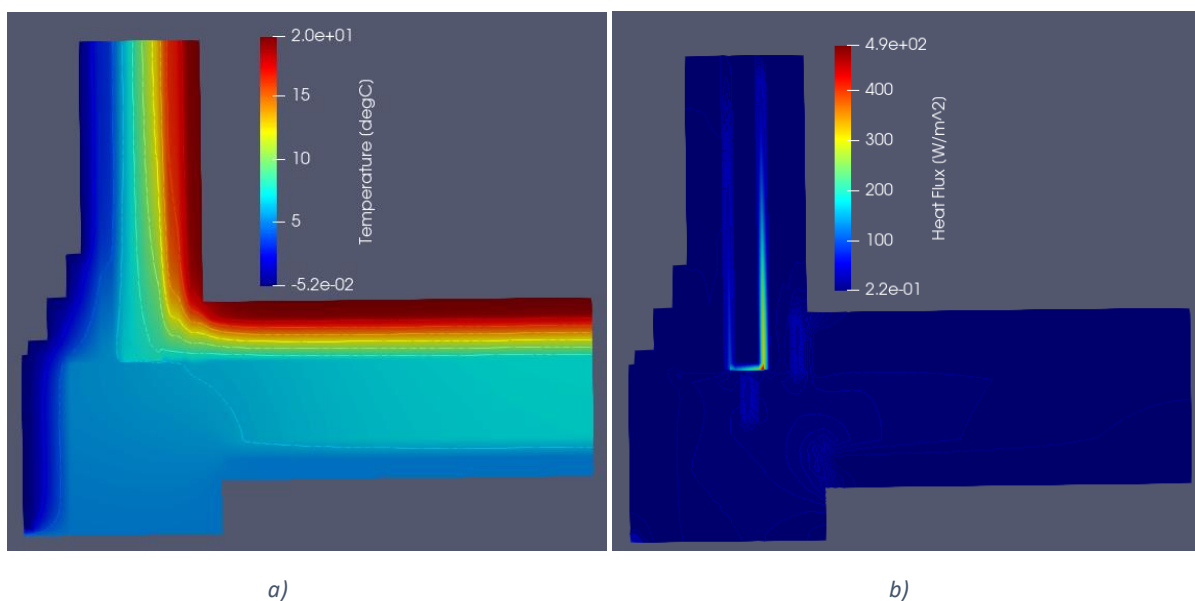


Slika 106: Distribucija vodene pare spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, MW

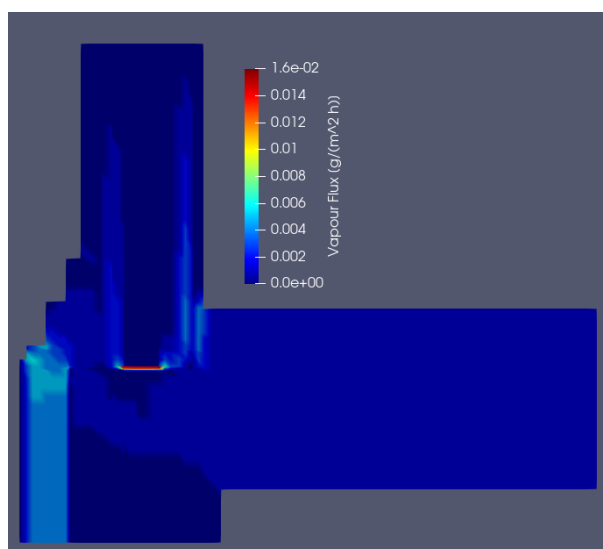
b) S PUR pjenom kao glavnim izolacijskim materijalom



Slika 107: Geometrijski model spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, PUR



Slika 108: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, PUR

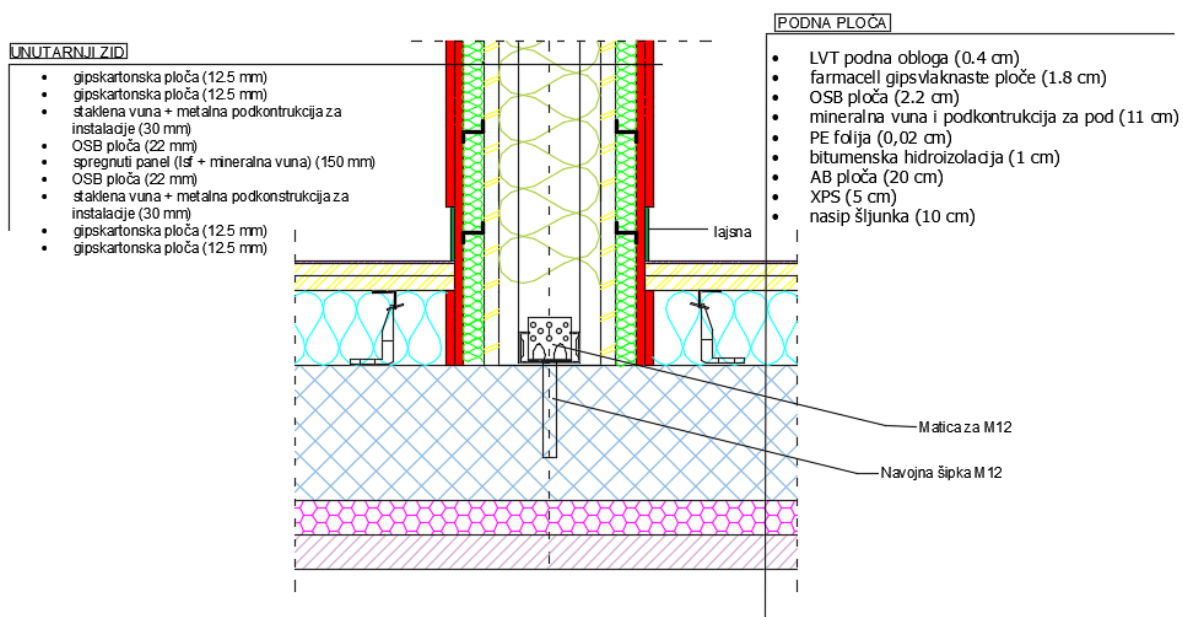


Slika 109: Distribucija vodenog toka spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, PUR

Tablica 9: Rezultati numeričke analize spoja vanjskog zida s temeljnom pločom

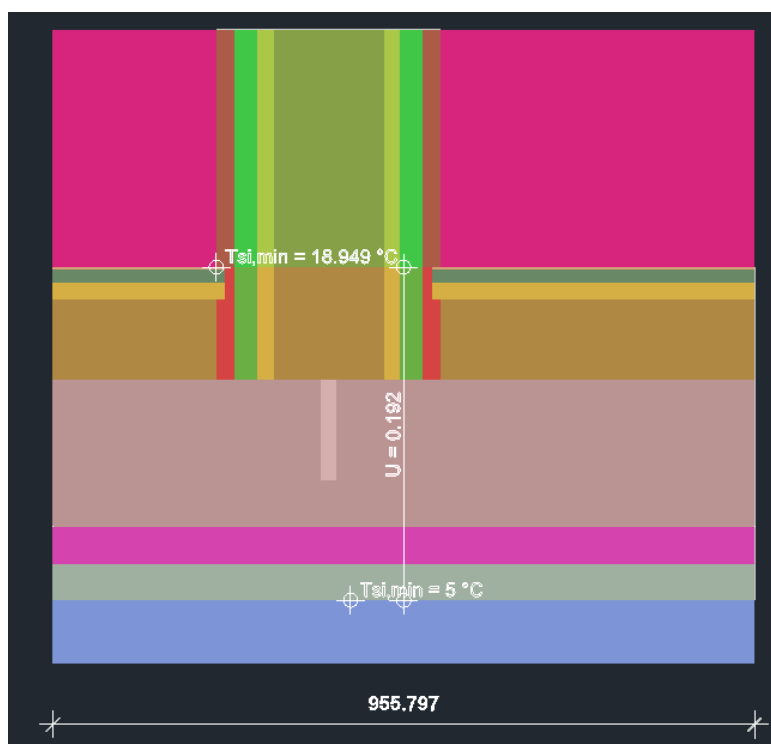
Spoj vanjskog zida s temeljnom pločom	$L_2D$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	fRsi [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,06957	0,014	18,065	0,904
	0,36716			0,972
<b>S PUR pjenom</b>	0,05600	0,025	18,203	0,910
	0,29583			0,972

### 11.1.4. Spoj unutarnjeg zida sa temeljnom pločom

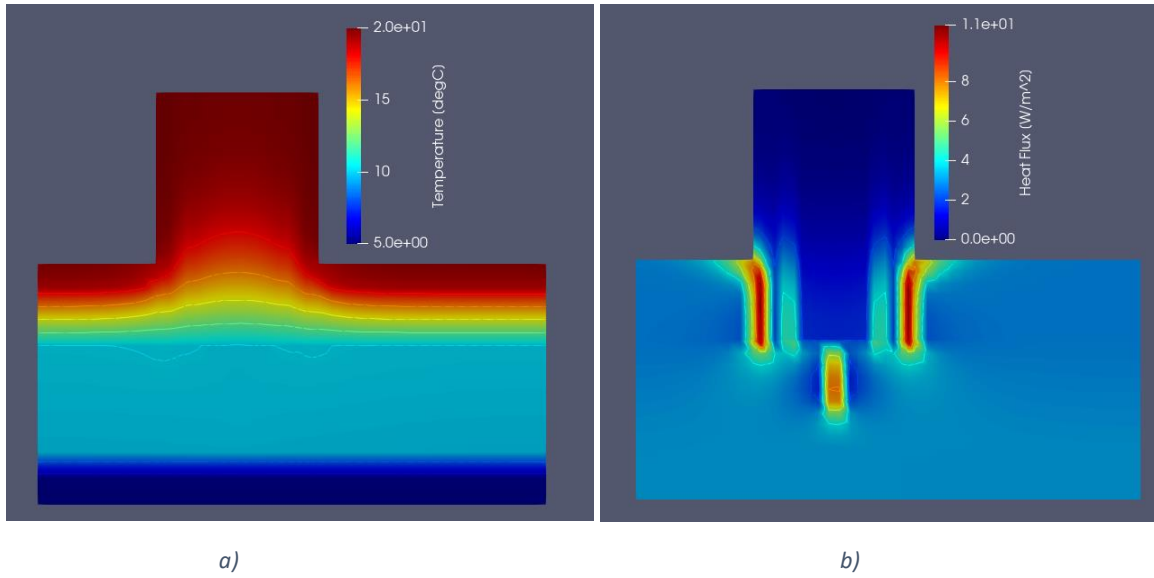


Slika 110: Detalj spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom

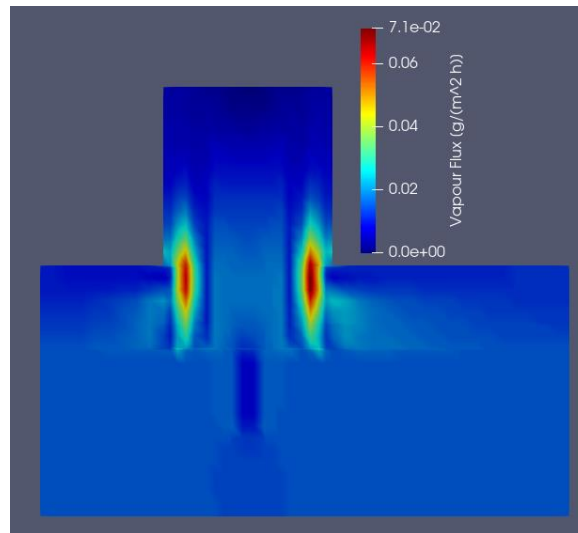
#### a) Upotreba mineralne vune kao glavnog izolacijskog materijala



Slika 111: Geometrijski model spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW



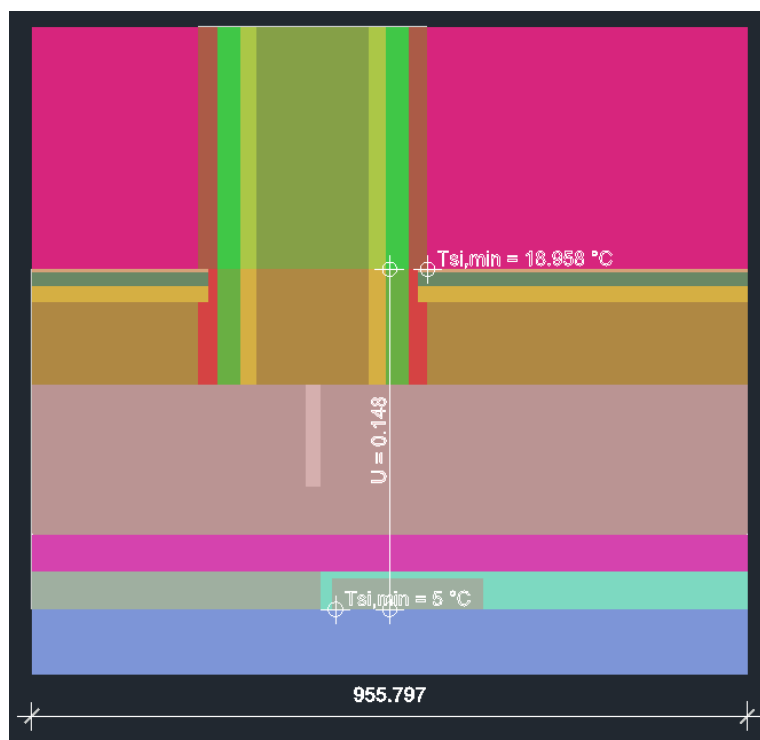
Slika 112: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW



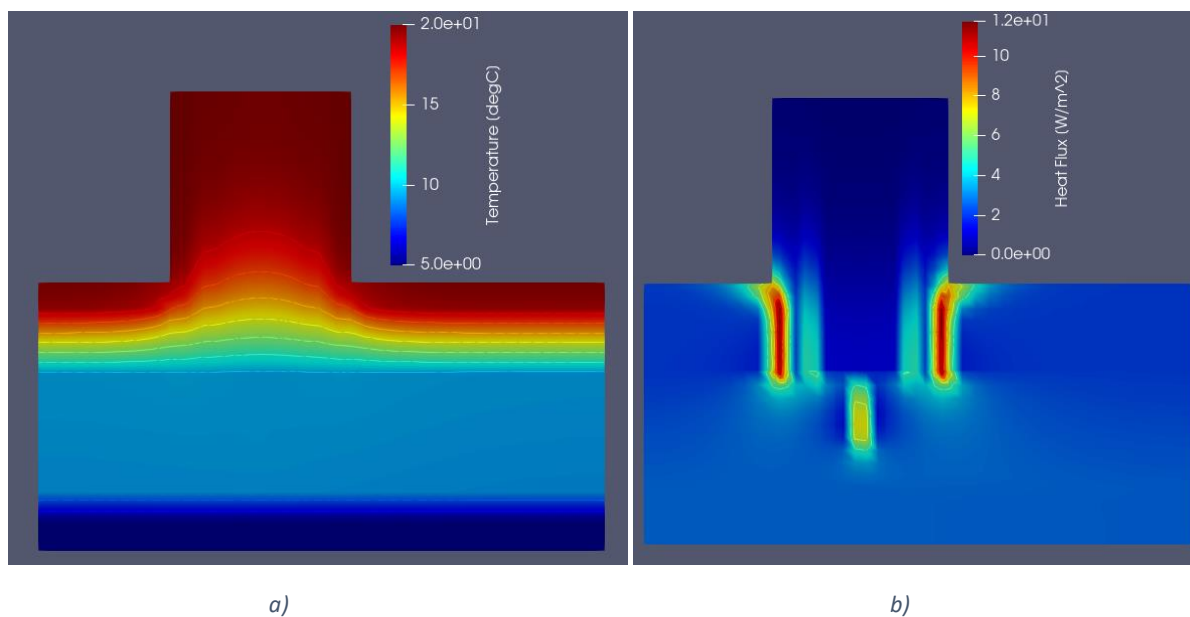
Slika 113: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW



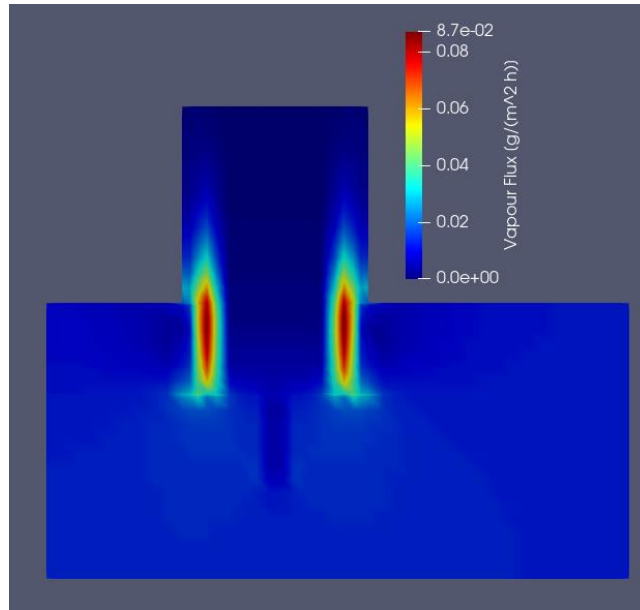
b) Upotreba Poliuretanske pjene kao glavnog izolacijskog materijala



Slika 114: Geometrijski model spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW



Slika 115: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, PUR

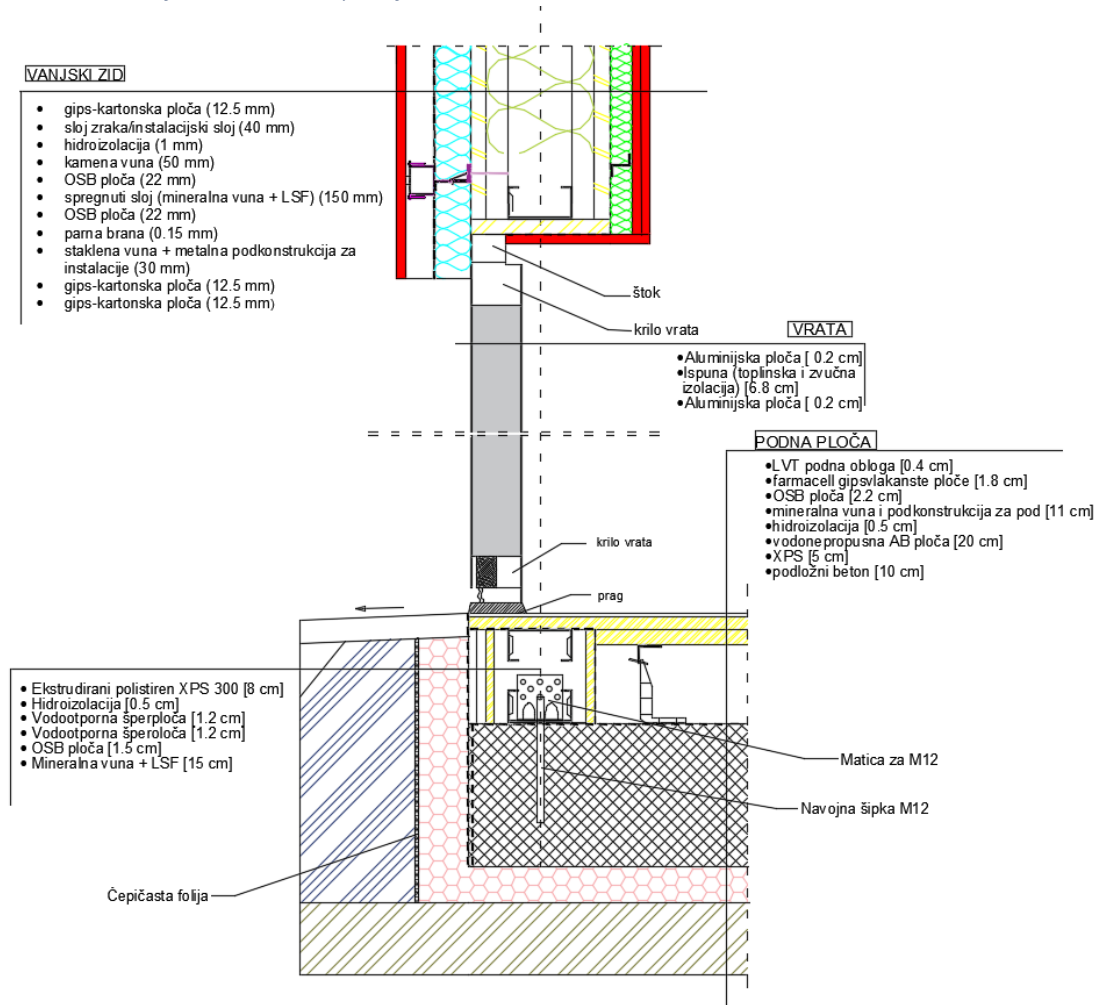


Slika 116: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, PUR

Tablica 10: Rezultati numeričke analize spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom

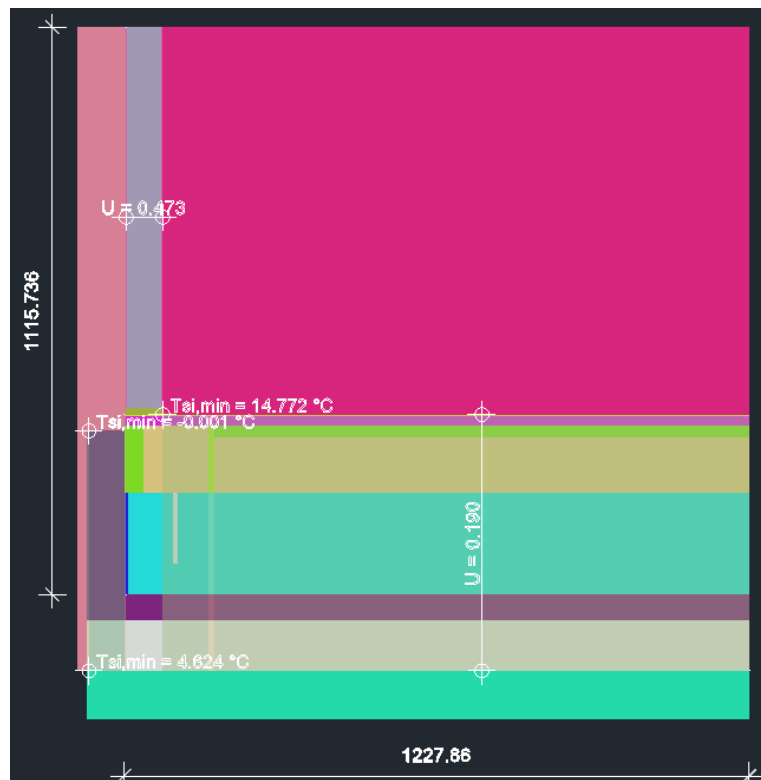
Spoj unutarnjeg zida s temeljnom pločom	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,19680	0,013	18,949	0,930
<b>S PUR pjenom</b>	0,16861	0,027	18,958	0,931

## Spoj vrata u temelju / vertikalni presjek vrata

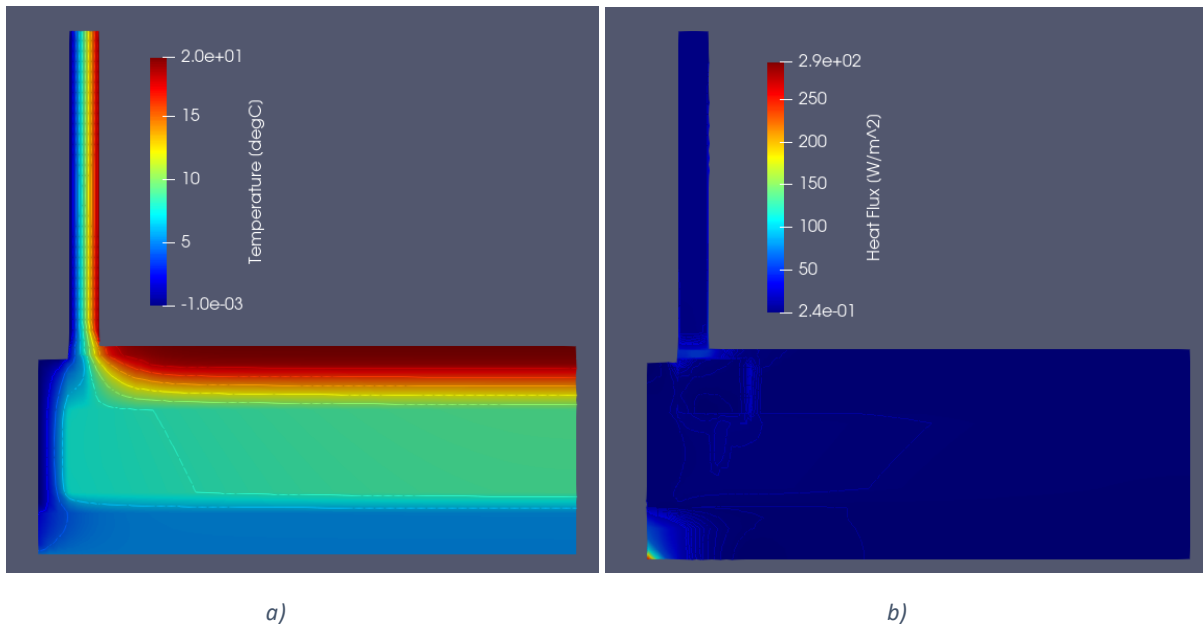


Slika 117: Detalj vrata u temelju

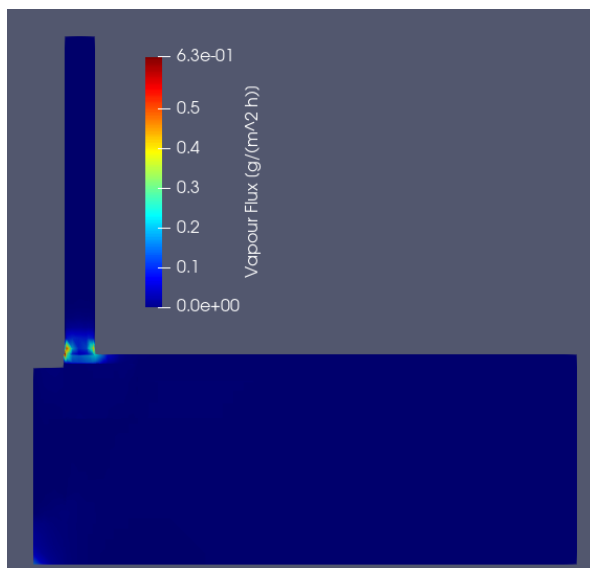
a) S mineralnom vunom kao glavnim izolacijskim materijalom



Slika 118: Geometrijski oblik vrata u temelju, MW

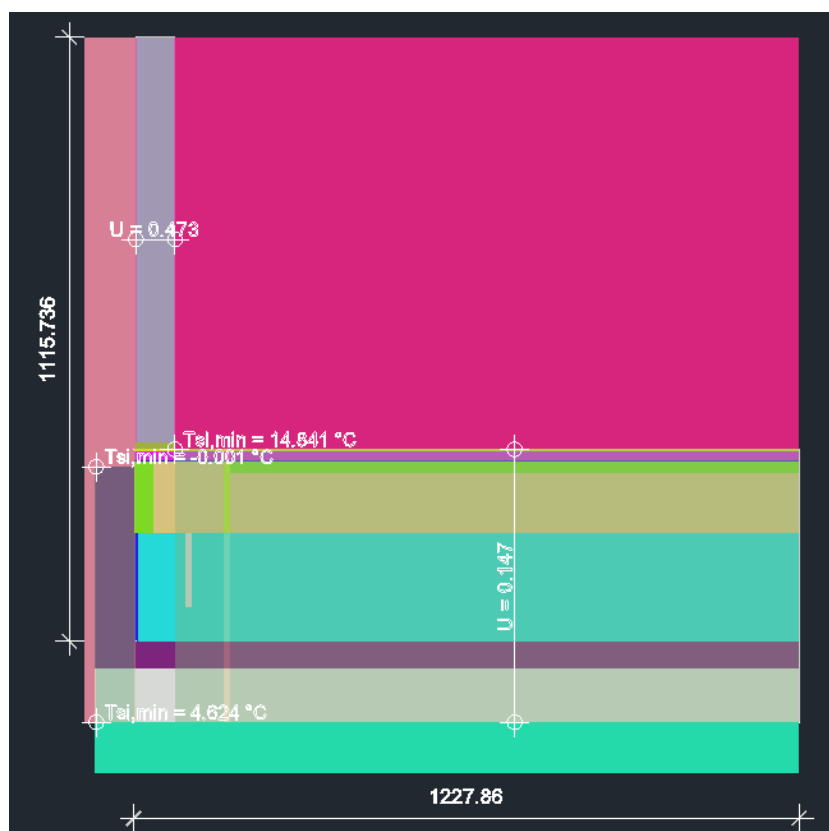


Slika 119: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka vrata u temelju, MW

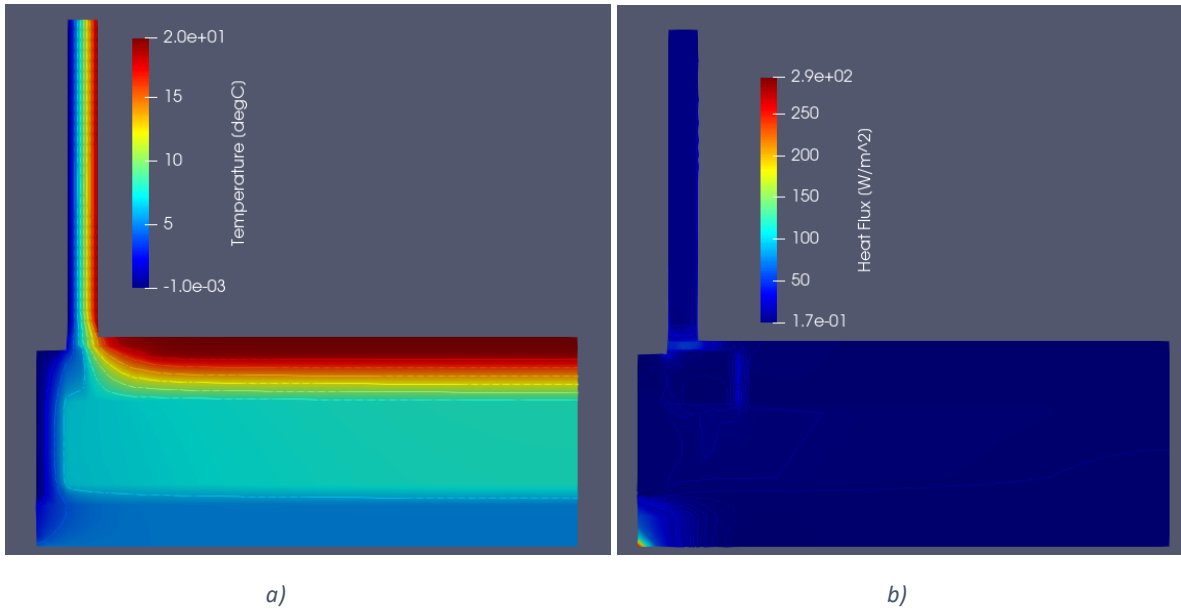


Slika 120: Distribucija toka vodene pare vrata u temelju, MW

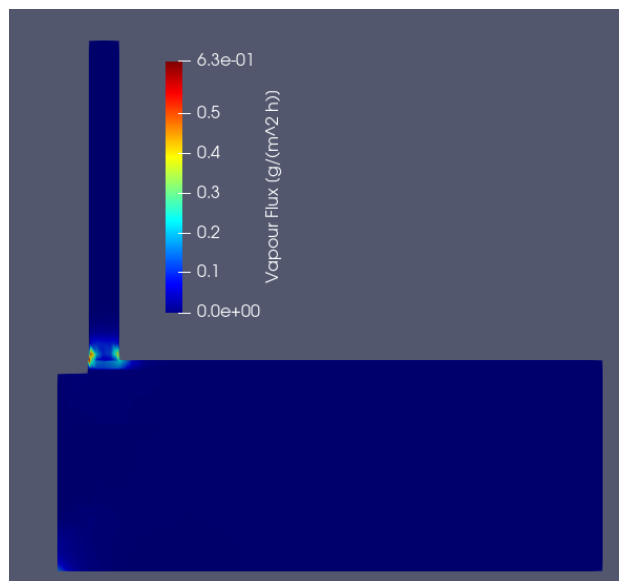
b) S poliuretanskom pjenom



Slika 121: Geometrijski oblik vrata u temelju, PUR



Slika 122: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka vrata u temelju, PUR

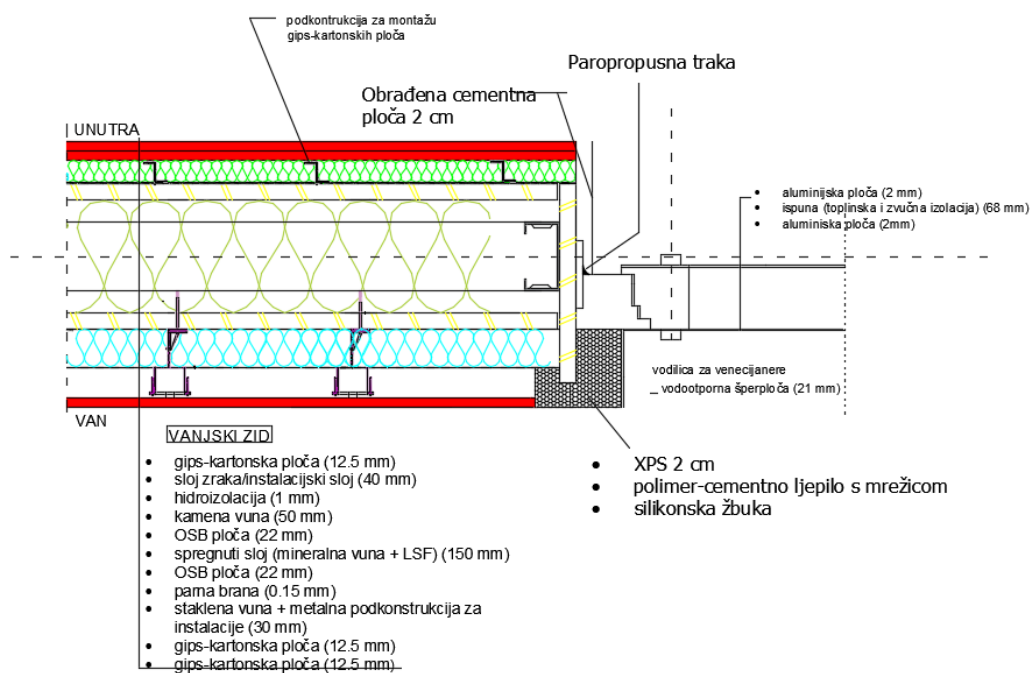


Slika 123: Distribucija toka vodene pare vrata u temelju, PUR

Tablica 11: Rezultati numeričke analize vrata u temelju

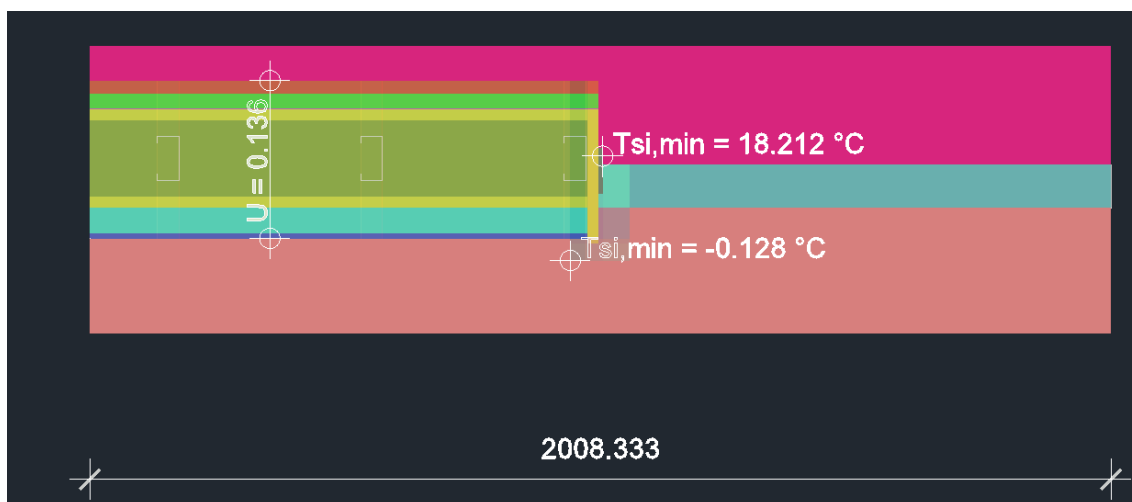
Vrata u temelju	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\Psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,39054	-0,078	14,772	0,739
				0,925
<b>S PUR pjenom</b>	0,33210	-0,08	14,541	0,742
				0,925

### 11.1.6. Horizontalni presjek vrata

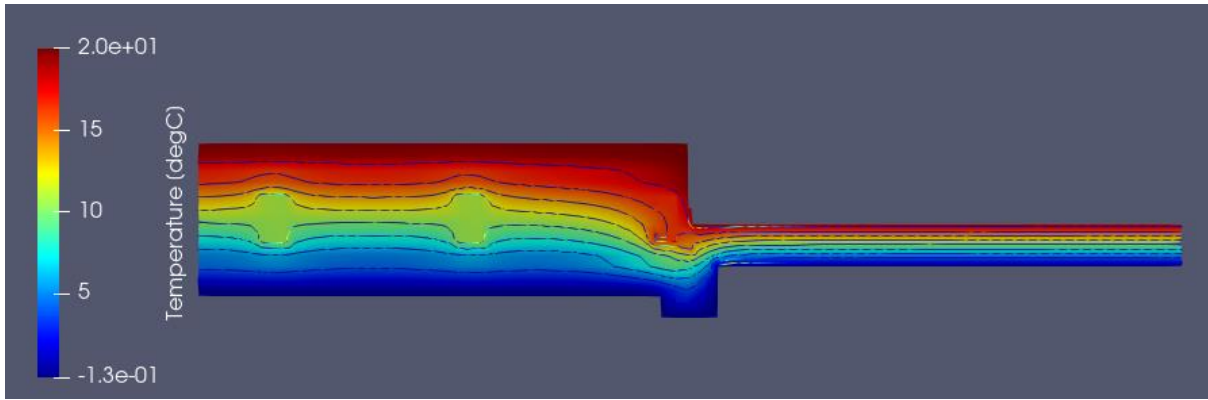


Slika 124: Detalj horizontalni presjek vrata

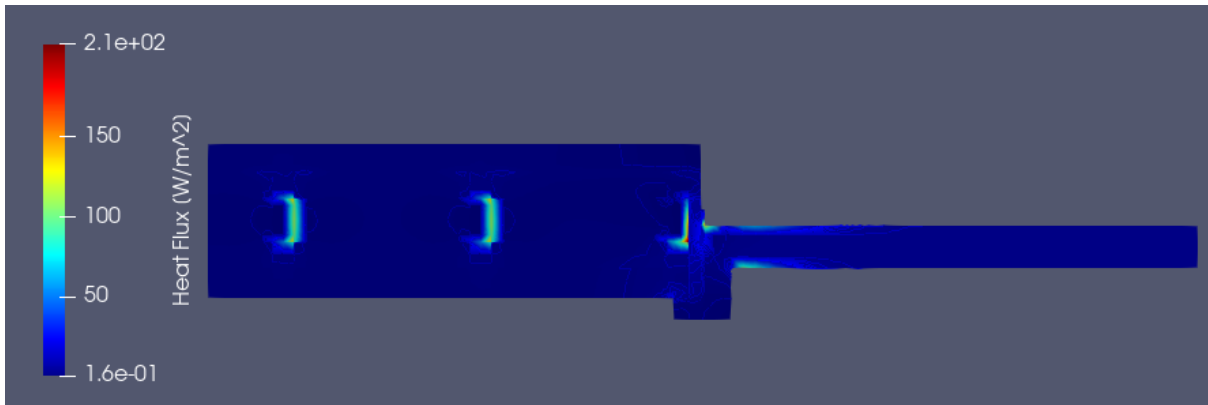
#### a) Upotreba mineralne vune kao glavnog izolacijskog materijala



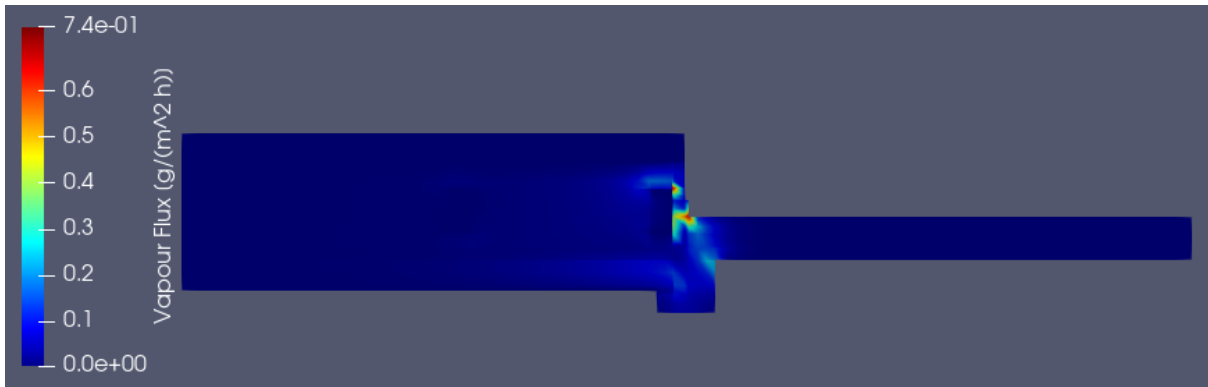
Slika 125: Geometrijski oblik horizontalnog presjeka vrata, MW



Slika 126: Distribucija temperature horizontalnog presjeka vrata, MW



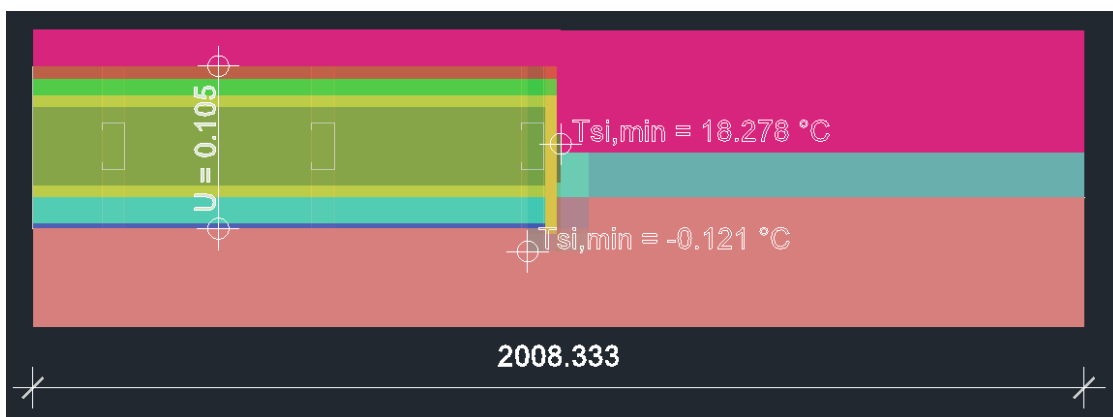
Slika 127: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka vrata, MW



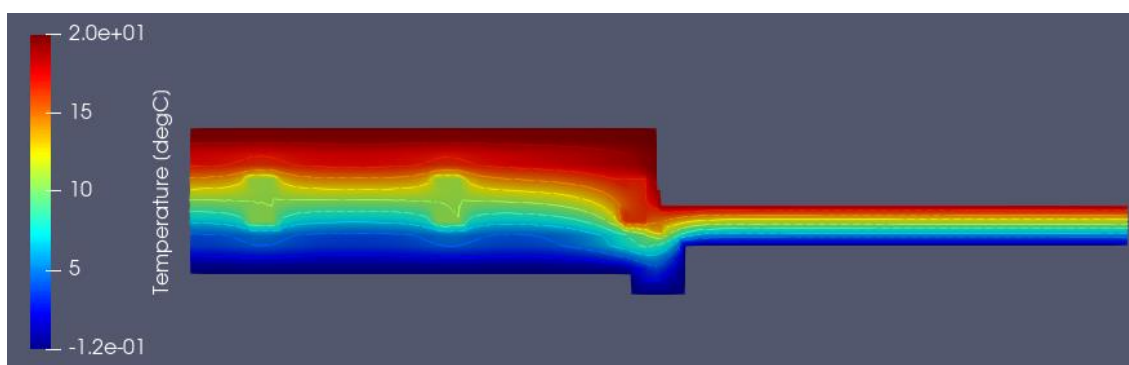
Slika 128: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka vrata, MW



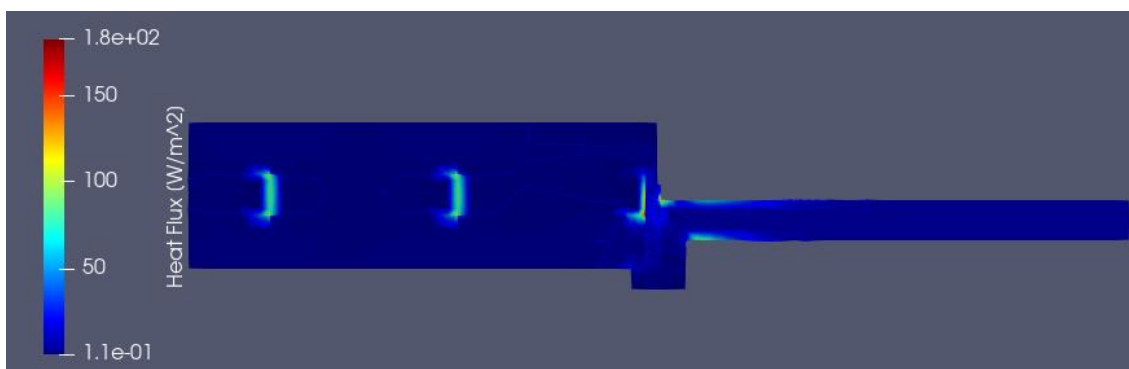
b) Upotreba poliuretanske pjene kao glavnog izolacijskog materijala



Slika 129: Geometrijski oblik horizontalnog presjeka vrata, PUR



Slika 130: Distribucija temperature horizontalnog presjeka vrata, PUR



Slika 131: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka vrata, PUR

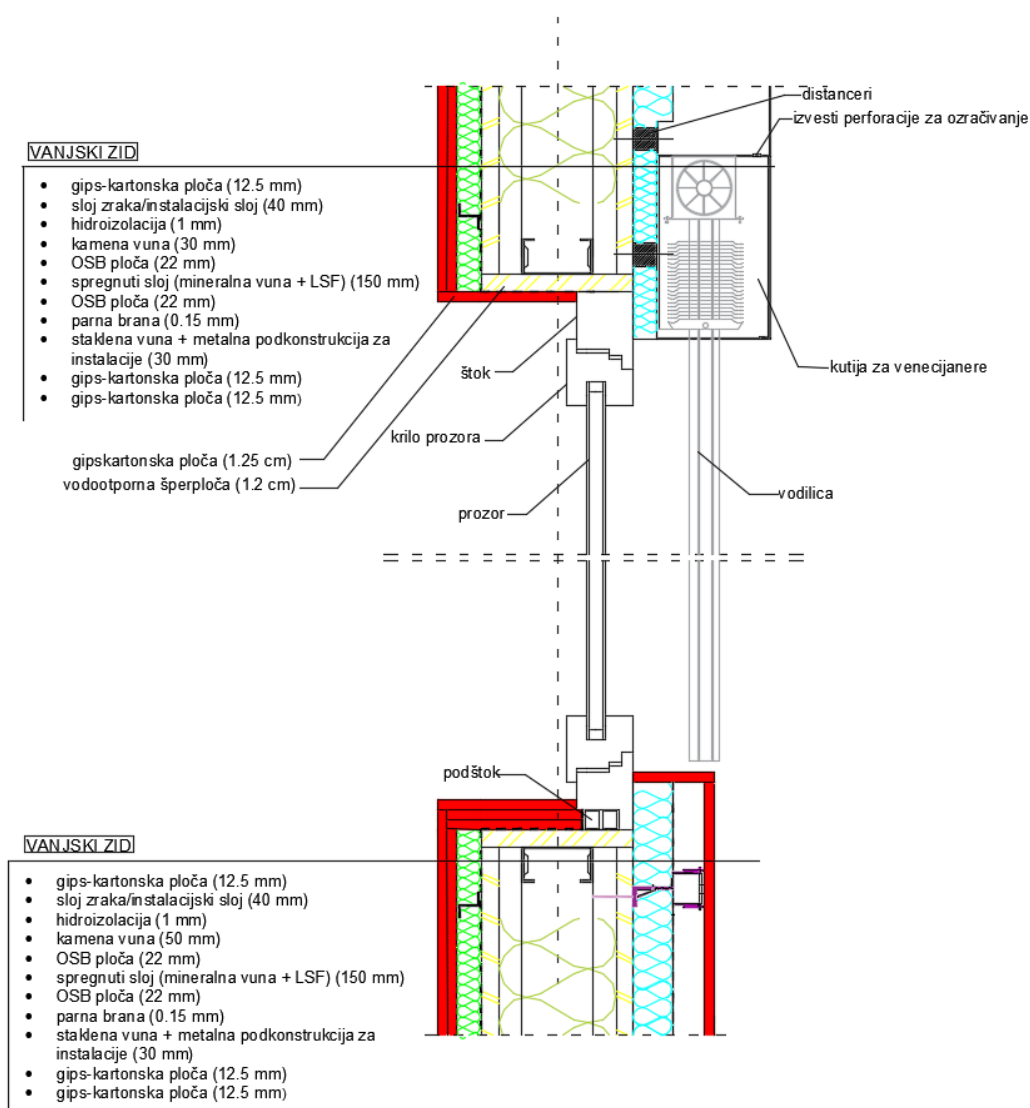


Slika 132: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka vrata, PUR

Tablica 12: Rezultati numeričke analize horizontalnog presjeka vrata

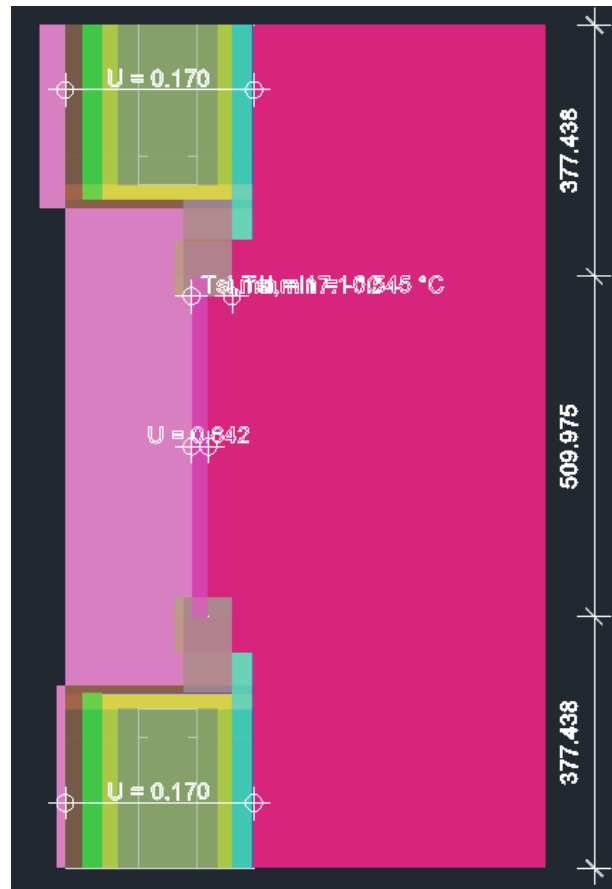
Spoj unutarnjeg zida s temeljnom pločom	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,56324	0,29	18,212	0,911
<b>S PUR pjenom</b>	0,53174	0,321	18,278	0,914

### 11.1.7. Vertikalni presjek prozora

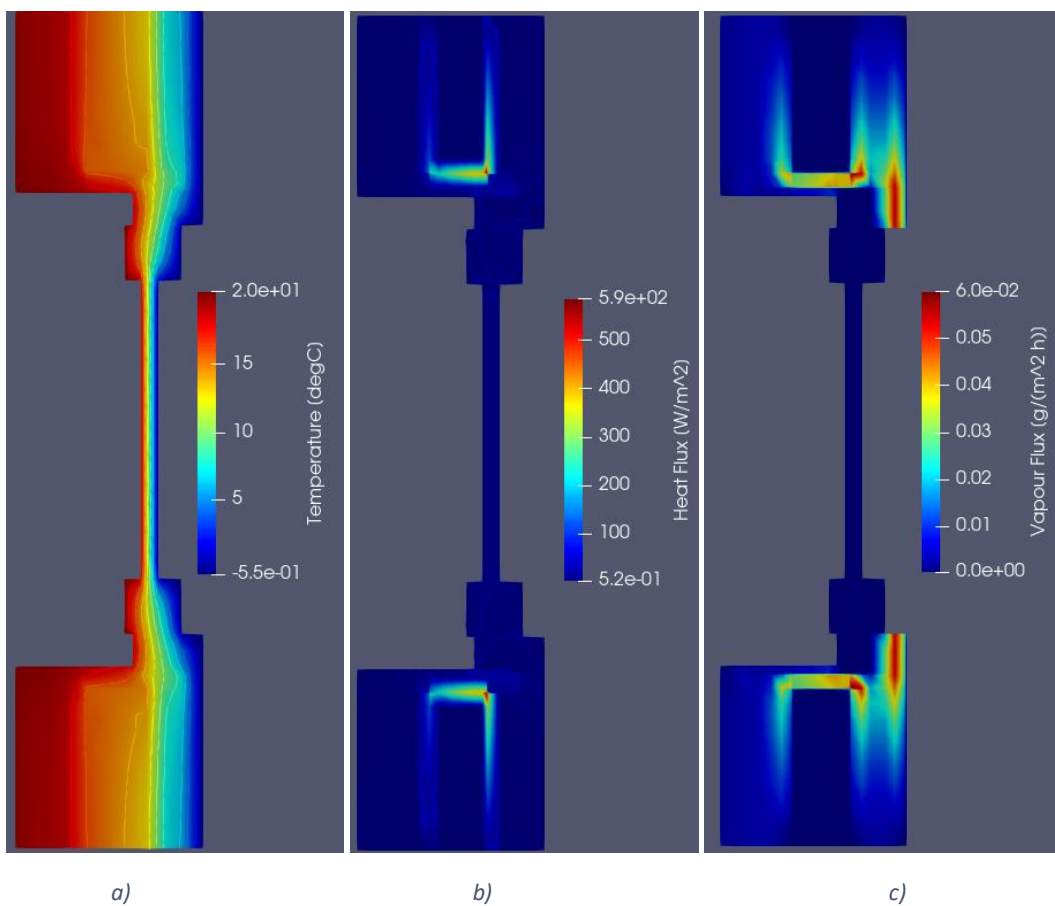


Slika 133: Detalj vertikalnog presjeka prozora

a) Mineralna vuna kao glavni izolacijski materijal

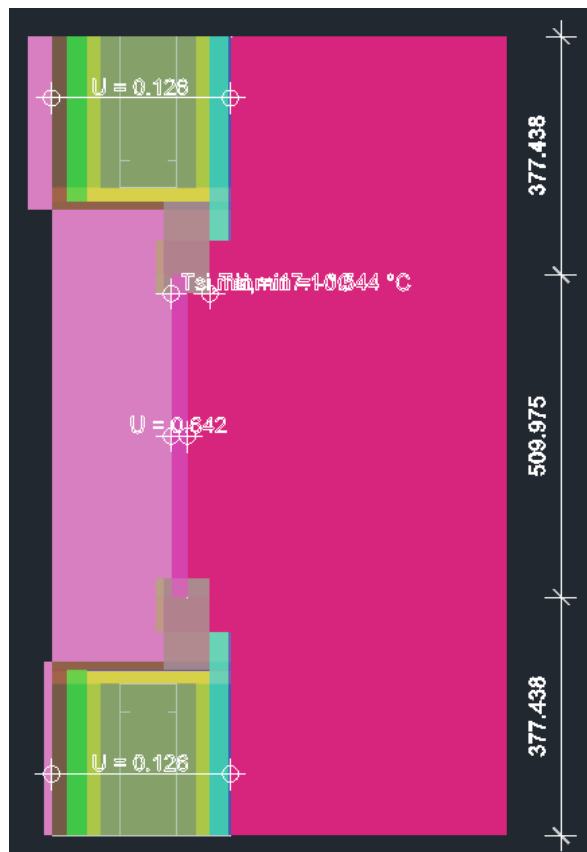


Slika 134: Geometrijski oblik vertikalnog presjeka vrata, MW

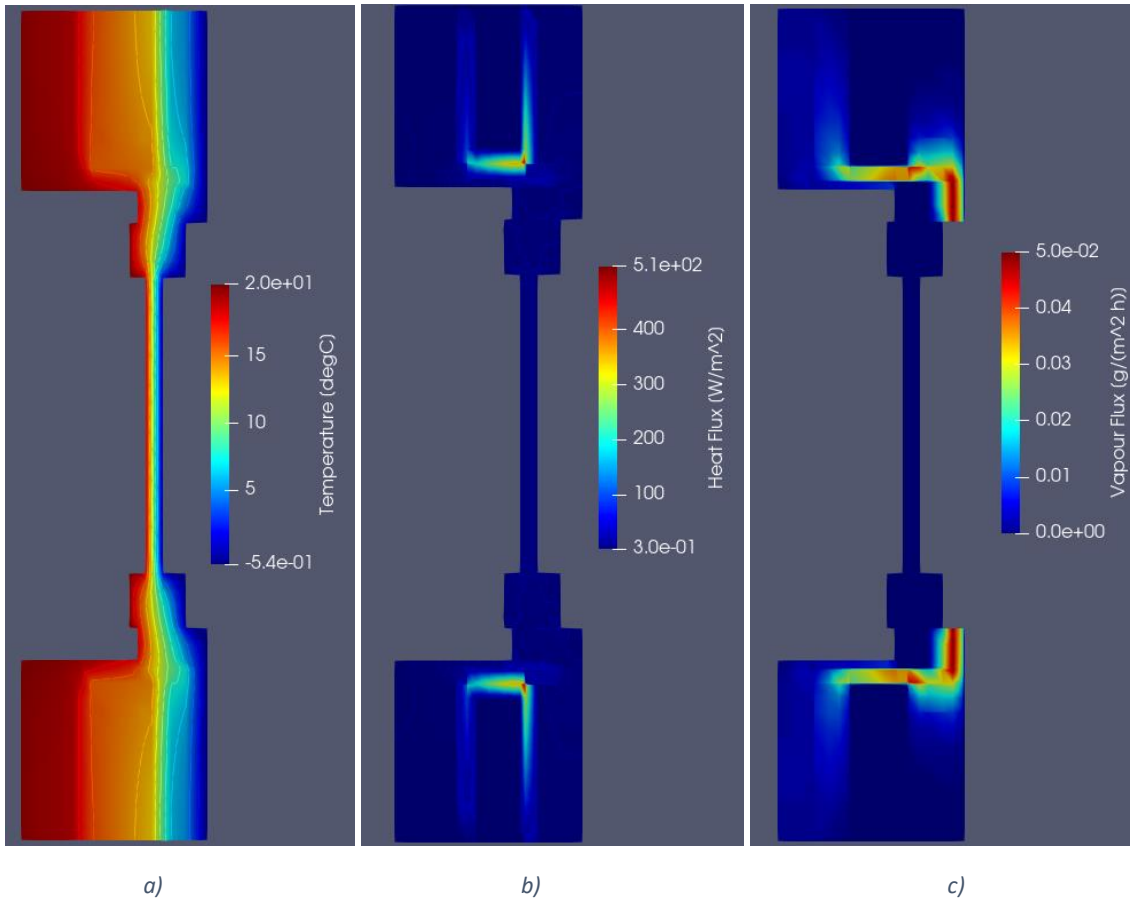


Slika 135: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka c) toka vodene pare vertikalnog presjeka prozora, MW

b) PUR pjena kao glavni izolacijski materijal



Slika 136: Geometrijski model vertikalnog presjeka prozora

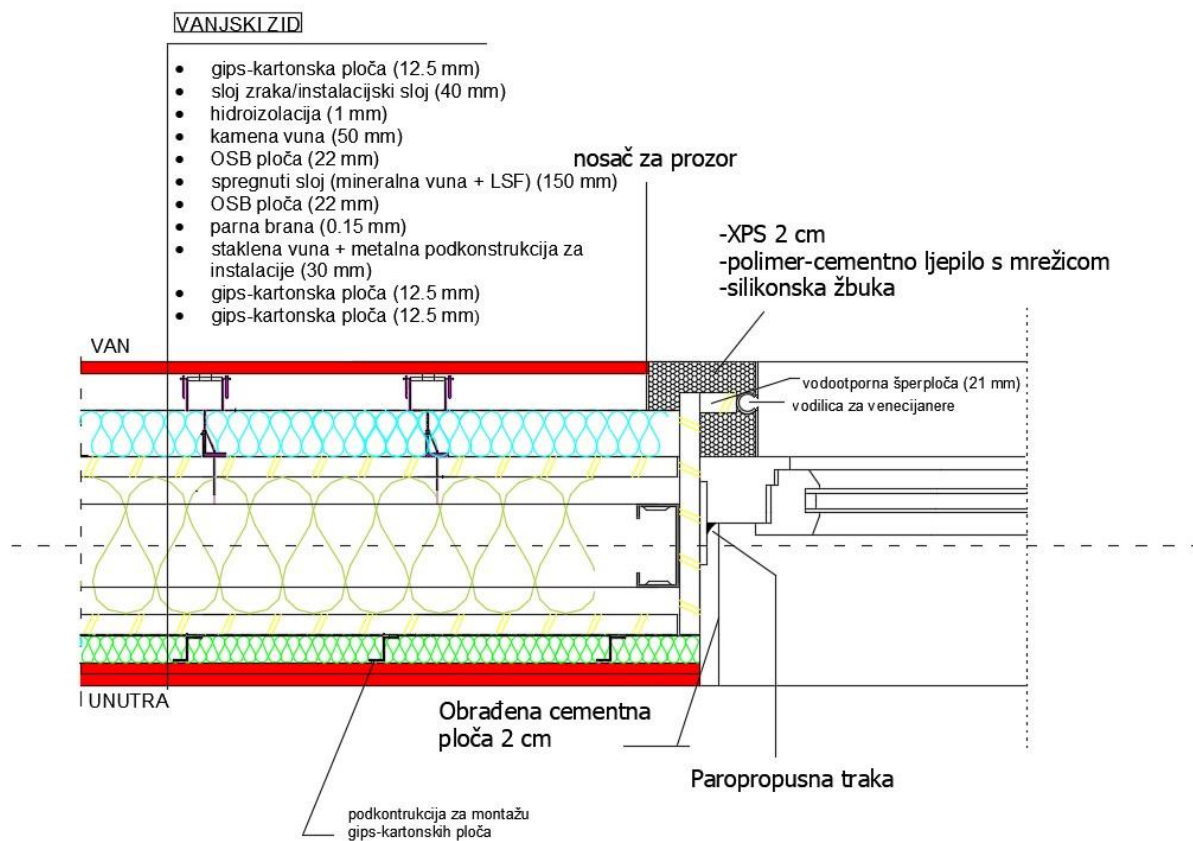


Slika 137: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka c) toka vodene pare vertikalnog presjeka prozora, PUR

Tablica 13: Rezultati numeričke analize vertikalnog presjeka prozora

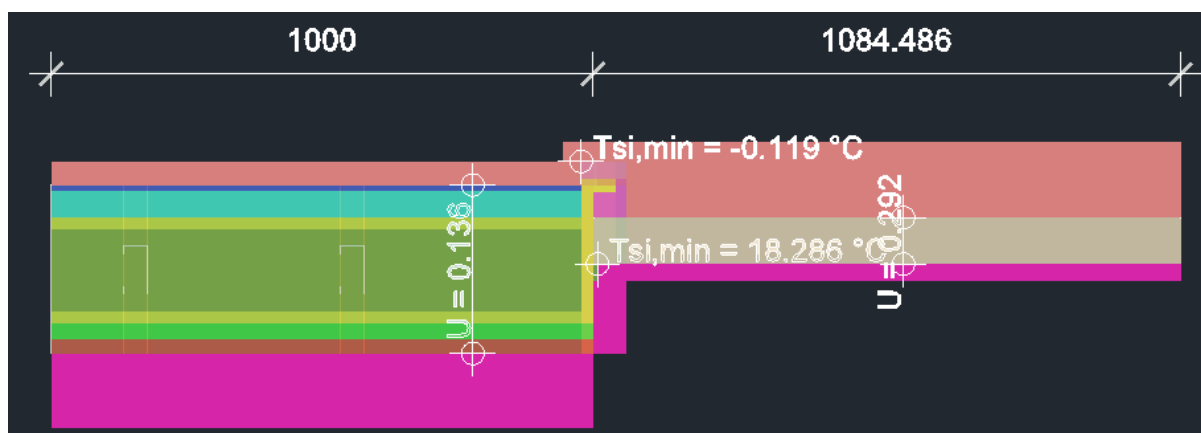
Vertikalni presjek prozora	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,59880	0,143	17,100	0,855
<b>S PUR pjenom</b>	0,57507	0,153	17,100	0,855

### 11.1.8. Horizontalni presjek prozora

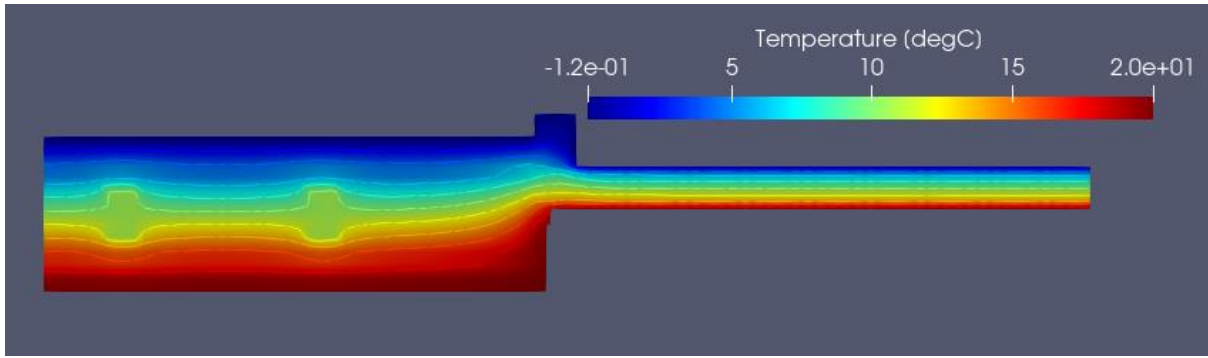


Slika 138: Detalj horizontalnog presjeka prozora

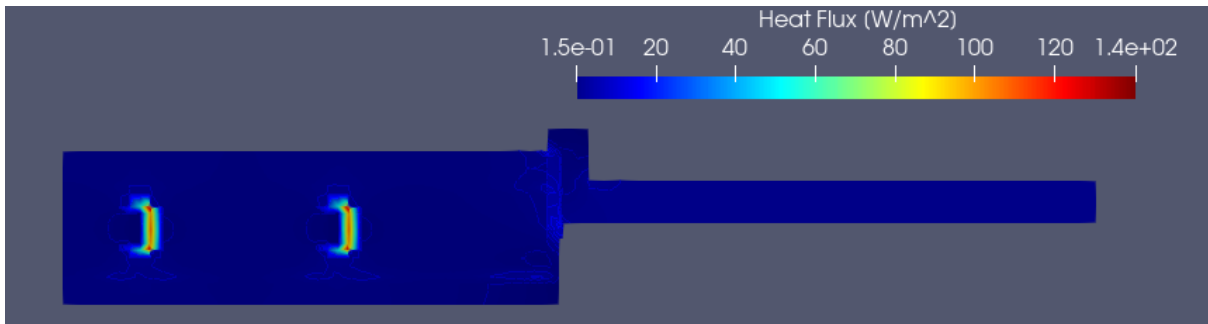
#### a) Mineralna vuna kao glavna toplinska izolacija



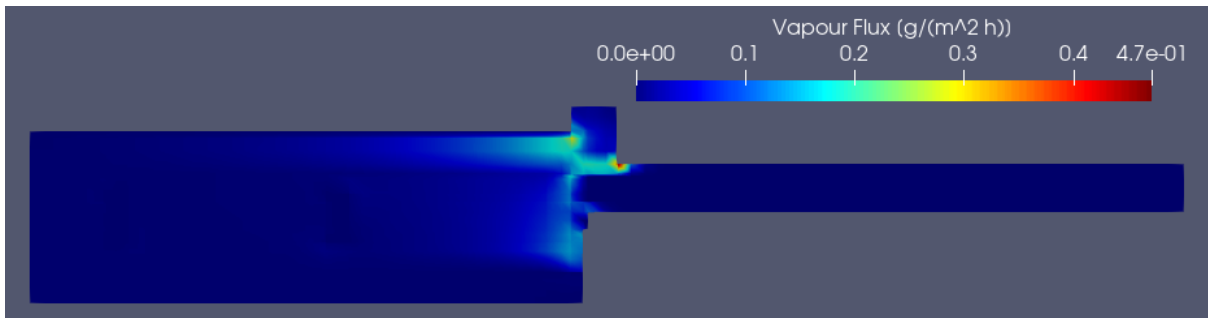
Slika 139: Geometrijski model horizontalnog presjeka prozora



Slika 140: Distribucija temperature horizontalnog presjeka prozora, MW

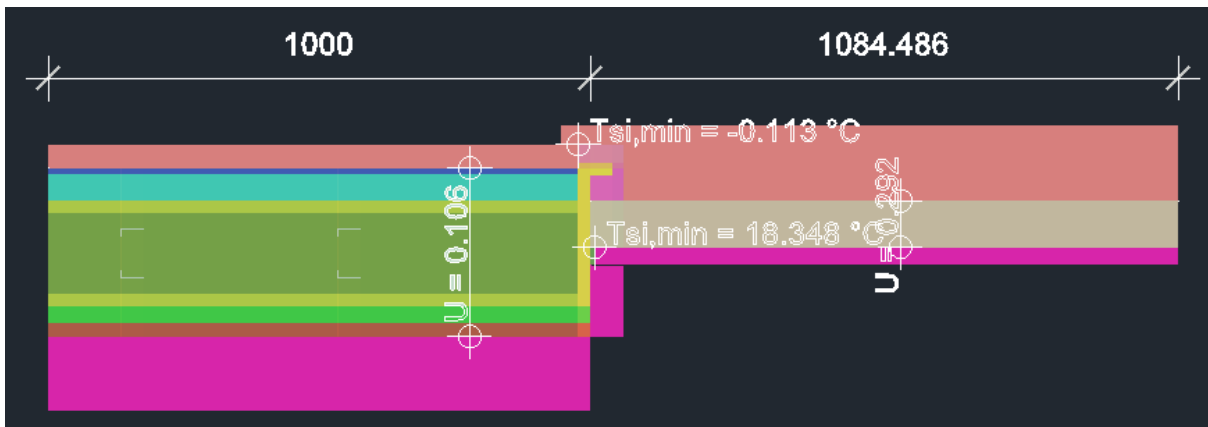


Slika 141: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka prozora, MW



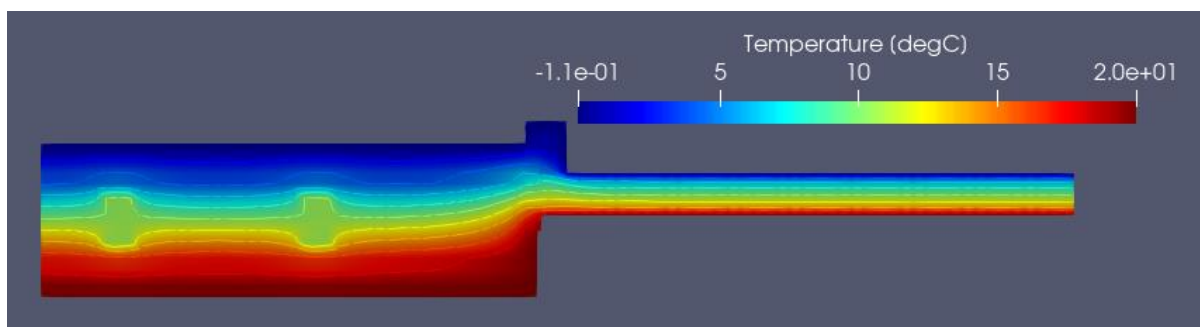
Slika 142: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka prozora, MW

b) PUR pjena kao glavna toplinska izolacija

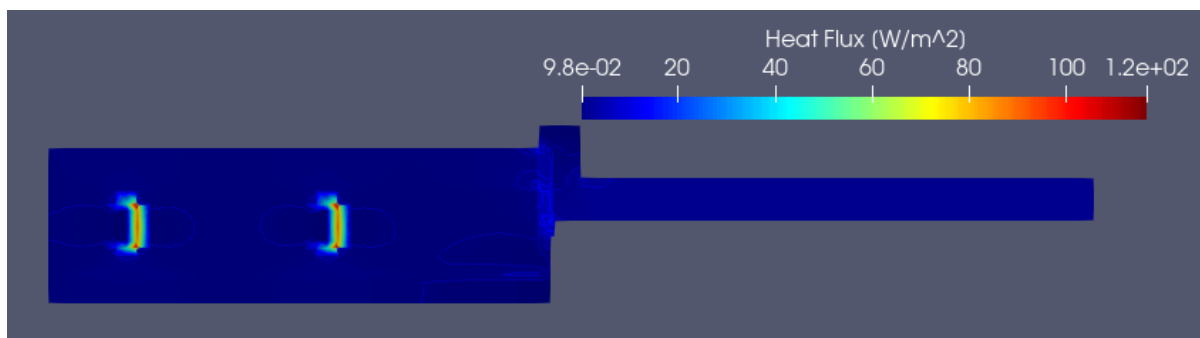


Slika 143: Geometrijski oblik horizontalnog presjeka prozora, PUR

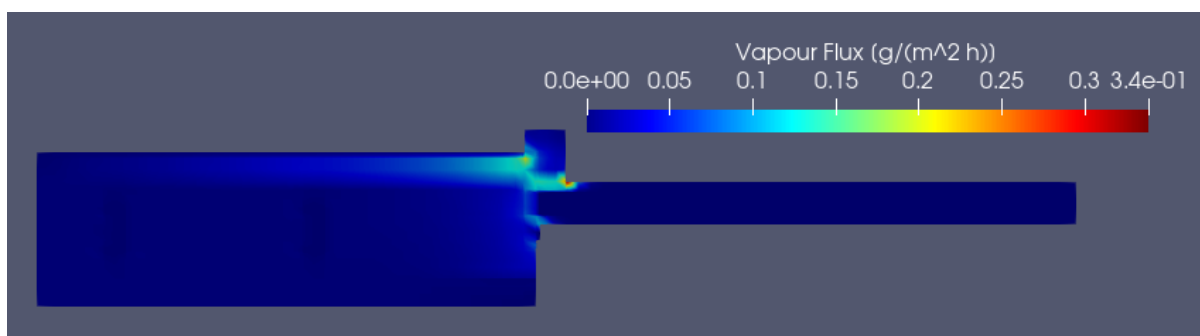




Slika 144: Distribucija temperature horizontalnog presjeka prozora, PUR



Slika 145: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka prozora, PUR

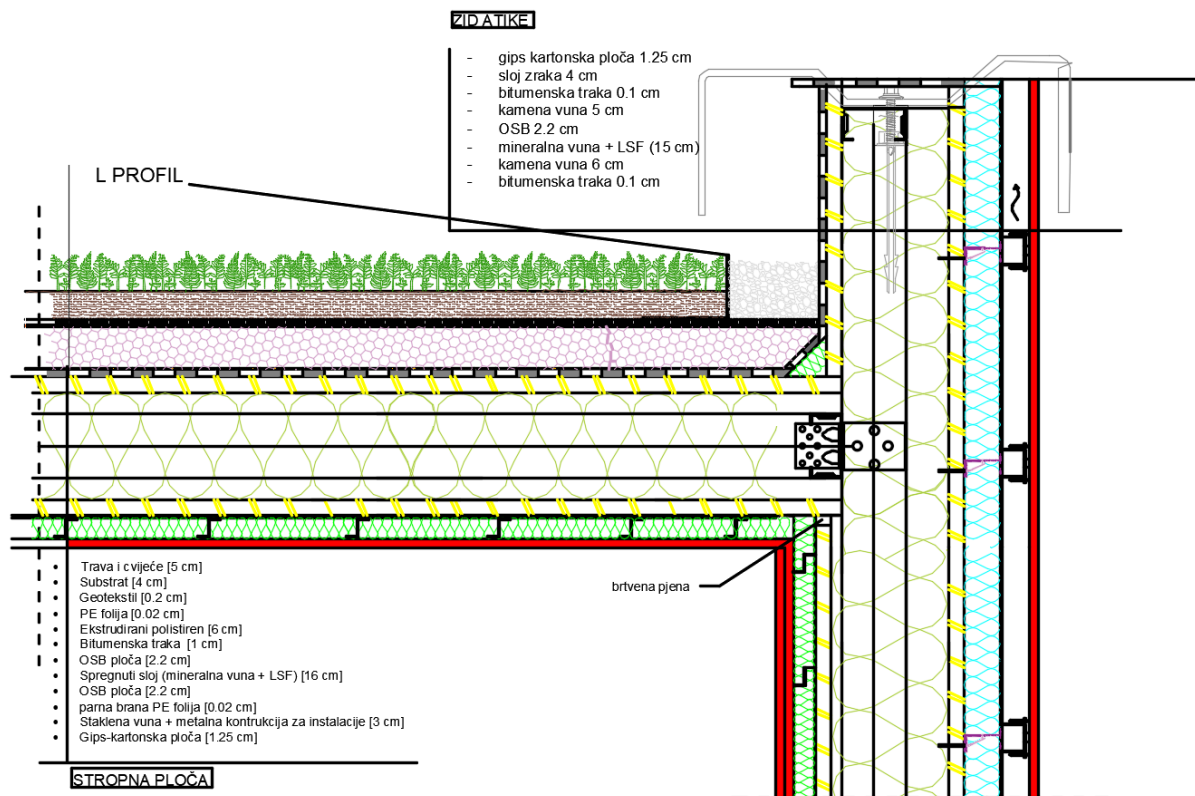


Slika 146: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka prozora, PUR

Tablica 14: Rezultati numeričke analize horizontalnog presjeka prozora

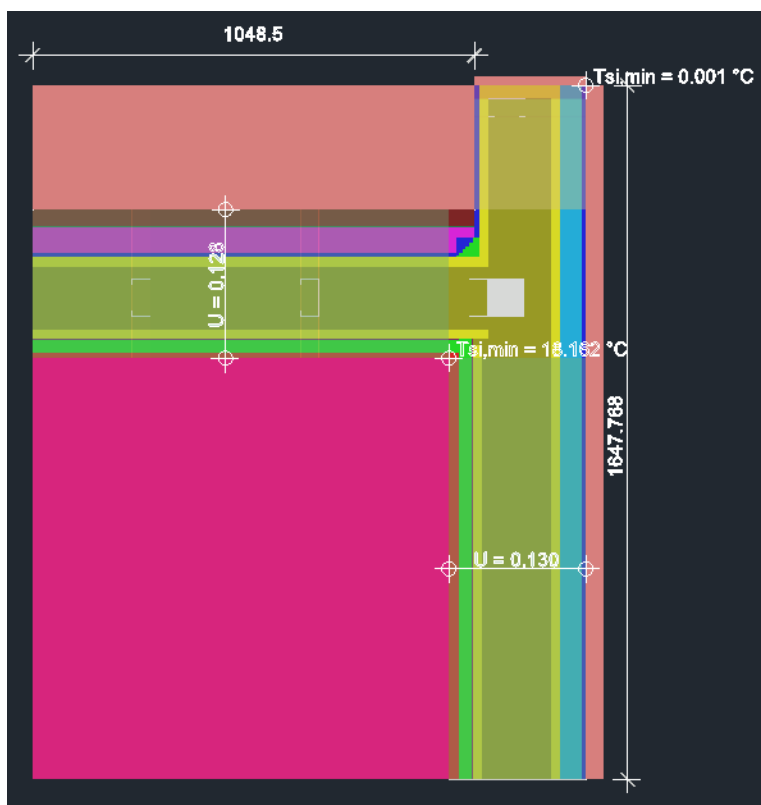
Horizontalni presjek prozora	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,48198	0,029	18,286	0,914
<b>S PUR pjenom</b>	0,45084	0,028	18,348	0,917

### 11.1.9. Detalj Atike

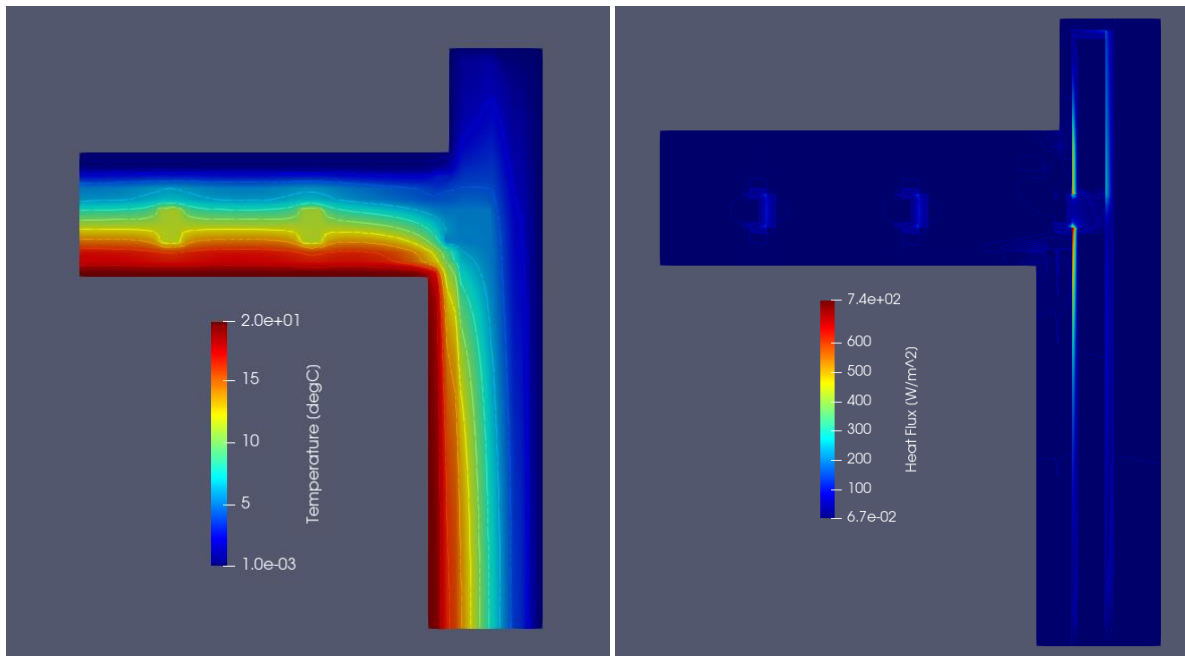


Slika 147: Detalj atike

#### a) Upotreba mineralne vune kao glavnog izolacijskog materijala



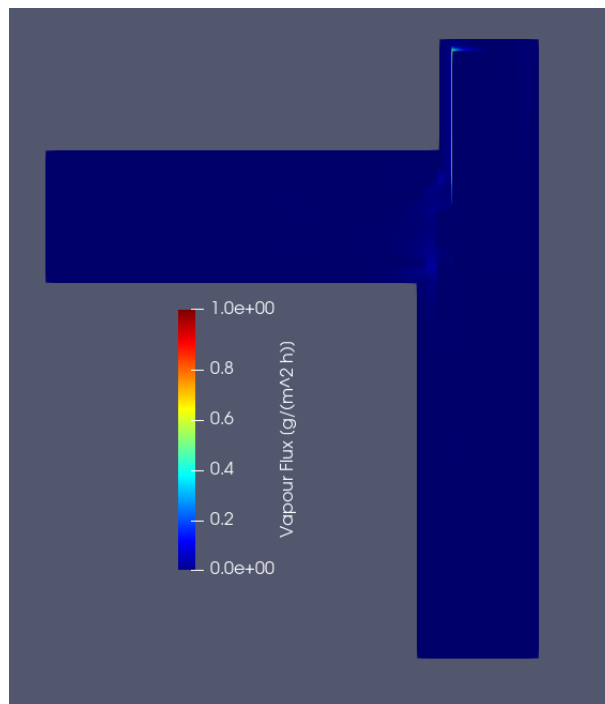
Slika 148: Geometrijski model atike, MW



a)

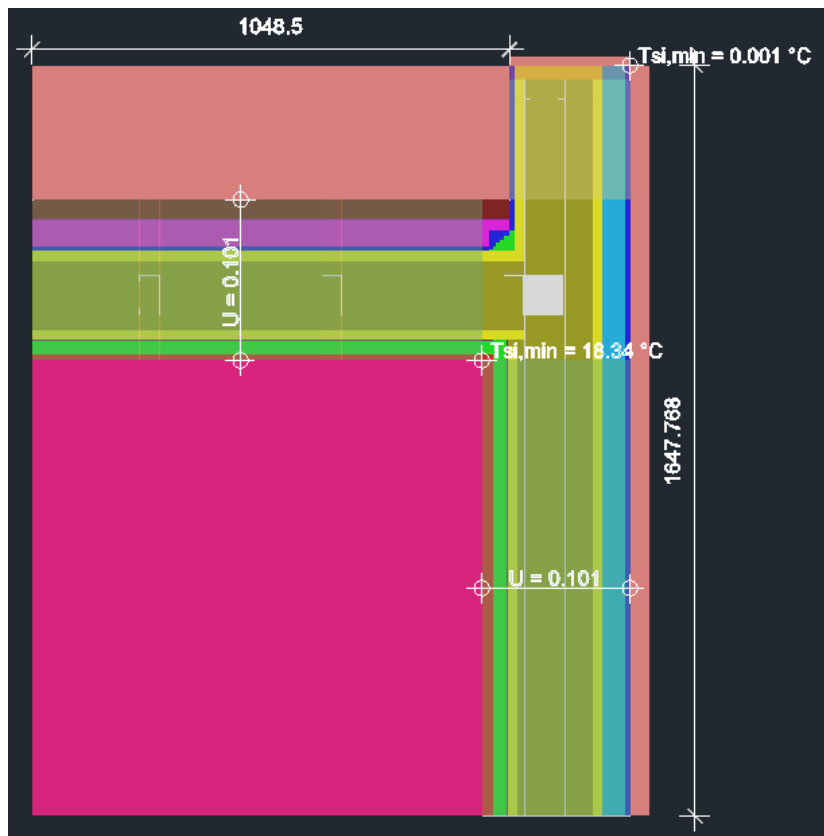
b)

Slika 149: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka Atike, MW

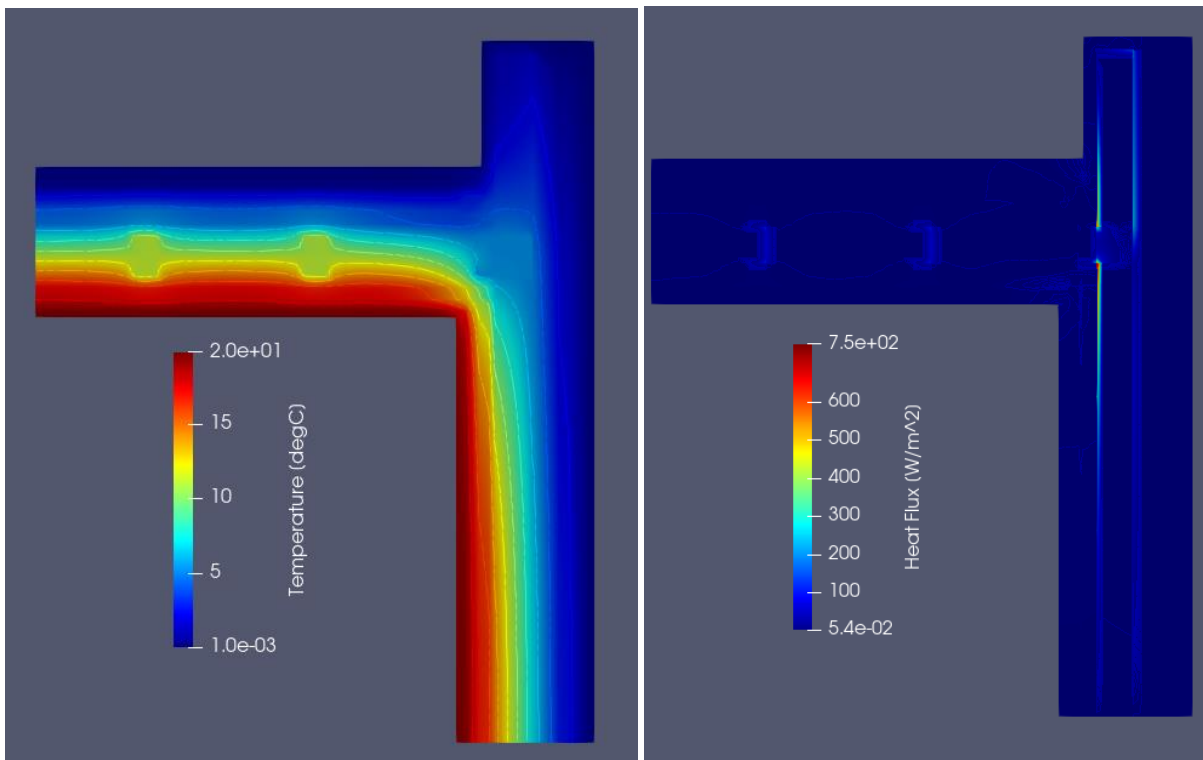


Slika 150: Distribucija toka vodene pare Atike, MW

b) Upotreba Poliuretanske pjene kao glavnog izolacijskog materijala



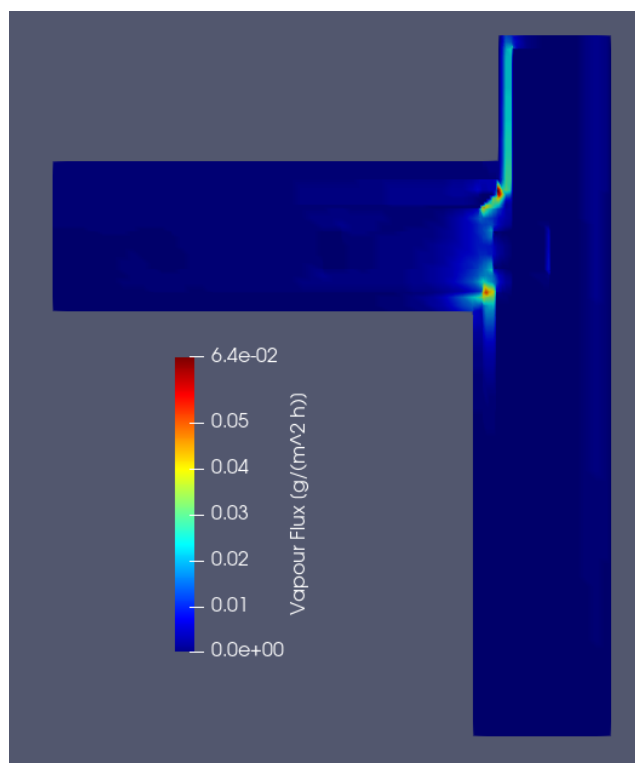
Slika 151: Geometrijski model Atike, PUR



a)

b)

Slika 152: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka Atike, PUR

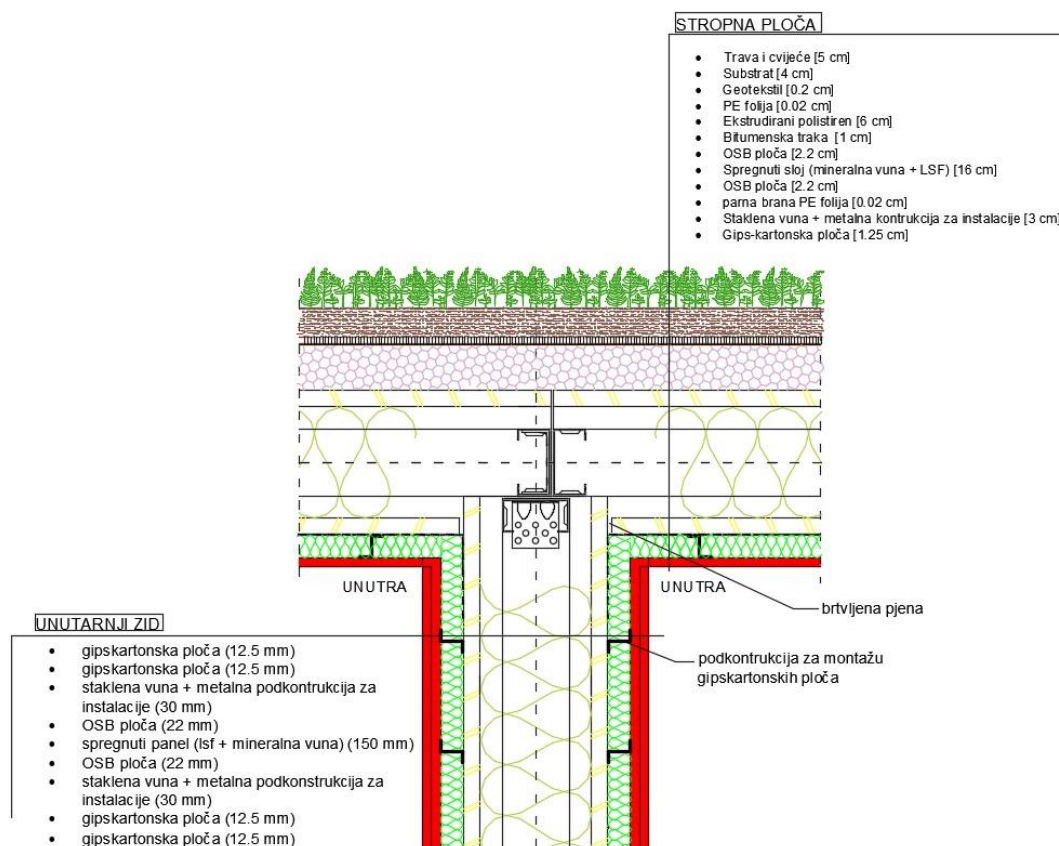


Slika 153: Distribucija toka vodene pare Atike, PUR

Tablica 15: Rezultati numeričke analize Atike

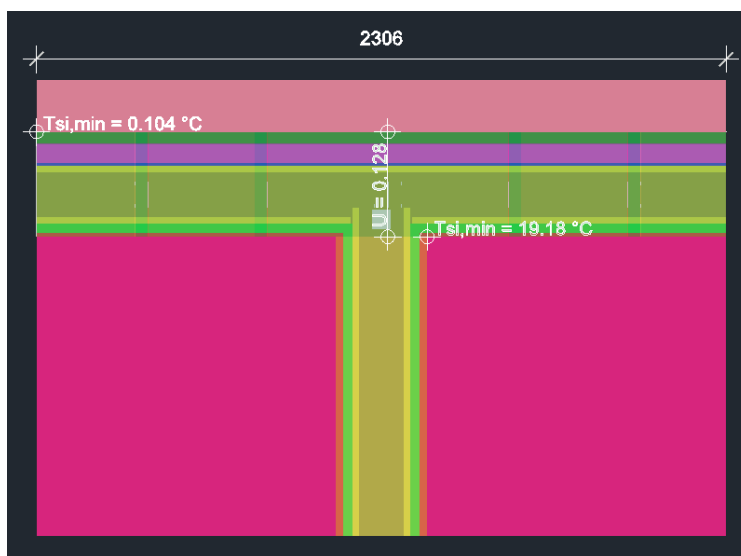
Atika	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,39054	0,042	18,162	0,908
<b>S PUR pjenom</b>	0,33210	0,060	18,340	0,917

### 11.1.10. Spoj unutarnjeg zida sa stropnom pločom

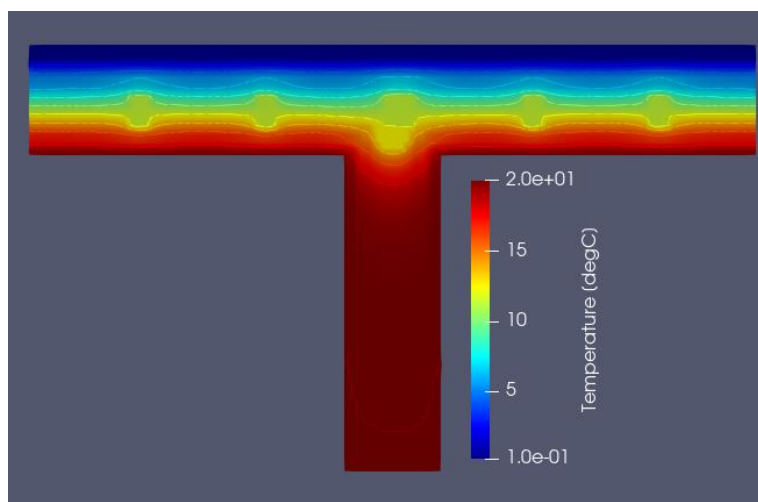


Slika 154: Detalj spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom

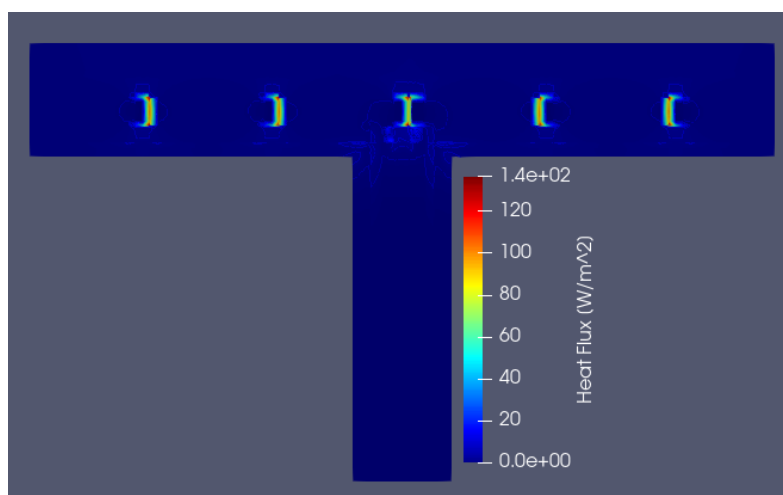
#### a) Upotreba mineralne vune kao glavnog izolacijskog materijala



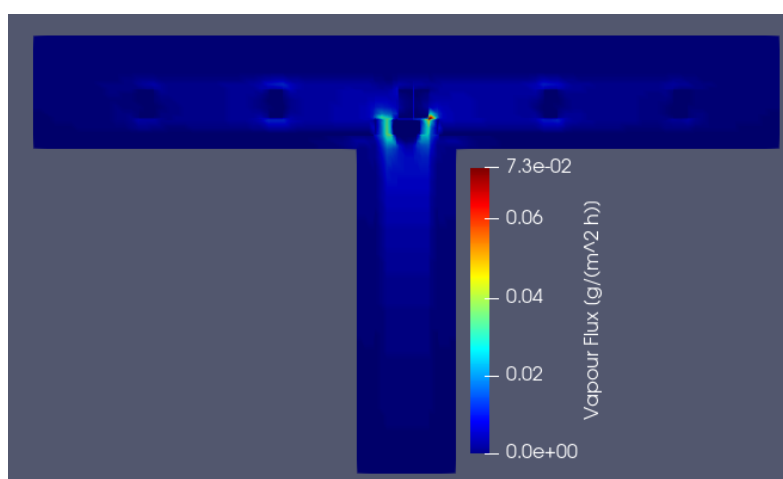
Slika 155: Geometrijski oblik spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom



Slika 156: Distribucija temperature spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, MW



Slika 157: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, MW

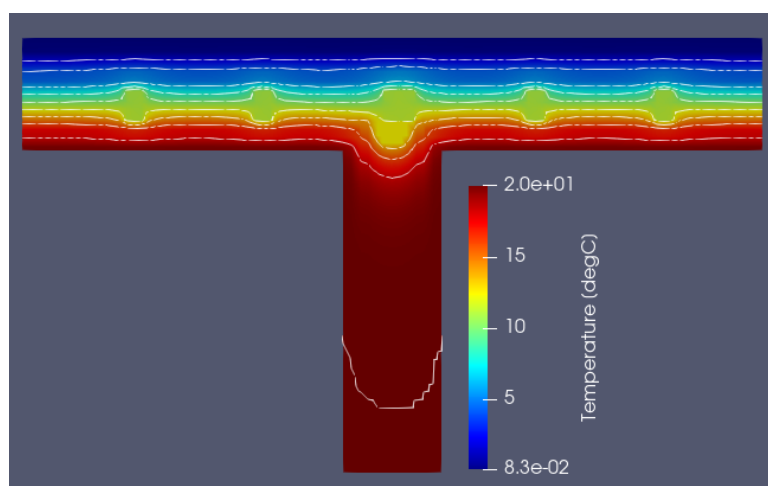


Slika 158: Distribucija toka vodne pare spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, MW

b) Upotreba Poliuretanske pjene kao glavnog izolacijskog materijala

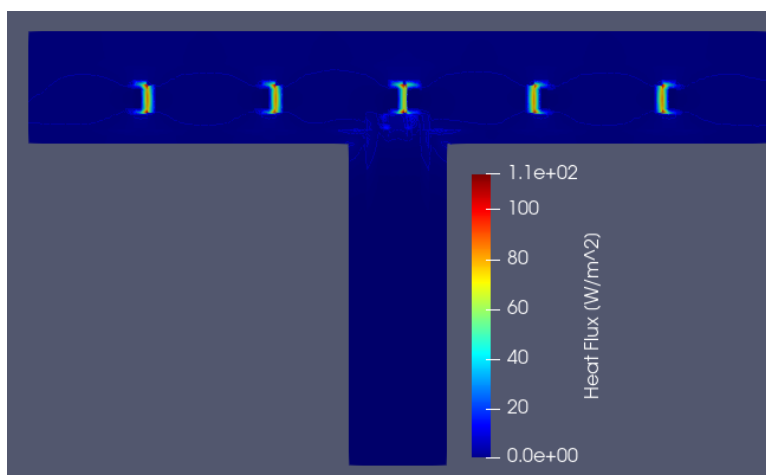


Slika 159: Geometrijski oblik spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR

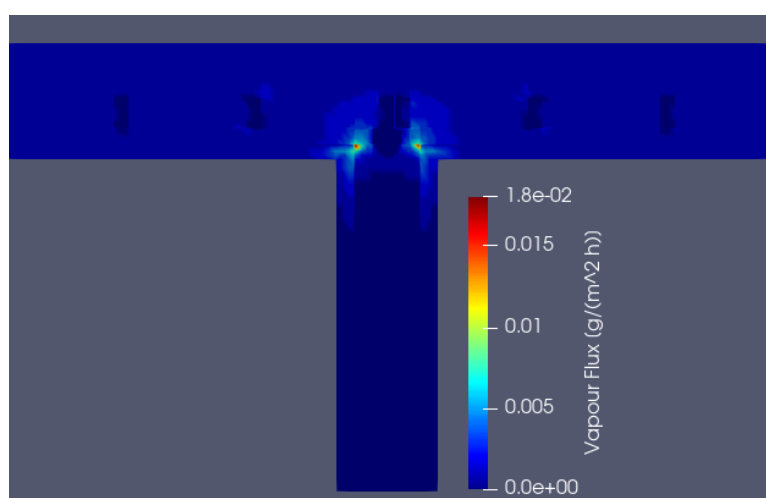


Slika 160: Distribucija temperature spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR





Slika 161: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR



Slika 162: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR

Tablica 16: Rezultati numeričke analize spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom

Spoj unutarnjeg zida sa stropnom pločom	$L_{2D}$ [W/(m·K)]	$\psi$ [W/(m·K)]	Minimalna temperatura površine [°C]	$f_{Rsi}$ [-]
<b>S mineralnom vunom</b>	0,32685	0,032	19,180	0,959
<b>S PUR pjenom</b>	0,26438	0,031	19,303	0,965

## 11.2 Obrada rezultata

Rezultati (vrijednosti  $\psi$ ) prikazani u Tablicama (8-17) izračunati su jednadžbom (25), dok su unutarnje temperature površine izračunate za geometriju prikazanu na slikama geometrijskog modela s stvarnim slojevima ovojnice zgrade i svojstvima materijala.

Iz rezultata numeričkih proračuna dobivenih pomoću softvera Cral, [50] očito je da toplinska izolacija umetnuta između presjeka čelične konstrukcije LSF strukture značajno doprinosi smanjenju toplinskih gubitaka, s  $\psi$ -vrijednostima znatno ispod  $0.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , osim za spojeve vertikalnog presjeka prozora i horizontalnog presjeka vrata. Lošija vrijednost koja je dobivena za ova dva konstrukcijska detalja inače bi rezultirala ugradnjom dodatne vanjske izolacije, međutim, relativno visoka unutarnja temperatura površine potvrđuje da je ova verzija detalja također prihvatljiva i nema potrebe za dodatnim ulaganjem resursa u dodatno smanjenje  $\psi$ -vrijednosti.

Negativna  $\psi$ -vrijednost ima samo matematičko značenje; ne predstavlja "suprotni" smjer toka topline. Negativna  $\psi$ -vrijednost znači da je stvarni tok topline manji od onog koji je izračunat pomoću vanjskih mjerenja (vanjska mjerenja koriste se za procjenu cjelokupne toplinske ovojnice).

Iako su toplinski gubici značajna posljedica toplinskih mostova, potencijalno ozbiljniji aspekt proizlazi iz pojave niskih unutarnjih temperatura površine na područjima toplinskih mostova. To može dovesti do kondenzacije na površini za neapsorbirajuće materijale ili gubitka toplinske učinkovitosti, narušavanje strukturalnog integriteta i rasta plijesni kod apsorbirajućih materijala.

Što se tiče faktora  $f_{Rsi}$ , može se vidjeti iz Tablica (7-16) da su vrijednosti znatno iznad ograničavajuće vrijednosti  $f_{Rsi} = 0.7$ , što osigurava smanjeni rizik od rasta plijesni na unutarnjoj površini razmatranih konstrukcijskih detalja. Izuzetak su detalj vrata u temelju, gdje je samo malo iznad  $f_{Rsi} = 0,7$  što i dalje zadovoljava uvijete, ali treba posebno obratiti pozornost na pravilnu izvedbu.

## 12. ZAKLJUČAK

Zgrade gotovo nulte energije temeljene su na zajedništvu korištenja obnovljivih izvora energija i poduzetih mjera učinkovitosti. Za postizanje propisanih zahtjeva potreban je koordiniran integralni pristup svih struka koje sudjeluju u projektiranju zgrade (projektnata arhitekture, fizike zgrade, termotehničkih sustava i elektroinstalacija) već od koncepta i idejnog projekta zgrade pa sve do izvedbenog projekta i kontrole izvedbe. Za postizanje konačne kvalitete izuzetno je važna stručna i kvalitetna izvedba zgrade. Zgradu je poželjno projektirati na način da njezine energetske potrebe budu što niže. Ne postoje univerzalna rješenja za postizanje nZEB standarda. Svaku zgradu treba detaljno sagledati i pokušati odrediti optimalan energetski koncept. Kvalitetno optimiran energetski koncept omogućava nisku potrošnju energije i korištenje energije iz obnovljivih izvora uz što nižu cijenu investicije, te rezultira troškovno optimalnim rješenjem koje zadovoljava nZEB standard.

Iz prikazanih rezultata može se zaključiti da je odgovarajuća evaluacija toplinskih performansi zidova od LSF-a zahtijeva složeniju i detaljniju analizu od one koja je potrebna za konstrukcije od armiranog betona ili opeke. To znači korištenje numeričkih metoda za izračunavanje gubitaka topline, uključujući sve čelične stupove i druge građevinske detalje.

U ovom radu evaluiran je utjecaj veličine i oblika nosača od čeličnih profila na toplinsku učinkovitost LSF zidova. Proučavane su dvije vrste nosivih zidova od laganih čeličnih profila: (1) unutarnji zid i (2) vanjski zid. Razmatrana su 2 čelična profila C90 i C150, svaki sa razmacima od 300, 400 i 500 mm. Upotrijebljene su dvije različite toplinske izolacije: mineralna vuna i PUR pjena. Evaluirane su četiri duljine prirubnice i tri debljine čelika, rezultirajući ukupno s 288 modela. Ovaj rad omogućio je bolje razumijevanje važnosti veličine i oblika nosača od čeličnih profila na toplinske učinkovitosti LSF zidova. Dobiveni rezultati naglašavaju potrebu za što manjim veličinama čeličnih profila, što je obrnuto proporcionalno strukturalnim potrebama, stoga je potrebno pronaći optimum: što veći profil čeličnog nosača ali da i dalje zadovoljava potrebe toplinske učinkovitosti. U tome je od velike pomoći i toplinska izolacija sa što nižim vrijednostima toplinske provodljivosti. Također je pokazano da primjena toplinske izolacije na vanjskoj strani čeličnog okvira (topli tip konstrukcije) maksimizira njegove performanse, dovodeći do smanjenja utjecaja čeličnih elemenata na  $U_{\text{eff}}$ -vrijednost na minimum. Ovaj rad također pokazuje da je korištenjem LSF-a moguće zadovoljiti hrvatske zahtjeve za zgradama gotovo nulte energije (nZEB).

## LITERATURA

1. Moga, L.; Petran, I.; Santos, P.; Ungureanu, V. Thermo-Energy Performance of Lightweight Steel Framed Constructions: A Case Study. *Buildings* 2022, 12, 321. <https://doi.org/10.3390/buildings12030321>
2. Roque, E.; Santos, P. The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position. *Buildings* 2017, 7, 13.
3. Bogdan, A. (2020) Automatizacija građevinskih procesa, Niskoenergetske seizmički otporne građevine proizvedene u tvornici, *Građevinar* 72 (2020) 12 (str. 1165-1172). Direktiva 2010/31/EU europskog parlamenta i vijeća od 19. svibnja 2010. O energetske učinkovitosti zgrada
4. Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja, smjernice za zgrade gotovo nulte energije; Zagreb, 2019
5. Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinske zaštiti u zgradama (»Narodne novine«, broj 128/15, 70/18, 73/18 86/18
6. Ministarstvo prostornog uređenja, graditeljstva i državne imovine: Program energetske obnove zgrada javnog sektora za razdoblje do 2030. godine, 2022.
7. Attis, S. NET ZERO ENERGY BUILDINGS (NZEB) Concepts, Frameworks and Roadmap for Project Analysis and Implementation, Butterworth-Heinemann publications, 2018
8. Atanasiu, B. (2011) Principles for nearly zero-energy buildings, Paving the way for effective implementation of policy requirements Executive Summary, *Buildings Performance Institute Europe (BPIE)* ([https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/content/executive%20summary\\_nZEB.pdf](https://build-up.ec.europa.eu/sites/default/files/content/executive%20summary_nZEB.pdf))
9. Santos P. Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings [Internet]. Energy Efficient Buildings. InTech; 2017.
10. RH, Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja: smjernice za zgrade gotovo nulte energije, dostupno na: [https://mpgi.gov.hr/UserDocImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Smjernice\\_2\\_dio\\_nZEB\\_mgipu.pdf](https://mpgi.gov.hr/UserDocImages/dokumenti/EnergetskaUcinkovitost/Smjernice_2_dio_nZEB_mgipu.pdf) (pristupljeno: 01.12.2023)
11. Murtinho V, Ferreira H, Antonio C, Simoes da Silva L, Gervasio H, Santos P. Architectural concept for multi-storey apartment building with light steel framing. *Steel Constr.* 2010;3(3):163–8
12. Jelčić Rukavina, M.; Skejić, D.; Kralj, A.; Ščapec, T.; Milovanović, B. Development of Lightweight Steel Framed Construction Systems for Nearly-Zero Energy Buildings. *Buildings* 2022, 12, 929.
13. Liang, H.; Roy, K.; Fang, Z.; Lim, J.B.P. A Critical Review on Optimization of Cold-Formed Steel Members for Better Structural and Thermal Performances. *Buildings* 2022, 12, 34.
14. Ye, J.; Hajirasouliha, I.; Becque, J.; Pilakoutas, K. Development of more efficient cold-formed steel channel sections in bending. *Thin-Walled Struct.* 2016, 101, [https://www.researchgate.net/publication/290018805\\_Development\\_of\\_More\\_Efficient\\_Cold-Formed\\_Steel\\_Channel\\_Sections\\_in\\_Bending](https://www.researchgate.net/publication/290018805_Development_of_More_Efficient_Cold-Formed_Steel_Channel_Sections_in_Bending)
15. LSK: European lightweight steel framed association, Arcelor 2005. <https://constructalia.arcelormittal.com/files/european%20lightweight%20steel-framed%20construction--627c1249e5c97aecee4a7eb06658b457.pdf>
16. EN1993-1-3. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-3: General Rules. Supplementary rules for cold-formed thin gauge members and sheeting. Brussels: European Committee for Standardization: CEN; 2006.

17. EN10326. Continuously hot-dip coated strip and sheet of structural steels - Technical delivery conditions. Brussels: European Committee for Standardization: CEN; 2004.
18. Manikandan, P.; Thulasi, M. Investigation on cold-formed steel lipped channel built-up I beam with intermediate web stiffener. *Int. J. Adv. Struct. Eng.* 2019, 11, 97–107
19. N. Soares, P. Santos, H. Gervásio, J.J. Costa, L. Simões da Silva, Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 78, 2017, Pages 194-209, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>.
20. T. Höglund, H. Burstrand, Slotted steel studs to reduce thermal bridges in insulated walls, *Thin-Walled Structures*, Volume 32, Issues 1–3, 1998, Pages 81-109, ISSN 0263-8231, [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(98\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00028-7).
21. Wood Technology Ireland Wood Based Panels-OSB (Oriented Stran Board) 2021, 4. dostupno na: <http://www.coford.ie/media/coford/content/publications/2021/WoodBasedPanelsOSB080321.pdf> (Pristupljeno 2023-12-05)
22. *CEN EN 300*; Oriented Strand Boards (OSB)- Definitions, Requirements and Test Methods. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2006.
23. Gnanachelvam, S.; Ariyanayagam, A.; Mahendran, M. Fire resistance of LSF wall systems lined with different wallboards including bio-PCM mat. *J. Build. Eng.* 2020, 32, 101628. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101628>
24. *CEN EN 520:2004+A1:2009*; Gypsum Plasterboards. Definitions, Requirements and Test Methods. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2009.
25. Rusthi, M.; Ariyanayagam, A.; Mahendran, M.; Keerthan, P. Fire tests of Magnesium Oxide board lined light gauge steel frame wall systems. *Fire Saf. J.* 2017, 90, 15–27
26. *CEN EN 13162:2013+A1:2015*; Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Mineral Wool (MW) Products. Specification. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2015.
27. *CEN EN 13163: 2013+A2:2016*; Factory Made Expanded Polystyrene (EPS) Products. Specification. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012.
28. *CEN EN 13164: 2013+A1:2015*; Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Extruded Polystyrene Foam (XPS) Products. Specification. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012.
29. Krolo, P., Bakran, A., Lukačević, L., Bede Odorčić, N., Palijan, I., Prlić, T., & Bulić, M. (2022). Istraživanje ponašanja komponenti kompozitnog panela s integriranom čeličnom jezgrom. *Zbornik Radova (Građevinski Fakultet Sveučilišta U Rijeci)*, 25(1), 221-236.
30. *CEN EN 13165: 2013+A2:2017*; Thermal Insulation Products for Buildings. Factory Made Rigid Polyurethane Foam (PU) Products. Specification. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2012
31. S. Schiavoni, F. D'Alessandro, F. Bianchi, F. Asdrubali, Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 62, 2016, Pages 988-1011, ISSN 1364-0321,
32. Ovčja vuna, dostupno na: <https://www.sheepwoolinsulation.com/product/optimal-rolls-2/> (pristupljeno 2024-10-01)
33. Moga, L.; Petran, I.; Santos, P.; Ungureanu, V. Thermo-Energy Performance of Lightweight Steel Framed Constructions: A Case Study. *Buildings* 2022, 12, 321. <https://doi.org/10.3390/buildings12030321>
34. Miszczuk, A.; Heim, D. Parametric Study of Air Infiltration in Residential Buildings—The Effect of Local Conditions on Energy Demand. *Energies* 2021, 14, 127.

35. Milovanović, B.; Bagarić, M.; Gaši, M.; Vezilić Strmo, N. Case Study in Modular Lightweight Steel Frame Construction: Thermal Bridges and Energy Performance Assessment. *Appl. Sci.* 2022, 12, 10551.
36. Erhorn-Kluttig, Heike & Erhorn, Hans & Lahmidi, Hicham & Anderson, Ren. (2009). Airtightness requirements for high performance building envelopes.
37. Santos, Paulo & Martins, Cláudio & Simões, L & Silva, Luís. (2014). Thermal performance of lightweight steel-framed construction systems. *Metallurgical Research and Technology.* 111. 329-338. 10.1051/metal/2014035.
38. Santos, P.; Ribeiro, T. Thermal Performance Improvement of Double-Pane Lightweight Steel Framed Walls Using Thermal Break Strips and Reflective Foils. *Energies* 2021, 14, 6927. <https://doi.org/10.3390/en14216927>
39. Erhorn-Kluttig, Heike, Hans Erhorn, Marco Citterio, Manuel Cocco, Dirk van Orshoven and Antoine Tilmans. "Thermal Bridges in the EPBD context." (2009).
40. CSSBI: Canadian Sheet Steel Building Institute, 2008. *Lightweight Steel Framing—Looking Forward to the Benefits, Environmental fact sheet, Vol. 3, p. 4*
41. Rajanayagam, H.; Upasiri, I.; Poologanathan, K.; Gatheeshgar, P.; Sherlock, P.; Konthesingha, C.; Nagaratnam, B.; Perera, D. Thermal Performance of LSF Wall Systems with Vacuum Insulation Panels. *Buildings* 2021, 11, 621. <https://doi.org/10.3390/buildings11120621>
42. Paulo Santos, Diogo Mateus, Experimental assessment of thermal break strips performance in load-bearing and non-load-bearing LSF walls, *Journal of Building Engineering*, Volume 32, 2020, 101693, ISSN 2352-7102,
43. Gervasio, Helena & Santos, Paulo & Silva, Luís & Gameiro Lopes, Antonio. (2010). Influence of thermal insulation on the energy balance for cold-formed buildings. *Advanced Steel Construction, an International Journal.* 6. 742-766.
44. Santos, Paulo & Lemes, Gabriela & Mateus, Diogo. (2020). Analytical Methods to Estimate the Thermal Transmittance of LSF Walls: Calculation Procedures Review and Accuracy Comparison. *Energies.* 13. 840. 10.3390/en13040840.
45. Gorgolewski, M. Developing a simplified method of calculating U-values in light steel framing. *Build. Environ.* 2007,
46. Santos, P.; Gonçalves, M.; Martins, C.; Soares, N.; Costa, J.J. Thermal Transmittance of Lightweight Steel Framed Walls: Experimental Versus Numerical and Analytical Approaches. *J. Build. Eng.* 2019, 25, 1
47. EN ISO 6946:2017; *Building Components and Building Elements—Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Calculation Methods.* The European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017.
48. EN ISO 14683:2017; *Thermal Bridges in Building Construction—Linear Thermal Transmittance—Simplified Methods and Default Values.* The European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017
49. EN ISO 10211:2017; *Thermal Bridges in Building Construction—Heat Flows and Surface Temperatures—Detailed Calculations.* The European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017.
50. Gaši, M. CRORAL-Computer Program for Thermal Bridge Analysis and Vapour Analysis; University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering: Zagreb, Croatia, 2021
51. EN ISO 10077-2:2017; *Thermal Performance of Windows, Doors and Shutters—Calculation of Thermal Transmittance—Part 2: Numerical Method for Frames.* The European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 2017

52. Tehnički list mineralne vune, dostupno na:  
[https://www.knaufinsulation.com/sites/ki\\_com/files/uploads/Rock%20Mineral%20Wool%20DP7-DP8.pdf](https://www.knaufinsulation.com/sites/ki_com/files/uploads/Rock%20Mineral%20Wool%20DP7-DP8.pdf) (Pristupljeno 2023-05-04)
53. Tehnički list PUR pjene, dostupno na:  
[https://www.scabro.com/images/companies/1/\[WEBSHOP\]%20TDS/Nestaan/TDS%20-%20PUR80C5%20-%20UK%20-%2020140606.pdf?1456411648077](https://www.scabro.com/images/companies/1/[WEBSHOP]%20TDS/Nestaan/TDS%20-%20PUR80C5%20-%20UK%20-%2020140606.pdf?1456411648077) (Pristupljeno: 2023-06-04)
54. Tehnički list prozora, dostupno na:  
<https://database.passivehouse.com/de/components/certificate/download/1593/en>  
(Pristupljeno 2023-12-10)
55. Santos, P.; Poologanathan, K. The Importance of Stud Flanges Size and Shape on the Thermal Performance of Lightweight Steel Framed Walls. *Sustainability* 2021, 13, 3970.
56. ISO. ISO 6946. In *Building Components and Building Elements Thermal Resistance and Thermal Transmittance Calculation Methods*; International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2017

## POPIS SLIKA

Slika 1: Inovativna tehnologija građenja LSF konstrukcija [3].....	11
Slika 2: Principi pri projektiranju Nzeb-a .....	13
Slika 3: Ključni čimbenici koji utječu na potrošnju energije u zgradama.....	14
Slika 4: Važnost staklenih površina: energetska učinkovitost i okoliš zgrade.....	16
Slika 5: Modularni arhitektonski koncept za višekratne zgrade s Laganim čeličnim okvirom (LSF-om) 17	
Slika 6 : Primjer stambene zgrade s Laganim čeličnim okvirom tijekom izgradnje [9]. (a) Čelični okvir; (b) vanjski sloj sastavljen od OSB ploča. ....	20
Slika 7: tipični poprečni presjeci CFS elemenata. a) poprečni presjek „C“ oblika; b) poprečni presjek „Z“ oblika; c) poprečni presjek „L“ oblika; poprečni presjek „šesir“ oblika. ....	23
Slika 8: Različiti poprečni presjeci a) jednostavnog usnog kanala; b) Usni kanal s jednom mrežom za ukrućenje; c) Kanal s usnom s dva mrežna ukrućenja; d) Dio kanala s jednim ukrućenjem mreže i povratnim usnim kanalom; e) Dio kanala s dva rebra za ukrućenje i povratnim rubovima. ....	24
Slika 9: spajanje kutnih presjeka „face to face“ metodom; b) I-presjek, složen tehnikom „back to back“ c) složeni kutni presjek odmaknutom „back to back“ metodom .....	24
Slika 10: Tehnički uređaji između čeličnih okvira [19].....	25
Slika 11: Oblaganje OSB ploče oko LSF-a [9] .....	27
Slika 12: Materijali u presjeku zida s Laganim čeličnim okvirom .....	29
Slika 13: Mineralna vuna između čeličnih nosača .....	31
Slika 14: Prototip panelnog sustava .....	32
Slika 15: ovčja vuna [32] .....	33
Slika 16: Vanjski sloj vjetrootpornih membrana oko otvora na vanjskoj fasadi LSF-a prije izvođenja ETICS-a [19] .....	35
Slika 17: Opcije spajanja LSF struktura .....	36
Slika 18: Klasifikacija LSF konstrukcija, ovisno o položaju izolacijskih materijala [9] (Materijali: 1-Gips; 2-LSFrame; 3-Kamena vuna; 4- Zračni raspor; 5-OSB; 6-EPS; 7-ETICS) [37] .....	38
Slika 19: Raspodjela unutarnje temperature i vrijednosti toplinske propusnosti (U) s obzirom ka klasifikaciju LSF sustava. (a) Konstrukcija hladnog okvira; $U = 0,5255 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . (b) Hibridna konstrukcija; $U = 0,3856 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . (c) Konstrukcija toplih okvira; $U = 0,2828 \text{ W/m}^2/\text{K}$ [37] .....	38
Slika 20: Rješenje zvučne izolacije [7].....	41
Slika 21: prikaz vanjske toplinske izolacije (EPS) [9] .....	44
Slika 22: Primjer čeličnog elementa s prorezima [15] .....	44
Slika 23: umetanje utora u rebro: a) „1/4“ kontaktne površine je smanjeno; b) „1/2“ a kontaktne površine je smanjeno .....	45
Slika 24: Element za prekid konstrukcije .....	46
Slika 25: Trake za brtvljenje postavljene duž čeličnih nosača [37] .....	46
Slika 26: Infracrvene snimke ocijenjenih nosivih LSF zidova: Hladna površina [40] .....	47
Slika 27: Primjena AR folija .....	47
Slika 28: Zid od kamena [9] .....	49
Slika 29: Primjer modernog "pametnog" trombe zida .....	49
Slika 30: Iskorištavanje ogromne toplinske mase tla kroz zakopane cijevi [37] .....	50
Slika 31: Primjeri PCM ploča za suhu gradnju: a) zidni paneli; b) stropne ploče.[19] .....	51
Slika 32: Upotreba PCM materijala [9] .....	51
Slika 33: Shematska ilustracija metode paralelnog puta: (a) poprečni presjek zida lakog čeličnog okvira (LSF); (b) Ekvivalentni krug paralelnog puta .....	57
Slika 34: Shematski prikaz metode izotermnih ravnina: (a) presjek stijenke LSF-a; (b) ekvivalent serijsko-paralelnog kruga.....	58



Slika 35: Ilustracija presjeka LSF zida za ASHRAE metode: presjeci W i CAV. ....	61
Slika 36: Shematski prikaz metoda ASHRAE: (a) presjek W presjeka zida LSF-a; (b) Ekvivalentni serijsko-paralelni krug. ....	62
Slika 37: Modificirane krivulje faktora zone za LSF zidove sa šupljom izolacijom kad god je ukupna debljina materijala za oblaganje veća je od 16 mm .....	63
Slika 38: Prikaz vanjskog referentnog zida.....	66
Slika 39: Prikaz unutarnjeg referentnog zida .....	67
Slika 40: Veličine pribubnica.....	68
Slika 41 Distribucija toplinskog toka za model C150, 300mm, 1.5mm, 43mm.....	77
Slika 42 Distribucija temperature za model C150, 300mm, 1.5mm, 43mm.....	77
Slika 43 Distribucija toplinskog toka za model C90, 300mm, 1.5mm, 43mm.....	77
Slika 44 Distribucija temperature za model C90, 300mm, 1.5mm, 43mm.....	77
Slika 45 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm.....	78
Slika 46: Distribucija toplinskog toka za model unutarnjeg zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm.....	78
Slika 47 Distribucija temperature za model vanjskog zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm.....	78
Slika 48: Distribucija temperature za model unutarnjeg zida C150, 400mm, 1.5mm, 43mm.....	78
Slika 49 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.5mm, 43mm.....	79
Slika 50 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.5mm, 43mm.....	79
Slika 51 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C150, 500mm, 1.5mm, 43mm.....	79
Slika 52 Distribucija temperature za model vanjskog zida C150, 500mm, 1.5mm, 43mm.....	79
Slika 53 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.5mm, 43mm.....	80
Slika 54 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.5mm, 43mm.....	80
Slika 57 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.0 mm, 33 mm.....	80
Slika 58 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 400mm, 1.0 mm, 33 mm.....	80
Slika 59 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm.....	81
Slika 60 Distribucija temperature za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm.....	81
Slika 61 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm.....	81
Slika 62 Distribucija temperature za mode vanjskog zida l C90, 500mm, 1.0 mm, 33 mm.....	81
Slika 63 Distribucija toplinskog toka za model vanjskog zida C150, 300mm, 3.0 mm, 63 mm.....	82
Slika 64 Distribucija temperature za model vanjskog zida C150, 300mm, 3.0 mm, 63 mm.....	82
Slika 65: Vanjski zid, C150, 300mm .....	82
Slika 66: Vanjski zid, C150, 300mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost .....	83
Slika 67: Vanjski zid, C150, 400mm .....	83
Slika 68: Vanjski zid, C150, 400mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost .....	83
Slika 69: Vanjski zid, C150, 500mm .....	84
Slika 70: Vanjski zid, C150, 500mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost .....	84
Slika 71: Vanjski zid, C90, 300mm .....	84
Slika 72: Vanjski zid, C90, 300mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost.....	85
Slika 73: Vanjski zid, C90, 400mm .....	85
Slika 74: Vanjski zid, C90, 400mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost.....	85
Slika 75: Vanjski zid, C90, 500mm .....	86
Slika 76: Vanjski zid, C90, 500mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost.....	86
Slika 77: Unutarnji zid, C150, 300mm.....	86
Slika 78: Unutarnji zid, C150, 300mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost .....	87
Slika 79: Unutarnji zid, C150, 400mm.....	87
Slika 80: Unutarnji zid, C150, 400mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost .....	87
Slika 81: Unutarnji zid, C150, 500mm.....	88
Slika 82: Unutarnji zid, C150, 500mm, razlika $U_{eff}$ u odnosu na referentnu vrijednost .....	88

Slika 83: Unutarnji zid, C90, 300mm .....	88
Slika 84: Unutarnji zid, C90, 300mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost .....	89
Slika 85: Unutarnji zid, C90, 400mm .....	89
Slika 86: Unutarnji zid, C90, 400mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost .....	89
Slika 87: Unutarnji zid, C90, 500mm .....	90
Slika 88: Unutarnji zid, C90, 500mm, razlika Ueff u odnosu na referentnu vrijednost .....	90
Slika 89: detalj spoja dva vanjska zida u kutu .....	91
Slika 90: Geometrijski model spoja 2 vanjska zida u kutu s mineralnom vunom .....	92
Slika 91: Detalj spoja 2 vanjska zida u kutu s mineralnom vunom. a) distribucija temperature; b) distribucija toplinskog toka.....	92
Slika 92: Tok vodene pare detalja spoja 2 vanjska zida u kutu s MW .....	93
Slika 93: Geometrijski model spoja 2 zida u kutu s PUR pjenom .....	93
Slika 94: Detalj spoja 2 vanjska zida u kutu s mineralnom vunom. a) distribucija temperature; b) distribucija toplinskog toka.....	94
Slika 95: Tok vodene pare detalja spoja 2 vanjska zida u kutu s PUR pjenom.....	94
Slika 96: detalj spoja unutarnjeg i vanjskog zida.....	95
Slika 97: Geometrijski model spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom .....	96
Slika 98: Distribucija temperature spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom.....	96
Slika 99: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom .....	97
Slika 100: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg i vanjskog zida s mineralnom vunom .....	97
Slika 101: Geometrijski oblik spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom .....	98
Slika 102: Distribucija temperature spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom .....	98
Slika 103: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom .....	99
Slika 104: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg i vanjskog zida s PUR pjenom.....	99
Slika 105: Detalj spoja vanjskog zida s temeljnom pločom.....	100
Slika 106: Geometrijski model spoja vanjskog zida s temeljom pločom, MW.....	101
Slika 107: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, MW .....	101
Slika 108: Distribucija vodene pare spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, MW .....	102
Slika 109: Geometrijski model spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, PUR.....	102
Slika 110: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, PUR.....	103
Slika 111: Distribucija vodenog toka spoja vanjskog zida s temeljnom pločom, PUR.....	103
Slika 112: Detalj spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom .....	104
Slika 113: Geometrijski model spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW .....	104
Slika 114: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW .....	105
Slika 115: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW .....	105
Slika 116: Geometrijski model spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, MW .....	106
Slika 117: Distribucija a) temperature b) toplinskog toka spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, PUR.....	106
Slika 118: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom, PUR .....	107
Slika 119: Detalj vrata u temelju .....	108
Slika 120: Geometrijski oblik vrata u temelju, MW .....	109
Slika 121: Distribucija a) temperature b)toplinskog toka vrata u temelju, MW .....	109
Slika 122: Distribucija toka vodene pare vrata u temelju, MW .....	110
Slika 123: Geometrijski oblik vrata u temelju, PUR.....	110
Slika 124: Distribucija a) temperature b)toplinskog toka vrata u temelju, PUR .....	111

Slika 125: Distribucija toka vodene pare vrata u temelju, PUR.....	111
Slika 126: Detalj horizontalni presjek vrata .....	112
Slika 127: Geometrijski oblik horizontalnog presjeka vrata, MW .....	112
Slika 128: Distribucija temperature horizontalnog presjeka vrata, MW .....	113
Slika 129: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka vrata, MW .....	113
Slika 130: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka vrata, MW .....	113
Slika 131: Geometrijski oblik horizontalnog presjeka vrata, PUR .....	114
Slika 132: Distribucija temperature horizontalnog presjeka vrata, PUR .....	114
Slika 133: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka vrata, PUR .....	114
Slika 134: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka vrata, PUR.....	114
Slika 135: Detalj vertikalnog presjeka prozora.....	115
Slika 136: Geometrijski oblik vertikalnog presjeka vrata, MW .....	116
Slika 137: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka c) toka vodene pare vertikalnog presjeka prozora, MW .....	117
Slika 138: Geometrijski model vertikalnog presjeka prozora .....	118
Slika 139: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka c) toka vodene pare vertikalnog presjeka prozora, PUR .....	119
Slika 140: Detalj horizontalnog presjeka prozora .....	120
Slika 141: Geometrijski model horizontalnog presjeka prozora .....	120
Slika 142: Distribucija temperature horizontalnog presjeka prozora, MW .....	121
Slika 143: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka prozora, MW .....	121
Slika 144: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka prozora, MW.....	121
Slika 145: Geometrijski oblik horizontalnog presjeka prozora, PUR .....	121
Slika 146: Distribucija temperature horizontalnog presjeka prozora, PUR .....	122
Slika 147: Distribucija toplinskog toka horizontalnog presjeka prozora, PUR .....	122
Slika 148: Distribucija toka vodene pare horizontalnog presjeka prozora, PUR.....	122
Slika 149: Detalj atike .....	123
Slika 150: Geometrijski model atike, MW .....	123
Slika 151: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka Atike, MW .....	124
Slika 152: Distribucija toka vodene pare Atike, MW .....	124
Slika 153: Geometrijski model Atike, PUR .....	125
Slika 154: Distribucija a) temperature, b) toplinskog toka Atike, PUR .....	125
Slika 155: Distribucija toka vodene pare Atike, PUR .....	126
Slika 156: Detalj spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom .....	127
Slika 157: Geometrijski oblik spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom .....	127
Slika 158: Distribucija temperature spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, MW .....	128
Slika 159: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, MW .....	128
Slika 160: Distribucija toka vodne pare spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, MW .....	128
Slika 161: Geometrijski oblik spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR.....	129
Slika 162: Distribucija temperature spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR.....	129
Slika 163: Distribucija toplinskog toka spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR.....	130
Slika 164: Distribucija toka vodene pare spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom, PUR .....	130

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Termofizikalna svojstva najčešće korištenih nemetalnih obloženih materijala za LSF [12].	26
Tablica 2: Termofizička svojstva različitih izolacijskih materijala koji se koriste u LSF konstrukcijama [12] .....	30
Tablica 3: Tablične $p$ -vrijednosti za Gorgolewski metodu 2 [44]. .....	59
Tablica 4: Slojevi zgrade- debljine materijala i osnovna higrotermalna svojstva.....	68
Tablica 6: Rezultati toplinske provodljivosti LSF-zida [ $W/m^2K$ ] za različite debljine čeličnog presjeka i duljine prirubnice i Mineralnom vunom kao glavnim izolacijskim materijalom.....	72
Tablica 7: Rezultati toplinske provodljivosti LSF-zida [ $W/m^2K$ ] za različite debljine čeličnog presjeka i duljine prirubnice i PUR pjenom kao glavnim izolacijskim materijalom.....	73
Tablica 8: Rezultati numeričke analize toplinskih mostova detalja 2 vanjska zida u kutu.....	95
Tablica 9: Rezultati numeričke analize toplinskih mostova spoja unutarnjeg i vanjskog zida.....	99
Tablica 10: Rezultati numeričke analize spoja vanjskog zida s temeljnom pločom .....	103
Tablica 11: Rezultati numeričke analize spoja unutarnjeg zida s temeljnom pločom.....	107
Tablica 12: Rezultati numeričke analize vrata u temelju .....	111
Tablica 13: Rezultati numeričke analize horizontalnog presjeka vrata .....	115
Tablica 14: Rezultati numeričke analize vertikalnog presjeka prozora .....	119
Tablica 15: Rezultati numeričke analize horizontalnog presjeka prozora .....	122
Tablica 16: Rezultati numeričke analize Atike.....	126
Tablica 17: Rezultati numeričke analize spoja unutarnjeg zida sa stropnom pločom.....	130

## POPIS OZNAKA

d	debljina sloja	[m]
$f_{Rsi}$	faktor temperature	[-]
$f_0$	faktor oblika	[m <sup>-1</sup> ]
h	plošni koeficijent prijelaza topline	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$h_{se}$	vanjski plošni koeficijent prijelaza topline	[W/(m <sup>2</sup> K)]
$h_{si}$	unutrašnji plošni koeficijent prijelaza topline	[W/(m <sup>2</sup> K)]
l	duljina geometrijskog modela	[m]
li	duljina 2D geometrijskog modela preko koje se primjenjuje vrijednost $U_i$	[m]
$L_{2D}$	dvodimenzionalni termalni koeficijent sprezanja	[W/(m·K)]
n	broj specifičnih slojeva u zgradi	[-]
$n_{50}$	zračne promjene na sat pri diferencijalnom tlaku od 50 Pa	[h <sup>-1</sup> ]
$Q''_{C,nd}$	specifična godišnja energija za hlađenje	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]
$Q''_{H,nd}$	specifična godišnja energija za grijanje	[kWh/(m <sup>2</sup> a)]
R	toplinski otpor	[(m <sup>2</sup> ·K)/W]
RH	relativna vlažnost	[%]
T	temperatura	[°C]
$T_i$	temperatura unutrašnjeg okoliša	[°C, K]
$T_e$	temperatura vanjskog okoliša	[°C, K]
$T_{si,min}$	minimalna temperatura vanjske površine	[°C, K]
U ili U-vrijednost	koeficijent prolaska topline /toplinska propusnost	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$U_{eff}$	efektivni koeficijent prolaska topline	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$U_f$	koeficijent prolaska topline okvira	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$U_g$	koeficijent prolaska topline stakla	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$U_i$	jednosmjerna toplinska propusnost i-tog građevinskog elementa koji dijeli dva okoliša.	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]
$U_w$	koeficijent prolaska topline prozora	[W/(m <sup>2</sup> ·K)]

## Grčki simboli

$\Delta$	Razlika između dvije količine ili povećanje jedne količine, izraženo u postotcima ili u jedinicama promatrane količine	
$\lambda$	toplinska provodljivost	[W/(m·K)]
$\mu$	koeficijent otpora difuziji vodene pare	[-]
$\varphi$	vrijednost toplinskog toka	[W/m]
$\chi$	koeficijent točkovnog toplinskog mosta	[W/K]
$\psi$	linijska toplinska propusnost	[W/(m·K)]