

Zgrada nulte emisije

Banić, Andrea

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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:237:623201>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-10**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

Zgrada nulte emisije

Zagreb, rujan 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GRAĐEVINSKI FAKULTET



DIPLOMSKI RAD

Zgrada nulte emisije

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Bojan Milovanović

Student:

Andrea Banić

Zagreb, rujan 2023.

UNIVERSITY OF ZAGREB
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING



MASTER'S THESIS
Zero emissions building

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Bojan Milovanović

Student:

Andrea Banić

Zagreb, September 2023.

IZJAVA O IZVORNOSTI

"Izjavljujem da je moj diplomski rad izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristila drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni."

Zagreb, rujan 2023.

Andrea Banić, univ.bacc.ing.aedif.

Sadržaj

Sadržaj.....	I
Popis slika.....	III
Popis tablica	VI
Sažetak.....	1
Abstract	2
1. Uvod – NZEB i ZEB	3
2. Tehnički opis.....	7
2.1. Općenito.....	7
2.2. Elementi građevine	12
2.3. Tehnički sustavi.....	12
3. Geometrijske karakteristike zgrade.....	13
4. Slojevi građevnih dijelova zgrade.....	16
5. Otvori (prozirni i neprozirni elementi) zgrade.....	19
6. Proračun i ocjena fizikalnih svojstava zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu.....	21
6.1. Zone	22
6.2. Klimatski podaci.....	24
6.3. Prijenos topline prema tlu.....	24
6.4. Toplinski mostovi	25
6.5. Zaštita od sunčevog zračenja	25
6.6. Tehnički sustavi.....	26
7. Rezultati proračuna i ocjene fizikalnih svojstava zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu	28
7.1. Rezultat proračuna građevnih dijelova	28
8. Rezultati proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje.....	29
8.1. Rezultat proračuna – gubici topline	29

8.2.	Rezultat proračuna – dobici topline.....	30
8.3.	Rezultat proračuna – potrebna energija za grijanje i hlađenje.....	32
8.4.	Rezultat proračuna - energetska svojstva zgrade i obnovljivi izvori energije.....	34
9.	Aspekt dugoročnog higrotermalnog ponašanja	35
9.1.	Proračun higrotermalnog ponašanja – definiranje slojeva	36
9.2.	Proračun higrotermalnog ponašanja – definiranje orijentacije, nagiba, visine zgrade 39	
9.3.	Proračun higrotermalnog ponašanja – odabir unutarnje temperature, relativne vlažnosti, proračunskog perioda i moda proračuna	40
9.4.	Proračun higrotermalnog ponašanja – definiranje vanjske i unutarnje klime	40
9.5.	Proračun higrotermalnog ponašanja –rezultati proračuna	42
9.6.	Proračun higrotermalnog ponašanja –analiza rezultata proračuna	42
10.	Proračun toplinskih mostova	55
10.1.	Proračun toplinskih mostova – atika ravnog krova	57
10.2.	Proračun toplinskih mostova – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom	61
10.3.	Proračun toplinskih mostova – spoj stupa s međukatnom konstrukcijom.....	65
10.4.	Proračun toplinskih mostova – horizontalni presjek prozora	69
10.5.	Proračun toplinskih mostova – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano	72
11.	Proračun emisije CO₂eq plinova.....	76
11.1.	Životni ciklus.....	76
11.2.	Modelirani elementi i sustavi te njihove količine.....	78
11.3.	Utjecaj korištenih materijala i sustava na okoliš (faktori ugljika).....	79
11.4.	Analiza rezultata proračuna	80
11.5.	Zaključak	85

Popis slika

Slika 1. Najveće dopuštene vrijednosti specifične godišnje potrošnje energije za grijanje i primarne energije za zgrade gotovo nulte energije grijane i/ili hlađene na temperaturu 18°C ili više [3].....	4
Slika 2. Tehnički sustavi koji ulaze u proračun primarne i isporučene energije [3]	4
Slika 3. BIM model predmetne zgrade.....	7
Slika 4. BIM model predmetne zgrade.....	8
Slika 5. Pročelja predmetne zgrade	8
Slika 6. Tlocrt prizemlja.....	9
Slika 7. Tlocrt 1. kata	10
Slika 8. Presjek A-A.....	11
Slika 9. Presjek B-B	11
Slika 10. Grijane i negrijane zone	13
Slika 11. Obujam (plavo) i oplošje (crveno) grijanog dijela zgrade	14
Slika 12. Korisničko sučelje - Caluwin	20
Slika 13. Unutarnje projektne temperature za sezone grijanja i hlađenja	22
Slika 14. Konfiguracija sustava grijanja i pripreme PTV	27
Slika 15. Rezultati proračuna toplinskih gubitaka na mjesečnoj razini	29
Slika 16. Rezultat proračuna solarnih dobitaka.....	30
Slika 17. Rezultat proračuna unutarnjih dobitaka	31
Slika 18. Rezultat proračuna toplinskih dobitaka.....	31
Slika 19. Grafički prikaz rezultata potrebne energije za grijanje i hlađenje	32
Slika 20. Grafički prikaz rezultata $Q''_{H,nd}$ i $Q''_{C,nd}$	33
Slika 21. Grafički prikaz rezultata $H_{tr,adj}$	34
Slika 22. Slojevi vanjskog zida	36
Slika 23. Slojevi ravnog krova	37
Slika 24. Slojevi pregradnog zida $d= 15$ cm	38
Slika 25. Slojevi pregradnog zida $d= 10$ cm	38
Slika 26. Slojevi poda na tlu.....	39
Slika 27. Definirana orijentacija, nagib i visina zgrade	39
Slika 28. Inicijalna temperatura komponente i relativna vlažnost	40
Slika 29. Proračunski period (lijevo) i mod proračuna (desno)	40
Slika 30. Vanjska klima – Innsbruck	41

Slika 31. Kiša nošena vjetrom i intenzitet sunčevog zračenja	41
Slika 32. Unutarnja klima.....	42
Slika 33. Vanjski zid- ukupan sadržaj vlage	43
Slika 34. Ravni krov- ukupan sadržaj vlage.....	43
Slika 35. Unutarnji zid (15 cm) – ukupan sadržaj vlage	44
Slika 36. Unutarnji zid (10 cm) – ukupan sadržaj vlage	44
Slika 37. Pod na tlu – ukupan sadržaj vlage.....	45
Slika 38. Vanjski zid- sadržaj vlage u sloju mineralne vune.....	46
Slika 39. Ravni krov- sadržaj vlage u sloju mineralne vune	46
Slika 40. Unutarnji zid (15 cm) – sadržaj vlage u sloju mineralne vune	47
Slika 41. Unutarnji zid (10 cm) – sadržaj vlage u sloju mineralne vune	47
Slika 42. Pod na tlu – sadržaj vlage u sloju mineralne vune	48
Slika 43. Vanjski zid - relativna vlažnost u sloju mineralne vune	49
Slika 44. Ravni krov- relativna vlažnost u sloju mineralne vune.....	50
Slika 45. Unutarnji zid (15 cm) – relativna vlažnost u sloju mineralne vune	50
Slika 46. Unutarnji zid (10 cm) – relativna vlažnost u sloju mineralne vune	51
Slika 47. Pod na tlu – relativna vlažnost u sloju mineralne vune.....	51
Slika 48. Vanjski zid - površinska kondenzacija unutarnje površine.....	52
Slika 49. Ravni krov- površinska kondenzacija unutarnje površine	52
Slika 50. Unutarnji zid (15 cm) – površinska kondenzacija unutarnje površine.....	53
Slika 51. Unutarnji zid (10 cm) – površinska kondenzacija unutarnje površine.....	53
Slika 52. Pod na tlu – površinska kondenzacija unutarnje površine	54
Slika 53. Detalji gdje će se analizirati utjecaj toplinskih mostova.....	55
Slika 54. Detalj atike ravnog krova.....	57
Slika 55. Model atike ravnog krova	58
Slika 56. Raspodjela temperature – atika ravnog krova.....	59
Slika 57. Detalj spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom	61
Slika 58. Model spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom	62
Slika 59. Raspodjela temperature – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom	63
Slika 60. Detalj spoja stupa s međukatnom konstrukcijom	65
Slika 61. Model spoja stupa s međukatnom konstrukcijom.....	66
Slika 62. Raspodjela temperature- spoj stupa s međukatnom konstrukcijom.....	67
Slika 63. Detalj - horizontalni presjek prozora	69
Slika 64. Model - horizontalni presjek prozora.....	70

Slika 65. Raspodjela temperature- horizontalni presjek prozora	71
Slika 66. Detalj spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano	72
Slika 67. Model spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano	73
Slika 68. Raspodjela temperature- spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano	74
Slika 69. Potencijal smanjenja emisija CO ₂ eq ovisno o fazi projekta [7]	76
Slika 70. Životni vijek ugrađenih elemenata i broj potrebnih zamjena tokom životnog ciklusa [9]	78
Slika 71. Kategorije utjecaja proizvoda na okoliš [10]	79
Slika 72. Rezultat proračuna - ukupne vrijednosti GWP-a za sve građevne elemente po fazama životnog ciklusa.....	80
Slika 73. Operativne i ugrađene emisije u životnom ciklusu [7]	80
Slika 74. Operativne energije [2]	81
Slika 75. Faze životnog ciklusa i operativne i ugrađene emisije	82
Slika 76. Udio ugrađenih i operativnih emisija u cijelom životnom vijeku stambene zgrade [8]	82
Slika 77. Prikaza rezultata proračuna CO ₂ eq za predmetnu zgradu po fazama životnog ciklusa	83
Slika 78. Prikaza rezultata proračuna CO ₂ eq za predmetnu zgradu po fazama životnog ciklusa	83
Slika 79. Utjecaj na okoliš građevnih elemenata u svim fazama životnog ciklusa.....	84
Slika 80. Usporedba rezultata emisija CO ₂ eq građevnih dijelova sa i bez faze D	84
Slika 81. Postupno uvođenje i povećanje zahtjeva za CO ₂ (prilagođeno iz „Nacionalne strategije za održivu gradnju” danskog Ministarstva unutarnjih poslova i stanovanja, travanj 2021. [11]	86

Popis tablica

Tablica 1. Grijane zone	14
Tablica 2. Geometrijske karakteristike zgrade	15
Tablica 3. Slojevi vanjskih zidova	16
Tablica 4. Slojevi zidova između grijanih dijelova različitih korisnika $d= 10$ cm.....	17
Tablica 5. Slojevi zidova između grijanih dijelova različitih korisnika $d= 15$ cm.....	17
Tablica 6. Stropovi između grijanih dijelova različitih korisnika	17
Tablica 7. Pod na tlu.....	18
Tablica 8. Ravni krovovi iznad grijanog prostora.....	18
Tablica 9. Stropovi s podnim grijanjem iznad vanjskog prostora.....	19
Tablica 10. Popis otvora s njihovim pripadajućim U vrijednostima.....	20
Tablica 11. Definirani podaci o zoni 1	23
Tablica 12. Klimatološki podaci po mjesecima i na godišnjoj razini	24
Tablica 13. Rezultati provjere prostorija u pogledu zaštite od sunčevog zračenja	25
Tablica 14. Definirani tehnički sustavi	26
Table 15. Sumarni prikaz karakteristika termotehničkih sustava.....	27
Tablica 16. Rezultati proračuna građevnih dijelova.....	28
Tablica 17. Toplinski gubici na godišnjoj razini.....	29
Tablica 18. Rezultat proračuna dobitaka topline –ukupni unutarnji i solarni dobitci	31
Tablica 19. Rezultat proračuna toplinskih dobitaka	32
Tablica 20. Rezultati proračuna potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje zgrade.....	33
Tablica 21. Rezultat proračuna – energetska svojstva zgrade	34
Tablica 22. Rezultat proračuna – obnovljivi izvori energije	35
Tablica 23. Definirani materijali i karakteristike materijala	58
Tablica 24. Definirani uvjeti okolnog prostora	59
Tablica 25. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti – atika ravnog krova	60
Tablica 26. Rezultat proračuna - faktor temperature fR_{si} – atika ravnog krova.....	60
Tablica 27. Definirani materijali i karakteristike materijala	62
Tablica 28. Definirani uvjeti okolnog prostora	63
Tablica 29. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom.....	63
Tablica 30. Rezultat proračuna - faktor temperature fR_{si} – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom.....	64
Tablica 31. Definirani materijali i karakteristike materijala	66
Table 32. Definirani uvjeti okoliša.....	66

Tablica 33. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti – spoj stupa s međukatnom konstrukcijom.....	67
Tablica 34. Rezultat proračuna - faktor temperature fR_{si} – spoj stupa s međukatnom konstrukcijom.....	68
Tablica 35. Definirani materijali i karakteristike	70
Tablica 36. Definirani uvjeti okoliša.....	70
Tablica 37. Rezultat proračuna - faktor temperature fR_{si} – horizontalni presjek prozora.....	71
Tablica 38. Definirani materijali i karakteristike	73
Tablica 39. Definirani uvjeti okoliša.....	74
Tablica 40. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti - spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano.....	74
Tablica 41. Rezultat proračuna – faktor temperature fR_{si} – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano-grijano.....	75
Tablica 42. Faze životnog ciklusa proizvoda [8]	77

Sažetak

U diplomskom radu istražen je potencijal gradnje zgrade nulte emisije na primjeru obiteljske kuće. Pregledom dostupne literature utvrđene su mogućnosti i ograničenja zgrade nulte emisije te je definiran koncept minimizacije potrošnje energije usmjeren prvenstveno na vanjsku ovojnicu zgrade. Na temelju postojećih arhitektonskih podloga izrađen je BIM model primjenom odgovarajućih računalnih paketa. Predložene mjere u sklopu rada integrirane su s postojećim prijedlogom statike predmetne zgrade. Predložene mjere analizirane su s aspekta potrebne energije za grijanje i hlađenje zgrade do razine gotovo nulte energije, utjecaja toplinskih mostova i sa aspekta dugoročnog higrotermalnog ponašanja. U radu je također proveden proračun emisije CO₂eq plinova tijekom cijelog životnog vijeka zgrade. Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje proveden je primjenom satne metode proračuna definirane u Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790. Proračun vrijednosti toplinskih mostova i dugoročnog transporta mase proveden je korištenjem numeričkih modela. Rad rezultira s definiranom energetsom bilancom zgrade te utjecajem na okoliš zgrade u njenom cjelokupnom životnom vijeku.

Ključne riječi: zgrada nulte emisije, energetska učinkovitost, BIM, GWP, NZEB, zgrada gotovo nulte energije, toplinski mostovi, HAM model

Abstract

In this thesis the potential of building a zero-emission building is explored using the example of a family house. By reviewing the available literature, the possibilities and limitations of the zero-emission building were determined, and the concept of energy consumption minimization focused primarily on the outer envelope of the building was defined. Based on the existing architectural plans, a BIM model was created using appropriate computer software. The suggested measures for a zero-emission building are integrated with the statics of the building in question. The proposed measures were analyzed from the aspect of the required energy for heating and cooling the building to the level of almost zero energy, the influence of thermal bridges and from the aspect of long-term hygrothermal behavior. The paper also contains calculated CO₂eq gas emissions during the building's entire lifetime. The calculation of the required energy for heating and cooling was carried out using the hourly calculation method defined in the Algorithm for the calculation of the required energy for heating and cooling of building spaces from HRN EN ISO 13790. The calculation of the value of thermal bridges and long-term mass transport was carried out using numerical models. The thesis results in a defined energy balance of the building and the impact on the environment of the building during its entire life span.

Key words: zero emissions building, energy efficiency, BIM, GWP, NZEB, nearly zero energy building, thermal bridges, HAM model

1. Uvod – NZEB i ZEB

Osnovni cilj revizije Direktive o energetske svojstvima zgrada provedene u ožujku ove godine je značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova i potrošnje energije fonda zgrada unutar Europske unije do 2030. godine kako bi se do 2050. godine postigla potpuna klimatska neutralnost fonda zgrada unutar zemalja članica EU. [1]

Sukladno tome od 2028. godine sve nove zgrade trebale bi biti zgrade nulte emisije, odnosno od 2026. godine ukoliko se radi o novim zgradama u posjedu ili vlasništvu javnih tijela. Dok je za stambene zgrade na kojima se provodi značajnija obnova rok do 2032. godine. [1]

Postoje razne definicije zgrade nulte emisije, međutim opći je konsenzus da je zgrada nulte emisije (ZEB) energetske učinkovita zgrada koja proizvodi dovoljno obnovljive energije da nadoknadi svoje emisije stakleničkih plinova tijekom svog životnog vijeka. [2]

Svrha ovog rada je na primjeru obiteljske kuće istražiti mogućnost gradnje zgrade nulte emisije. Uz proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje koji treba zadovoljiti odredbe *Tehničkog propisa o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* tj. predmetna zgrada treba postići nZEB standard napravljena je i analiza utjecaja predmetne zgrade na okoliš tijekom cijelog životnog vijeka odnosno analiza emisije CO₂eq plinova u cijelom životnom vijeku zgrade u skladu sa EN 15978.

Potrebno je proračunom dokazati da predmetna zgrada ne prelazi najveće dopuštene vrijednosti specifične godišnje potrošnje energije za grijanje i specifične godišnje potrošnje primarne energije za zgrade gotovo nulte energije grijane i/ili hlađene na temperaturu 18°C ili više. Također minimalno 30 % godišnje isporučene energije zgrade treba biti podmireno iz obnovljivih izvora energije kako bi nZEB standard za predmetnu zgradu bio postignut. [3]

VRSTA ZGRADE	Q'' _{H,nd} [kWh/(m ² ·a)]						E _{prim} [kWh/(m ² ·a)]	
	NZEB						NZEB	
	kontinentalna, Θ _{mm} ≤ 3 °C			primorska, Θ _{mm} > 3 °C			kontinent, Θ _{mm} ≤ 3 °C	primorje, Θ _{mm} > 3 °C
	f ₀ ≤ 0,20	0,20 < f ₀ < 1,05	f ₀ ≥ 1,05	f ₀ ≤ 0,20	0,20 < f ₀ < 1,05	f ₀ ≥ 1,05		
Višestambena	40,50	32,39 + 40,58 · f ₀	75,00	24,84	19,86 + 24,89 · f ₀	45,99	80	80
Obiteljska kuća	40,50	32,39 + 40,58 · f ₀	75,00	24,84	17,16 + 38,42 · f ₀	57,50	45	35
Uredska	16,94	8,82 + 40,58 · f ₀	51,43	16,19	11,21 + 24,89 · f ₀	37,34	35	25
Obrazovna	11,98	3,86 + 40,58 · f ₀	46,48	9,95	4,97 + 24,91 · f ₀	31,13	55	55
Bolnica	18,72	10,61 + 40,58 · f ₀	53,21	46,44	41,46 + 24,89 · f ₀	67,60	250	250
Hotel i restoran	35,48	27,37 + 40,58 · f ₀	69,98	11,50	6,52 + 24,89 · f ₀	32,65	90	70
Sportska dvorana	96,39	88,28 + 40,58 · f ₀	130,89	37,64	32,66 + 24,91 · f ₀	58,82	210	150
Trgovina	48,91	40,79 + 40,58 · f ₀	83,40	13,90	8,92 + 24,91 · f ₀	35,08	170	150
Ostale nestambene	40,50	32,39 + 40,58 · f ₀	75,00	24,84	19,86 + 24,89 · f ₀	45,99	/	/

Slika 1. Najveće dopuštene vrijednosti specifične godišnje potrošnje energije za grijanje i primarne energije za zgrade gotovo nulte energije grijane i/ili hladene na temperaturu 18°C ili više [3]

Osnovni cilj je smanjenje gubitaka topline kako bi se smanjila potrebna energija za grijanje i/ili hlađenje. To se može postići povoljnom orijentacijom zgrade, povoljnim faktorom oblika, ispravnim odabirom građevinskih proizvoda koji se ugrađuju kao slojevi građevinskih elemenata (Tehnički propis određuje maksimalni dopušteni koeficijenti prolaska topline kroz građevne dijelove), minimiziranjem toplinskih mostova... [3]

U nZEB zgradama također je potrebno koristiti što energetski učinkovitije tehničke sustave i/ili sustave s visokim udjelom obnovljivih izvora energije. Sustavi koji ulaze u proračun primarne i isporučene energije ovisno o vrsti zgrade prema *Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama* se nalaze u tablici u nastavku. [3]

Vrsta zgrade	Sustav grijanja	Sustav hlađenja	Sustav pripreme PTV-a	Sustav meh. ventilacije i klimatizacije	Sustav rasvjete
Obiteljske kuće	DA	NE	DA	Uzima se u obzir ako postoji	NE
Višestambene zgrade	DA	NE	DA		NE
Uredske zgrade	DA	DA	NE		DA
Zgrade za obrazovanje	DA	NE	NE		DA
Bolnice	DA	DA	DA		DA
Hoteli i restorani	DA	DA	DA		DA
Sportske dvorane	DA	DA	DA		DA
Zgrade trgovine	DA	DA	NE		DA
Ostale nestambene zgrade	DA	NE	NE		DA

Slika 2. Tehnički sustavi koji ulaze u proračun primarne i isporučene energije [3]

Kako bi nZEB standard bio postignut moguće je definirati pet ključnih principa projektiranja:

- neprekinuta toplinska izolacija optimalne debljine
- prozori odgovarajućih toplinskih karakteristika (U_w) i svojstava propuštanja Sunčeve energije (g_{\perp})
- mehanička ventilacija s rekuperacijom (osigurava optimalnu kvalitetu zraka unutarnjeg prostora)
- zrakonepropusnost vanjske ovojnice zgrade
- minimiziranje toplinskih mostova- osigurava smanjenje gubitaka topline [3]

Uz prethodno navedeno nZEB standard bi trebao biti postignut implementiranjem ekonomski opravdanih, tehnički izvedivih i održivih rješenja. [3]

Vidljivo je da su trenutačno mjere energetske učinkovitosti uglavnom usmjerene na smanjenje pogonske/operativne potrošnje energije i operativne emisije stakleničkih plinova dok se ugrađena energija i emisije stakleničkih plinova zanemaruju.

Energija na koju su usmjerene nZEB mjere odnosi se na operativnu energiju – energiju potrebnu za grijanje, hlađenje, opskrbu toplom vodom, ventilaciju ili klimatizaciju, rasvjetu. Kao što je prikazano u tablici na slici 2. – kod obiteljskih kuća se energija za hlađenje i rasvjetu prema trenutno važećem Tehničkom propisu ni ne uzima u obzir kod proračuna primarne i isporučene energije. No klimatske promjene vjerojatno će utjecati na količinu potrebne operativne energije, doći će do smanjenja potrebe za grijanjem i povećanja potrebe za hlađenjem. Očekuje se da će klimatizacija ljeti porasti za 3,14% godišnje, uglavnom u srednjoj i južnoj Europi (68% ukupne EU potražnje). [2]

Nekoliko studija istaknulo je da zgrade s nultom energijom troše više energije od zgrada s niskim udjelom ugljika u cijelom životni ciklusu. Razlog je veća ugrađena energija zbog dodatnih mjera energetske učinkovitosti. Iako mjere energetske učinkovitosti mogu značajno smanjiti operativnu energiju zgrada gotovo nulte energije ili čak nulte energije, također istovremeno mogu dovesti do povećanja ugrađene energije ako se malo pozornosti posveti ukupnom ponašanju zgrade tijekom cijelog životnog ciklusa. [2]

Iz prethodno navedenog proizlazi da je prilikom projektiranja ZEB-a ključno minimizirati potrebe za energijom provedbom mjera energetske učinkovitosti prije implementacije tehnologija obnovljivih izvora energije, a tek preostale emisije povezane s malom količinom

energije koju još uvijek zahtijeva zgrada mogu se nadoknaditi iz obnovljivih izvora energije koju proizvodi zgrada. [2]

Kako bi nova zgrada dostigla ZEB (zero emission building) standard, EPBD (Energy performance of buildings directive) definira sljedeće:

- Godišnji operativni cilj za zgrade nulte emisije definira se primjenom pristupa neto bilance, tj. godišnje emisije CO₂ moraju iznositi nula. Ovo omogućuje zgradi i unos energije iz mreže i predaju obnovljive energije u energetska mrežu.
- Nove zgrade moraju zadovoljiti uvjete koji su stroži od uvjeta za NZEB.
- Uvjeti koje bi zgrada trebala zadovoljiti mogli bi se definirati postavljanjem pragova potrebne primarne energije- ukupna i obnovljiva energija u kWh/m²/god. kao u slučaju preporuka NZEB-a i dodavanjem CO₂-ekvivalentnih pragova (kgCO₂-eq/m²/godina).
- Potrebno je zahtijevati i izvješće o ugrađenim emisijama kako bi se podigla svijest o ugljičnom otisku zgrade i pomoglo u odlučivanju o mogućnostima i prioritetima za daljnje kompenziranje ugrađenih emisija. [2]

2. Tehnički opis

2.1. Općenito

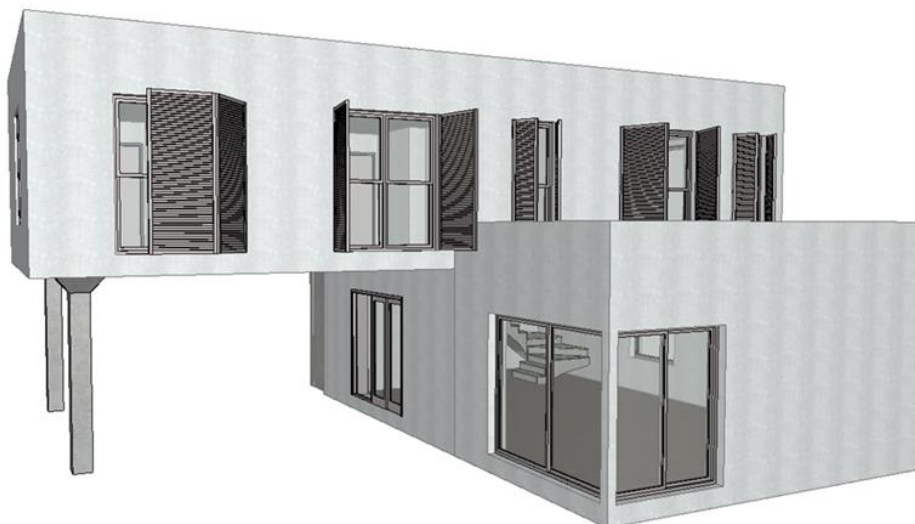
Prema postojećim arhitektonskim podlogama predmetna zgrada je obiteljska kuća katnosti prizemlje + 1. kat (P+1). Planirana namjena je isključivo stambena te se izgradnja planira u Puli.

Predmetna građevina se nalazi u 4. zoni globalnog Sunčevog zračenja sa srednjom mjesečnom temperaturom vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade $\Theta_{e,mj,min} > 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ i unutarnjom temperaturom $\Theta_i \geq 18^\circ\text{C}$.

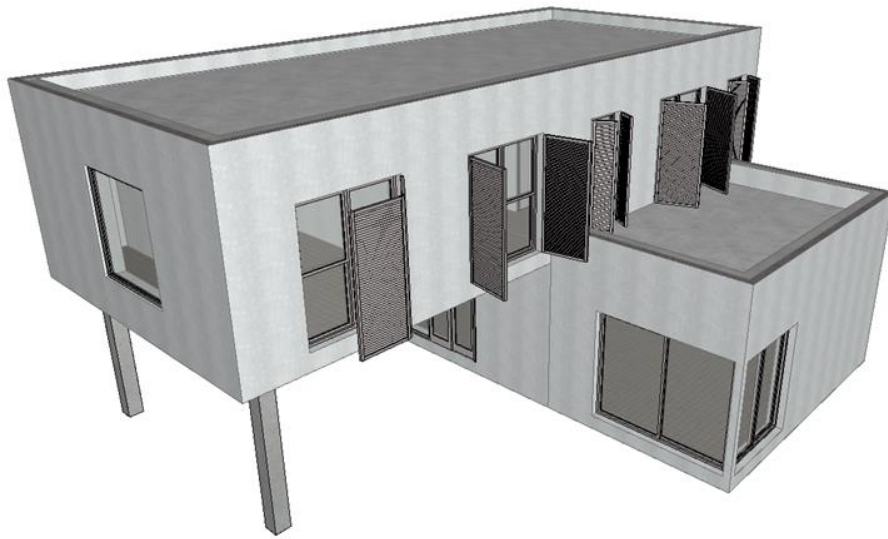
Tlocrt je pravokutnog oblika. Prizemlje se sastoji od dnevnog boravka, kupaonice i kuhinje sa blagavaonskim prostorom, dok se na 1. katu nalazi hodnik, 3 spavaće sobe i 3 kupaonice. Tlocrtne dimenzije prizemlja iznose 12,35 m x 6,6 m, a prvog kata 15,10m x 6,6 m.

Glavni i jedini ulaz u zgradu nalazi se na jugozapadnom pročelju, dok je većina otvora smještena sa jugoistočne strane. Orijentacija zgrade i otvora je povoljna.

U skladu sa arhitektonskim podlogama izrađen je BIM model. Za izradu modela korišten je ArchiCAD 26. Na slikama u nastavku prikazan je 3D model predmetne obiteljske kuće.

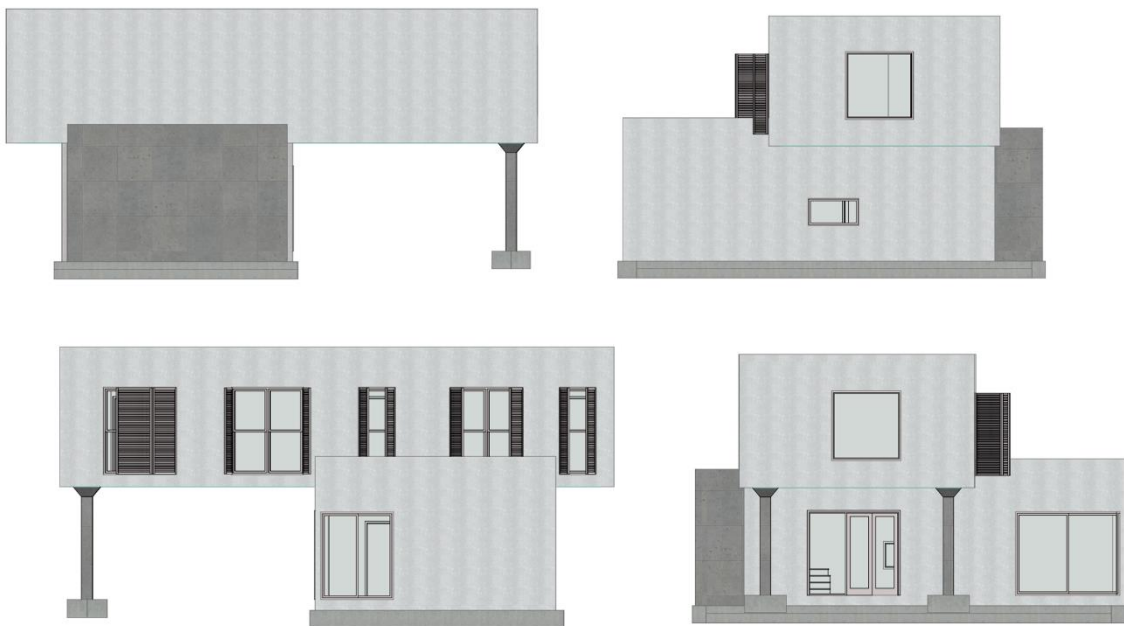


Slika 3. BIM model predmetne zgrade



Slika 4. BIM model predmetne zgrade

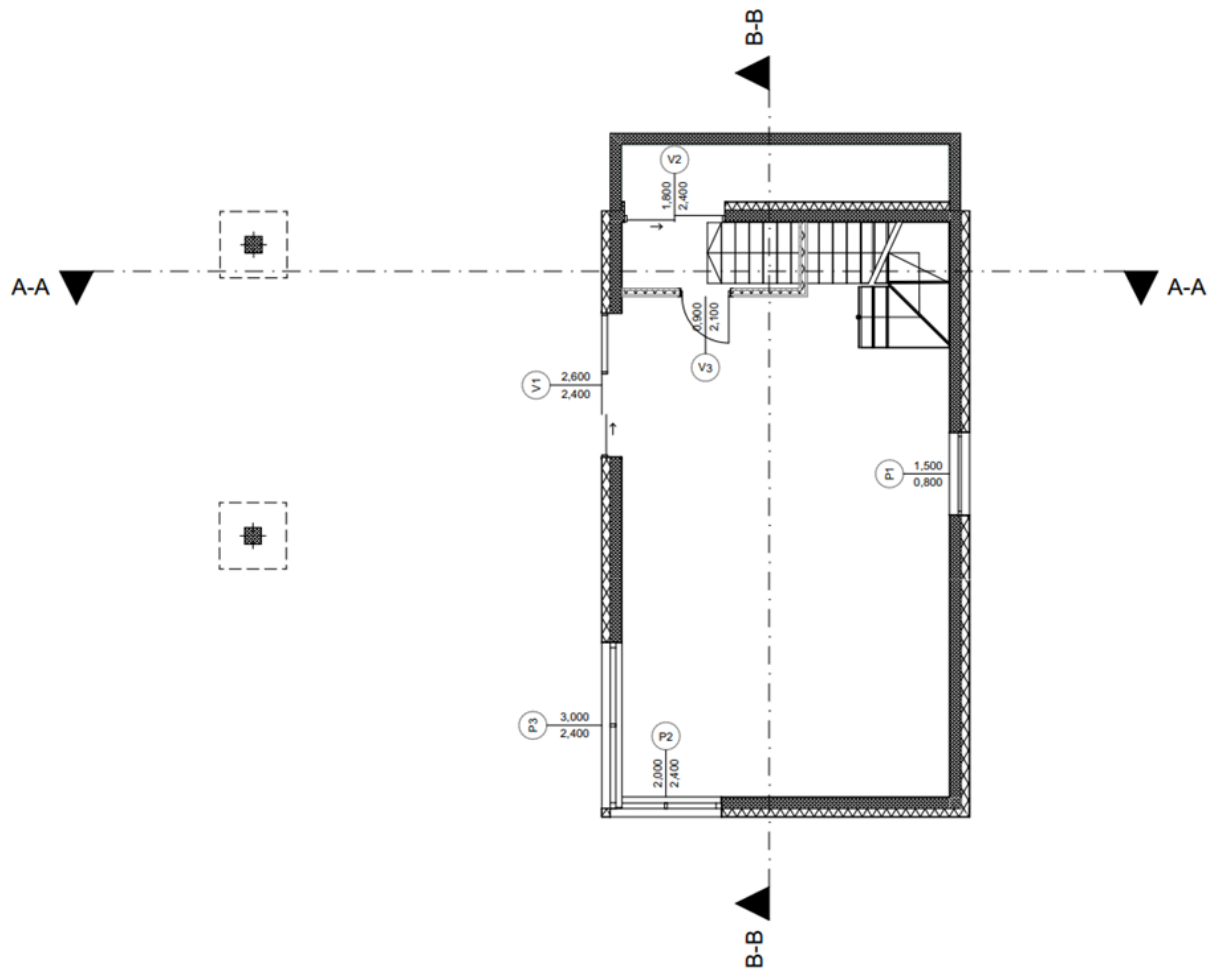
Na sljedećim slikama prikazana su pročelja modela.



Slika 5. Pročelja predmetne zgrade

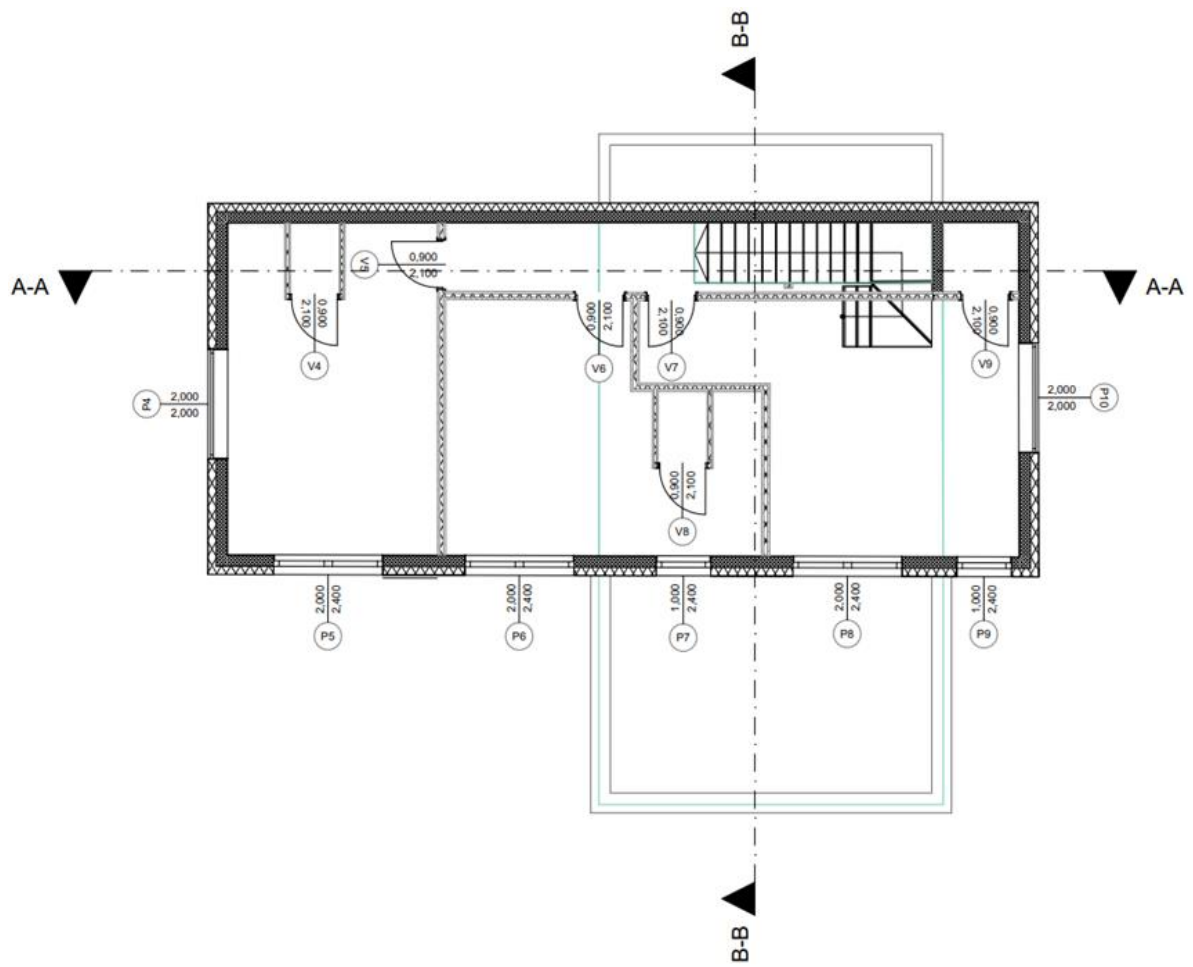
Također prikazani su i tlocrti prizemlja i 1. kata modela te karakteristični presjeci A-A i B-B.

- TLOCRT PRIZEMLJA



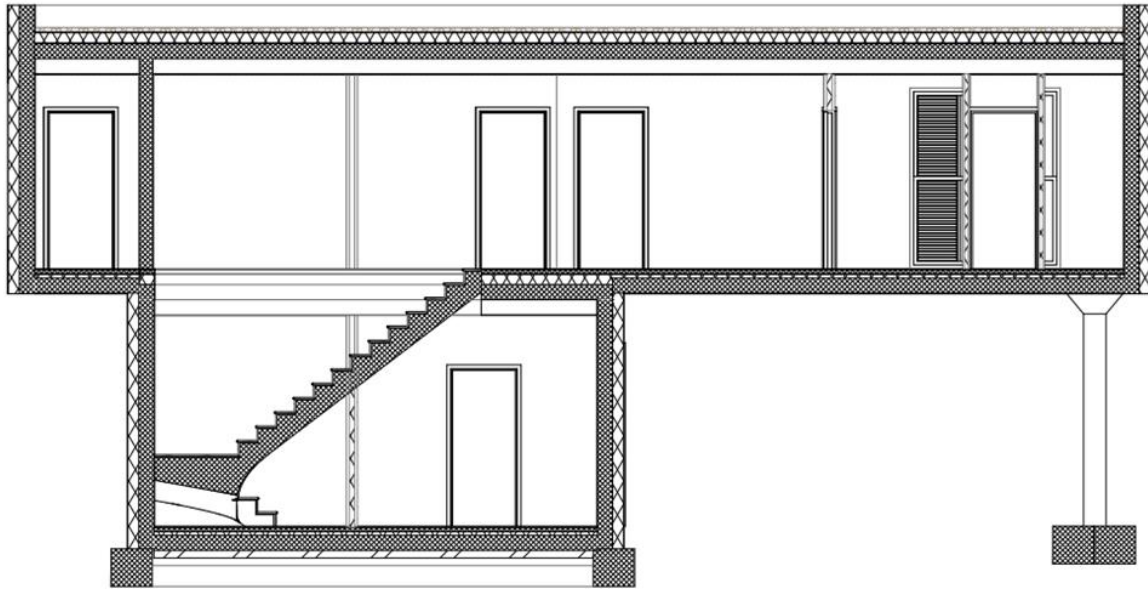
Slika 6. Tlocrt prizemlja

- TLOCRT 1. KATA



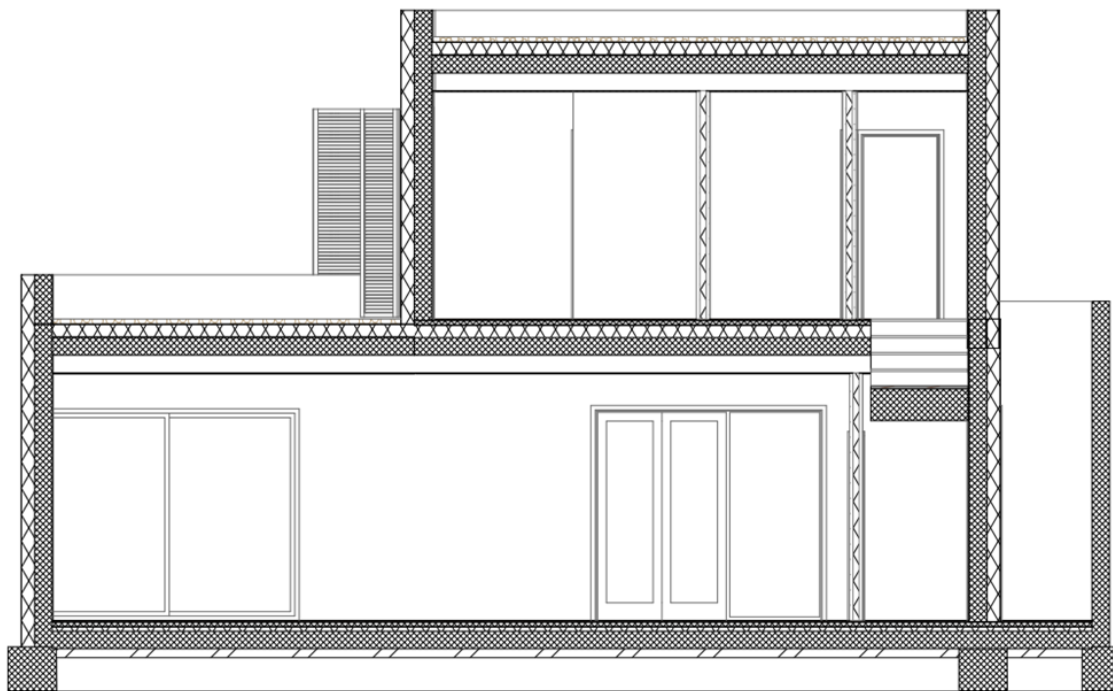
Slika 7. Tlocrt 1. kata

- PRESJEK A-A



Slika 8. Presjek A-A

- PRESJEK B-B



Slika 9. Presjek B-B

2.2. Elementi građevine

Zgrada se temelji na trakastim temeljima, cijela konstrukcija zgrade je armiranobetonska. Nosivi zidovi su od armiranog betona debljine 20 cm, pregradni zidovi su debljina 15 cm i 10 cm sastavljeni od gips-kartonskih ploča između kojih se nalazi ispuna od mineralne vune.

Svjetla visina prizemlja iznosi 3,1 m dok svjetla visina 1. kata iznosi 2,85 m.

Međukatna konstrukcija je armirano-betonska ploča debljine 20 cm. Krov zgrade je predviđen kao neprohodni ravni krov. U predmetnoj zgradi također su predviđeni spuštene stropovi.

Detaljan opis odabranih slojeva svakog građevnog elementa prikazan je u poglavlju 4.

Vertikalna komunikacija ostvariti će se unutarnjim jednokrakim stubištem izvedenim od armiranog betona.

Okviri vanjske stolarije su od aluminijski dok je ostakljenje od troslojnog IZO stakla. Za zaštitu od insolacije predviđene su škure. Unutarnja stolarija je od punog drveta.

2.3. Tehnički sustavi

Odabrano je centralno grijanje prostora i priprema PTV s dizalicom topline. Grijanje je podno, sustav razvoda grijanja je dvocjevan a regulacija se vrši prema unutrašnjoj temperaturi uz pomoć termostatskih ventila sa sobnim termostatom. Odbrana je dizalica topline zrak – voda.

Na krovu zgrade predviđen je fotonaponski sustav ukupne efektivne površine PV modula (bez okvira) 10 m². Orijentacija PV modula je prema jugu s nagibom od 30 stupnjeva.

Za shemu sustava mehaničke ventilacije odabrana je shema 2 – dovod i odvod zraka s rekuperacijom topline i bez toplinske pripreme.

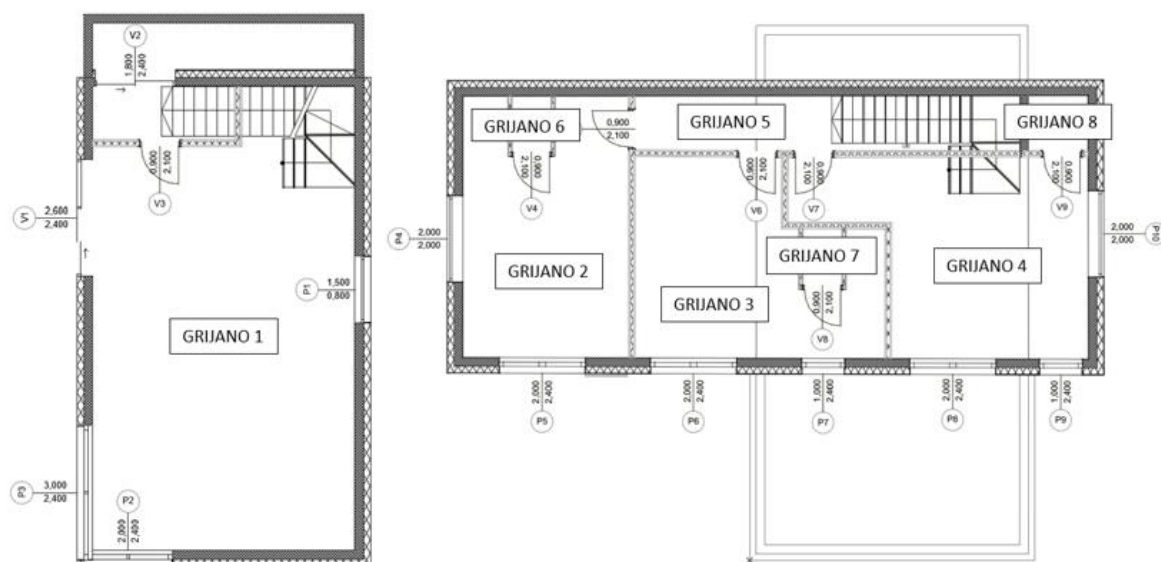
Karakteristike tehničkih sustava su detaljnije opisane u poglavlju 6.

3. Geometrijske karakteristike zgrade

Kako bi se mogao provesti proračun geometrijskih karakteristika zgrade potrebno je poznavati ulazne podatke potrebne za proračun. Ulazni podaci za proračun dobiveni su pomoću BIM modela predmetne zgrade prikazanog u 2. poglavlju rada.

Pod promatrane geometrijske karakteristike spadaju: oplošje grijanog dijela zgrade, volumen grijanog dijela zgrade, neto obujam grijanog zraka, ploština korisne površine grijanog dijela zgrade i faktor oblika.

U BIM modelu prvo su utvrđene grijane i negrijane zone zgrade prikazane na slici u nastavku. Sve prostorije u zgradi su grijane te nema negrijanih zona.



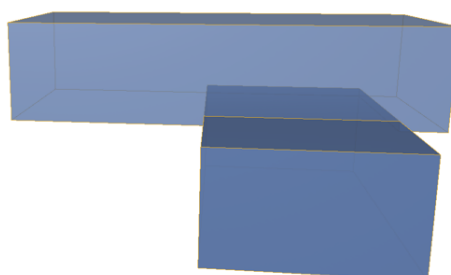
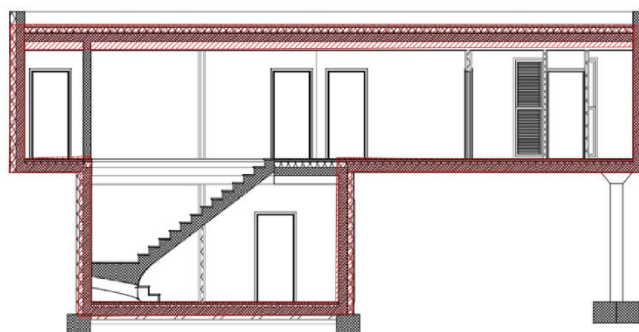
Slika 10. Grijane i negrijane zone

Pomoću površine i neto volumena definiranih zona prikazanih u tablici 1 dobiven je neto obujam grijanog zraka (V) te ploština korisne površine grijanog dijela zgrade (A_k).

Tablica 1. Grijane zone

GRIJANE ZONE		
ZONA	Površina [m ²]	Volumen (neto) [m ³]
Grijano 1	62,74	191,69
Grijano 2	22,46	63,91
Grijano 3	22,02	62,63
Grijano 4	25,69	73,08
Grijano 5	11,38	32,44
Grijano 6	1,17	3,32
Grijano 7	1,17	3,34
Grijano 8	1,63	4,65
Ukupno:	A_k= 148,26	V= 435,06

Obujam grijanog dijela zgrade (V_e) dobiven je direktno modeliranjem u BIM-u, a oplošje grijanog dijela zgrade (A) proračunom.



Bruto volumen [m ³]
595,55

Slika 11. Obujam (plavo) i oplošje (crveno) grijanog dijela zgrade

Oplošje grijanog dijela zgrade (A) je suma površina svih građevnih dijelova koji odvajaju grijani dio zgrade od vanjskog prostora, tla ili negrijanih dijelova zgrade. [4]

Sumom površina navedenih građevnih dijelova dobivenih iz BIM modela za predmetnu zgradu tj. sumom svih zidova na granici grijanog i vanjskog prostora, otvora na granici grijanog i vanjskog prostora, podova na tlu te površine ravnog krova i dijela međukatne konstrukcije koji se nalazi na granici grijanog i vanjskog prostora dobiva se oplošje grijanog dijela zgrade $A = 495,62 \text{ m}^2$. (Označeno crvenom bojom na slici 11.)

Faktor oblika je omjer prethodno izračunatog oplošja grijanog dijela zgrade A i volumena grijanog dijela zgrade V_e . Rezultat faktora oblika dan je u tablici 2. „Geometrija zgrade i faktor oblika zgrade direktno utječu na potrošnju energije u zgradi. Veličina transmisijskih gubitaka topline kroz oplošje grijanog volumena zgrade ovisi o veličini oplošja: što je veće oplošje, veća je transmisija topline.“ [4]

Svi rezultati proračuna geometrijskih karakteristika sažeto su prikazani u tablici 2.

Tablica 2. Geometrijske karakteristike zgrade

OPLOŠJE GRIJANOG DIJELA ZGRADE	$A \text{ [m}^2\text{]}$	495,62
VOLUMEN GRIJANOG DIJELA ZGRADE	$V_e \text{ [m}^3\text{]}$	595,55
VOLUMEN GRIJANOG ZRAKA	$V \text{ [m}^3\text{]}$	435,06
FAKTOR OBLIKA	$f_o = \frac{A}{V_e} \text{ [m}^{-1}\text{]}$	0,83
PLOŠTINA KORISNE POVRŠINE	$A_k \text{ [m}^2\text{]}$	148,26

4. Slojevi građevnih dijelova zgrade

U ovom poglavlju su prikazani definirani slojevi svih građevnih dijelova zgrade.

Pod građevne dijelove zgrade spadaju:

- vanjski zidovi
- zidovi između grijanih dijelova različitih korisnika
- podovi na tlu
- stropovi između grijanih dijelova različitih korisnika
- stropovi s podnim grijanjem iznad vanjskog prostora
- ravni krovovi iznad grijanog prostora.

U tablicama 3. – 9. navedeni su slojevi za svaki pojedinačni građevni dio. Redoslijed slojeva je u smjeru toplinskog toka. Navedene su i pripadajuće karakteristike svakog pojedinog sloja koje uključuju:

d [cm] - debljina sloja

λ [W/mK] - toplinska provodljivost

μ [-] - faktor otpora difuziji vodene pare

ρ [kg/m³] - gustoća materijala

Tablica 3. Slojevi vanjskih zidova

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Vapneno-cementna žbuka	1,000	1,000	20,00	1800,00
2	Armirani beton	20,000	2,600	110,00	2500,00
3	Mort za lijepljenje i armiranje	0,500	0,930	28,00	1700,00
4	Ploča za kontaktne fasade (toplinska izolacija)	15,000	0,034	1,10	95,00
5	Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	0,900	14,00	1650,00
6	Silikatna završna žbuka	0,200	0,700	40,00	1800,00
Definirane ploštine [m ²]:				Sjeveroistok	50,43
				Jugoistok	47,21
				Jugozapad	38,02
				Sjeverozapad	48,59

Tablica 4. Slojevi zidova između grijanih dijelova različitih korisnika $d= 10$ cm

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Ploča za pregradne zidove	4,000	0,038	1,10	30,00
2	Mineralna vuna (MW)	2,000	0,034	1,00	25,00
3	Ploča za pregradne zidove	4,000	0,038	1,10	30,00
Definirana ploština [m ²]:					16,83

Tablica 5. Slojevi zidova između grijanih dijelova različitih korisnika $d= 15$ cm

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Ploča za pregradne zidove	4,000	0,038	1,10	30,00
2	Mineralna vuna (MW)	7,000	0,034	1,00	25,00
3	Ploča za pregradne zidove	4,000	0,038	1,10	30,00
Definirana ploština [m ²]:					73,35

Tablica 6. Stropovi između grijanih dijelova različitih korisnika

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Keramičke pločice	1,500	1,300	200,00	2300,00
2	Hidroizolacija	0,500	0,250	6000,00	1200,00
3	Cementni estrih	5,000	1,600	50,00	2000,00
4	Polietilenska folija 0,25 mm	0,020	0,500	400000,00	980,00
5	Podna ploča (toplinska izolacija)	5,000	0,035	1,10	100,00
6	Bitumenska ljepenka (traka)	0,500	0,230	50000,00	1100,00
7	Armirani beton	20,000	2,600	110,00	2500,00
8	Neprovjetravan sloj zraka	20,000	-	1,00	-
9	Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	900,00
Definirana ploština [m ²]:					35,57

Tablica 7. Pod na tlu

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Keramičke pločice	1,500	1,300	200,00	2300,00
2	Hidroizolacija	0,500	0,250	6000,00	1200,00
3	Cementni estrih	5,000	1,600	50,00	2000,00
4	Polietilenska folija 0,25 mm	0,020	0,500	400000,00	980,00
5	Podna ploča (toplinska izolacija)	5,000	0,035	1,10	100,00
6	Bitumenska ljepenka (traka)	0,500	0,230	50000,00	1100,00
7	Armirani beton	20,000	2,600	110,00	2500,00
8	XPS	10,000	0,035	200,00	35,00
9	Beton	10,000	2,000	100,00	2400,00
10	Pijesak, šljunak, tucanik	15,000	0,810	3,00	1700,00
Definirana ploština [m ²]:					68,13

Tablica 8. Ravni krovovi iznad grijanog prostora

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Gipskartonske ploče	1,250	0,250	8,00	900,00
2	Neprovjetran sloj zraka	20,000	-	1,00	-
3	Armirani beton	20,000	2,600	110,00	2500,00
4	Bitumenska traka s uloškom od Al folije	1,020	160,000	3000000,00	1600,00
5	ploča za ravne krovove (toplinska izolacija)	14,000	0,038	1,10	135,00
6	TPO membrana	0,200	0,260	85000,00	1600,00
7	Geotekstil 150-200 g/m ²	0,160	0,200	1000,00	900,00
8	Pijesak, šljunak, tucanik	6,000	0,810	3,00	1700,00
Definirana ploština [m ²]:					124,82

Tablica 9. Stropovi s podnim grijanjem iznad vanjskog prostora

R.b.	Materijal	d [cm]	λ [W/mK]	μ [-]	ρ [kg/m ³]
1	Keramičke pločice	1,500	1,300	200,00	2300,00
2	Hidroizolacija	0,500	0,250	6000,00	1200,00
3	Cementni estrih	5,000	1,600	50,00	2000,00
4	Polietilenska folija 0,25 mm	0,020	0,500	400000,00	980,00
5	Podna ploča (Toplinska izolacija)	5,000	0,035	1,10	100,00
6	Bitumenska ljepenka (traka)	0,500	0,230	50000,00	1100,00
7	Armirani beton	20,000	2,600	110,00	2500,00
8	Mineralna vuna (MW)	10,000	0,034	1,00	25,00
9	Polimerno-cementno ljepilo armirano staklenom mrežicom	0,500	0,900	14,00	1650,00
10	Vapneno-cementna žbuka	0,200	1,000	20,00	1800,00
Definirana ploština [m ²]:					55,96

5. Otvori (prozirni i neprozirni elementi) zgrade

Kao tip ostakljenja je odabrano trostruko izolirajuće staklo s dva stakla niske emisije (dvije Low-E obloge), dok je okvir predviđen kao metal s prekinutim toplinskim mostom.

Kao zaslone promatranih otvora odabrane su škure.

Prilikom odabira prozora u toplim klimatskim uvjetima preporuča se zadržati sunčevo opterećenje izvan unutarnjeg prostora što se postiže odabirom otvora sa što nižom vrijednosti g^{\perp} , dok su nešto viši transmisijski gubici (U_w) dopustivi. [3]

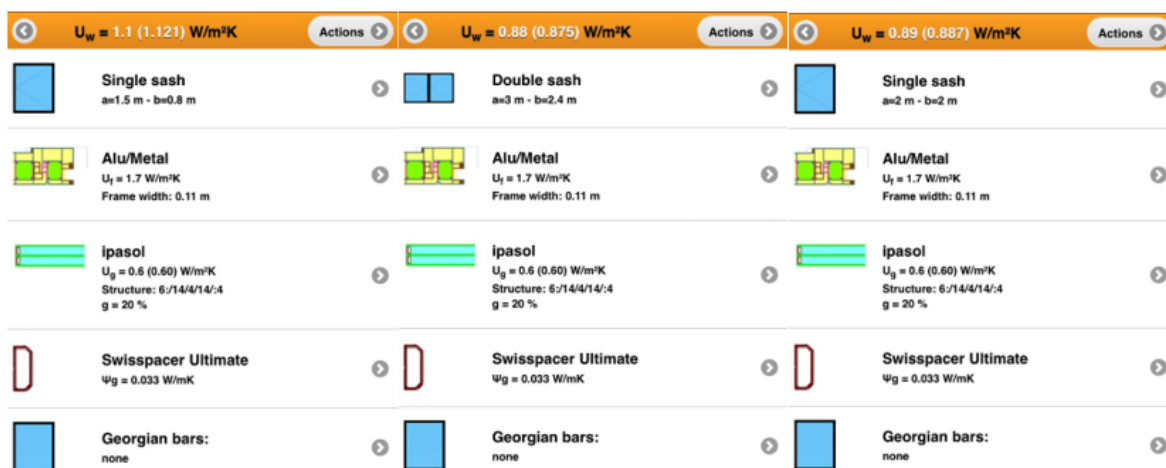
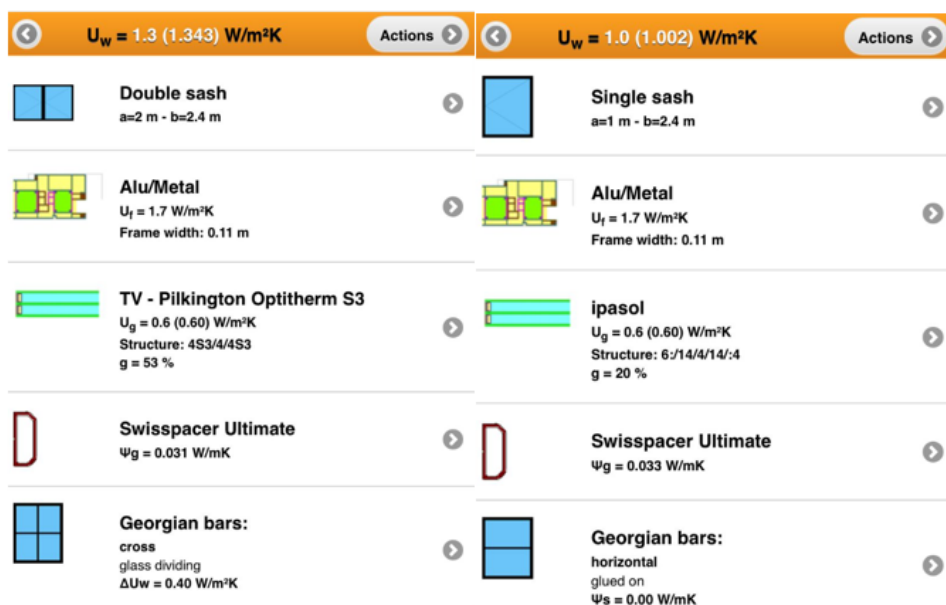
Pomoću mobilne aplikacije Caluwin (korisničko sučelje nalazi se na slici 12.) za odabrani tip ostakljenja, okvira i dimenzije otvora dobivene su vrijednosti:

U_f [W/m²K] - koeficijent prolaska topline kroz okvir otvora

U_g [W/m²K] - koeficijent toplinske provodljivosti ostakljenja

U_w [W/m²K] - koeficijent toplinske provodljivosti otvora

Sve dobivene vrijednosti za svaki pripadajući otvor navedene su u tablici 10.



Slika 12. Korisničko sučelje - Caluwin

Tablica 10. Popis otvora s njihovim pripadajućim U vrijednostima

Otvori na granici grijano-vani						
Otvor	Dimenzije [m]	Površina otvora [m ²]	U_f [W/m ² K]	U_g [W/m ² K]	ψ_g [W/mK]	U_w [W/m ² K]
P-GV-JI-001-PR	2×2,4	4,8	1,7	0,6	0,031	1,343
P-GV-JI-004-1K	2 × 2,4	4,8	1,7	0,6	0,031	1,343
P-GV-JI-005-1K	2×2,4	4,8	1,7	0,6	0,031	1,343
P-GV-JI-006-1K	1×2,4	2,4	1,7	0,6	0,033	1,002

P-GV-JI-007-1K	2×2,4	4,8	1,7	0,6	0,031	1,343
P-GV-JI-008-1K	1×2,4	2,4	1,7	0,6	0,033	1,002
P-GV-JZ-002-PR	3×2,4	7,2	1,7	0,6	0,033	0,875
P-GV-JZ-009-1K	2×2	4	1,7	0,6	0,033	0,887
P-GV-SI-003-PR	1,5×0,8	1,2	1,7	0,6	0,033	1,121
P-GV-SI-010-1K	2×2	4	1,7	0,6	0,033	0,887

6. Proračun i ocjena fizikalnih svojstava zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu

Proračun je proveden koristeći računalni program KI Expert Plus.

U programu je potrebno definirati podatke o predmetnoj zgradi za koju se vrši proračun. U te podatke spadaju:

- definirane zone
- klimatski podaci
- geometrijske karakteristike (proračunate u poglavlju 3.)
- građevni dijelovi i slojevi svakog pojedinog građevnog dijela (definirani u poglavlju 4.)
- prijenos topline prema tlu
- toplinski mostovi
- podaci o otvorima (definirani u poglavlju 5.)
- zaštita od sunčevog zračenja
- definirani termotehnički sustavi
- definirani sustav rasvjete
- definirani fotonaponski sustavi

6.1. Zone

„Ukoliko se projektira zgrada s više različitih zona (temperaturne razlike unutarnjih projektnih temperatura između zona više od 4K (°C), različita namjena korištenja, uporabljeni termotehnički sustav, režim uporabe termotehničkog sustava), tada se prema uvjetima Propisa rade odvojeni proračuni za svaku zonu.“ [5]

Za predmetnu zgradu nije potrebno dijeljenje na toplinske zone, te se cijela zgrada promatra kao jedna zona.

Kod definiranja zone potrebno je definirati njenu namjenu (za predmetnu zgradu proračun je proveden za obiteljsku kuću) kako bi se unaprijed odredile najviše Propisom dozvoljene vrijednosti specifične godišnje potrošnje energije za grijanje i primarne energije ovisno o namjeni.

Temeljem odabrane vrste prostora program koristi unutarnje projektne temperature za sezone grijanja i hlađenja s kojima ulazi u proračun potrebne energije te definira period korištenja, odnosno definira režim rada termotehničkog sustava zone/zgrade. [5]

Vrsta prostora	Sezona grijanja zimi ϑ_{int} , °C	Kontinentalna Hrvatska – sezona hlađenja ϑ_{int} , °C	Primorska Hrvatska - sezona hlađenja ϑ_{int} , °C
Obiteljske kuće	20	22	24
Stambene zgrade	20	22	24
Uredske, administrativne i druge poslovne zgrade slične pretežite namjene	20	22	24
Školske, fakultetske zgrade, i druge odgojne i obrazovne ustanove	20	22	24
Vrtići	22	22	24
Knjižnice – prostorije za čitanje	20	22	24
Knjižnice – prostorije s policama	20	22	24
Bolnice i zgrade za rehabilitaciju	22	22	24
Hoteli, moteli i sl.	20	22	24
Muzeji	20	22	24
Ostale zgrade sa stalnim radom (kolodvori, i sl.)	20	22	24
Robne kuće, trgovački centri, trgovine	20	22	24
Sportske zgrade	18	22	24
Radionice i proizvodne hale	18	22	24
Kongresni centri	20	22	24
Kazališta i kina	20	22	24
Kantine	20	22	24
Restorani	20	22	24
Kuhinje	20	22	24
Serverske sobe, kompjuterski centri	-	24	26
Spremišta opreme, arhive	16	22	24
Bazeni	28	26	26
Zgrade koje nisu navedene	20	22	24

Slika 13. Unutarnje projektne temperature za sezone grijanja i hlađenja

Tablica 11. Definirani podaci o zoni 1

Zgrada		
Namjena zgrade	Stambena zgrada	
Podjela zgrade u toplinske zone	ne	
Toplinska zona 1		
Naziv zone	Zona 1	
Namjena zone	Stambeni dio	
Vrsta zgrade	Obiteljske kuće	
Vrsta prostora	Obiteljske kuće	
Unutarnja projektna temperatura u sezoni grijanja	$\Theta_{\text{int,set,H}} [^{\circ}\text{C}]$	20,00
Unutarnja projektna temperatura u sezoni hlađenja	$\Theta_{\text{int,set,C}} [^{\circ}\text{C}]$	24,00
Srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najtoplijeg mjeseca na lokaciji zgrade	$\Theta_{\text{e,mj,max}} [^{\circ}\text{C}]$	24,90
Srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade	$\Theta_{\text{e,mj,min}} [^{\circ}\text{C}]$	6,00
Srednja godišnja vlažnost zraka izvan zone	$\varphi_{\text{e}} [\%]$	70,00
Relativna unutarnja vlažnost zraka	$\varphi_{\text{i}} [\%]$	50,00
Vrijeme rada sustava	Sustavi s prekidom rada noću	
Period korištenja sustava za grijanje/hlađenje	08:00 - 23:00	
Period korištenja sustava za mehaničku ventilaciju	08:00 - 23:00	
Broj dana korištenja sustava grijanja/hlađenja u tjednu	$d_{\text{use,tj}} [\text{dan/tj}]$	7,00
Broj sati rada sustava grijanja/hlađenja	$t_{\text{d}} [\text{h}]$	17,00
Broj sati korištenja prostora za mehaničku ventilaciju	$t_{\text{kor}} [\text{h}]$	15,00
Broj sati rada sustava mehaničke ventilacije/klimatizacije	$t_{\text{v,mech}} [\text{h}]$	17,00
Minimalno potrebni protok vanjskog zraka po jedinici	$V_{\text{A}} [\text{m}^3/\text{m}^2]$	0,00

Tablično su prikazani svi definirani podaci o zoni koji će se koristiti za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje.

6.2. Klimatski podaci

Klimatski podaci za predmetnu zgradu dobiveni su za referentnu meteorološku postaju. Referentna meteorološka postaja je Pula s nadmorskom visinom 63 m n.v.

Predmetna građevina se nalazi u 4. zoni globalnog Sunčevog zračenja sa srednjom mjesečnom temperaturom vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade $\Theta_{e,mj,min} > 3^{\circ}\text{C}$ i unutarnjom temperaturom $\Theta_i \geq 18^{\circ}\text{C}$.

Vrijednosti klimatoloških podataka (temperatura zraka, tlak vodene pare, relativna vlažnost zraka i brzina vjetra) su prikazani u tablici 12. posebno po mjesecima te na godišnjoj razini.

Tablica 12. Klimatološki podaci po mjesecima i na godišnjoj razini

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	God.
	Temperature zraka (° C)												
m	6	6,2	9,1	12,8	18,1	22,2	24,9	24,5	19,5	15,4	11	7,2	14,8
min	-3,5	-6,2	-2	3,8	8,7	14	16,6	15,8	11,6	5,2	0	-5	-6,2
max	14,4	13,8	16,4	19,8	25,8	30,4	30,7	31	26,2	22,4	19,7	16	31
	Tlak vodene pare (Pa)												
m	720	730	830	1020	1360	1700	1860	1860	1630	1290	990	780	1230
	Relativna vlažnost zraka (%)												
m	76	73	71	70	68	65	62	64	69	74	77	75	70
	Brzina vjetra (m/s)												
m	2,7	3	3,1	3	2,4	2,3	2,2	2,1	2,2	2,8	2,9	2,9	2,6

6.3. Prijenos topline prema tlu

Kod utvrđivanja prijenosa topline prema tlu potrebno je definirati način prijenosa topline prema tlu – radi li se o podu položenom direktno na tlo, uzdignutom (izdignutom) podu, ili o (ne)grijanom podrumu. [5]

U slučaju predmetne zgrade pod je položen direktno na tlo.

Kako bi bilo moguće izvršiti proračun gubitaka poda na tlu potrebno je provjeriti zadovoljava li pod koeficijent prolaska topline. Također je potrebno definirati i zid koji omeđuje predmetni građevni dio (pod na tlu). U ovom slučaju radi se o zidu na granici grijano – vani. Potrebno je

također definirati izloženi opseg tj. duljinu spoja poda i vanjskog zida (linijski gubitak – toplinski most). Definira se i horizontalna ili vertikalna (rubna) izolacija. Za slučaj predmetne zgrade definirana je rubna izolacija od ekstrudiranog polistirena (XPS).

6.4. Toplinski mostovi

Nije proveden proračun duljinskih gubitaka već su toplinski mostovi uzeti u obzir korekcijom koeficijenta prolaska topline pomoću paušalnog dodatka. Paušalni dodatak koji se koristi prilikom proračuna za predmetnu zgradu je paušalni dodatak za niskoenergetske zgrade koji iznosi $UTM = 0,02 \text{ W/m}^2\text{K}$. Koeficijent prolaska topline će se uvećati za iznos paušalnog dodatka te će program automatski tu povećanu vrijednost izračunatog koeficijenta prolaska topline građevnog dijela uvrstiti u proračun toplinskih (transmisijskih) gubitaka.

6.5. Zaštita od sunčevog zračenja

Izvršena je i provjera zadovoljavaju li pojedine prostorije zgrade po pitanju opasnosti od prekomjernog zagrijavanja tijekom ljetnog perioda. Kao kritične prostorije odabrane su prostorije s najvećim udjelom ostakljenja u površini pročelja s kritičnom orijentacijom. To su prostorije orijentirane prema jugoistoku i jugozapadu.

U tablici 13. prikazane su odabrane prostorije i rezultat proračuna, odabrane prostorije zadovoljavaju po pitanju zaštite od sunčevog zračenja te ne postoji opasnosti od prekomjernog zagrijavanja tijekom ljetnog perioda.

Tablica 13. Rezultati provjere prostorija u pogledu zaštite od sunčevog zračenja

Naziv prostorije	Orijentacija	A [m ²]	A _g [m ² f]	f	g _{tot f}	max	Zadovoljava
Prostorije JI	Jugoistok	54,41	5,76	0,11	0,01	0,20	Da
Prostorije JZ	Jugozapad	55,46	13,95	0,25	0,06	0,20	Da

6.6. Tehnički sustavi

Tablično su prikazani tehnički sustavi koji su definirani u programu te ulaze li, prema Pravilniku, u proračun isporučene i primarne energije ili ne (ovisno o vrsti zgrade).

Tablica 14. Definirani tehnički sustavi

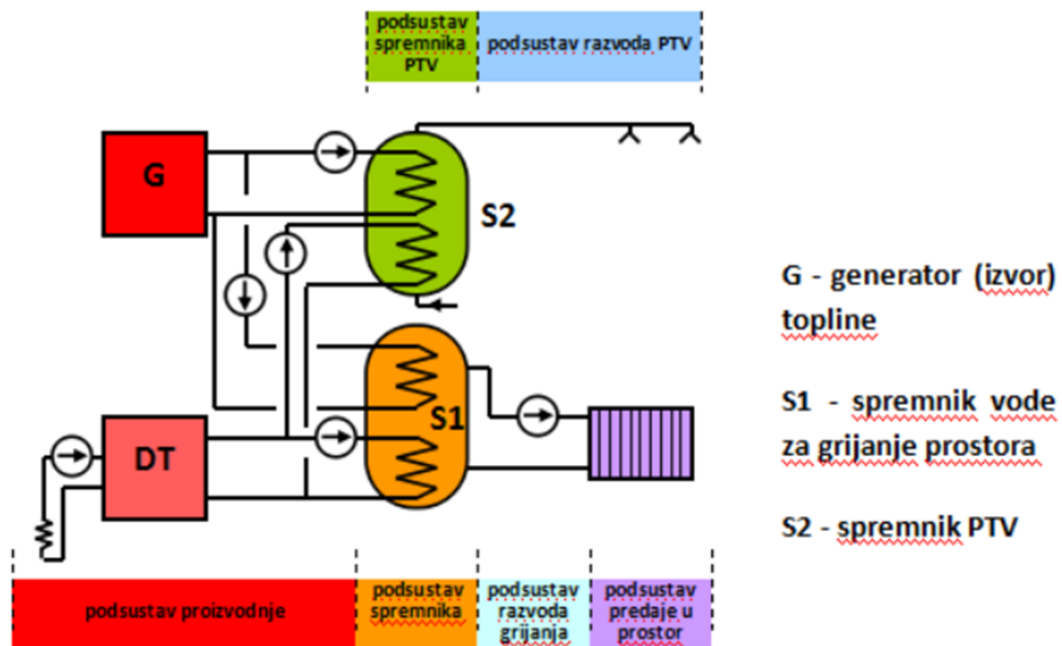
Sustav	Uzima se u obzir u proračunu
Sustav grijanja	DA
Sustav hlađenja	NE
Sustav pripreme PTV-a	DA
Sustav meh. ventilacije i klimatizacije	DA
Sustav rasvjete	NE

Sustav grijanja i pripreme PTV je centralan s dizalicom topline i kotlom kao dodatnim generatorom topline za grijanje i pripremu PTV sa spremnikom tople vode za grijanje i spremnikom PTV.

Sastoji se od podsustava:

- podsustav predaje topline u prostoru
- podsustav razvoda grijanja
- podsustav razvoda PTV
- podsustav proizvodnje s dizalicom topline i spremnikom tople vode za grijanje i spremnikom PTV

Konfiguracija sustava je prikazana na slici 14.



Slika 14. Konfiguracija sustava grijanja i pripreme PTV

Sumarni prikaz karakteristika termotehničkih sustava nalazi se u tablici u nastavku.

Table 15. Sumarni prikaz karakteristika termotehničkih sustava

Opis karakteristike	Vrijednost
Način grijanja zgrade	Centralno
Način pripreme potrošne tople vode	Centralno
Izvor energije za grijanje zgrade	Električna energija
Izvor energije za pripremu potrošne tople vode	Električna energija
Način hlađenja zgrade	Centralno
Vrsta ventilacije	Prisilna sa sustavom povrata topline, Prirodna
Vrsta i način korištenja sustava s obnovljivim izvorima energije	Dizalica topline, Fotonaпон

7. Rezultati proračuna i ocjene fizikalnih svojstava zgrade u odnosu na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu

7.1. Rezultat proračuna građevnih dijelova

Kao rezultat proračuna građevnih dijelova ustanovljeno je zadovoljavaju li građevni dijelovi definirani u 4. poglavlju u pogledu toplinske zaštite usporedbom dobivene vrijednosti koeficijenta prolaznosti topline (U - vrijednost) sa maksimalnim dozvoljenim koeficijentom prolaska topline (U_{\max}).

Tablica 16. Rezultati proračuna građevnih dijelova

Naziv građevnog dijela	U [W/m^2K]	U_{\max} [W/m^2K]	U pogledu toplinske zaštite
Vanjski zidovi	0,22	0,45	ZADOVOLJAVA
Zidovi između grijanih dijelova različitih korisnika $d=10$ cm	0,34	-	ZADOVOLJAVA
Zidovi između grijanih dijelova različitih korisnika $d=15$ cm	0,23	-	ZADOVOLJAVA
Stropovi između grijanih dijelova različitih korisnika	0,47	0,80	ZADOVOLJAVA
Pod na tlu	0,21	0,50	ZADOVOLJAVA
Stropovi s podnim grijanjem iznad vanjskog prostora	0,21	0,40	ZADOVOLJAVA
Ravni krov	0,24	0,30	ZADOVOLJAVA

8. Rezultati proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje

8.1. Rezultat proračuna – gubici topline

Proračun gubitaka topline proveden je za definirani sustav s prekidom rada noću te uz pretpostavku da se grijanje uključuje kada je vanjska temperatura zraka manja od 12°C.

Rezultati proračuna (slika 15.) dani su po mjesecima, pri čemu je:

$H_{t,H}$ [W/K] – ukupni koeficijent toplinskog gubitka po mjesecima za period grijanja

$H_{t,C}$ [W/K] – ukupni koeficijent toplinskog gubitka po mjesecima za period hlađenja

$\Theta_{int,set,H}$ [°C] - unutarnja projektna temperatura u sezoni grijanja

$\Theta_{int,set,C}$ [°C] - unutarnja projektna temperatura u sezoni hlađenja

$Q_{ht,H}$ [kWh] – toplinski gubici pojedinačno po mjesecima za period grijanja

$Q_{ht,C}$ [kWh] - toplinski gubici pojedinačno po mjesecima za period hlađenja

Mjesec	$H_{t,H}$ [W/K]	$H_{t,C}$ [W/K]	$\Theta_{int,H}$ [°C]	$\Theta_{int,C}$ [°C]	$\Theta_{e,m}$ [°C]	$Q_{ht,H}$ [kWh]	$Q_{ht,C}$ [kWh]		
Siječanj	183,56	232,94	20,00	24,00	6,00	1911,41	3118,79		
Veljača	184,27	232,97	20,00	24,00	6,20	1707,78	2785,34		
Ožujak	186,99	233,13	20,00	24,00	9,10	1516,99	2585,13		
Travanj	191,08	232,70	20,00	24,00	12,80	991,71	1877,86		
Svibanj	248,87	245,95	20,00	24,00	18,10	350,26	1078,09		
Lipanj	200,45	289,74	20,00	24,00	22,20	0,00	377,24		
Srpanj	222,49	31,02	20,00	24,00	24,90	0,00	0,00		
Kolovoz	224,26	-63,06	20,00	24,00	24,50	0,00	23,66		
Rujan	507,34	235,94	20,00	24,00	19,50	181,12	763,74		
Listopad	185,28	228,11	20,00	24,00	15,40	633,53	1458,82		
Studeni	182,86	230,63	20,00	24,00	11,00	1184,93	2158,71		
Prosinac	182,45	231,96	20,00	24,00	7,20	1736,98	2898,62		
						Godišnji gubici	10214,71	19126,00	

Slika 15. Rezultati proračuna toplinskih gubitaka na mjesečnoj razini

U tablici 17. prikazani su toplinski gubici hlađenja i grijanja na godišnjoj razini.

Tablica 17. Toplinski gubici na godišnjoj razini

	Toplinski gubici hlađenja [kWh]	Toplinski gubici grijanja [kWh]
Godišnje	19126,00	10214,71

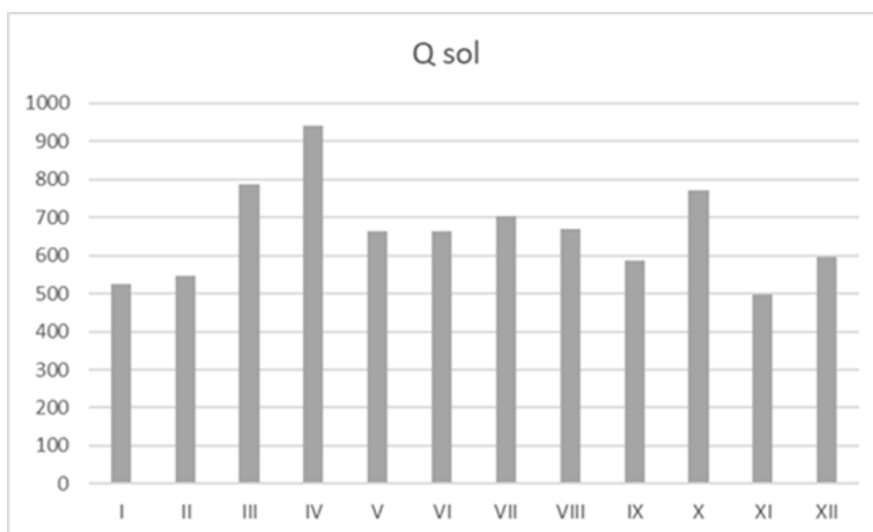
8.2. Rezultat proračuna – dobiti topline

Dobitci topline uzeti u obzir prilikom proračuna su unutarnji dobitci i solarni dobitci (dobitci od Sunčeva zračenja).

- **SOLARNI DOBITCI TOPLINE**

Kod proračuna solarnih dobitaka parametri koji se uzimaju u obzir definiraju se prilikom definiranja otvora. Osim površina i vrsta ostakljenja i okvira otvora za proračun je potrebno definirati i orijentaciju te utjecaj zaslona koji je posebno značajan i prilikom proračuna energije za hlađenje. [5]

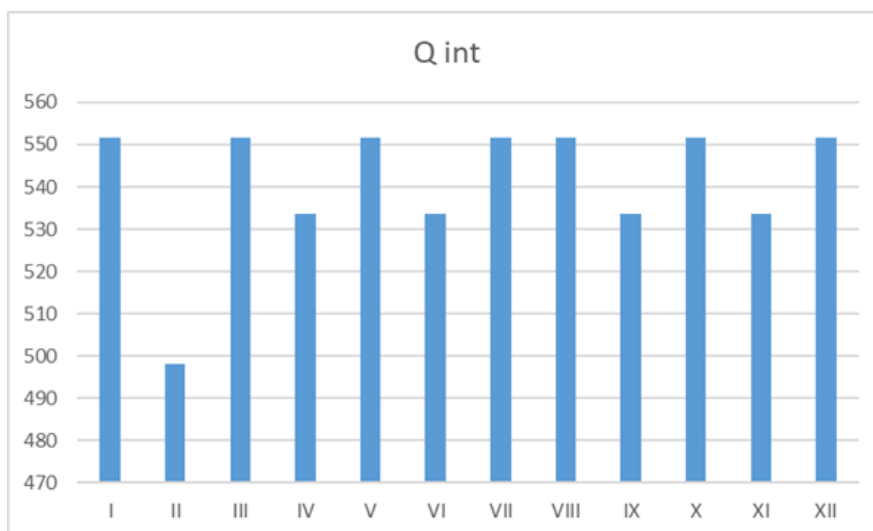
Nakon provedenog proračuna solarnih dobitaka kroz definirane otvore koji ulaze u proračun dobiveni su dobitci topline po mjesecima u kWh (slika 16).



Slika 16. Rezultat proračuna solarnih dobitaka

- **UNUTARNJI DOBITCI TOPLINE**

Unutarnji dobitci Q_{int} računaju se s vrijednošću 5 W/m^2 (vrijednost za stambene zgrade) ploštine korisne površine zgrade i program ih računa automatski. Dobiveni rezultati proračuna unutarnjih dobitaka u kWh na mjesečnoj razini sažeto su prikazani na dijagramu na slici 17.



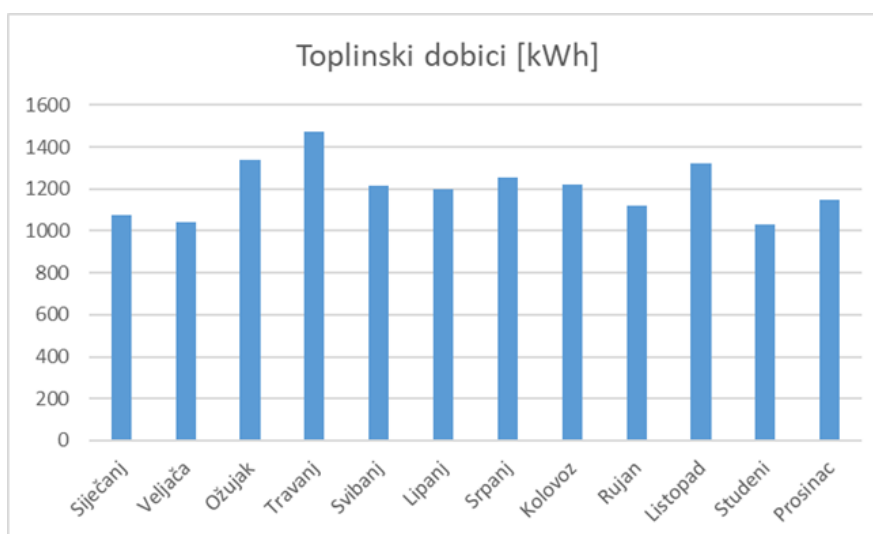
Slika 17. Rezultat proračuna unutarnjih dobitaka

Ukupni unutarnji i solarni dobitci na godišnjoj razini nalaze se u tablici 18.

Tablica 18. Rezultat proračuna dobitaka topline –ukupni unutarnji i solarni dobitci

Ukupni dobitci topline	Unutarnji dobitci topline	Q int = 6.493,79 [kWh]
	Solarni dobitci topline	Q sol = 7.953,82 [kWh]

Suma unutarnjih i solarnih dobitaka daje ukupne toplinske dobitke predmetne zgrade. Dijagram ukupnih toplinskih dobitaka na mjesečnoj razini nalazi se na dijagramu na slici 18. odnosno na godišnjoj razini u tablici 19.



Slika 18. Rezultat proračuna toplinskih dobitaka

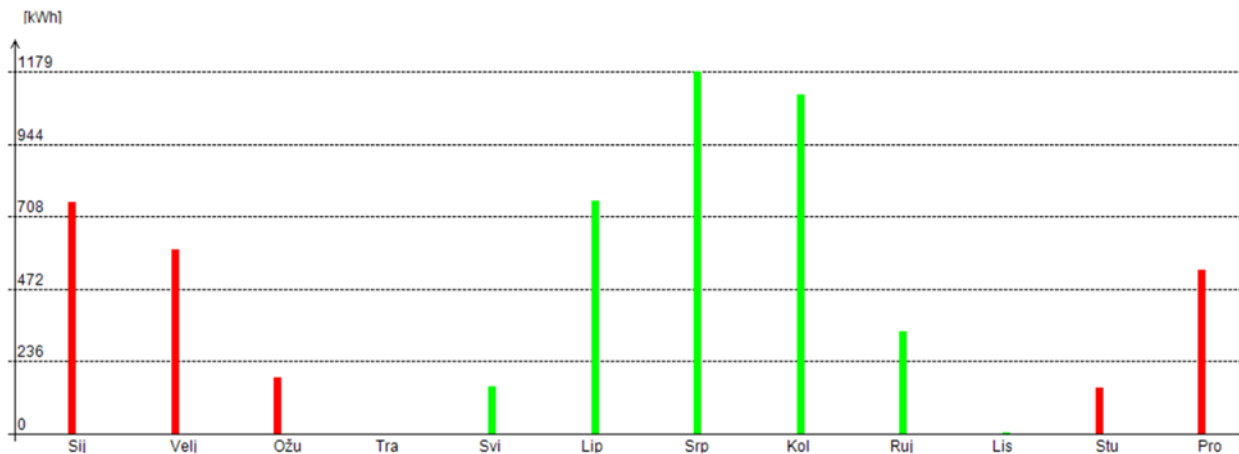
Tablica 19. Rezultat proračuna toplinskih dobitaka

	Toplinski dobitci [MJ]	Toplinski dobitci [kWh]
Godišnje	52011,39	14447,61

8.3. Rezultat proračuna – potrebna energija za grijanje i hlađenje

Proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje provodi se koristeći satnu metodu proračuna definiranu u Algoritmu za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN ISO 13790. Rezultati su iskazani na mjesečnoj i godišnjoj razini.

Koliko je kWh energije za grijanje ($Q_{H,nd}$) odnosno hlađenje ($Q_{C,nd}$) potrebno svaki pojedini mjesec prikazano je na grafu na slici 19. Potrebna energija za grijanje na grafu označena je crvenom bojom, a potrebna energija za hlađenje zelenom bojom.



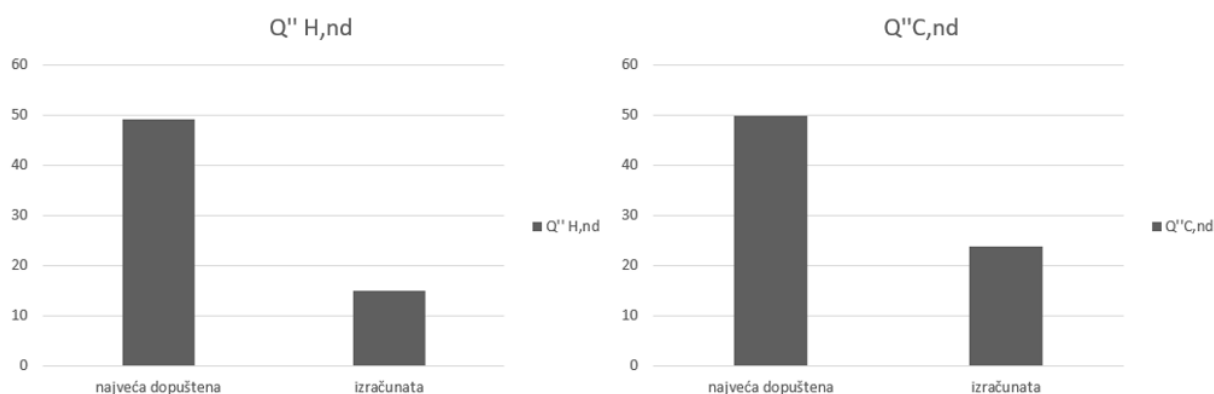
Slika 19. Grafički prikaz rezultata potrebne energije za grijanje i hlađenje

Vrijednosti dobivene proračunom iskazane na godišnjoj razini nalaze se u tablici.

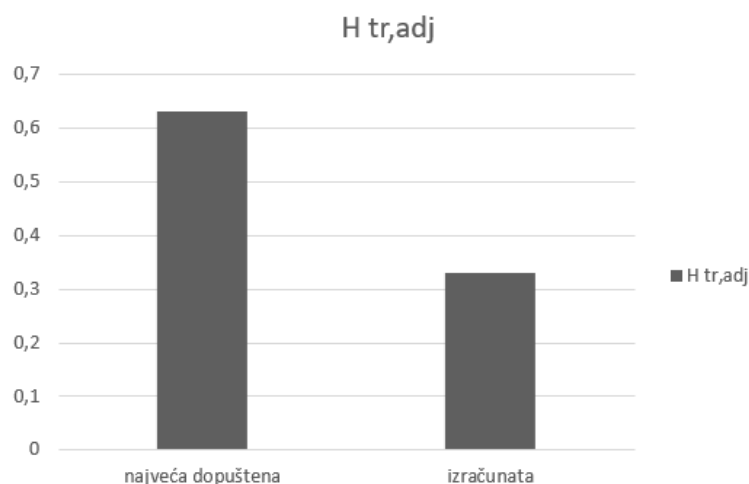
Tablica 20. Rezultati proračuna potrebna toplinska energija za grijanje i hlađenje zgrade

POTREBNA TOPLINSKA ENERGIJA ZA GRIJANJE I HLAĐENJE ZGRADE		
Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje $Q_{H,nd}$ [kWh/a]	2235,37	
Godišnja potrebna toplinska energija za grijanje po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade $Q''_{H,nd}$ [kWh/(m ² a)]	Najveća dopuštena	Izračunata
	49,13	15,18
Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje $Q_{C,nd}$ [kWh/a]	3544,16	
Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade $Q''_{C,nd}$ [kWh/(m ² a)]	Najveća dopuštena	Izračunata
	50,00	23,91
Koeficijent transmisijskog toplinskog gubitka po jedinici oplošja grijanog dijela zgrade $H_{tr,adj}$ [W/(m ² K)]	Najveća dopuštena	Izračunata
	0,63	0,33

Iz tablice može se uočiti da godišnje potrebne toplinske energije za grijanje odnosno hlađenje po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade ($Q''_{H,nd}$ i $Q''_{C,nd}$) ne premašuju najveće dopuštene propisane vrijednosti. Koeficijent transmisijskog toplinskog gubitka po jedinici oplošja grijanog dijela zgrade ($H_{tr,adj}$) također ne prelazi maksimalnu dopuštenu vrijednost. Usporedba vrijednosti dobivenih proračunom i maksimalnih dozvoljenih vrijednosti iz tablice 20. grafički je prikazana na slikama u nastavku.



Slika 20. Grafički prikaz rezultata $Q''_{H,nd}$ i $Q''_{C,nd}$



Slika 21. Grafički prikaz rezultata $H_{tr,adj}$

8.4. Rezultat proračuna - energetska svojstva zgrade i obnovljivi izvori energije

Iz rezultata energetske svojstva zgrade (isporučena i primarna energija) i rezultata proračuna energije dobivene iz obnovljivih izvora energije prikazanih u tablicama 21. i 22. vidljivo je da energetska svojstva - godišnja primarna energija po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade (E_{prim}) i udio godišnje isporučene energije za rad tehničkih sustava u zgradi koji je podmiren energijom iz obnovljivih izvora energije zadovoljavaju zahtjeve za zgrade gotovo nulte energije.

Tablica 21. Rezultat proračuna – energetska svojstva zgrade

ENERGETSKO SVOJSTVO ZGRADE		
Godišnja isporučena energija E_{del} [kWh/a]	386,30	
Godišnja primarna energija E_{prim} [kWh/a]	623,49	
Godišnja primarna energija po jedinici ploštine korisne površine grijanog dijela zgrade E_{prim} [kWh/(m ² a)]	Najveća dopuštena	Izračunata
	35,00	4,21

Tablica 22. Rezultat proračuna – obnovljivi izvori energije

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE		
Godišnja proizvedena toplinska energija iz obnovljivih izvora energije na lokaciji zgrade $E_{HW, RES}$ [kWh/a]	4520,76	
Godišnja proizvedena električna energija iz obnovljivih izvora energije na lokaciji zgrade $E_{EL, RES}$ [kWh/a]	2127,96	
Udio godišnje isporučene energije za rad tehničkih sustava u zgradi podmiren energijom iz obnovljivih izvora energije [%]	Ostvareno %	Minimalno potrebno ostvariti
	92,13	30

9. Aspekt dugoročnog higrotermalnog ponašanja

Higrotermalno ponašanje može se analizirati provedbom stacionarne (Glaserove metode) ili nestacionarne metode proračuna. U radu je proračun difuzije vodene pare proveden nestacionarnom metodom na numeričkim higrotermalnim modelima (HAM - eng. *Heat, air and moisture*) pomoću računalnog programa WUFI Light 6.7.

Za razliku od Glaserove metode gdje su prijenos topline i vlage međusobno odvojeni te se vlaga prenosi jedino difuzijom, a toplina vođenjem, kod dinamičkog proračuna transport vlage i topline je kombiniran i prisutni su svi mehanizmi prijenosa topline i vlage. Dinamičke higrotermalne simulacije zahtijevaju veći broj ulaznih podataka, ali istovremeno nude veće mogućnosti analize kao na primjer mogućnost praćenja dugoročnog higrotermalnog ponašanja.

[3]

Proračun je proveden za sljedeće građevne dijelove:

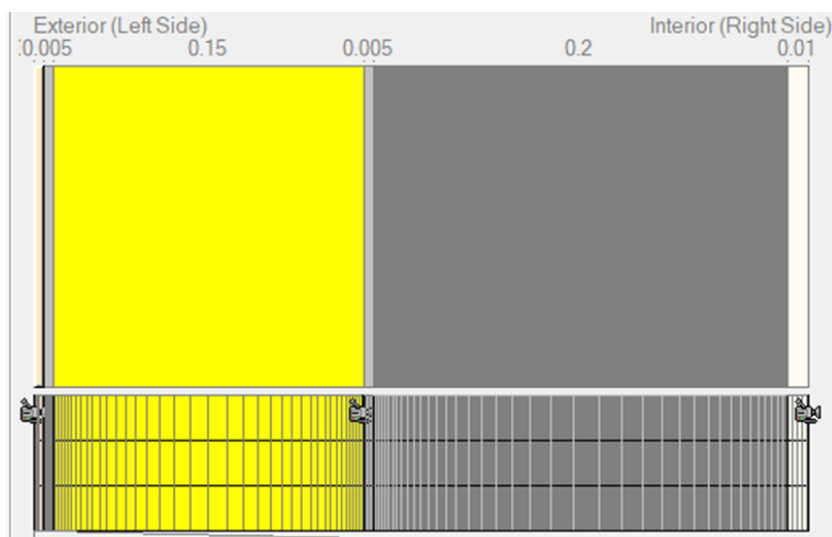
- vanjski zidovi
- ravni krov
- unutarnji (pregradni) zidovi d=15 cm
- unutarnji (pregradni) zidovi d=10 cm
- pod na tlu

9.1. Proračun higrotermalnog ponašanja – definiranje slojeva

Kako je za proračun korištena verzija programa Wufi light 6.7. koja je besplatna i u usporedbi s komercijalnim verzijama ovog softvera posjeduje određena pojednostavljenja, u programu nije moguće samostalno definirati materijale sa željenim karakteristikama koje u potpunosti odgovaraju karakteristikama materijala predviđenih kod definiranja slojeva građevnih dijelova u poglavlju 4. Već je prilikom kreiranja rasporeda slojeva građevnog dijela moguće samo odabrati materijale iz postojeće baze materijala. Iz tog razloga odabrani su materijali koji su najbliži onima predviđenim u ranijim poglavljima.

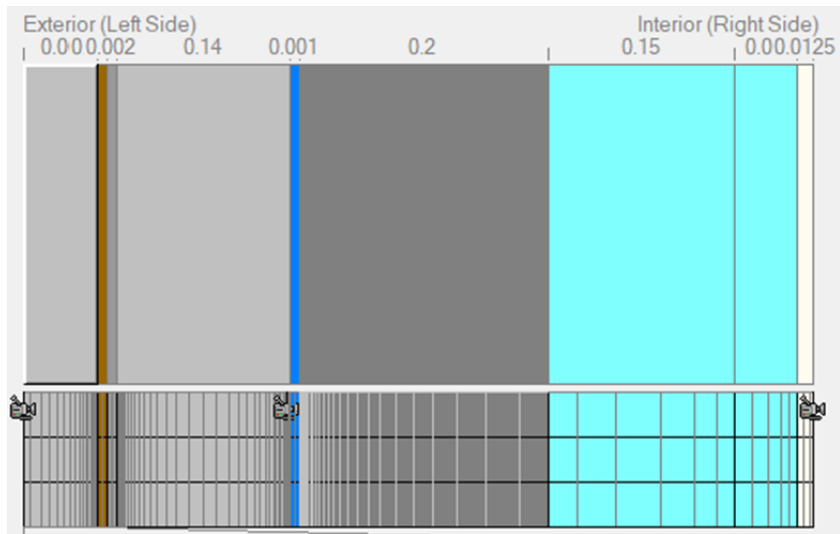
Na slikama u nastavku prikazani su rasporedi slojeva za svaki građevni dio za koji se vrši proračun higrotermalnog ponašanja.

Prilikom definiranja slojeva potrebno je definirati i točke motrišta, svaka kamera na slikama označava po jednu točku motrišta.



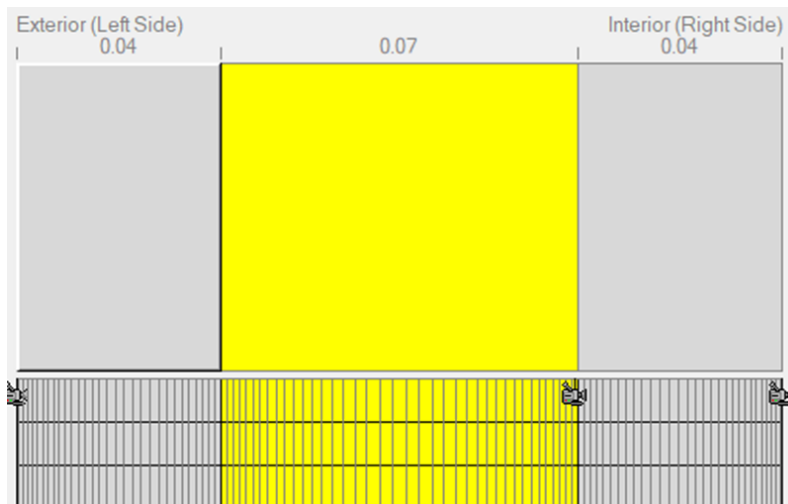
Assembly		
No.	Layer/Material (from Outside to Inside)	Thickn. [m]
1	Mineral Plaster (stucco, A-value: 0.1 kg/m ² h ^{0.5})	0.002
2	Ytong Multipor Adhesive	0.005
3	Mineral Wool (heat cond.: 0.04 W/mK)	0.15
4	Ytong Multipor Adhesive	0.005
5	Concrete, w/c=0.5	0.2

Slika 22. Slojevi vanjskog zida



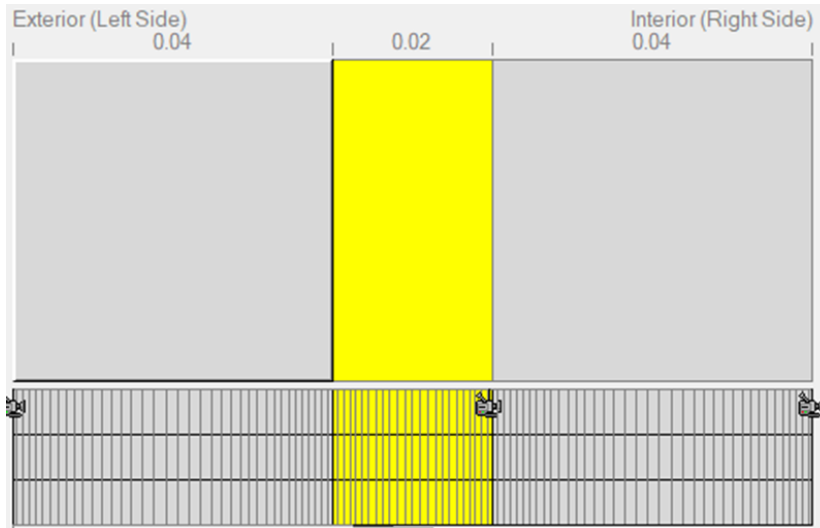
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m³]
1	generic gravel	0.06	5.0
2	TP-KD 430	0.0016	0.5
3	TPO membrane	0.002	0.0
4	Flumroc-Dämmplatte 1	0.14	0.01
5	vapour barrier (sd=1500m)	0.001	0.0
6	Concrete, w/c=0.5	0.2	85.0
7	Air Layer 150 mm	0.15	1.88
8	Air Layer 50 mm	0.05	1.88
9	Gypsum Board	0.0125	6.3

Slika 23. Slojevi ravnog krova



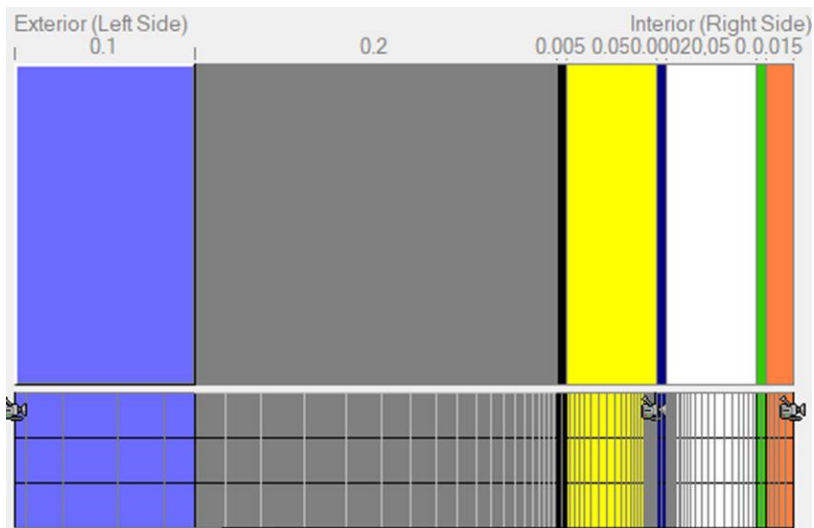
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m³]
1	Interior Gypsum Board	0.04	8.65
2	Mineral Wool (heat cond.: 0.04 W/mK)	0.07	1.79
3	Interior Gypsum Board	0.04	8.65

Slika 24. Slojevi pregradnog zida $d=15\text{ cm}$



No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m³]
1	Interior Gypsum Board	0.04	8.65
2	Mineral Wool (heat cond.: 0.04 W/mK)	0.02	1.79
3	Interior Gypsum Board	0.04	8.65

Slika 25. Slojevi pregradnog zida $d=10\text{ cm}$



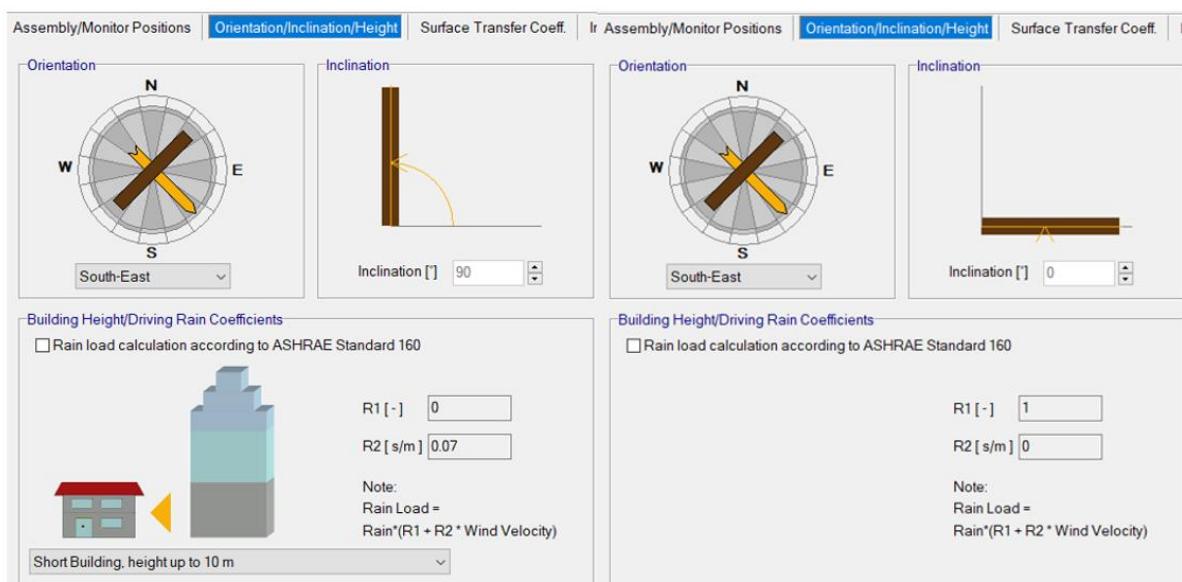
No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m³]
1	Extruded Polystyrene Insulation	0.1	0.31
2	Concrete, w/c=0.5	0.2	85.0
3	Bituminous Paper (#15 Felt)	0.005	0.0
4	Mineral Wool (heat cond.: 0.04 W/mK)	0.05	1.79
5	Membrane of laminated polyetylen and polypropylen	0.0002	0.0
6	Cementing Material	0.05	44.54
7	Paint, Water-proof for flat roofs, polyurethane	0.005	0.0
8	Laminate flooring	0.015	117.5

Slika 26. Slojevi poda na tlu

9.2. Proračun higrotermalnog ponašanja – definiranje orijentacije, nagiba, visine zgrade

Sljedeći korak proračuna se sastoji od definiranja orijentacije i nagiba zgrade. Kao kritična orijentacija za kišu nošenu vjetrom odabran je jugoistok. Nagib svih vertikalnih građevnih elemenata, odnosno zidova definiran je sa 90° dok je za horizontalne građevne elemente definiran sa 0°. Za visinu zgrade odabrana je opcija – niske zgrade, visine do 10 m.

Na slici 29. lijevo prikazan je odabir u računalnom programu za vertikalne elemente, a desno za horizontalne elemente.



Slika 27. Definirana orijentacija, nagib i visina zgrade

9.3. Proračun higrotermalnog ponašanja – odabir unutarnje temperature, relativne vlažnosti, proračunskog perioda i moda proračuna

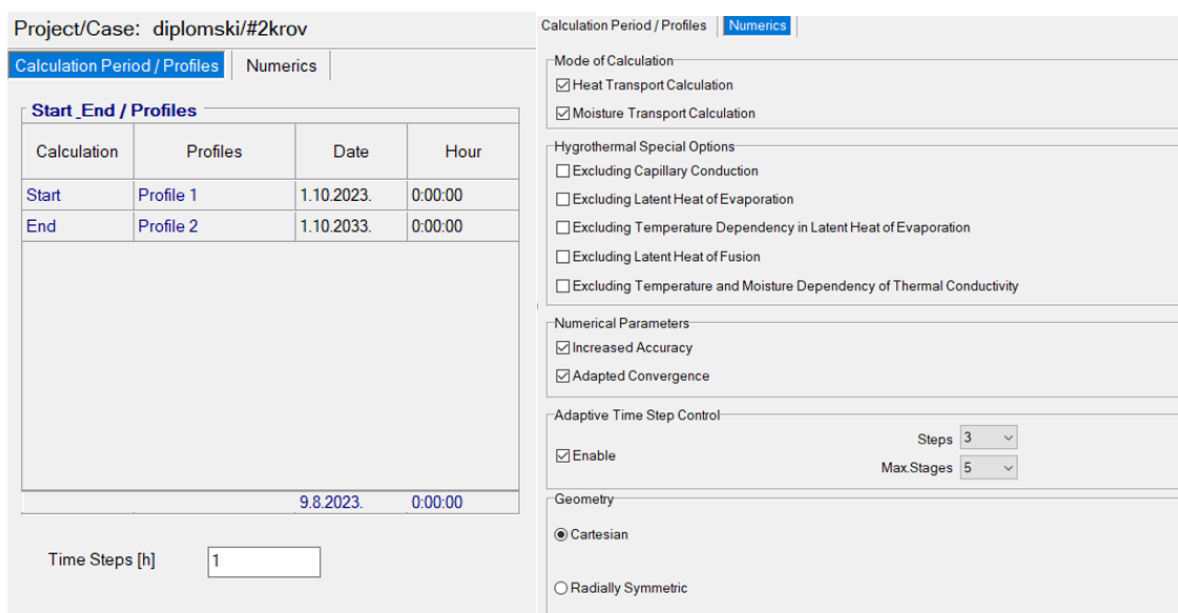
Zadana unutarnja temperatura je 20 stupnjeva, a relativna vlažnost 80% te je korišten proračunski period od 10 godina kako bi bilo moguće promatrati dugoročno higrotermalno ponašanje.

Za mod proračuna odabrane su obje opcije; proračun transporta topline i proračun transporta vlage.



Initial Relative Humidity [-] Initial Temperature in Component [°C]

Slika 28. Inicijalna temperatura komponente i relativna vlažnost



Project/Case: diplomski/#2krov

Calculation Period / Profiles | Numerics

Calculation Period / Profiles | Numerics

Start_End / Profiles			
Calculation	Profiles	Date	Hour
Start	Profile 1	1.10.2023.	0:00:00
End	Profile 2	1.10.2033.	0:00:00

9.8.2023. 0:00:00

Time Steps [h]

Mode of Calculation

- Heat Transport Calculation
- Moisture Transport Calculation

Hygrothermal Special Options

- Excluding Capillary Conduction
- Excluding Latent Heat of Evaporation
- Excluding Temperature Dependency in Latent Heat of Evaporation
- Excluding Latent Heat of Fusion
- Excluding Temperature and Moisture Dependency of Thermal Conductivity

Numerical Parameters

- Increased Accuracy
- Adapted Convergence

Adaptive Time Step Control

- Enable
- Steps
- Max.Stages

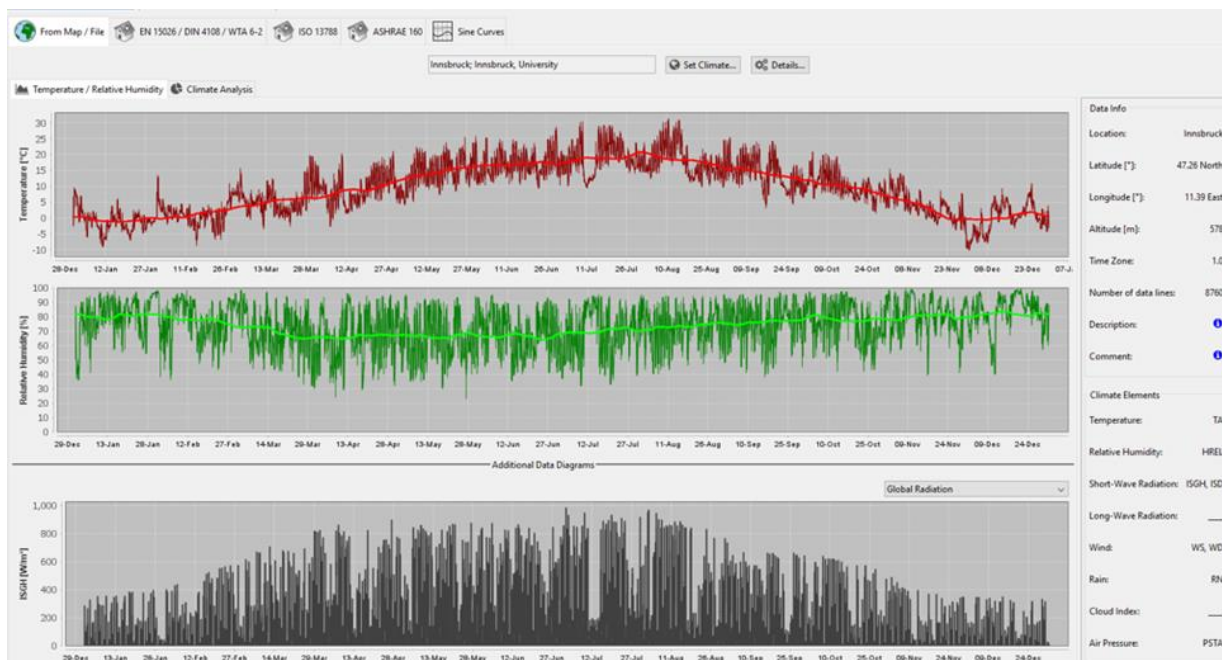
Geometry

- Cartesian
- Radially Symmetric

Slika 29. Proračunski period (lijevo) i mod proračuna (desno)

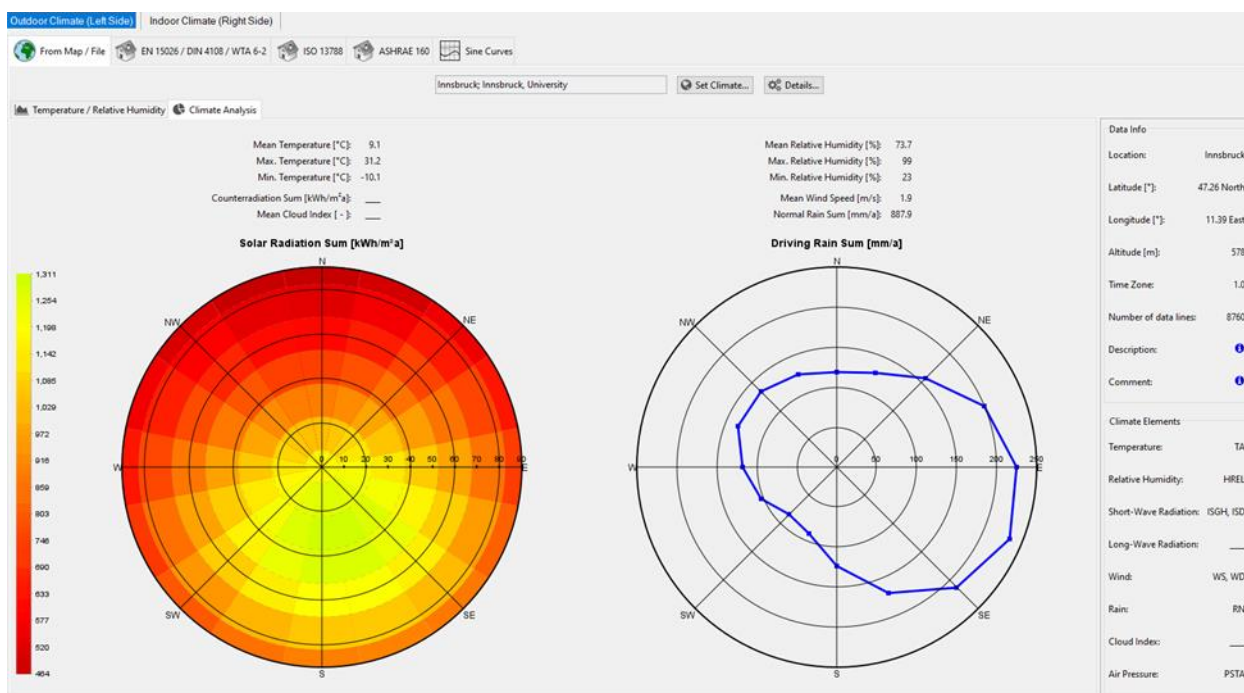
9.4. Proračun higrotermalnog ponašanja – definiranje vanjske i unutarnje klime

Još jedno od ograničenja besplatne verzije Wufi Light 6.7. je nemogućnost odabira točne lokacije izgradnje objekta za koju se dobivaju klimatološki podaci prema kojima se vrši proračun. Iz tog razloga kao lokacija je odabran Innsbruck (Austrija). Dijagrami temperature (crveno) i relativne vlažnosti (zeleno) za period od jedne godine za odabrani grad se nalaze na slici 30.



Slika 30. Vanjska klima – Innsbruck

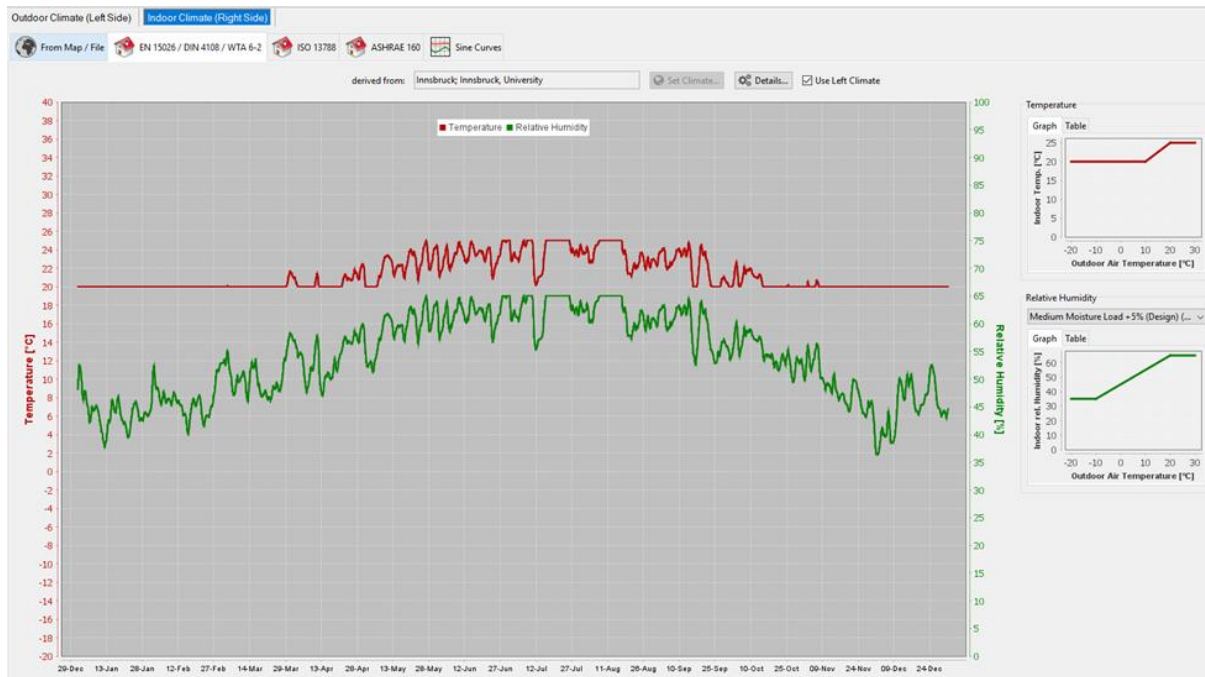
Podaci o kiši nošenoj vjetrom i intenzitetu sunčevog zračenja takođe se odnose na Innsbruck te su prikazani su na slici 31.



Slika 31. Kiša nošena vjetrom i intenzitet sunčevog zračenja

Unutarnja klima je definirana prema normi EN 15026. Dijagrami unutarnje temperature (crveno) i relativne vlažnosti (zeleno) za razdoblje od jedne godine prikazani su na slici 32. lijevo. Prema normi unutarnja temperatura i relativna vlažnost unutrašnjeg prostora ovise o

vanjskoj temperaturi zraka. Grafovi na desnoj strani slike 32. prikazuju ovisnost unutarnje temperature i vanjske temperature zraka (crveno) odnosno unutarnje relativne vlažnosti i vanjske temperature zraka (zeleno).



Slika 32. Unutarnja klima

9.5. Proračun higrotermalnog ponašanja –rezultati proračuna

Proračunom su za svaki građevni dio dobiveni rezultati koji uključuju:

- ukupan sadržaj vlage
- sadržaj vlage u najkritičnijem sloju građevnog elementa
- relativna vlažnost u sloju izolacije
- površinska kondenzacija unutarnje površine građevnog elementa

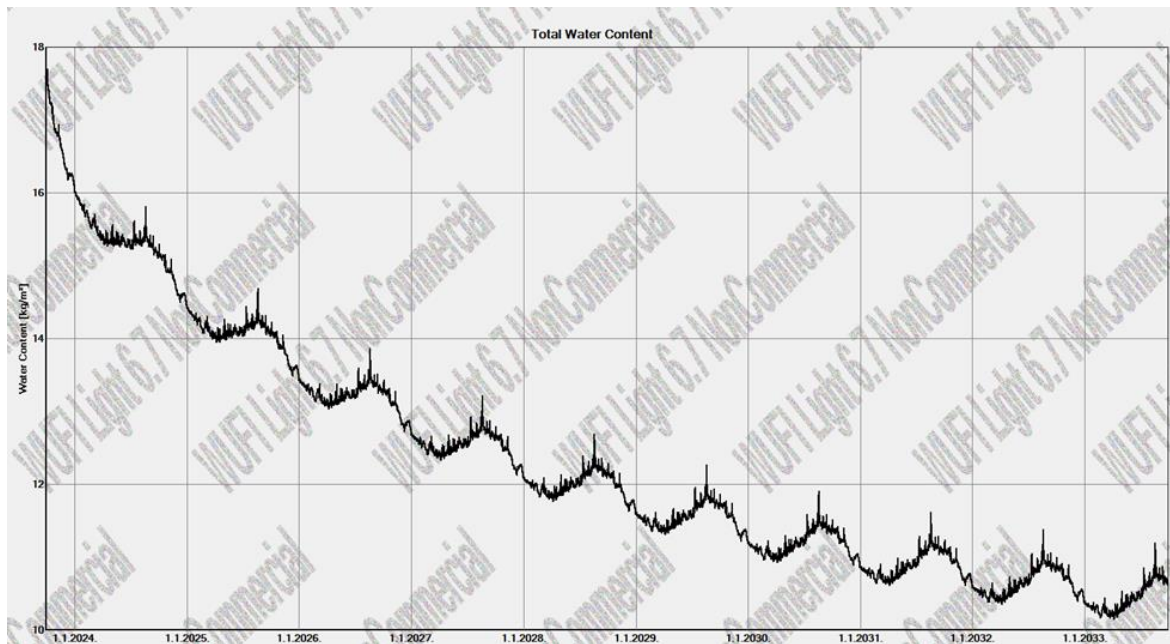
9.6. Proračun higrotermalnog ponašanja –analiza rezultata proračuna

• UKUPAN SADRŽAJ VLAGE

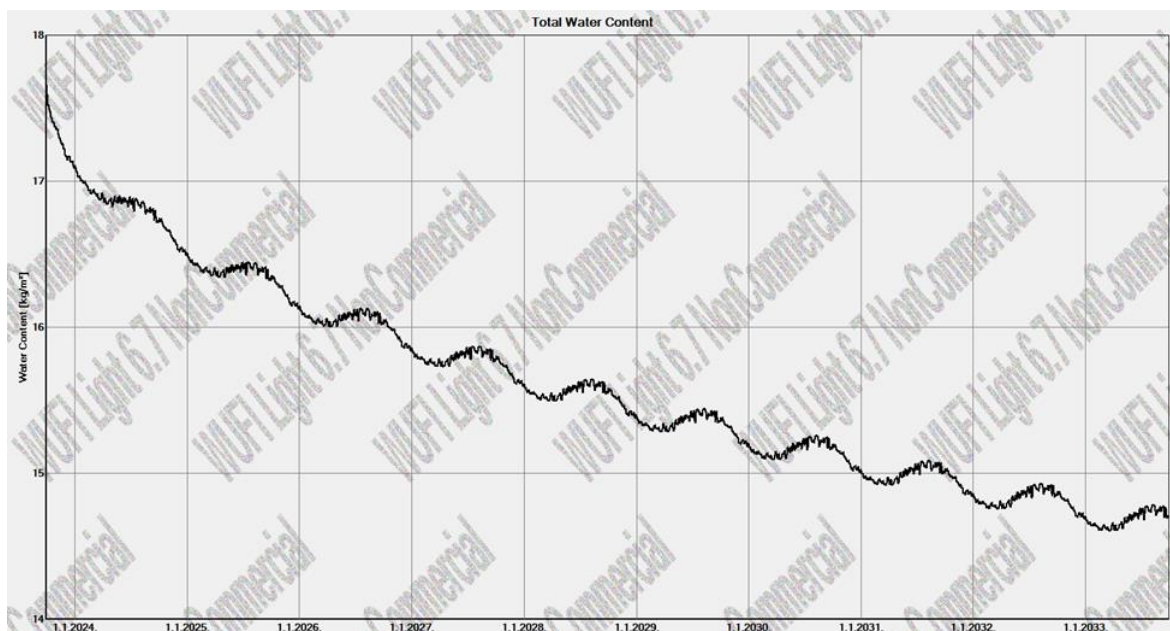
Iz dijagrama ukupnog sadržaja vlage vanjskih zidova, ravnog krova i poda na tlu je vidljiv trend isušivanja građevnog elementa kroz zadani proračunski period od 10 godina.

Istovremeno na dijagramima ukupnog sadržaja vlage unutarnjih zidova uočava se stanje postignute dinamičke ravnoteže.

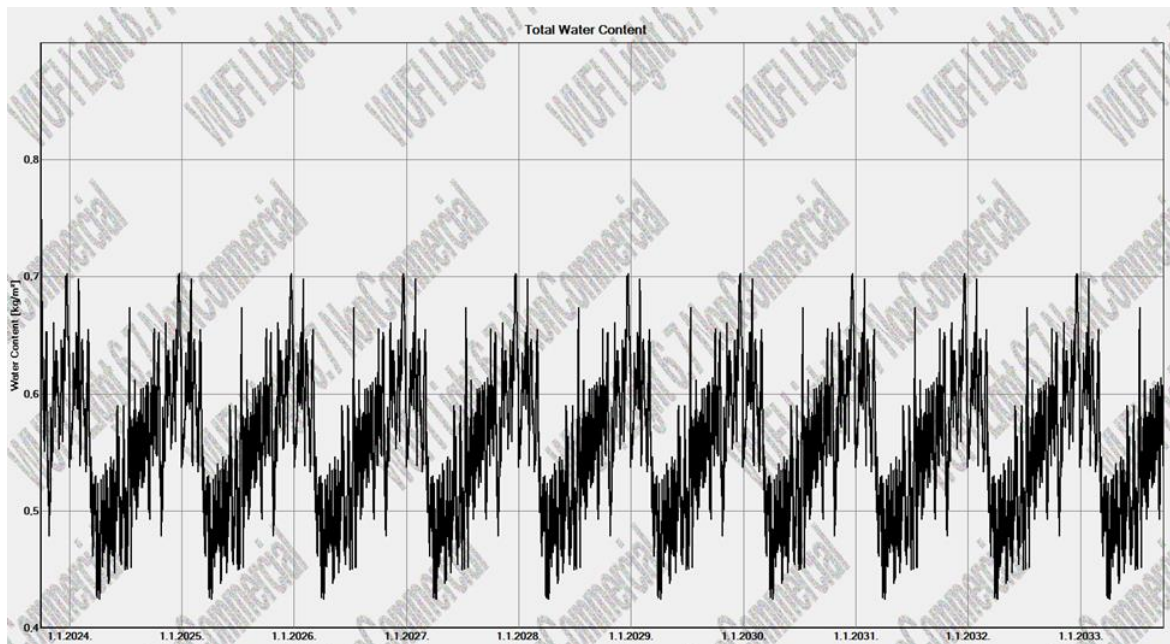
Također za sve analizirane građevne elemente možemo uočiti da je ponašanje unutar svake godine pojedinačno isto – u toplijim mjesecima dolazi do isušivanja građevnog elementa, a u hladnijim mjesecima s više oborina do vlaženja građevnog elementa što se može uočiti položajem skokova na dijagramu.



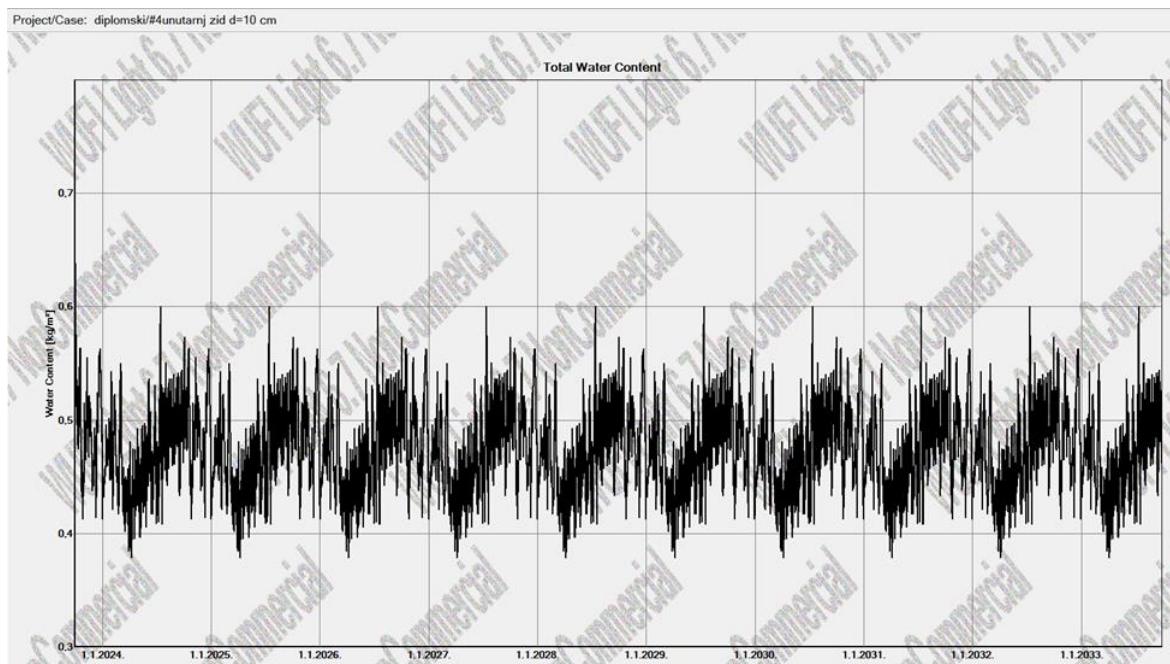
Slika 33. Vanjski zid- ukupan sadržaj vlage



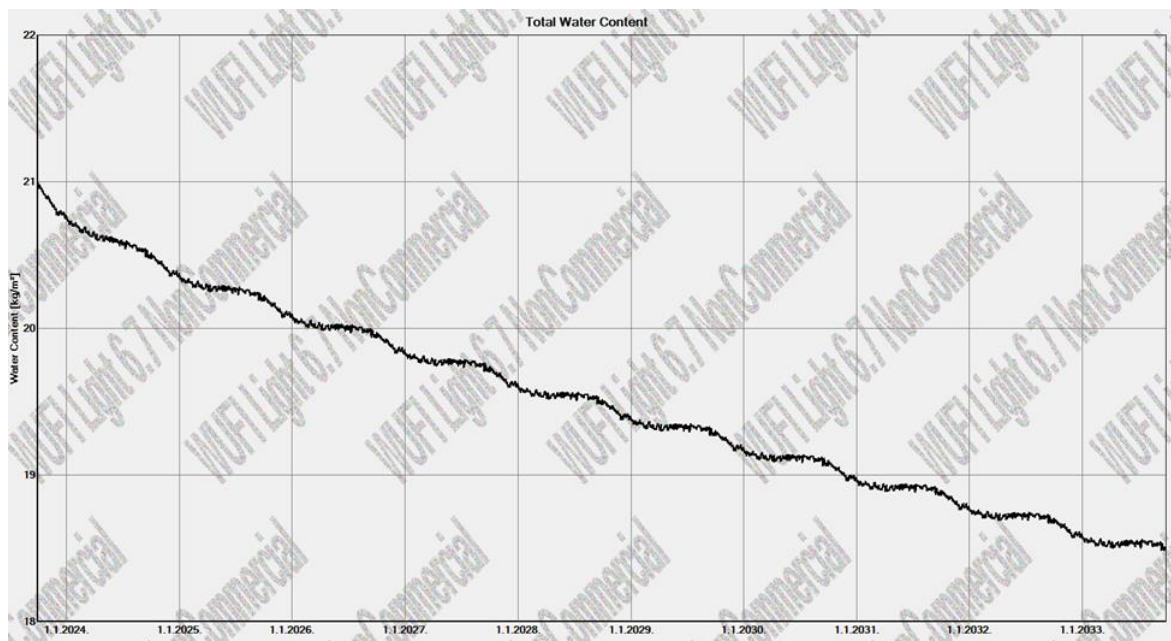
Slika 34. Ravni krov- ukupan sadržaj vlage



Slika 35. Unutarnji zid (15 cm) – ukupan sadržaj vlage



Slika 36. Unutarnji zid (10 cm) – ukupan sadržaj vlage

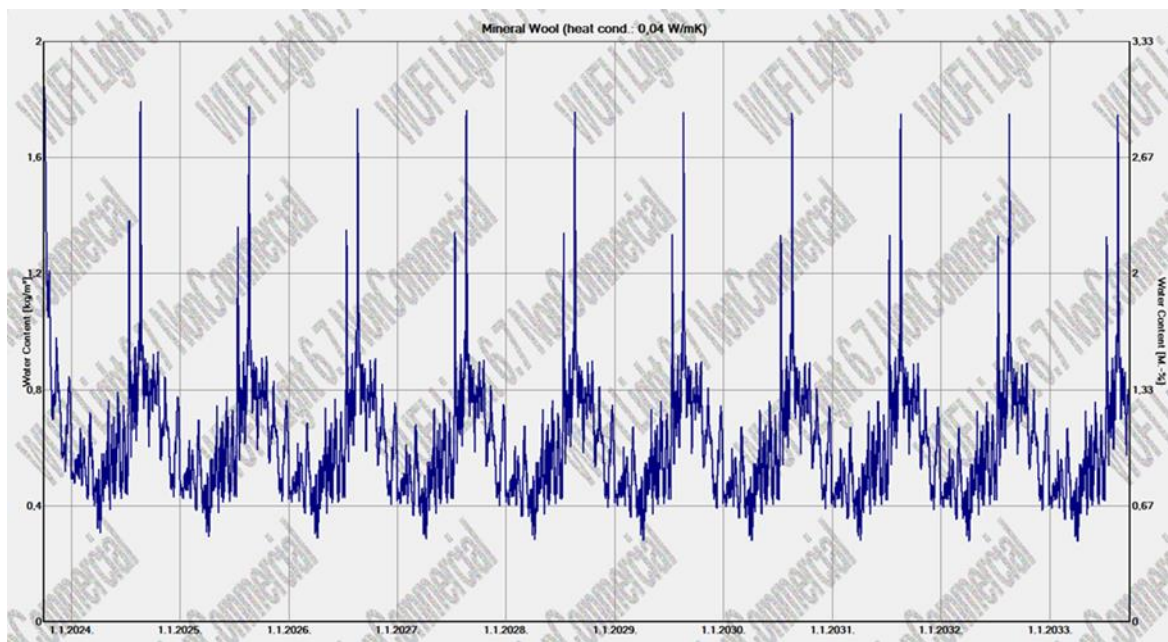


Slika 37. Pod na tlu – ukupan sadržaj vlage

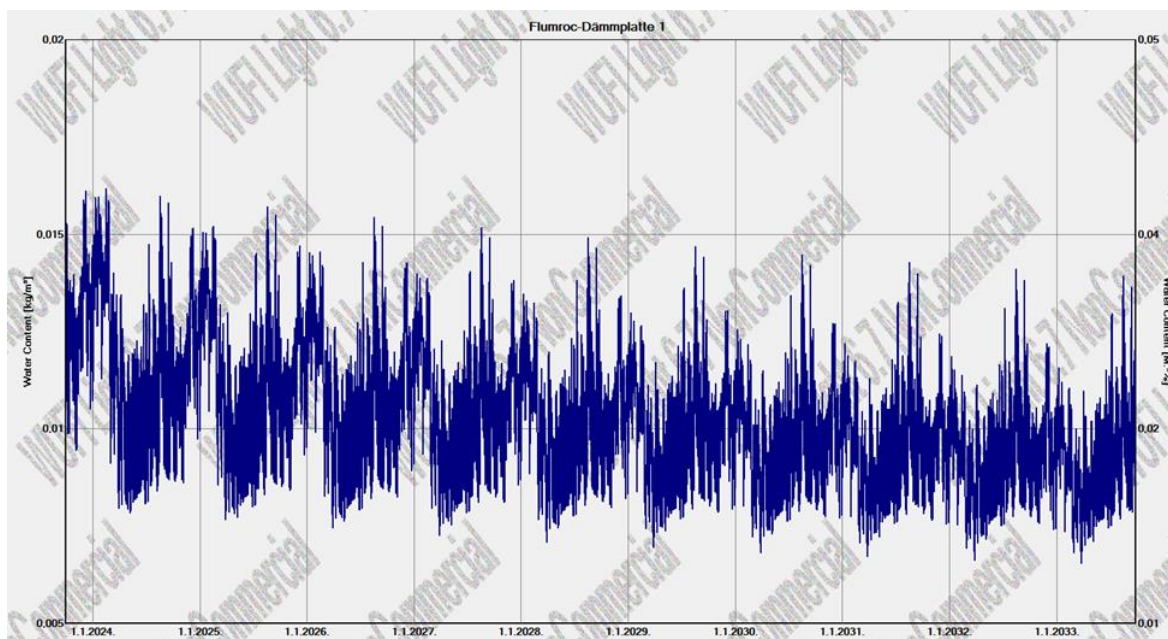
- **SADRŽAJ VLAGE U KRITIČNOM SLOJU**

Prilikom promatranja sadržaja vlage u svakom pojedinom sloju kritični sloj koji je važno posebno promotriti je sloj toplinske izolacije. Razlog tome je ukoliko dođe do akumulacije vlage u sloju toplinske izolacije ona će početi gubiti svoja toplinska svojstva. Nakupljanje vlage može uzrokovati degradaciju građevnih elemenata i prouzročiti građevinsku štetu.

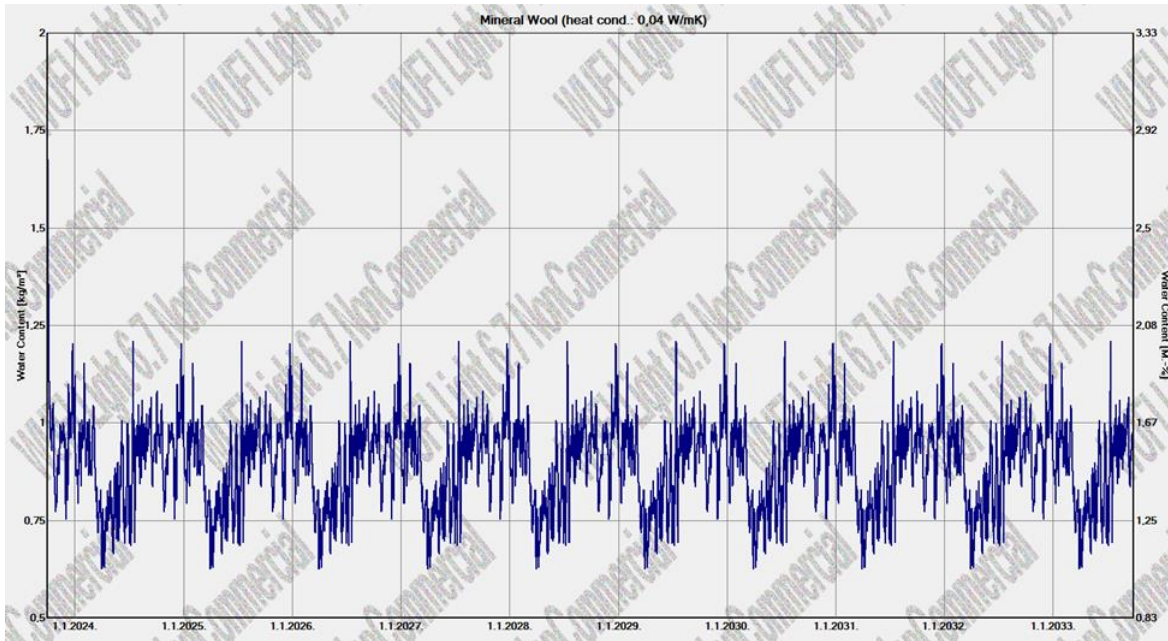
Na dijagramima sadržaja vlage može se uočiti da je postignuta dinamička ravnoteža u sloju toplinske izolacije te da ne dolazi do akumulacije vlage.



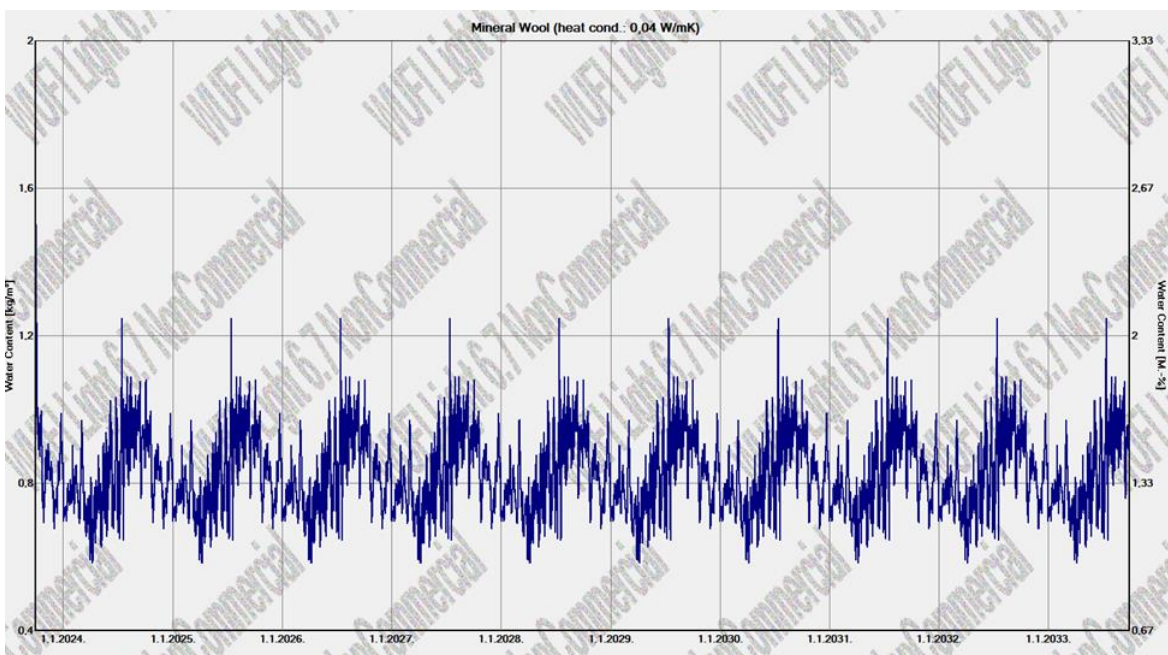
Slika 38. Vanjski zid- sadržaj vlage u sloju mineralne vune



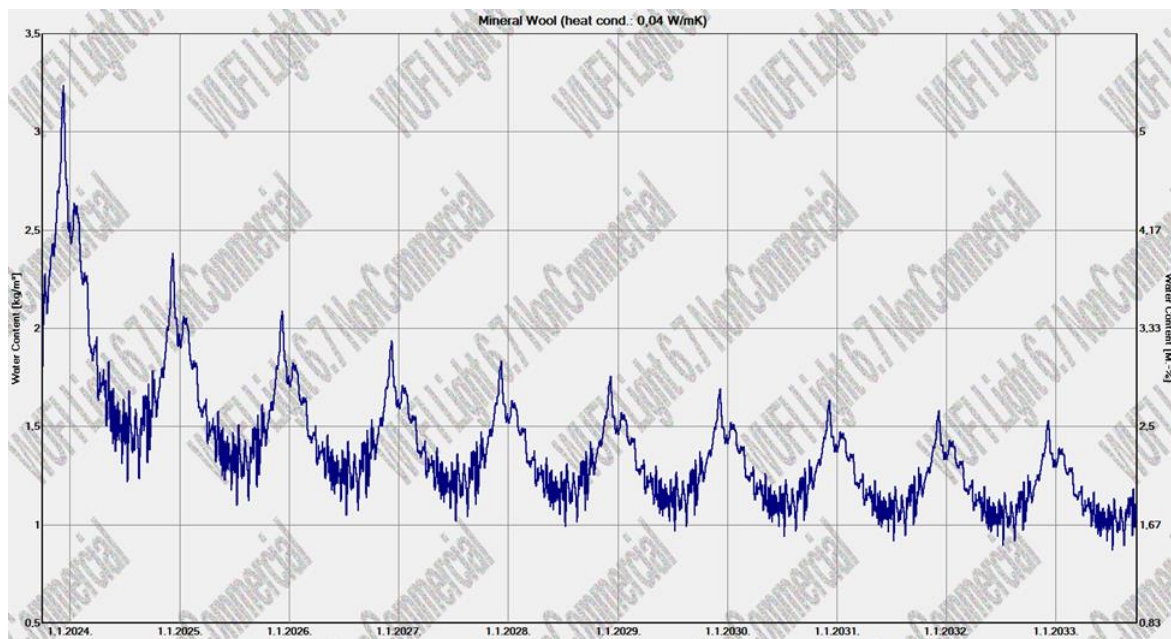
Slika 39. Ravni krov- sadržaj vlage u sloju mineralne vune



Slika 40. Unutarnji zid (15 cm) – sadržaj vlage u sloju mineralne vune



Slika 41. Unutarnji zid (10 cm) – sadržaj vlage u sloju mineralne vune

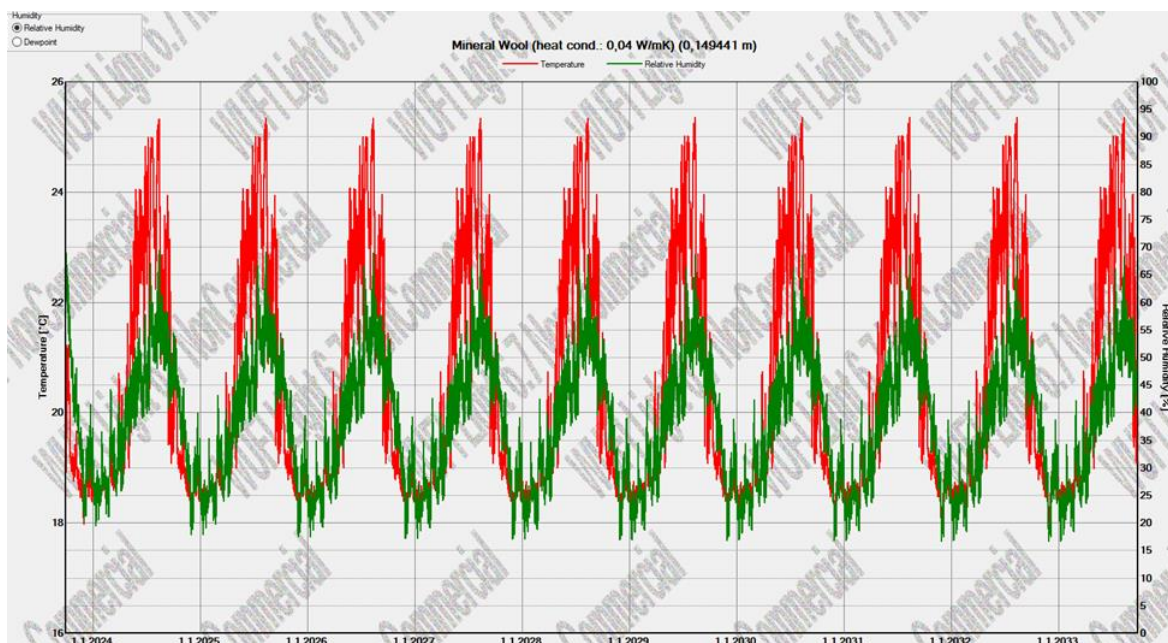


Slika 42. Pod na tlu – sadržaj vlage u sloju mineralne vune

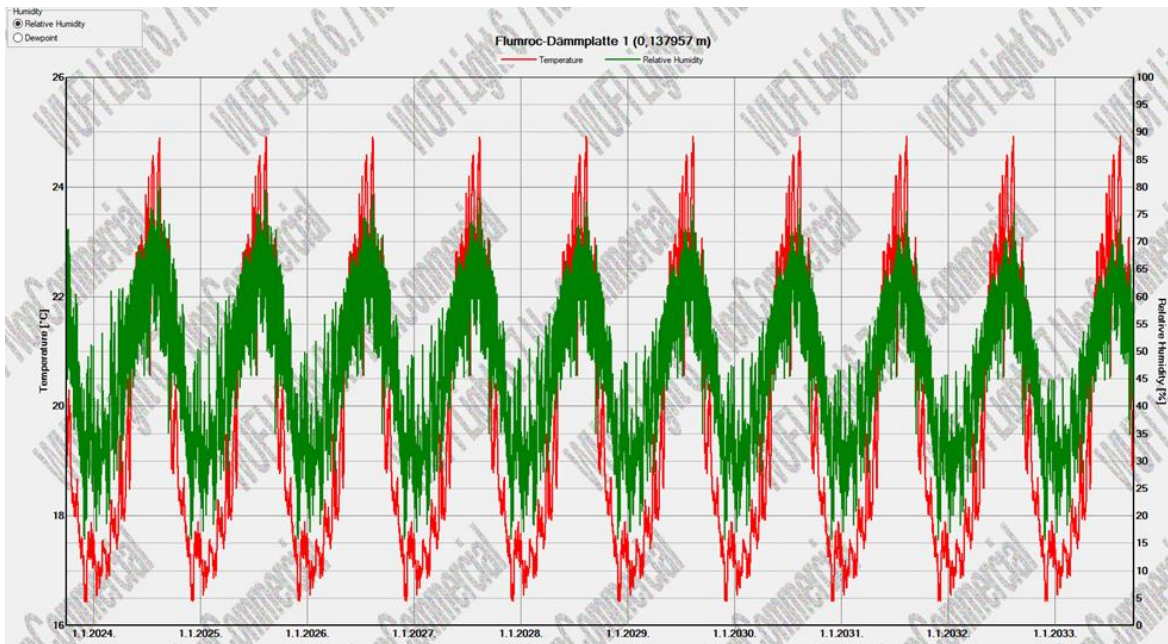
- **RELATIVNA VLAŽNOST U SLOJU IZOLACIJE**

Relativnu vlažnost posebno je važno analizirati u spoju toplinske izolacije s podlogom. Izolacijski materijali se u konstrukciju mogu ugrađivati na način da se punoplošno lijepe na podlogu ili se na podlogu pričvršćuju mehaničkim pričvrstnicama. Ukoliko se toplinska izolacija punoplošno lijepe na površinu tada mora biti zadovoljen uvjet da je relativna vlažnost na spoju manja od 95%. S druge strane ukoliko se toplinska izolacija postavlja pomoću mehaničkih pričvrstnica tada relativna vlažnost ne smije prelaziti 85%. Uvjet je stroži za slobodno oslonjeni sloj toplinske izolacije jer kod ovog načina ugradnje postoji veliki rizik od pojave „zračnih džepova“.

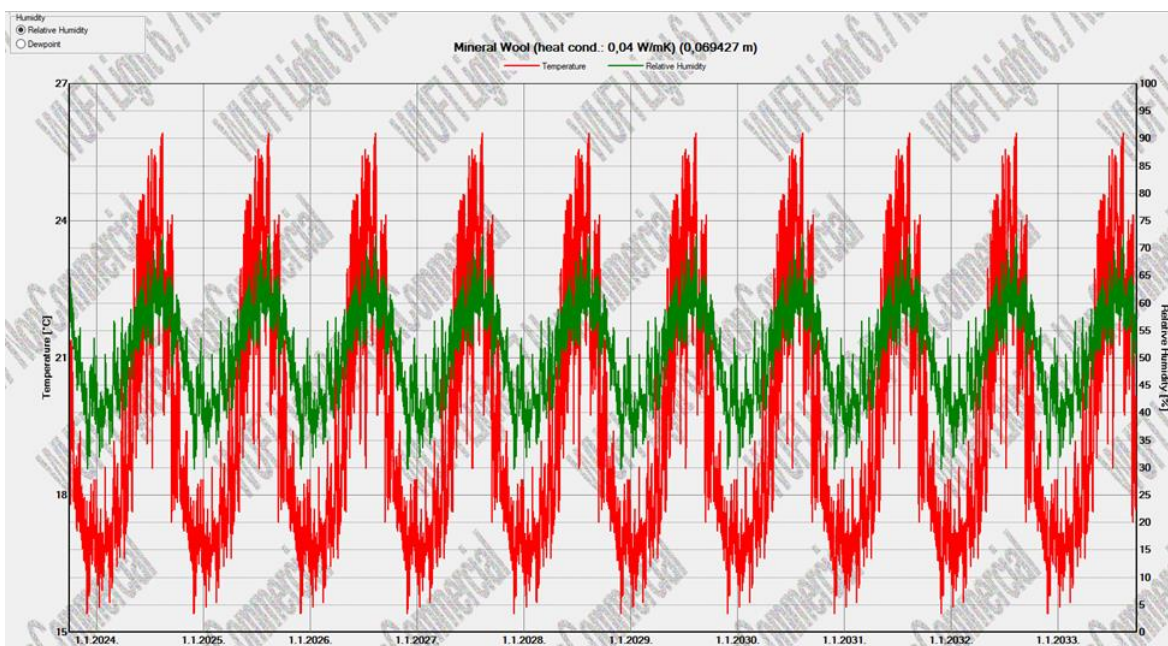
Relativna vlažnost je na dijagramima prikazana zelenom bojom, uočavamo da ona nigdje ne prelazi 95% odnosno 85%.



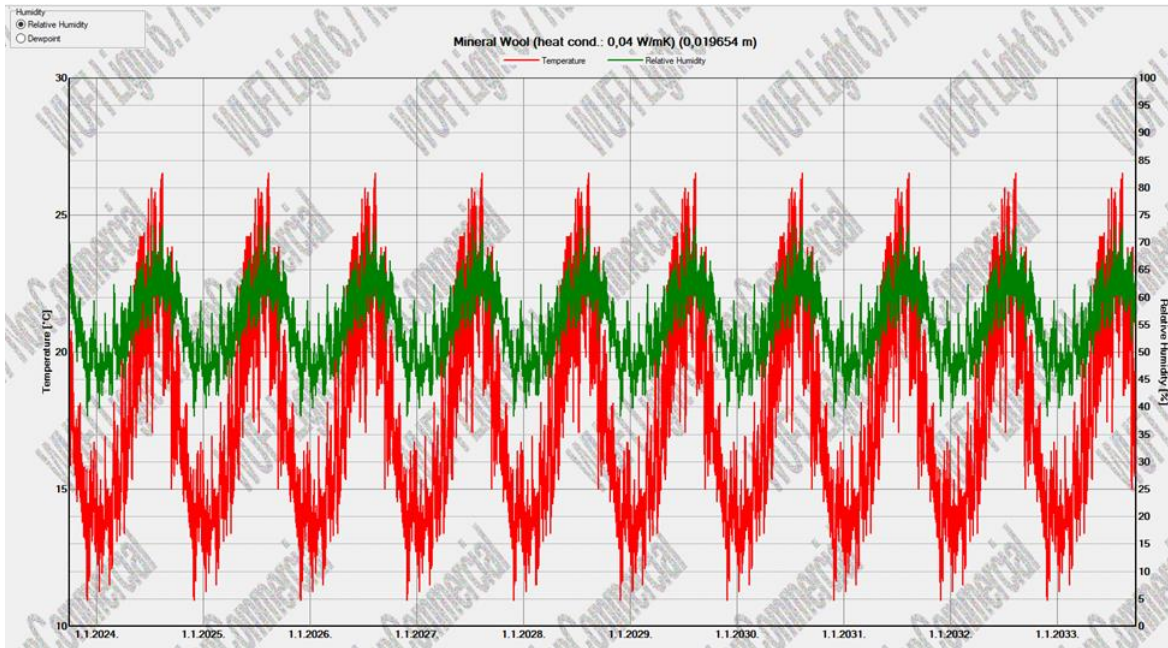
Slika 43. Vanjski zid - relativna vlažnost u sloju mineralne vune



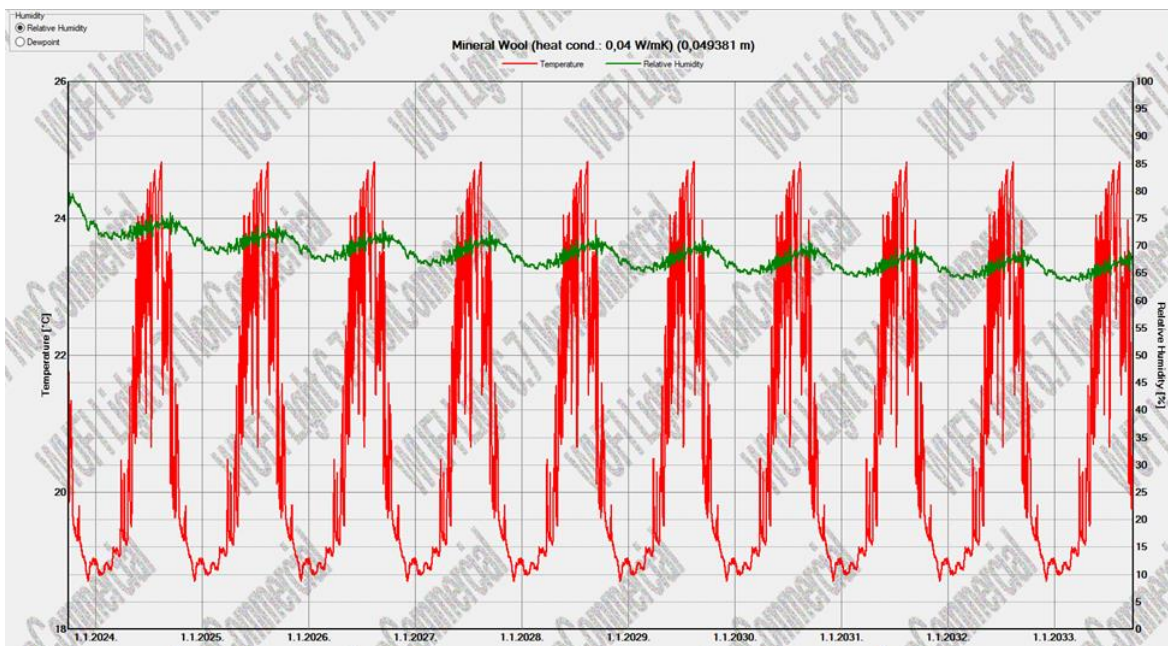
Slika 44. Ravni krov- relativna vlažnost u sloju mineralne vune



Slika 45. Unutarnji zid (15 cm) – relativna vlažnost u sloju mineralne vune



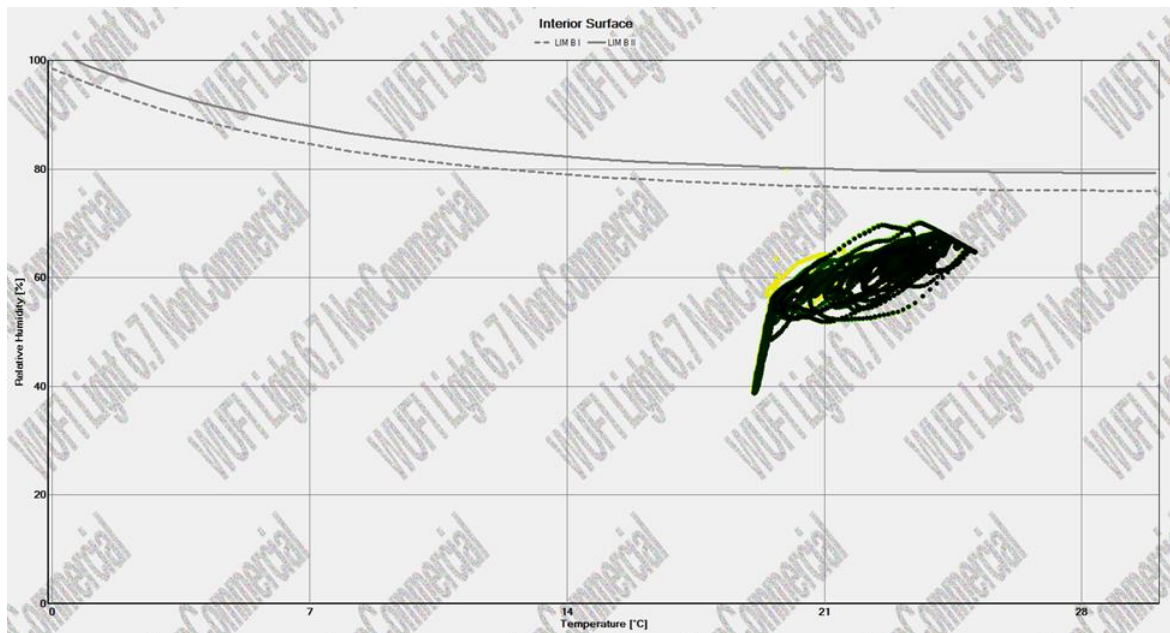
Slika 46. Unutarnji zid (10 cm) – relativna vlažnost u sloju mineralne vune



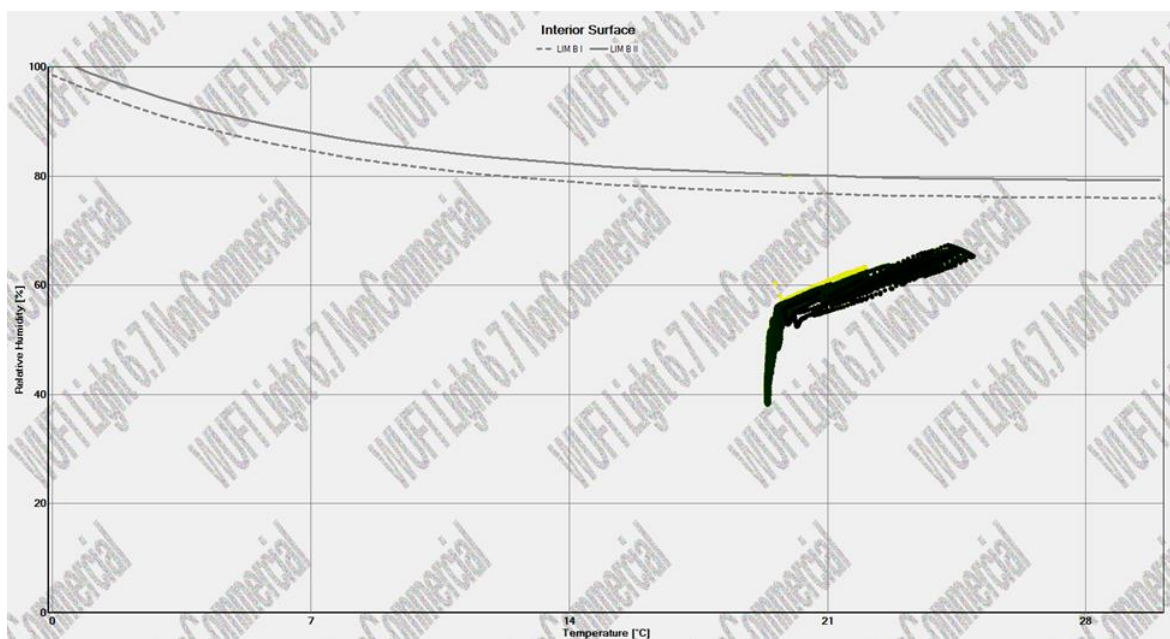
Slika 47. Pod na tlu – relativna vlažnost u sloju mineralne vune

- **POVRŠINSKA KONDENZACIJA**

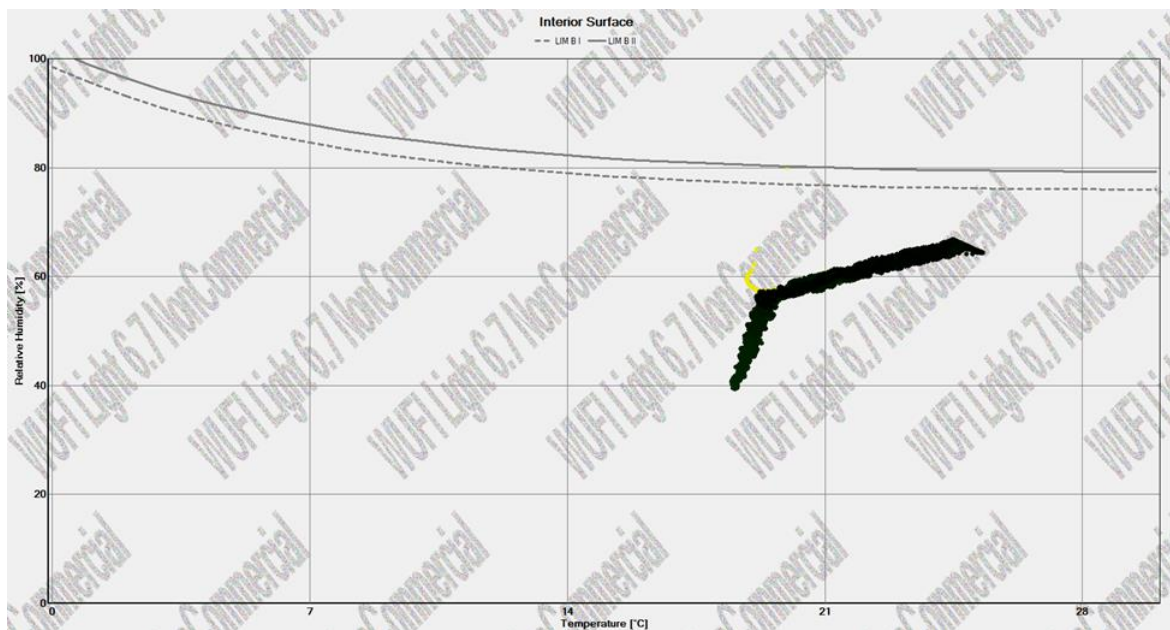
Sive krivulje na dijagramu temperatura - relativna vlažnost predstavljaju granične vrijednosti do kojih ne dolazi do površinske kondenzacije. Mogućnost pojave površinske kondenzacije je važno analizirati jer je posljedica površinske kondenzacije nastanak gljivica i plijesni. Crne i žute linije na dijagramu tj. izoplete nigdje ne sijeku sive krivulje iz čega se može zaključiti da nema opasnosti od pojave površinske kondenzacije tj pojave gljivica i plijesni.



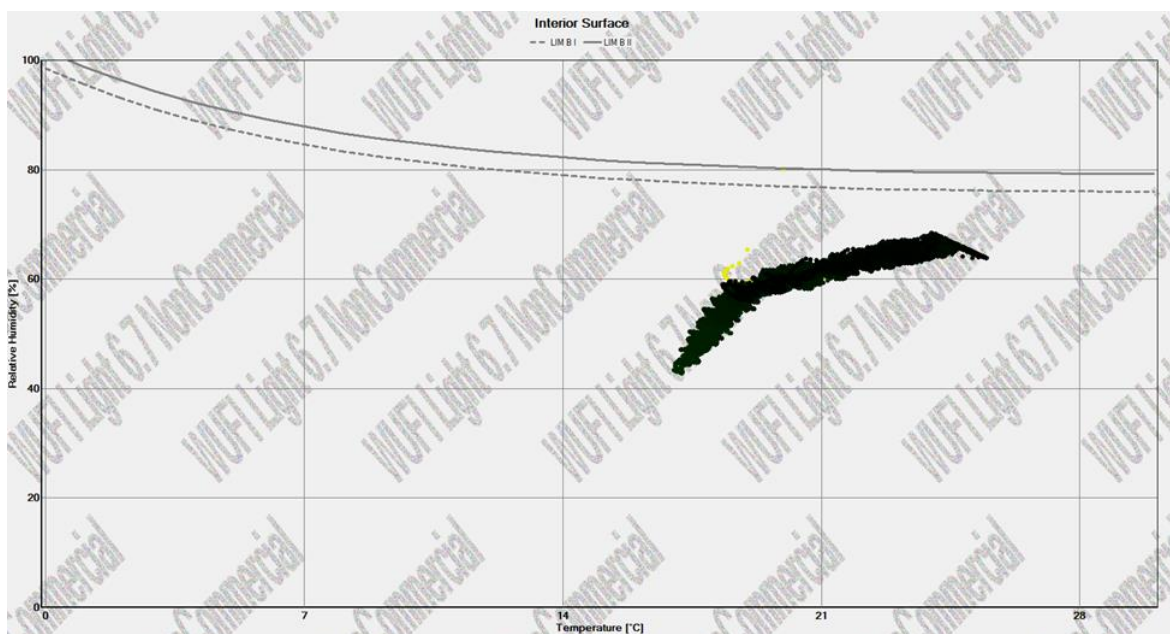
Slika 48. Vanjski zid - površinska kondenzacija unutarnje površine



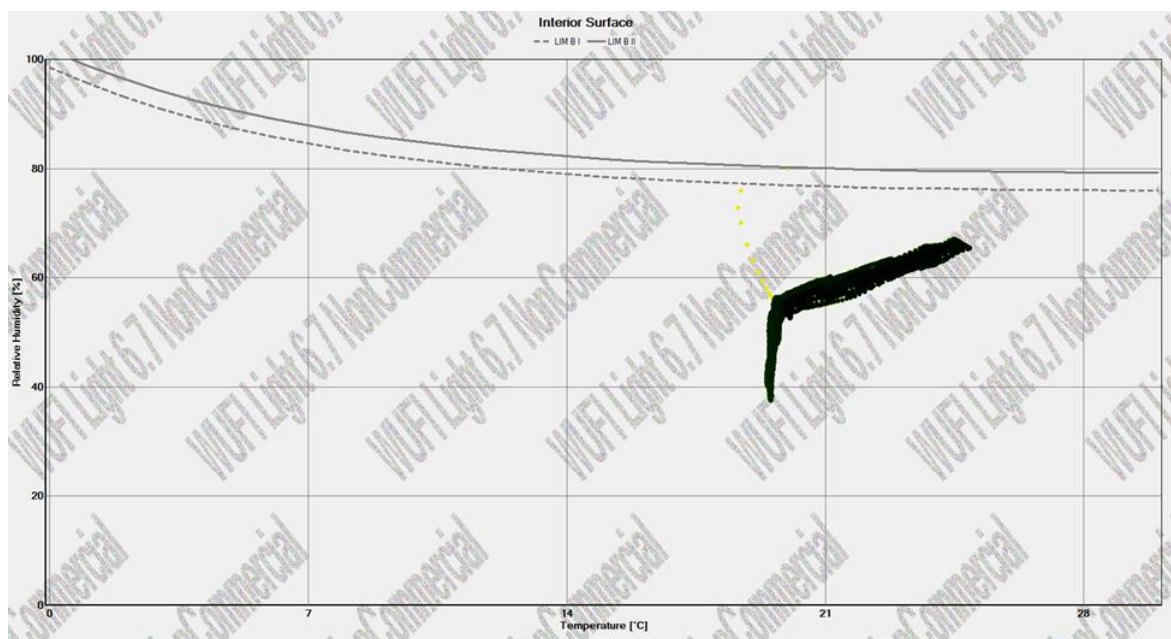
Slika 49. Ravni krov- površinska kondenzacija unutarnje površine



Slika 50. Unutarnji zid (15 cm) – površinska kondenzacija unutarnje površine



Slika 51. Unutarnji zid (10 cm) – površinska kondenzacija unutarnje površine



Slika 52. Pod na tlu – površinska kondenzacija unutarnje površine

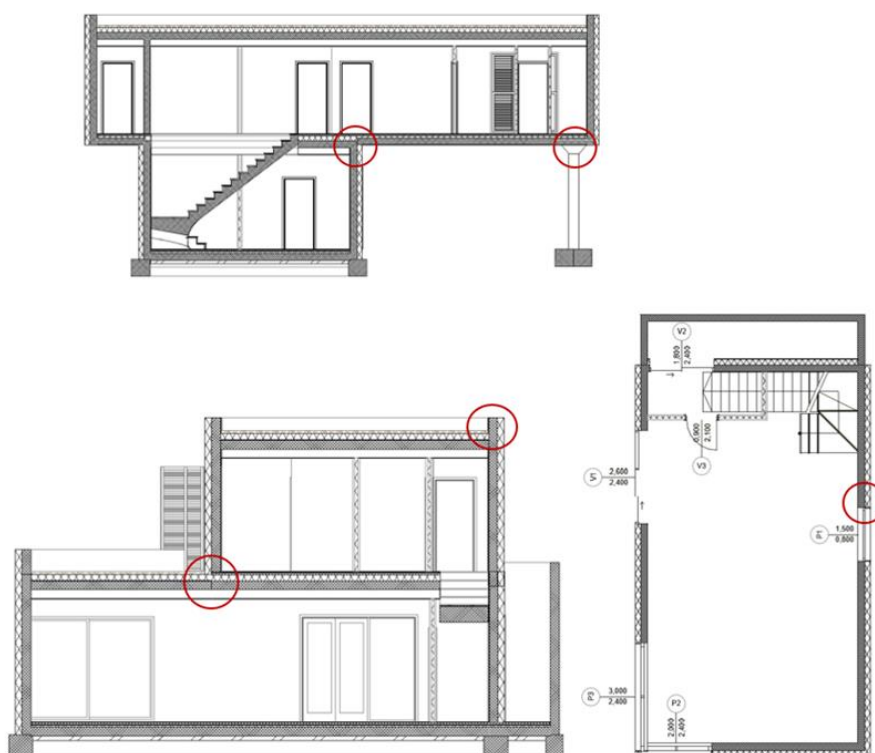
10. Proračun toplinskih mostova

Iako su toplinski mostovi uzeti u obzir u programu KI Expert samo korekcijom prethodno izračunatog koeficijenta prolaska topline prema HRN EN 6946 pomoću paušalnog dodatka u ovom poglavlju na određenim detaljima provesti će se njihov detaljniji proračun.

„Prema Tehničkom propisu o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama (NN 128/15) toplinski mostovi su definirani kao manja područja u omotaču grijanog dijela zgrade kroz koje je toplinski tok povećan radi promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela.“ [6]

„Neke od posljedica toplinskih mostova su: povećani gubici topline iz zgrade tijekom zime; kondenzacija vodene pare na površini; razvoj gljivica / plijesni; razaranje građevnih dijelova uslijed korozije; povećano gomilanje prašine na vlažnoj površini; pukotine zbog različitog toplinskog rada; razaranje građevnih dijelova uslijed smrzavanja; odvajanje žbuke, naliča, tapeta; povećanje toplinske provodljivosti izolacijskih materijala; iscvjetavanje soli.“ [3]

Kako toplinski mostovi uzrokuju toplinske gubitke ali i uzrokuju građevinsku štetu, prilikom projektiranja nZEB zgrada potrebno je eliminirati ili potpuno minimizirati utjecaj toplinskih mostova.



Slika 53. Detalji gdje će se analizirati utjecaj toplinskih mostova

Toplinski mostovi analizirati će se na sljedećim mjestima: (slika 53.)

- atika ravnog krova
- prozor ugrađen u vanjski zid (horizontalni presjek)
- spoj stupa sa međukatnom konstrukcijom
- spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani
- spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

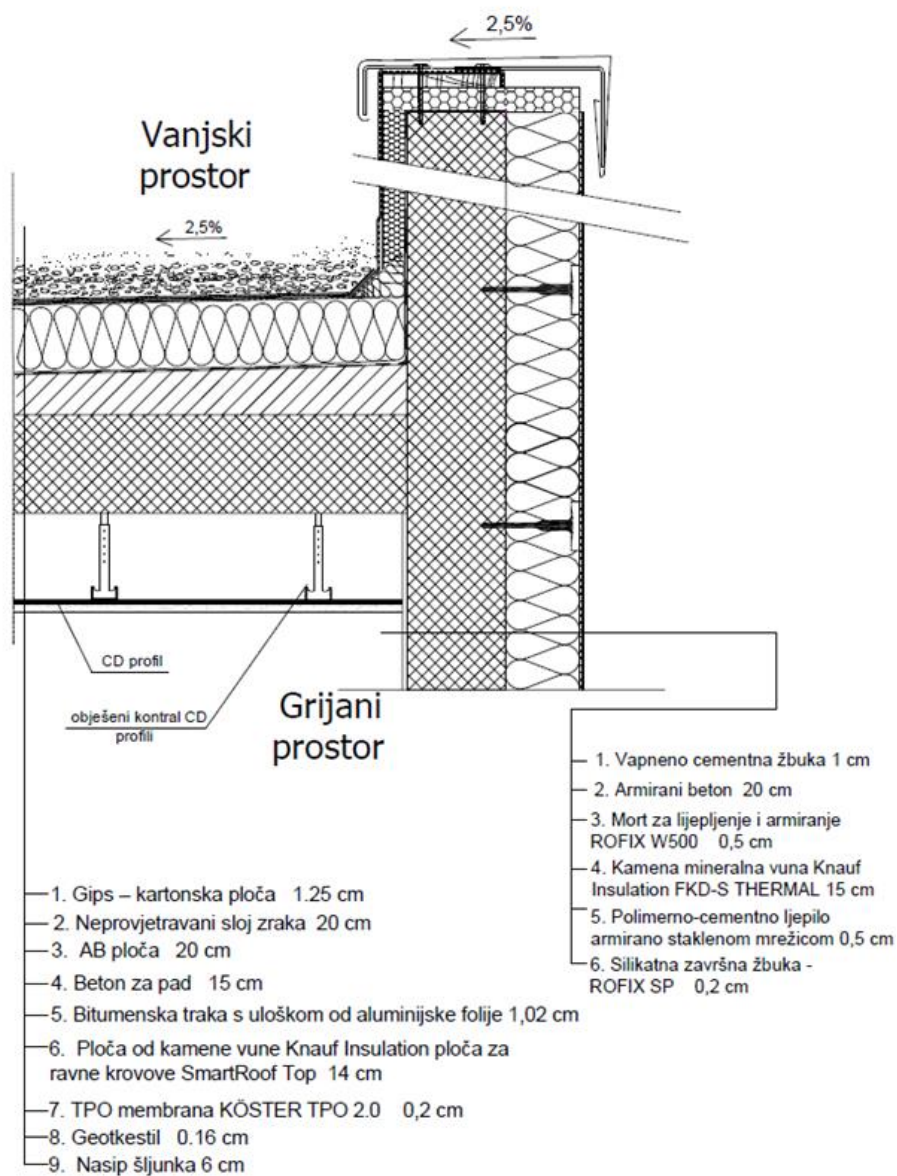
Utjecaj toplinskog mosta može se uočiti kao povećanje ili smanjenje toplinskog toka na modeliranom detalju promatranog građevnog elementa. On se kod linijskih toplinskih mostova označava se oznakom ψ (psi), a mjerna jedinica je $W/(m \cdot K)$. [3]

Proračunom je osim ψ (psi) vrijednosti i grafičkog prikaza raspodjele temperature i toplinskog toka po modelima definiranih detalja dobivena i vrijednost faktora temperature f_{Rsi} koji ukazuje na opasnost od pojave gljivica ili plijesni ukoliko izračunata vrijednost faktora premaši propisanu vrijednost. (Na ni jednom detalju za koji je proveden proračun nije uočena mogućnost pojave gljivica ili plijesni.)

Proračun je proveden primjenom računalnog programa Croral. Za primjenu Croral potreban je Microsoft Excel, Autocad te ParaView. Pri čemu Croral koristi Microsoft Excel kao glavno korisničko sučelje, modeli toplinskih mostova se u program unose kao DXF datoteke dok se rezultati proračuna dobivaju prikazani grafički u softveru ParaView.

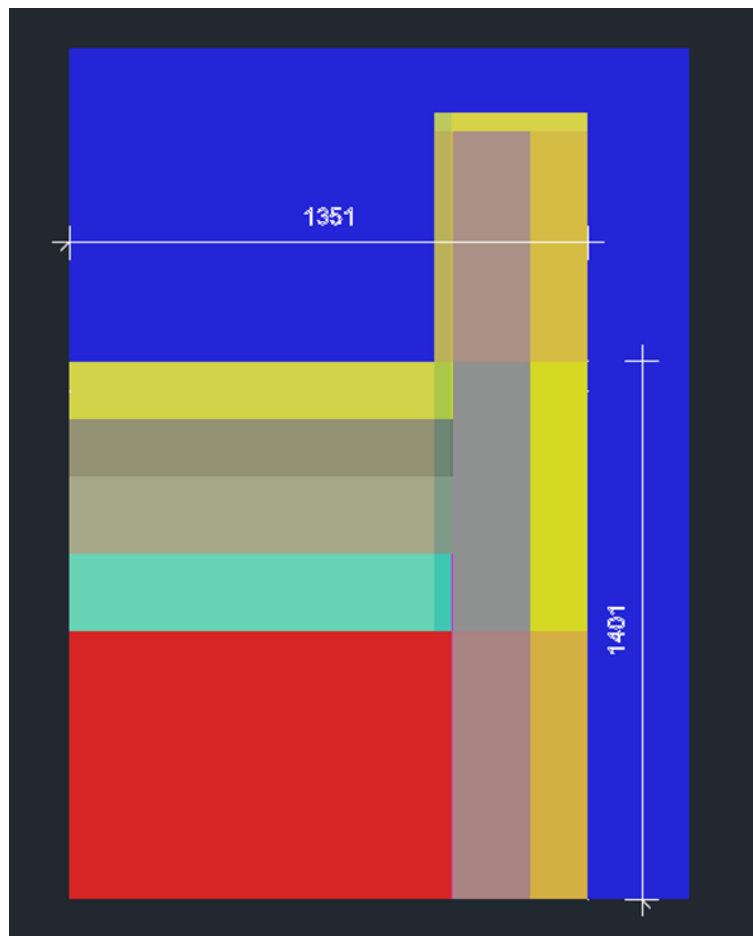
10.1. Proračun toplinskih mostova – atika ravnog krova

Na slici 54. prikazano je izrađeno rješenje detalja atike ravnog krova na granici vanjskog i grijanog prostora s označenim slojevima.



Slika 54. Detalj atike ravnog krova

U Autocadu je napravljen geometrijski model prikazanog detalja atike koji je kao DXF datoteka unesen u računalni program Croral u svrhu provedbe proračuna. Model je prikazan na slici 55.



Slika 55. Model atike ravnog krova

Potom su definirani korišteni materijali u programu Croral te su prikazani u tablici 23. sa pripadajućim karakteristikama potrebnim za proračun:

λ [W/(mK)] – koeficijent prolaska topline

μ [--] – faktor otpor difuziji vodene pare

Tablica 23. Definirani materijali i karakteristike materijala

R.br	Materijal	λ [W/(mK)]	μ [--]
1	Armirani beton	2,00	110,00
2	Toplinska izolacija	0,04	1,10
3	Sloj zraka	0,03	1,00
4	Beton za pad	2,00	100,00
5	Vanjska žbuka	1,00	20,00

U programu su potom definirani uvjeti okolnog prostora. U ovom slučaju analizirani građevni element nalazi se na granici grijani prostor – vanjski prostor. Podaci o uvjetima okoliša građevnog elementa prikazani su u tablici 24. pri čemu je:

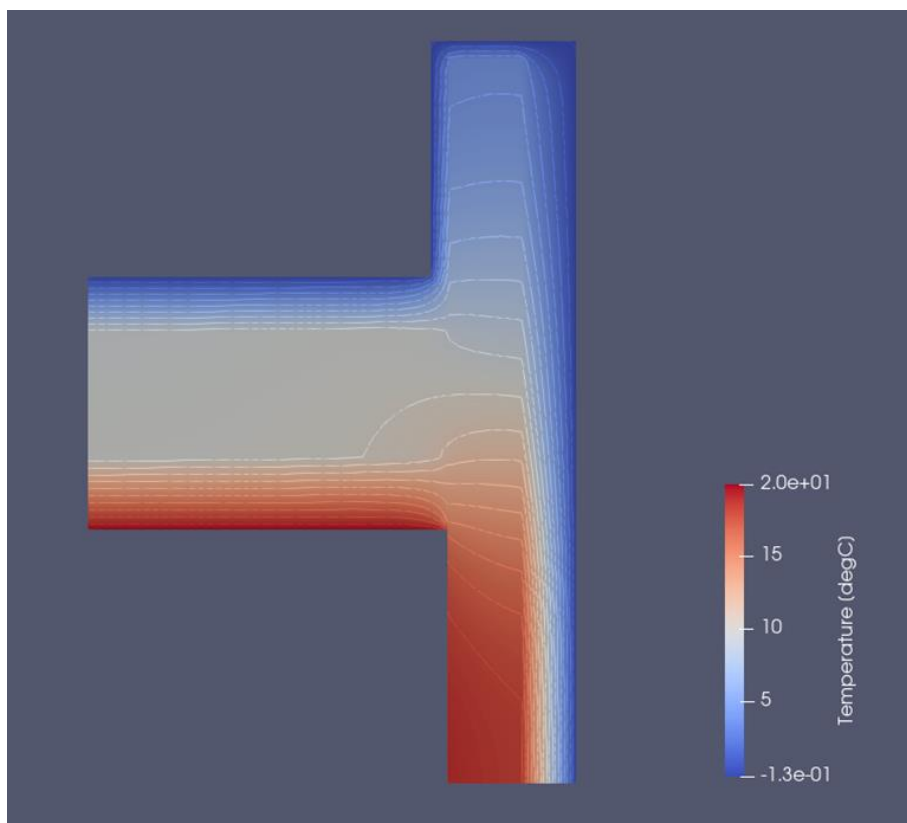
T [°C] – temperatura prostora

RH [W/m²K] – relativna vlažnost prostora

Tablica 24. Definirani uvjeti okolnog prostora

R.br	Prostor	h [W/m ² K]	T [°C]	RH [W/m ² K]
1	Grijani prostor	7,69	20,00	60,00
2	Vanjski prostor	25,00	0,00	90,00

Kao rezultat stacionarne 2D toplinske analize dobivena je raspodjela temperature po definiranom geometrijskom modelu u softveru ParaView. Grafički prikaz raspodjele temperature prikazan je na slici 56.



Slika 56. Raspodjela temperature – atika ravnog krova

Rezultat proračuna linearne toplinske propusnosti (Ψ -vrijednosti) dobiven iz računalnog programa Croral prikazan je u tablici 25.

Tablica 25. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti – atika ravnog krova

Prostor_i/Prostor_j	U vrijednost [W/(m²K)]	L [m]	ΔT [°C]	U × L [W/(mK)]
Grijani prostor/Vanjski prostor	0,093	1,351	20,000	0,126
Grijani prostor/Vanjski prostor	0,248	1,401	20,000	0,347
Grijani prostor/Vanjski prostor			Ψ [W/(mK)] = 0,098	

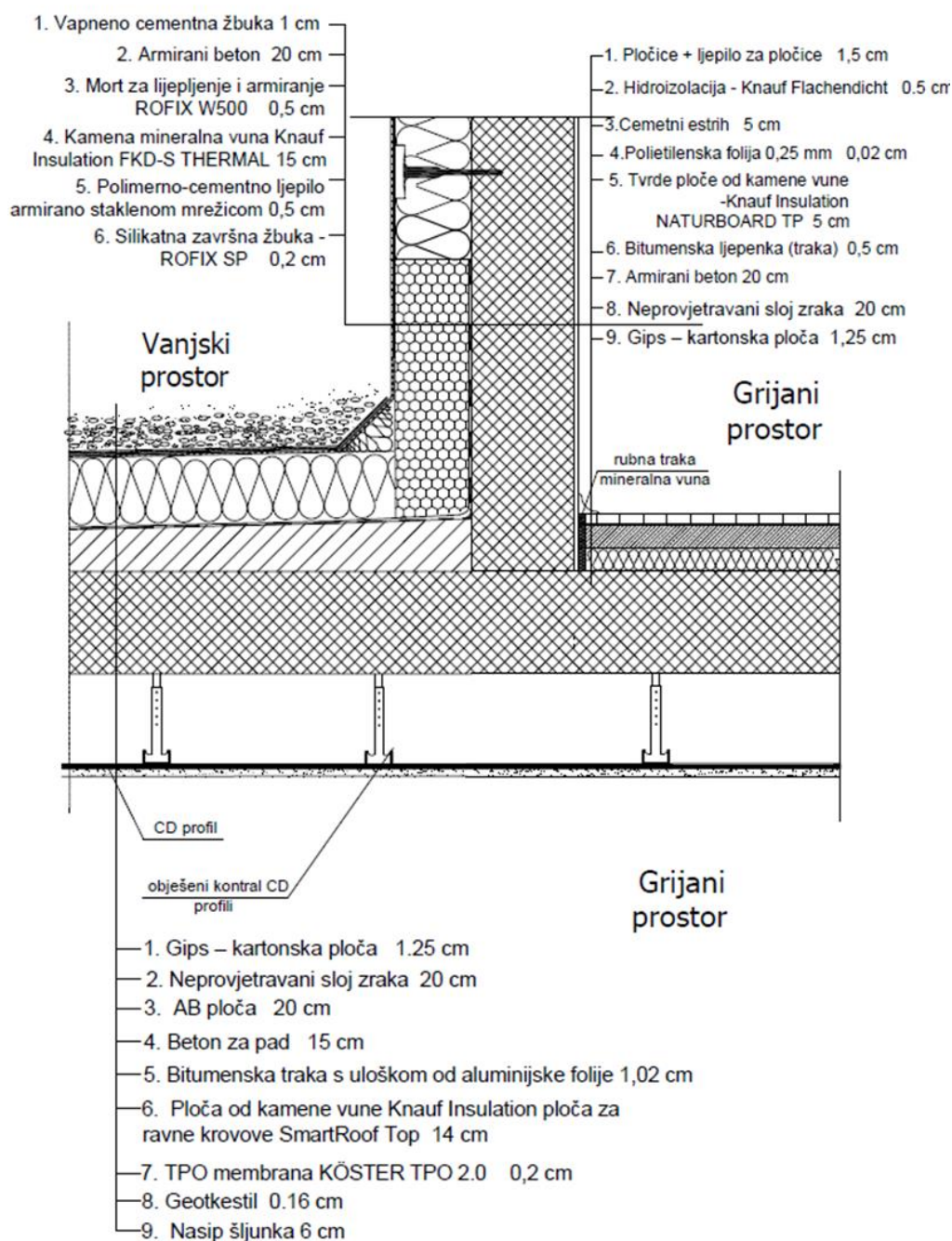
Vrijednost faktora temperature f_{Rsi} dobivenog proračunom nalazi se u tablici 26.

Tablica 26. Rezultat proračuna - faktor temperature f_{Rsi} – atika ravnog krova

Prostor	Temperatur a zraka	Min. površinska temperatura	Max. površinska temperatura	Relativna vlažnost kod koje dolazi do kondenzacije	f_{Rsi}
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	
Grijani prostor	20,000	15,638	19,806	75,980	0,782
Vanjski prostor	0,000	-0,131	1,416	98,930	--

10.2. Proračun toplinskih mostova – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

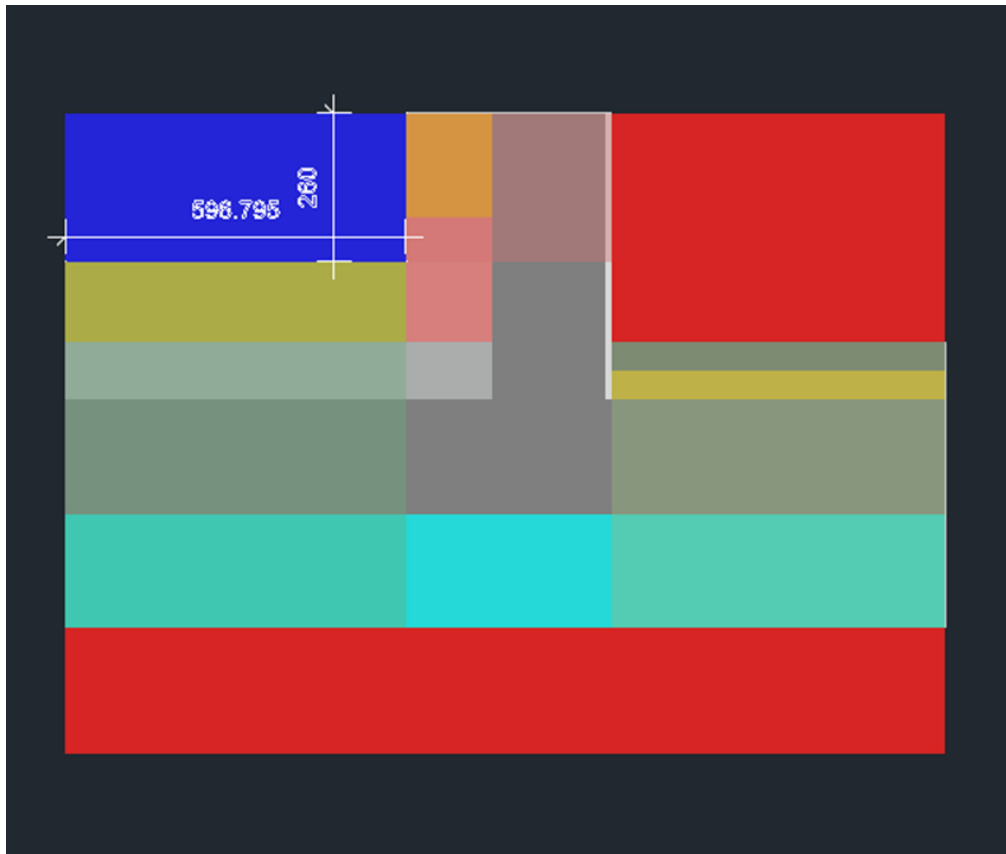
Na slici 57. je prikazano rješenje detalja spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom.



Slika 57. Detalj spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

Na temelju napravljenog modela proveden je proračun u programu Croral na isti način kao za prethodni slučaj iz poglavlja 10.1.

Geometrijski model prikazan je na slici 58.



Slika 58. Model spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

Definirane karakteristike korištenih materijala prikazane su u tablici 27.

Tablica 27. Definirani materijali i karakteristike materijala

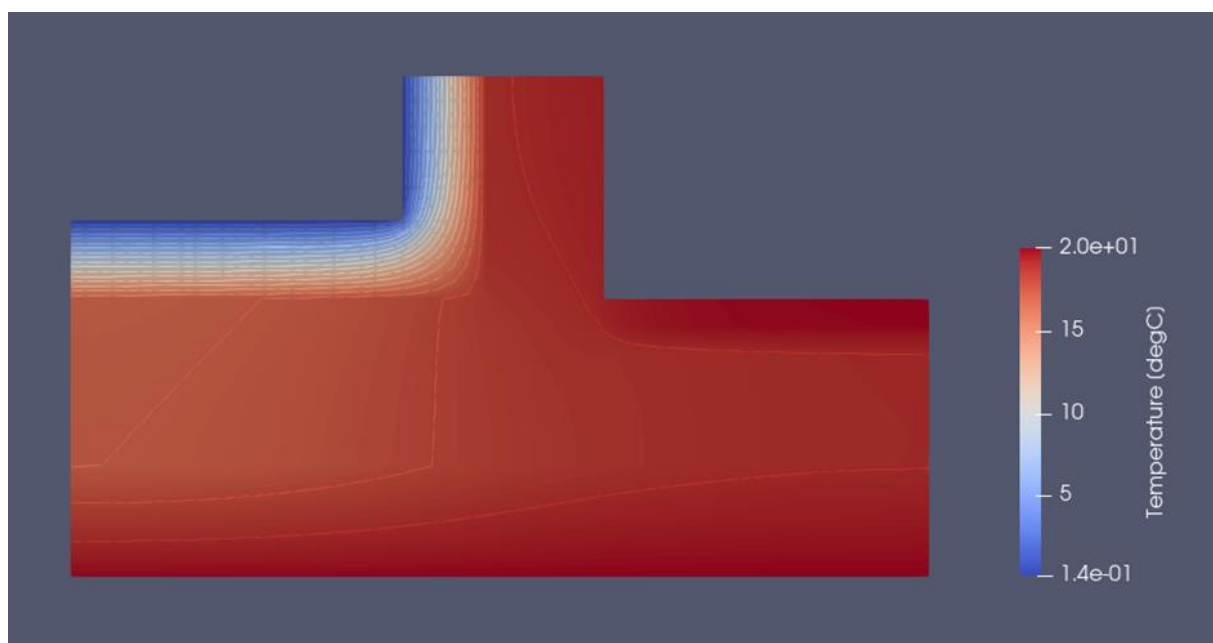
R.br	Materijal	λ [W/(mK)]	μ [--]
1	Armirani beton	2,00	110,00
2	Toplinska izolacija	0,03	1,10
3	Unutarnja žbuka	1,00	20,00
4	Zrak	0,03	1,00
5	Estrih	1,60	50,00
6	Beton za pad	2,00	100,00
7	XPS	0,03	140,00

Promatrani građevni elementi nalazi se na granici grijani prostor – vanjski prostor te grijani prostor – grijani prostor. Definirani rubni uvjeti nalaze se u tablici 28.

Tablica 28. Definirani uvjeti okolnog prostora

R.br	Prostor	h [W/m ² K]	T [°C]	RH [W/m ² K]
1	Grijani prostor	7,69	20,00	60,00
2	Vanjski prostor	25,00	0,00	90,00

Dobivena raspodjela temperature po definiranom građevnom elementu prikazana je na slici 59.



Slika 59. Raspodjela temperature – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

Tablica 29. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

Prostorija/Prostorija _j	U- vrijednost [W/(m ² K)]	L [m]	ΔT [°C]	U × L [W/(mK)]
grijani prostor/vanjski prostor	0,189	0,260	20,000	0,049
grijani prostor/vanjski prostor	0,086	0,597	20,000	0,051
grijani prostor/vanjski prostor			Ψ [W/(m K)] = 0,070	

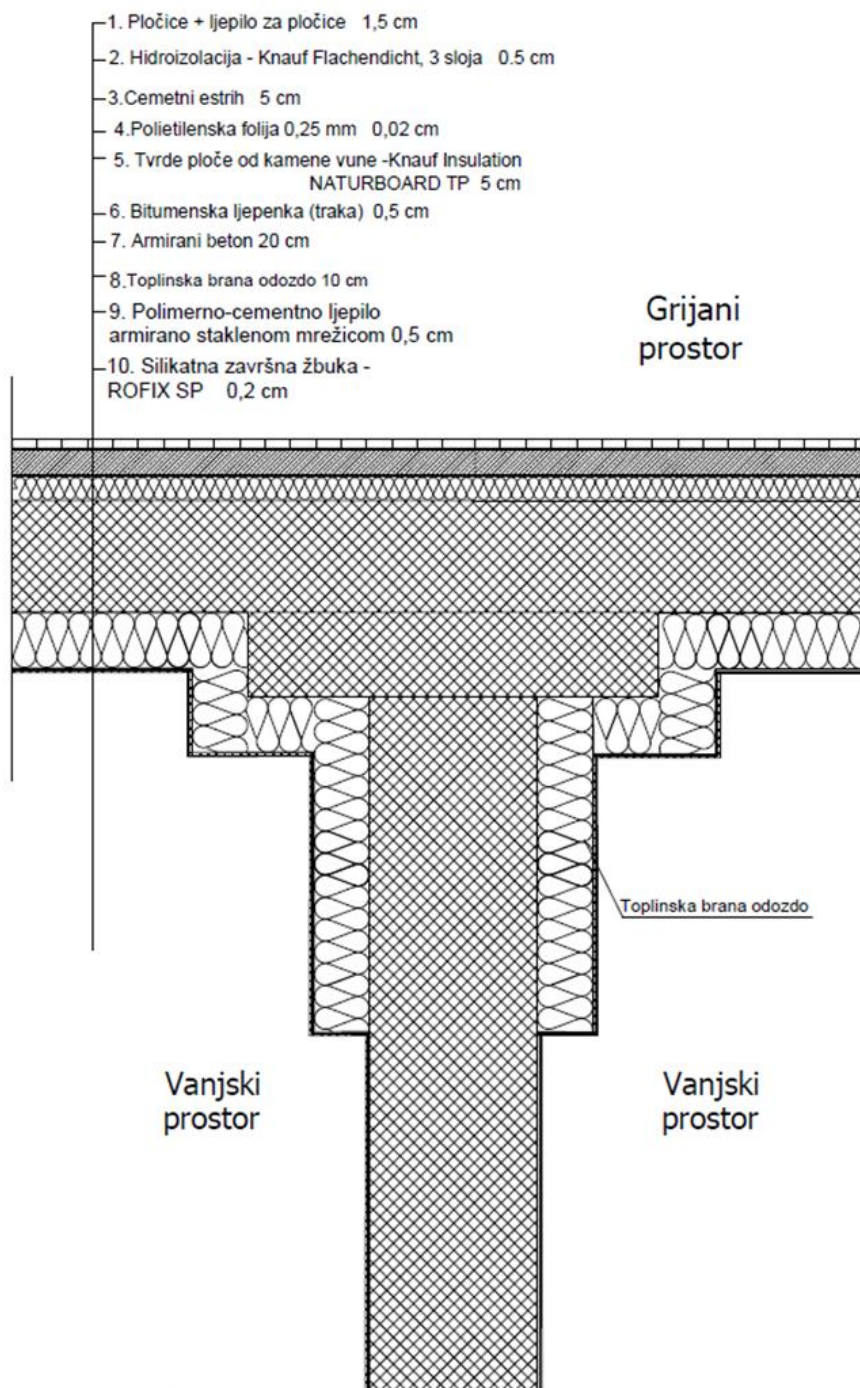
Faktor temperature fRsi dobiven proračunom nalazi se u tablici 30.

Tablica 30. Rezultat proračuna - faktor temperature fRsi – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom i ravnim krovom

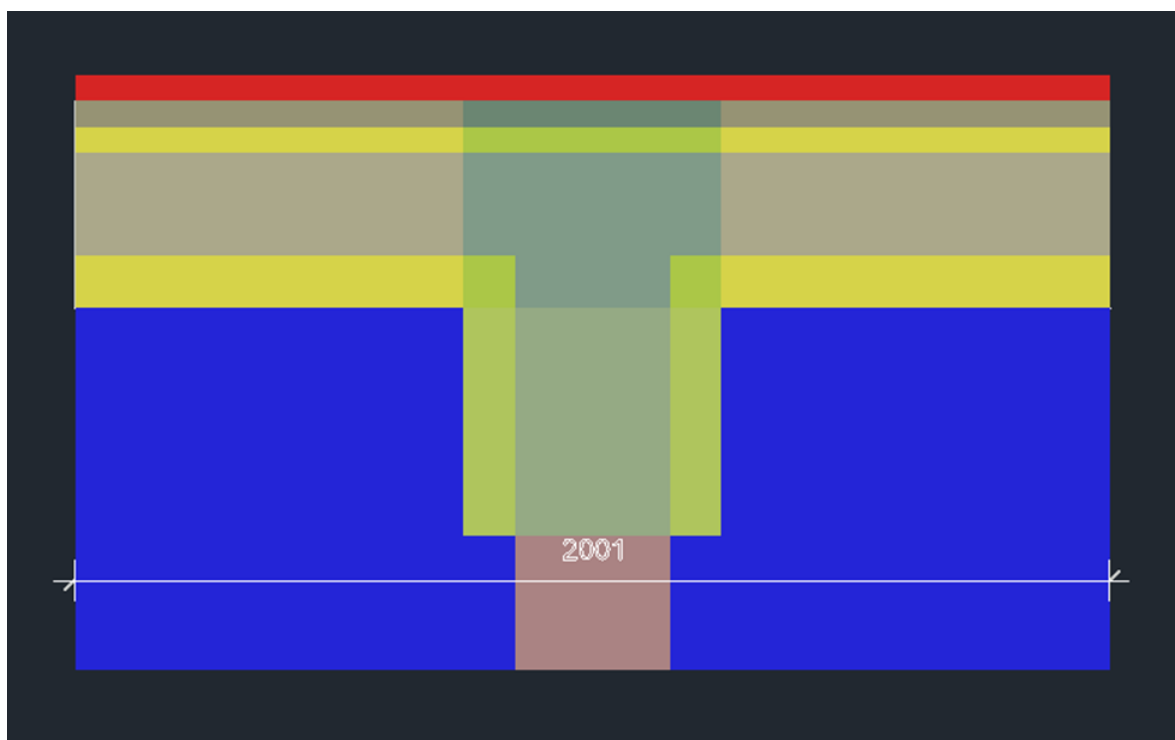
Prostor	Temperatur a zraka	Min. površinska temperatura	Max. površinska temperatura	Relativna vlažnost kod koje dolazi do kondenzacije	fRsi
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[--]
grijani prostor	20,000	19,189	19,980	95,090	0,959
vanjski prostor	0,000	0,142	2,008	100,000	--

10.3. Proračun toplinskih mostova – spoj stupa s međukatnom konstrukcijom

Kao i kod prethodnih detalja prvo je (na slici 60.) prikazano rješenje detalja spoja sa popisom slojeva građevnih elemenata te je prikazan njegov geometrijski model modeliran u Autocadu. (slika 61.)



Slika 60. Detalj spoja stupa s međukatnom konstrukcijom



Slika 61. Model spoja stupa s međukatnom konstrukcijom

Karakteristike materijala i okoliša građevnih elemenata prikazani su u tablicama 31. i 32.

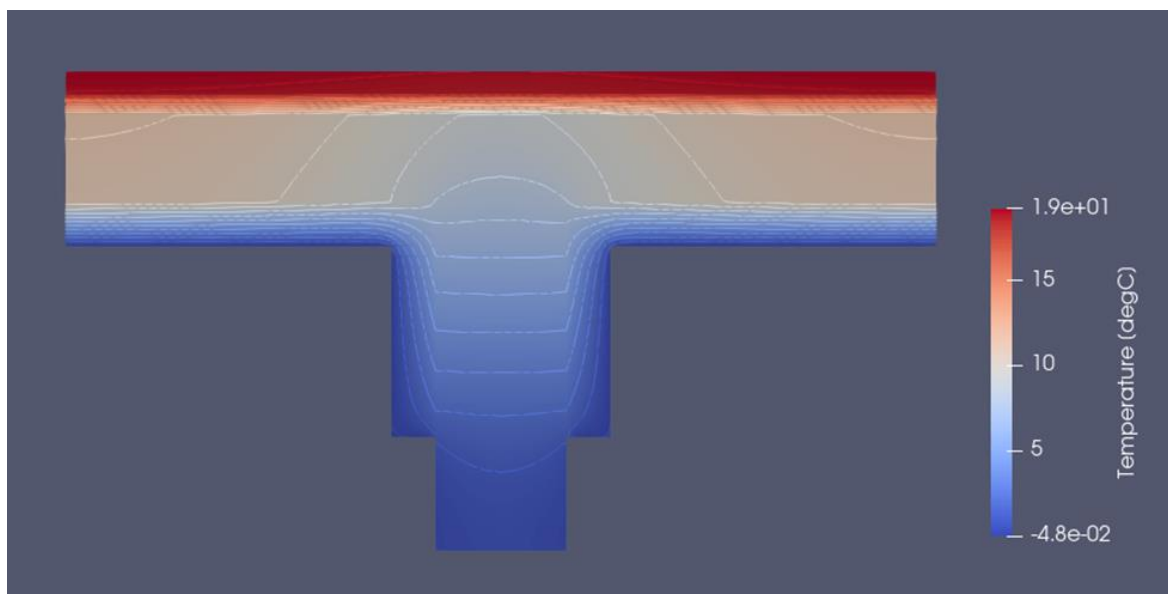
Tablica 31. Definirani materijali i karakteristike materijala

R.br	Materijal	λ [W/(m K)]	μ [--]
1	Armirani beton	2,00	110,00
2	Toplinsk izolacija	0,04	1,10
3	Estrih	1,60	50,00

Table 32. Definirani uvjeti okoliša

R.br	Prostor	h [W/m ² K]	T [°C]	RH [W/m ² K]
1	Grijani prostor	7,69	20,00	60,00
2	Vanjski prostor	25,00	0,00	90,00

Raspodjela temperature po definiranom modelu prikazana je na slici 62.



Slika 62. Raspodjela temperature- spoj stupa s međukatnom konstrukcijom

Proračunati iznos linearne toplinske propusnosti (Ψ -vrijednosti) i iznos faktora temperature f_{Rsi} za predmetni spoj nalaze se u tablicama u nastavku.

Tablica 33. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti – spoj stupa s međukatnom konstrukcijom

Prostor _i /Prostor _j	U- vrijednost [W/(m ² K)]	L [m]	ΔT [°C]	U × L [W/(mK)]
grijani prostor/vanjski prostor	0,247	2,001	20,000	0,494
grijani prostor/vanjski prostor			Ψ [W/(m K)] = 0,195	

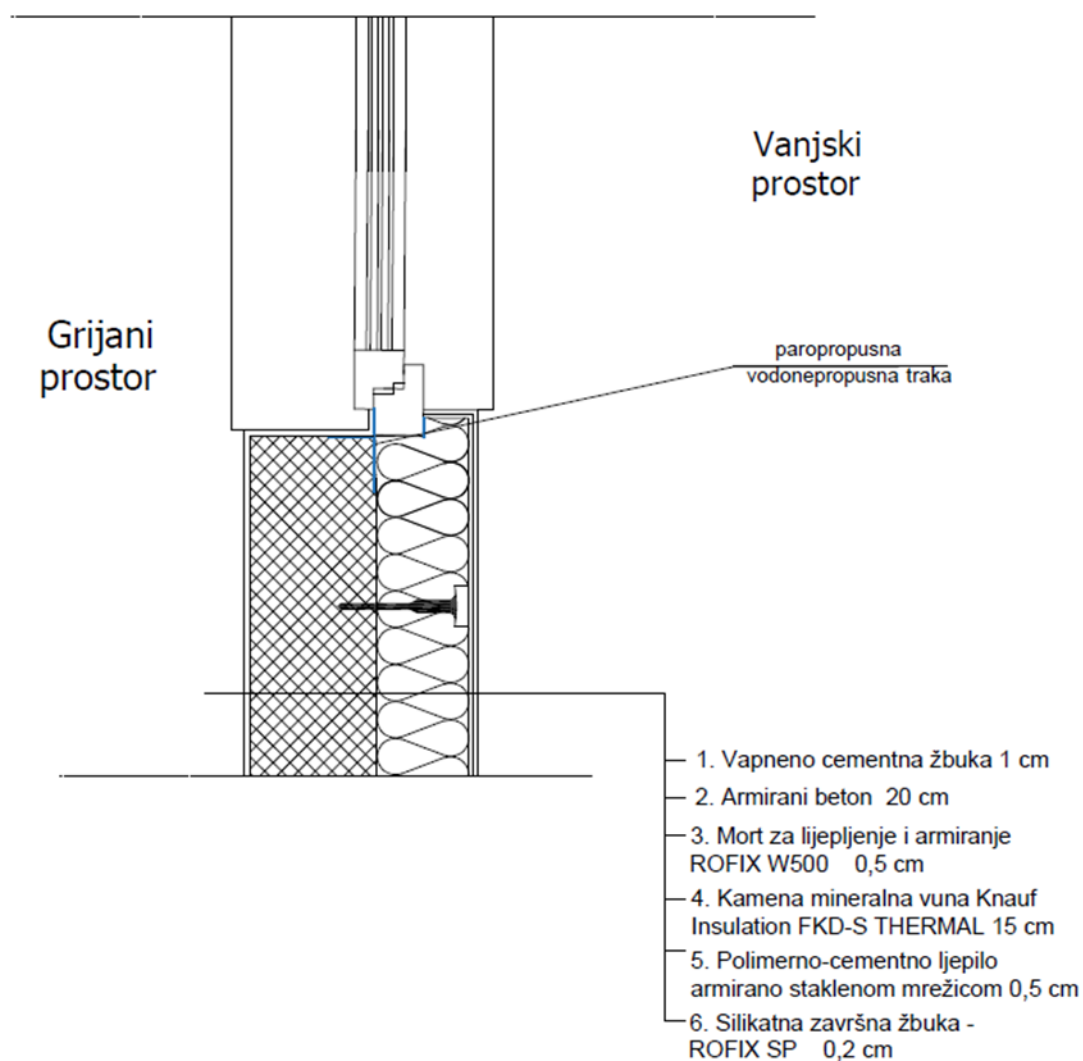
Tablica 34. Rezultat proračuna - faktor temperature f_{Rsi} – spoj stupa s međukatnom konstrukcijom

Prostor	Temperatur a zraka	Min. površinska temperatura	Max. površinska temperatura	Relativna vlažnost kod koje doazi do kondenzacije	f_{Rsi}
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[--]
grijani prostor	20,000	18,996	19,181	93,950	0,950
vanjski prostor	0,000	-0,048	1,319	99,610	--

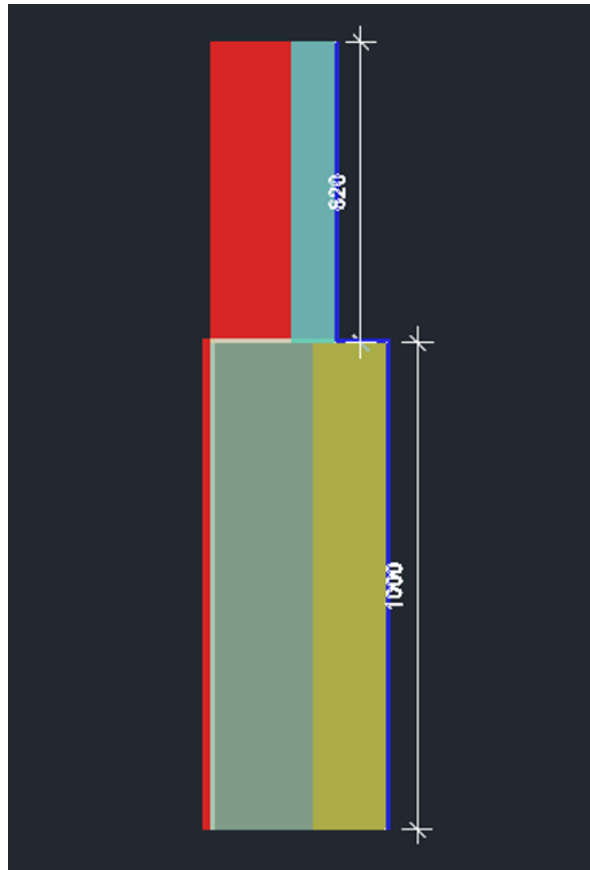
10.4. Proračun toplinskih mostova – horizontalni presjek prozora

Kao i kod prethodnih detalja prvo je (na slici 63.) prikazano rješenje detalja spoja sa popisom slojeva građevnih elemenata te je prikazan njegov model iz Autocada. (slika 64.)

U ovom slučaju radi se o horizontalnom presjeku prozora ugrađenog u vanjski zid predmetne zgrade.



Slika 63. Detalj - horizontalni presjek prozora



Slika 64. Model - horizontalni presjek prozora

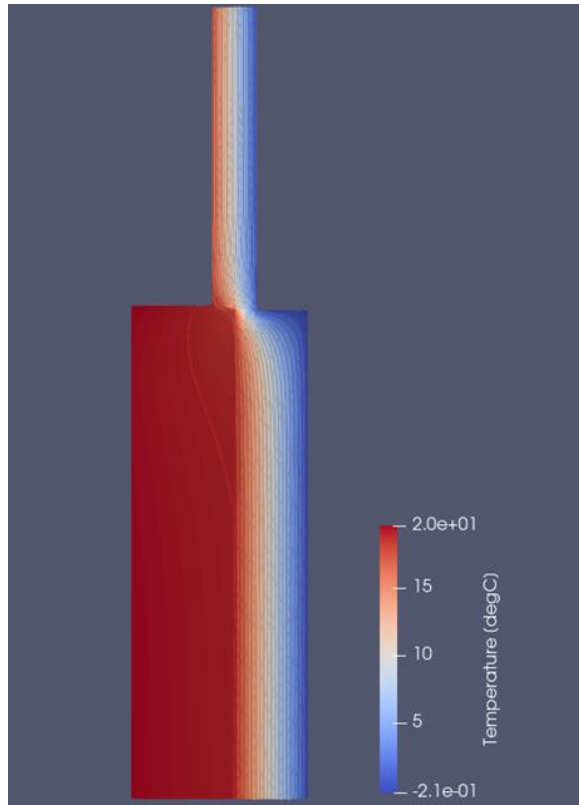
Karakteristike materijala i okoliša građevnih elemenata prikazani su u tablicama 35. i 36. Građevni element se nalazi na granici između grijanog i vanjskog prostora.

Tablica 35. Definirani materijali i karakteristike

R.br	Materijal	λ [W/(mK)]	μ [--]
1	Armirani beton	2,00	110,00
2	Toplinska izolacija	0,03	1,10
3	Unutarnja žbuka	1,00	20,00
4	Prozor	0,13	1,00

Tablica 36. Definirani uvjeti okoliša

R.br	Prostor	h [W/m ² K]	T [°C]	RH [W/m ² K]
1	Grijani prostor	7,69	20,00	60,00
2	Vanjski prostor	25,00	0,00	90,00



Slika 65. Raspodjela temperature- horizontalni presjek prozora

Tablica 37. Rezultat proračuna - faktor temperature f_{Rsi} – horizontalni presjek prozora

Prostor	Temperatur a zraka	Min. površinska temperatur a	Max. Površinska temperatura	Relativna vlažnost kod koje dolazi do kondenzacije	f_{Rsi}
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[--]
grijani prostor	20,000	16,984	19,549	82,790	0,849
vanjski prostor	0,000	-0,210	1,832	98,280	--

Proračun linijskog koeficijenta prolaska topline ψ :

$$\Psi = L2D - \sum U \cdot l$$

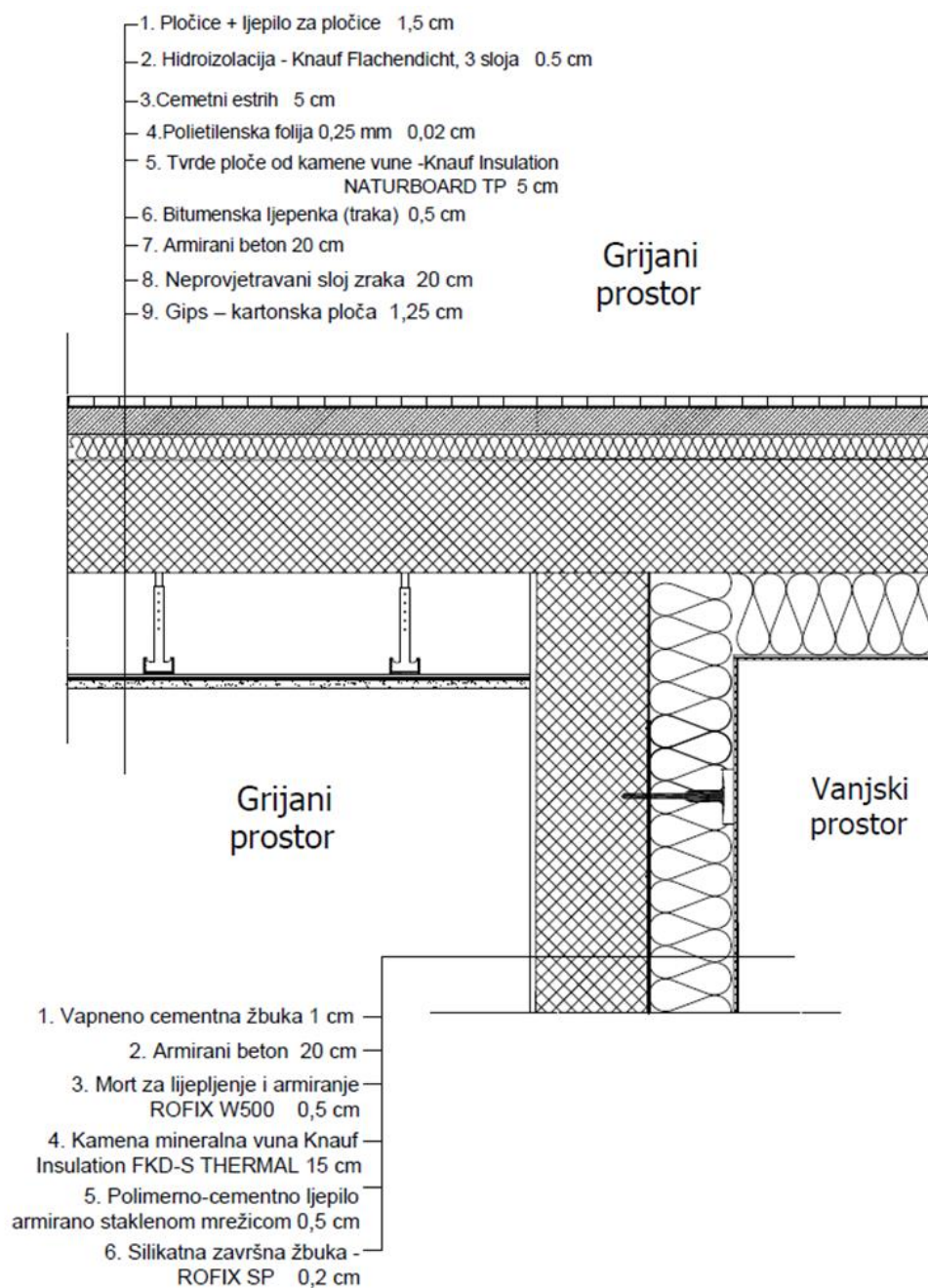
$$\Psi = 0,944 - (0,189 \cdot 1,00 + 0,62 \cdot 1,16)$$

$$\Psi = 0,036 \text{ W/m}^2\text{K}$$

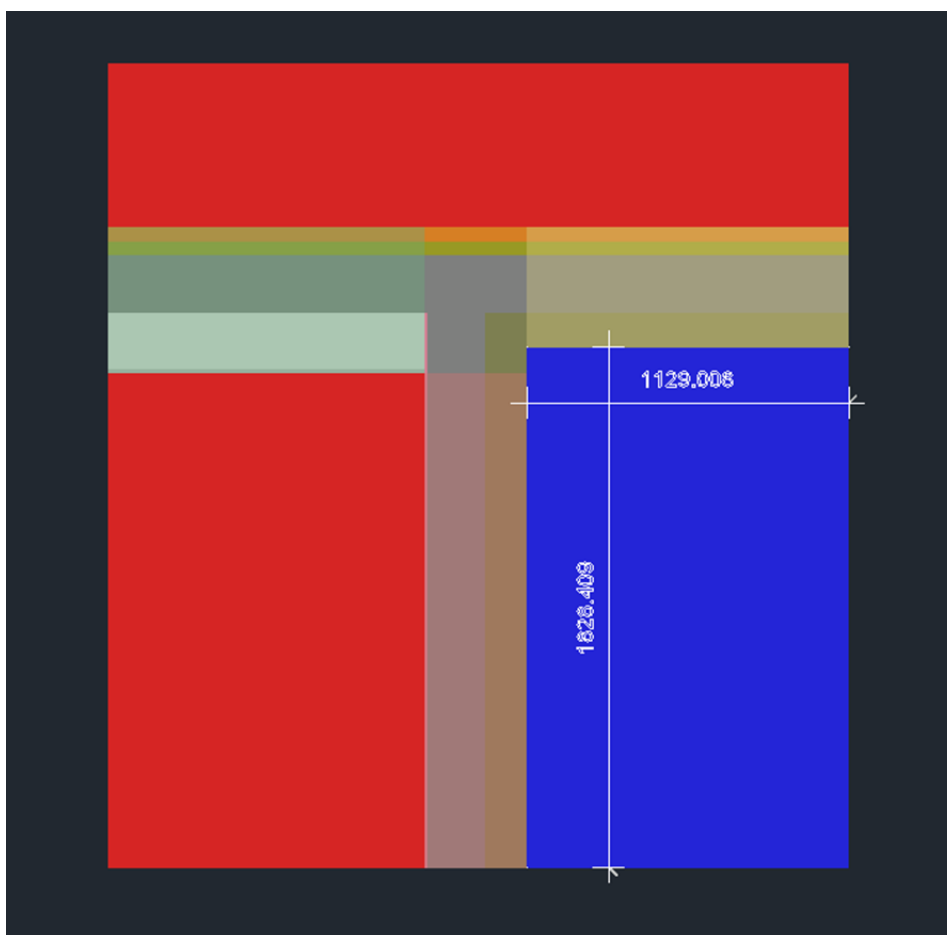
10.5. Proračun toplinskih mostova – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano

Kao i kod prethodnih detalja prvo je (na slici 66.) prikazano rješenje detalja spoja sa popisom slojeva građevnih elemenata te je prikazan njegov model. (slika 67.)

U ovom slučaju radi se o spoju vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granicama grijano – vani i grijano – grijano.



Slika 66. Detalj spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano



Slika 67. Model spoja vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano

Karakteristike materijala i okoliša građevnih elemenata prikazani su u tablicama 38. i 39.

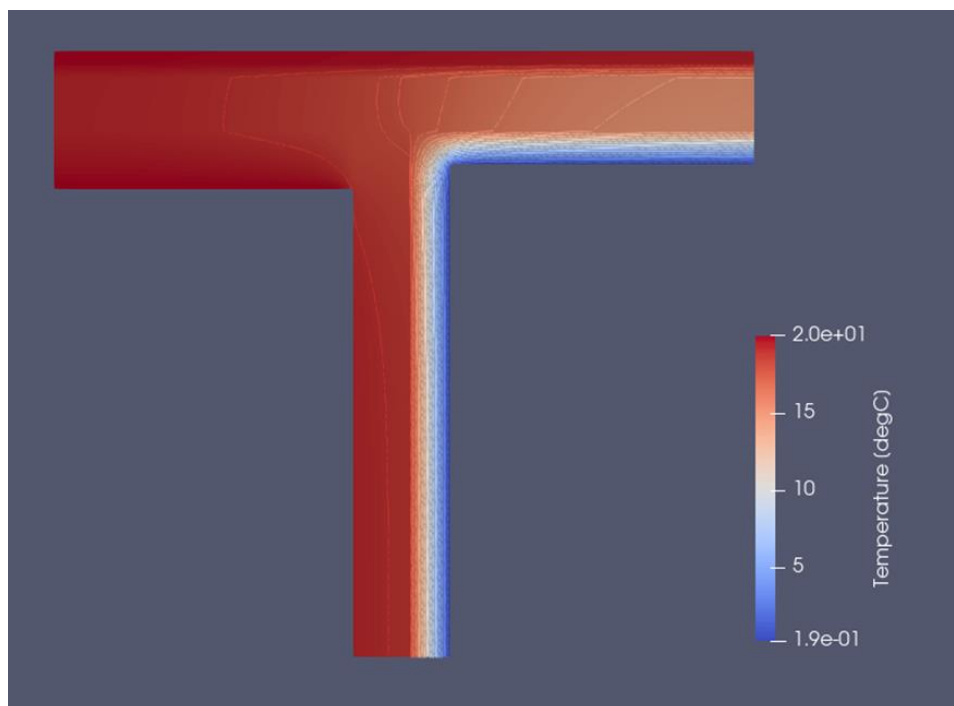
Tablica 38. Definirani materijali i karakteristike

R.br.	Material	λ [W/(m K)]	μ [--]
1	Armirani beton	2,00	110,00
2	Zrak	0,03	1,00
3	Gipskartonske ploče	0,25	8,00
4	Ploče od kamene vune	0,04	1,10
5	Žbuka	1,00	20,00
6	Estrih	1,60	50,00
7	Mineralna vuna	0,04	1,10

Tablica 39. Definirani uvjeti okoliša

R.br	Prostor	h [W/m ² K]	T [°C]	RH [W/m ² K]
1	Grijani prostor	7,69	20,00	60,00
2	Vanjski prostor	25,00	0,00	90,00

Raspodjela temperature po detalju prikazana je na slici 68.



Slika 68. Raspodjela temperature- spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano

U tablici 40. nalazi se iznos Ψ -vrijednosti.

Tablica 40. Rezultat proračuna Ψ -vrijednosti - spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano – grijano

Prostor _i /Prostor _j	U-vrijednost [W/(m ² K)]	L [m]	ΔT [°C]	U × L [W/(m K)]
grijani prostor/vanjski prostor	0,217	1,129	20,000	0,245
grijani prostor/vanjski prostor	0,248	1,828	20,000	0,453
grijani prostor/vanjski prostor			Ψ [W/(m K)] = 0,047	

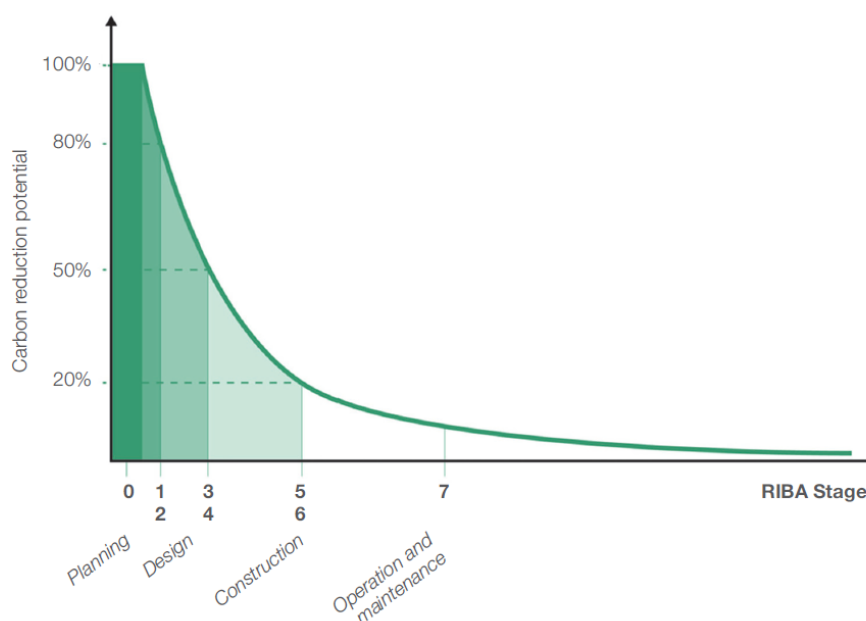
Dobiveni faktor temperature f_{Rsi} za predmetni spoj nalazi se u tablici 41.

Tablica 41. Rezultat proračuna – faktor temperature f_{Rsi} – spoj vanjskog zida sa međukatnom konstrukcijom na granici grijano – vani i grijano-grijano

Prostor	Temperatura zraka	Min. površinska temperatura	Max. površinska temperatura	Relativna vlažnost kod koje dolazi do kondenzacije	f_{Rsi}
	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[--]
grijani prostor	20,000	18,788	19,987	92,740	0,939
vanjski prostor	0,000	0,187	2,074	100,000	--

11. Proračun emisije CO₂eq plinova

Temeljni princip proračuna je množenje količine svakog materijala ugrađenog u konstrukciju s faktorom ugljika [kgCO₂eq] za faze životnog ciklusa koji se razmatraju. Najpovoljnije vrijeme za provedbu proračuna je faza planiranja te rana faza projektiranja kako bi se mogla identificirati moguća poboljšanja u projektu. Na grafu na slici u nastavku prikazano je kako potencijal smanjenja emisija CO₂eq eksponencijalno opada u kasnijim fazama projekta, već u fazi izgradnje potencijal smanjenja emisija CO₂eq iznosi svega 20%. [7]



Slika 69. Potencijal smanjenja emisija CO₂eq ovisno o fazi projekta [7]

Proračun je proveden za životni vijek od 60 godina prema EN 15978. [8]

11.1. Životni ciklus

Za predmetnu zgradu proveden je proračun emisija CO₂eq plinova u njenom cjelokupnom životnom vijeku pri čemu životni vijek za koji je izrađen proračun iznosi 60 godina. Životni vijek je podijeljen na 5 faza: 1. Faza proizvoda (Faza A1-A3)

2. Faza procesa građenja (Faza A4-A5)

3. Faza korištenja (Faza B)

4. Faza kraja životnog ciklusa (Faza C)

5. Prednosti i opterećenja izvan granica sustava (Faza D)

Sukladno EN 15978; 7.4. pod fazu proizvoda spadaju 3 podfaze (modula) dobivanja proizvoda: A1 – nabava sirovina, A2- prijevoz materijala i na kraju A3- proizvodnja. U fazu procesa grđenja uključena je faza transporta na gradilište (A4) i proces gradnje/instalacije (A5). Faza B, odnosno faza korištenja u obzir uzima: korištenje (B1), održavanje (B2), popravke (B3), zamjene (B4), obnove (B5), korištenu energiju (B6) i korištenu vodu (B7). Faza kraja životnog ciklusa sastoji se od deinstalacije ili rušenja (C1), transporta materijala (C2), proces razvrstavanja otpada (C3) te njegovo zbrinjavanje (C4). Faza D podrazumijeva mogućnosti ponovnog korištenja, uporabe ili recikliranja. Sumarno sve faze i podfaze životnog ciklusa prikazane su u tablično (tablica 42).

Tablica 42. Faze životnog ciklusa proizvoda [8]

Životni ciklus proizvoda																	
Faza proizvoda			Faza procesa građenja		Faza korištenja						Faza kraja životnog ciklusa			Prednosti i opterećenja izvan granica sustava			
A					B						C			D			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
Nabava sirovina	Prijevoz materijala	Proizvodnja	Prijevoz na gradilište	Gradnja, Instalacija	Korištenje	Održavanje	Popravci	Zamjene	Obnova	Energija	Voda	Deinstalacija, rušenje	Prijevoz materijala	Otpad - proces razvrstavanja	Zbrinjavanje	Ponovno korištenje, upotreba, recikliranje	

Životni vijek nekih od korištenih građevinskih proizvoda (popis se nalazi u tablici na slici 69.) manji je od projektnog životnog vijeka cijele zgrade, stoga je potrebno u obzir uzeti njihove zamjene tijekom životnog vijeka. Dakle ukoliko se vrši zamjena nekog građevinskog proizvoda (npr. postavljanje novih prozora) u proračun je potrebno uvrstiti ukupan broj komada tog proizvoda koji uključuje prvobitno postavljen proizvod i svaki novi (zamjenski) proizvod.

Element zgrade	Procijenjeni životni vijek elementa zgrade, CL _i [god]	Broj zamjena u 60 god.	Ukupno komada instaliranih u 60 god.
Fotonaponski sustav	25	2	3
Dizalica topline	20	2	3
MVHR	20	2	3
PVC prozori	40	1	2
Rolete	40	1	2
Turbovijci	40	1	2
PUR pjena	40	1	2
RAL trake	40	1	2
Ljepilo za RAL trake	40	1	2
Okviri i krila vrata stanova	10	5	6
Okviri i krila unutarnja vrata	30	1	2
Bitumenska hidroizolacija	35	1	2
Toplinska izolacija (XPS)	50	1	2
XPS za TI atike	50	1	2
Geotekstil		1	2

Slika 70. Životni vijek ugrađenih elemenata i broj potrebnih zamjena tokom životnog ciklusa [9]

11.2. Modelirani elementi i sustavi te njihove količine

Kako se proračun emisija CO₂eq plinova provodi za cijelu predmetnu zgradu potrebno je u obzir uzeti sve njene elemente i sustave koji su ugrađeni u nju te poznavati njihove količine. Modelirani su sljedeći elementi i sustavi za potrebe proračuna:

1. Pod na tlu (popis slojeva u tablici 7.)
2. Vanjski zidovi (popis slojeva u tablici 3.)
3. Ravni krov (popis slojeva u tablici 8.)
4. Unutarnji pregradni zidovi (popis slojeva u tablici 4. i 5.)
5. Međukatna konstrukcija (popis slojeva u tablici 6. i 9.)
6. Prozori i vrata

Kod prozora i vrata u proračun su uzeti i materijali za njihovu ugradnju (RAL trake, PUR pjena, turbovijci, metalni nosači za ugradnju prozora u izolaciju)

7. Tehnički sustavi (fotonapon, dizalica topline, mehanička ventilacija)

Količine materijala mogu se ustanoviti na više različitih načina:

- Ručni proračuni
- BIM modeli
- Modeli strukturne analize
- Priručnici za projektiranje

- Preliminarni proračuni reprezentativnih/konstruktivnih elemenata koji se ponavljaju
- Prethodno iskustvo na projektu
- Količine iz troškovnika [7]

Za proračun proveden u radu za predmetnu zgradu količine materijala dobivene su pomoću izrade BIM modela.

11.3. Utjecaj korištenih materijala i sustava na okoliš (faktori ugljika)

Prilikom procjene utjecaja životnog ciklusa (LCIA) proizvoda razmatra se više različitih kategorija utjecaja (slika 70.). [10] Za proračun CO₂eq plinova biti će korištena kategorija utjecaja – klimatske promjene čiji je pokazatelj potencijal globalnog zatopljenja (GWP – global warming potential) iskazan u mjernoj jedinici kgCO₂eq. Uzročnik promatrane kategorije utjecaja je efekt stakleničkih plinova uzrokovan antropogenim utjecajem.

Kategorija utjecaja	Pokazatelj	Uzrok	Mierna jedinica
Abiotičko iscrpljivanje	Potencijal adiobatičkog iscrpljivanja (engl. Abiotic depletion), ADP	Korištenje prirodnih resursa (voda, metali i sl.)	kg Sb eq
Abiotičko iscrpljivanje (fosilna goriva)	Potencijal adiobatičkog iscrpljivanja fosilnih goriva (engl. Abiotic depletion (fossil fuels), ADP-FF)	Korištenje prirodnih resursa (fosilnih goriva)	MJ
Klimatske promjene	Globalno zatopljenje (engl. Global warming) za vremensko razdoblje od 100 godina, GWP100a	Efekt stakleničkih plinova uzrokovan antropogenim djelovanjem	kgCO ₂ eq
Oštećenje ozona	Oštećenje ozona (engl. Ozone layer depletion), ODP	Oštećenje ozonskog omotača uzrokovano različitim plinovima	kgCFC11 eq
Toksičnost za ljude	Toksični učinci na čovjeka (engl. Human toxicity), HTP	Utjecaj emisija štetnih tvari i kemikalija na zdravlje (kancerogenost i sl.)	kg 1,4-DP eq
Toksičnost za slatkovodnu vodu	Toksični učinci na slatku vodu (engl. Fresh water aquatic ecotoxicity), FAETP	Utjecaj emisija štetnih tvari i kemikalija na kopnene, slatkovodne, morske i zračne ekosustave uzrokujući povećanu smrtnost, mutacije, smanjenu reprodukciju, promjene u ponašanju sl.	kg 1,4-DP eq
Toksičnost za morsku vodu	Toksični učinci na morsku vodu (engl. Marine aquatic ecotoxicity), MAETP		kg 1,4-DP eq
Toksičnost za tlo	Toksični učinci na tlo (engl. Terrestrial ecotoxicity), TETP		kg 1,4-DP eq
Fotokemijska oksidacija	Potencijal fotokemijske oksidacije, (engl. Photochemical oxidation), POCP	Fotokemijsko stvaranje ozona i drugih reaktivnih spojeva kisika u troposferi iz emisija VOC i NO _x pod utjecajem svjetlosti	kg C2H2 eq
Zakiseljavanje	Potencijal zakiseljavanja (engl. Acidification), akumulirano prekoračenje zakiseljavanja, AP	Zakiseljavanje tla i vodenih sustava prekomjernim korištenjem antropogenih spojeva kao npr. SO _x , NO _x , HCl, H ₂ SO ₄	kg SO ₂ eq

Slika 71. Kategorije utjecaja proizvoda na okoliš [10]

Utjecaji svih materijala i sustava ugrađenih u konstrukciju za svaku kategoriju utjecaja na okoliš u svakoj pojedinoj fazi njegovog životnog ciklusa nalaze se u EPD dokumentima. EPD (Environmental Product Declaration) ili izjava o utjecaju na okoliš je standardizirani dokument koji pruža informacije o utjecaju proizvoda na okoliš i ljudsko zdravlje. [10]

Mnogi proizvođači pružaju EPD dokumente za svoje proizvode koji sadrže ugljične faktore proizvoda iskazane u kgCO₂eq. [7]

Za svaki korišteni građevinski proizvod potrebno je iz EPD dokumenta izdvojiti vrijednost GWP-a [kgCO₂eq] i uvrstiti ga u proračun ukupnog GWP za cijelu zgradu i sve njene građevne elemente i sustave ugrađene u nju.

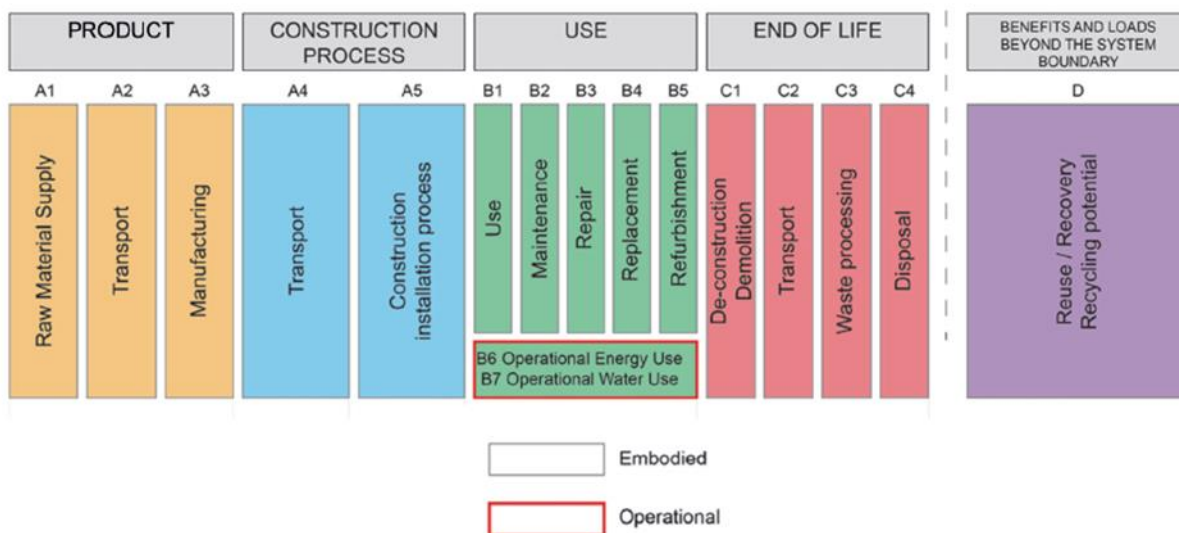
Za svaki modelirani građevni element i sustav tablično su prikazane ukupne vrijednosti GWP-a [kgCO₂eq] po fazama životnog ciklusa (A-D) dobivene proračunom.

	A1-A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
Pod na tlu	9,28E+03	1,71E+02	1,74E+02	0,00E+00	3,97E-04	0,00E+00	0,00E+00	6,38E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,01E+02	2,81E+02	5,49E+01	3,22E+02	-1,26E+02
Vanjski zidovi	2,40E+04	7,48E+02	8,67E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	8,36E+02	9,05E+02	4,32E+01	3,05E+02	-6,91E+02
Ravni krov	2,70E+04	2,58E+02	2,85E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1,17E+01	0,00E+00	0,00E+00	6,82E+02	8,88E+02	9,89E+01	3,91E+02	-8,47E+02
Unutarnji pregradni zidovi	1,39E+03	8,82E+01	5,25E+01	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,16E+00	1,80E+01	2,37E-01	1,18E+02	-2,80E+02
Međukatne konstrukcije	1,08E+04	2,03E+02	2,80E+02	0,00E+00	3,59E+01	0,00E+00	0,00E+00	8,79E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,77E+02	3,81E+02	1,05E+02	2,13E+02	-1,72E+02
Prozori i vrata	2,74E+04	8,69E+01	1,78E+02	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	2,51E+03	2,51E+01	0,00E+00	9,91E+02	-6,06E+03
Tehnički sustavi	3,18E+03	9,80E+01	2,23E+03	-2,45E+04	0,00E+00	0,00E+00	4,12E+01	0,00E+00	1,47E+04	0,00E+00	0,00E+00	1,44E+00	3,13E+01	8,58E+00	-8,71E+02
UKUPNO	1,03E+05	1,65E+03	4,06E+03	-2,45E+04	3,59E+01	0,00E+00	4,12E+01	2,69E+01	1,47E+04	0,00E+00	4,51E+03	2,50E+03	3,33E+02	2,35E+03	-9,04E+03

Slika 72. Rezultat proračuna - ukupne vrijednosti GWP-a za sve građevne elemente po fazama životnog ciklusa

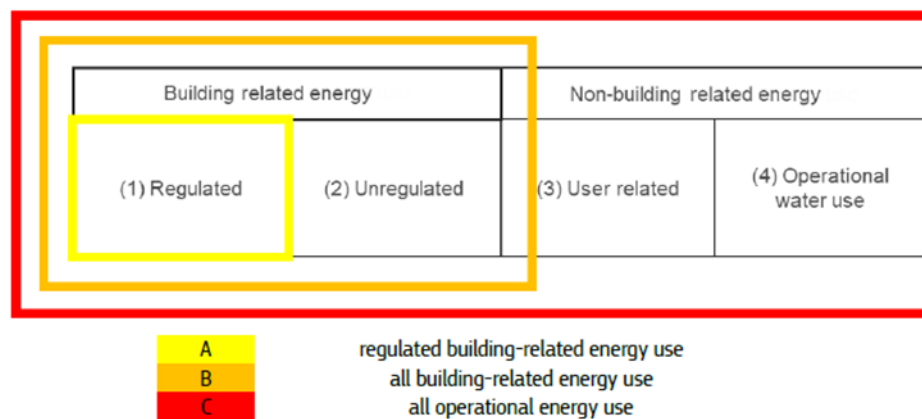
11.4. Analiza rezultata proračuna

Kako bi bilo moguće analizirati rezultate potrebno je poznavati razliku između operativnih i ugrađenih CO₂eq emisija. Operativne emisije sadržane su u fazama B6 i B7 što obično uključuje emisije ugljika povezane s korištenjem energije za grijanje, toplu vodu, hlađenje, ventilaciju i rasvjetu. [7]



Slika 73. Operativne i ugrađene emisije u životnom ciklusu [7]

Sve vrste operativne energije objašnjene su u nastavku i prikazane na slici.



Slika 74. Operativne energije [2]

U slučaju zgrada gotovo nulte energije (NZEB) granica sustava postavljena je samo na operativnu fazu zgrade (fazu njenog korištenja), točnije fokus je na reguliranoj upotrebi energije. [2]

(1) Regulirana upotreba energije uključuje grijanje, hlađenje, ventilaciju, pripremu potrošne tople vode (PTV), rasvjetu. [2]

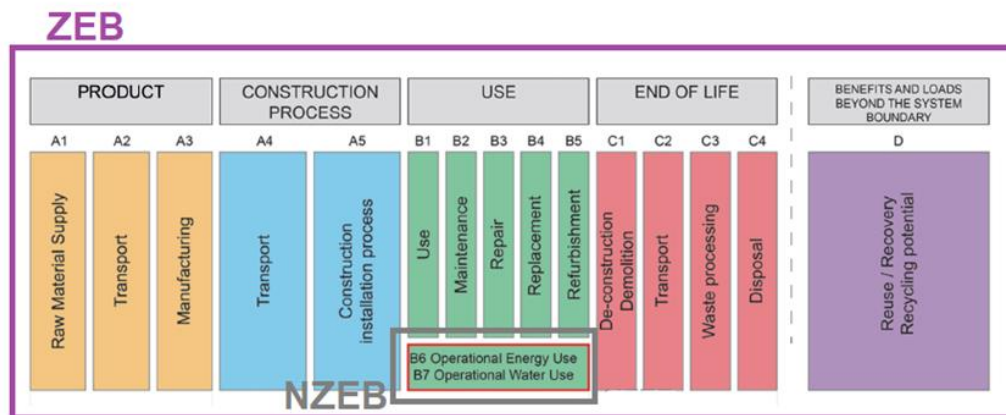
(2) Neregulirano korištenje energije u zgradi predstavlja potrošnja energije koja nije predmetom propisa za zgrade i može biti vezana uz zgradu ili korisnika (energija koju troše dizala, pokretne stepenice, automatska vrata, sigurnosni i sigurnosni sustavi, komunikacijski sustavi i svi drugi tehnički sustavi potrebni za pravilno funkcioniranje zgrade) [2]

Potrošnja energije koja nije povezana s zgradama:

(3) Povezano s korisnikom: energija koju troše električni uređaji (TV, hladnjaci, informatička oprema itd.) i bilo koja druga potrošnja energije koju generira korisnik zgrade. S druge strane, ova kategorija stvara toplinske dobitke, stoga ima pozitivan doprinos energetske učinkovitosti zgrada smanjenjem potrebe za grijanjem. [2]

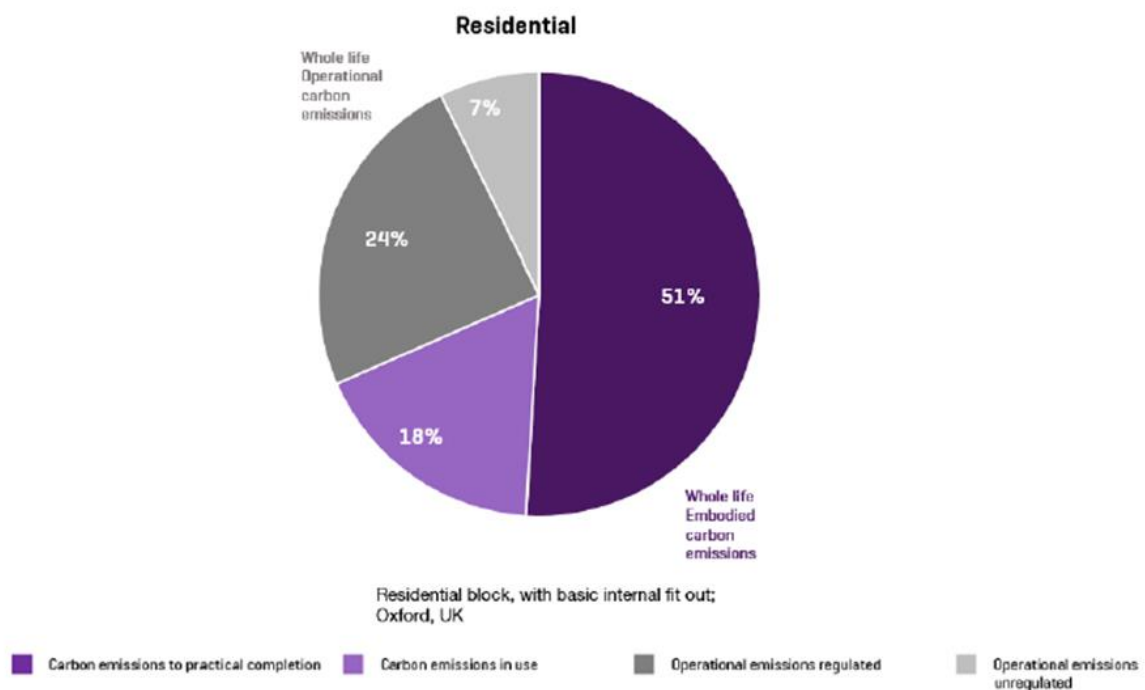
(4) Operativna uporaba vode: uključuje svu vodu korištenu u procesima potrošnje vode u zgradi kao što su: pitka voda, voda za sanitarije, navodnjavanje zelenih površina. [2]

Kod zgrada nulte emisije (ZEB) osim faze korištenja promatra se njen cijeli životni ciklus te se osim operativnih emisija u obzir uzimaju i ugrađene emisije.



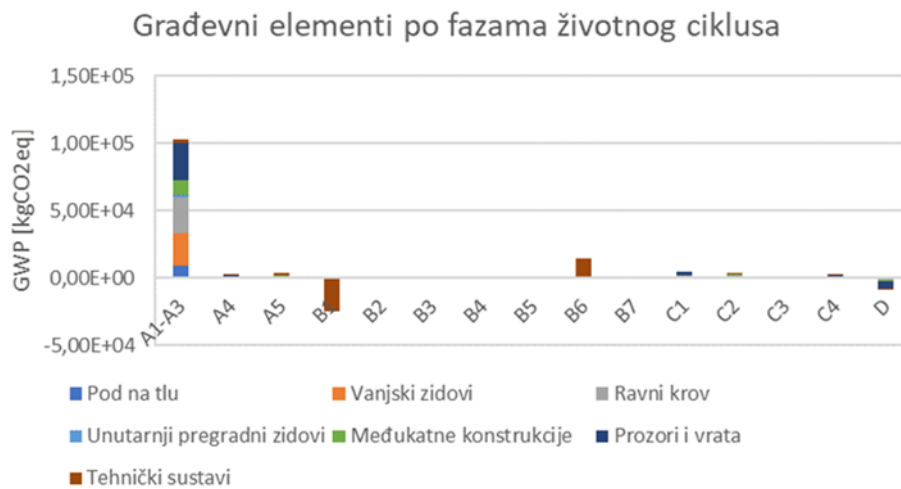
Slika 75. Faze životnog ciklusa i operativne i ugrađene emisije

Na slici je na primjeru tipične zgrade stambene namjene u Ujedinjenom Kraljevstvu prikazan odnos između udjela ugrađenih i operativnih emisija, raspodjela na dijagramu dokazuje da su ugrađene emisije dominantnije u cijelom životnom ciklusu te samim time imaju veći utjecaj na okoliš koji je dosadašnjim NZEB standardom bio zanemaren.



Slika 76. Udio ugrađenih i operativnih emisija u cijelom životnom vijeku stambene zgrade [8]

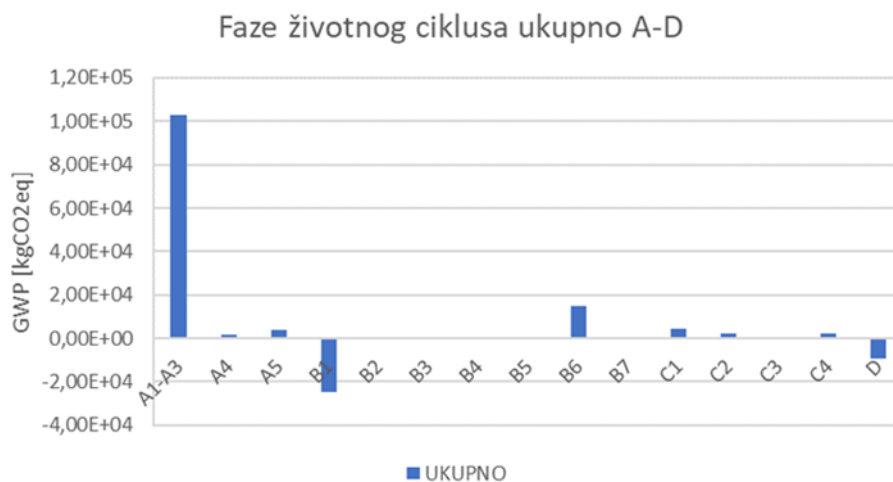
Iz prikaza rezultata proračuna CO₂eq za predmetnu zgradu po fazama životnog ciklusa možemo uočiti kako su dominantne ugrađene emisije u odnosu na operativne.



Slika 77. Prikaza rezultata proračuna CO₂eq za predmetnu zgradu po fazama životnog ciklusa

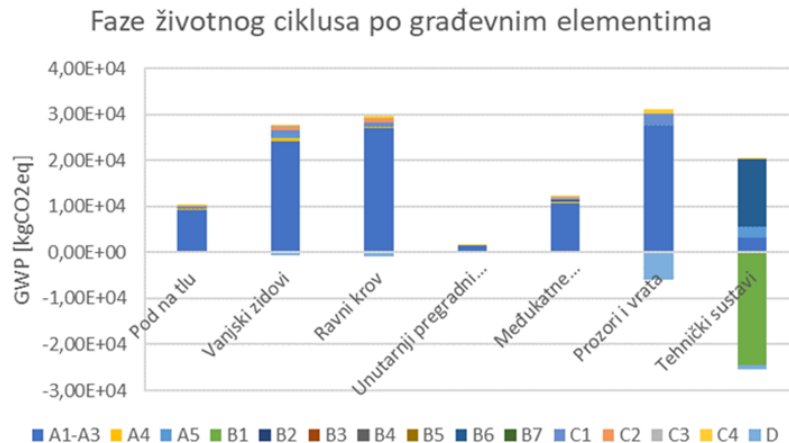
Također je vidljivo da se najveći udio emisija CO₂eq za predmetnu zgradu (koja zadovoljava NZEB standard) događa u prvoj fazi životnog ciklusa – fazi A, pogotovo njenom prvom dijelu A1-A3 koji podrazumijeva proizvodnju materijala i sustava.

Ovakav rezultat je očekivan za zgradu projektiranu po NZEB standardu jer se u fazi planiranja i projektiranja nije razmatrao cijeli životni ciklus već samo faza korištenja i operativne emisije tj. samo emisije vezane uz reguliranu upotrebu energije (energija potrebna za grijanje, hlađenje, PTV...).



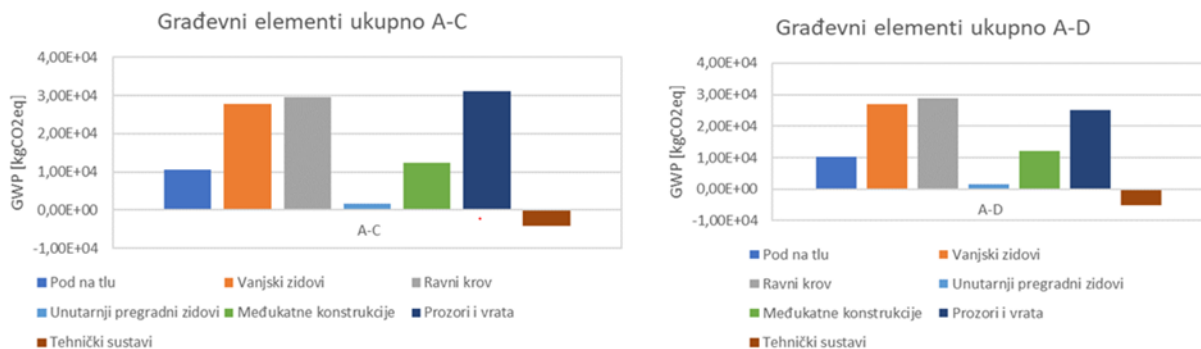
Slika 78. Prikaza rezultata proračuna CO₂eq za predmetnu zgradu po fazama životnog ciklusa

Također uočavamo da je vrijednost emisija CO₂eq negativna u fazi korištenja. Razlog tome je energija koja se proizvede pomoću fotonaponskog sustava – dobivanje energije iz obnovljivih izvora doprinosi smanjuju vrijednosti GWP-a. I kada usporedimo sve modelirane građevne elemente i sustave uočavamo da tehnički sustavi imaju najznačajniji utjecaj u smanjenu emisija CO₂eq upravo zahvaljujući NZEB mjerama (smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje te upotreba obnovljivih izvora energije - fotonapon).



Slika 79. Utjecaj na okoliš građevnih elemenata u svim fazama životnog ciklusa

Da ugrađene emisije imaju najveći udio u emisijama CO₂eq predmetne zgrade vidljivo je i prilikom usporedbe utjecaja svih građevnih elemenata, moguće je evidentirati i kod kojih građevnih elemenata je to najizraženije (ravni krov, vanjski zid, prozori i vrata). No neki materijali s velikim potencijalom za recikliranje ili ponovnu upotrebu mogu njime nadoknaditi svoje ugrađene emisije, odnosno smanjiti emisije CO₂eq. Na primjer kada bi zanemarili fazu D najveće emisije bi uzrokovali prozori i vrata, a kada bi u obzir uzeli i njihov potencijal za ponovnu upotrebu i recikliranje (faza D), prozori i vrata više nebi uzrokovali najveću vrijednost CO₂eq emisija u odnosu na ostale građevne elemente. (slika 80.)



Slika 80. Usporedba rezultata emisija CO₂eq građevnih dijelova sa i bez faze D

11.5. Zaključak

Analizom rezultata proračuna emisija CO₂eq iz prethodnog poglavlja za predmetnu nZEB zgradu zaključeno je sljedeće:

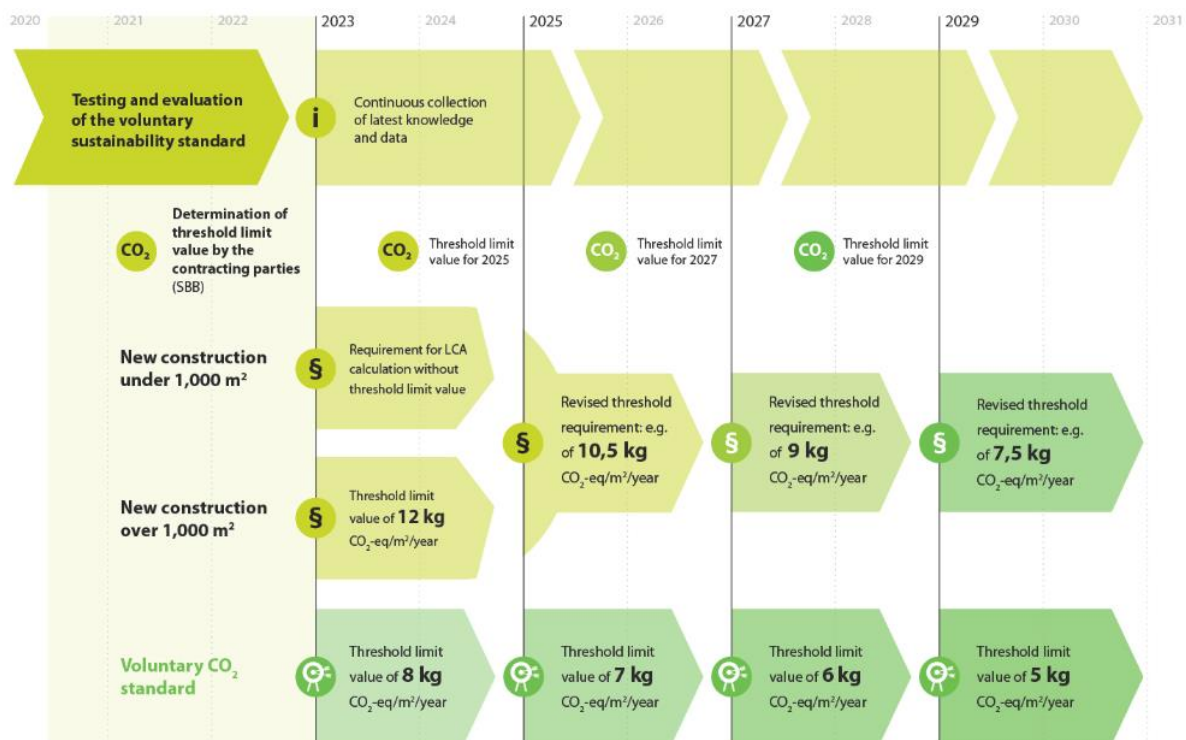
- Dominantne su ugrađene emisije CO₂eq u odnosu na operativne.
- Najveći udio emisija CO₂eq za predmetnu zgradu događa se u fazi proizvodnje materijala- faza A.
- Tehnički sustavi (vezani su uz operativne emisije – fazu B) imaju najznačajniji utjecaj u smanjenu ukupnih emisija CO₂eq upravo zahvaljujući NZEB mjerama (smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje te upotreba obnovljivih izvora energije - fotonapon)
- Moguće je uočiti da i faza D – ponovno korištenje i recikliranje također igra ulogu u smanjenju ukupnih emisija CO₂eq te ne treba zanemariti potencijal korištenja reciklabilnih materijala u smanjenju ugljičnog otiska zgrade.

Ovakvi rezultati su očekivani za zgradu projektiranu prema NZEB smjernicama. Operativne emisije značajno su niže od ugrađenih upravo zbog fokusa samih NZEB smjernica na fazu korištenja - faza B (ali ne i na ostatak životnog ciklusa) te na smanjenje operativne energije zgrade (samo regulirana upotreba energije) tj. smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje te upotreba obnovljivih izvora energije. Tim mjerama su smanjene operativne emisije, ali moguće istovremeno povećane ugrađene emisije zbog svih ugrađenih materijala i zanemarivanja njihovog utjecaja tokom životnog vijeka (vrijednost GWP-a, mogućnost recikliranja...).

Međutim usporedimo li vrijednost dobivenih emisija [kgCO₂eq] po kvadratu predmetne zgrade na godišnjoj razini dobivenih implementacijom samo NZEB smjernica sa Danskim kriterijem (prva zemlja u Europi s definiranim kriterijima za CO₂eq od 2023.) **uočavamo da tako projektirana zgrada zadovoljava Danski kriterij** tj. njene emisije ne prelaze kriterijem dozvoljene emisije CO₂eq plinova na godišnjoj razini.

Za predmetnu zgradu kroz cijeli životni vijek dobivena je vrijednost od 99 673,35 kgCO₂eq. Kada to podijelimo s površinom zgrade od 181, 17 m² i životnim vijekom (60 godina) dobivamo: 99 673,35 kgCO₂eq / 181, 17 m² / 60 god = **9,14 kgCO₂eq/ m²/god.**

Rezultat uspoređujemo s Danskom kao prvom zemljom u Europi s definiranim kriterijima za CO₂eq od 2023. Definirani kriteriji (i njihova promjena kroz vrijeme) od strane danskog Ministarstva unutarnjih poslova i stanovanja prikazani su na slici u nastavku.



Slika 81. Postupno uvođenje i povećanje zahtjeva za CO₂ (prilagođeno iz „Nacionalne strategije za održivu gradnju” danskog Ministarstva unutarnjih poslova i stanovanja, travanj 2021. [11])

Prema Danskim kriterijima do 2025. godine za utjecaj na okoliš novih zgrada većih od 1000 m² granična vrijednost iznosi 12 kg CO₂eq/m²/god. Za nove građevine manje od 1000 m² potrebno je provesti procjenu životnog ciklusa (ali ne postoji granična vrijednost). [11]

Predmetna zgrada je manje površine od strategijom definiranih 1 000 m² te zadovoljava propisani kriterij za nove građevine manje od 1000 m² do 2025. godine. Postroživanjem kriterija zgrada će zadovoljiti i kriterij od maksimalnih 10,5 kgCO₂eq/ m²/god koji na snagu u Danskoj stupa od 2025. godine.

Literatura

- [1] »Zastupnici podržali plan za klimatski neutralan sektor zgrada do 2050.«,« Europski parlament, 14 03 2023. [Mrežno]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/hr/press-room/20230310IPR77228/zastupnici-podrzali-plan-za-klimatski-neutralan-sektor-zgrada-do-2050>.
- [2] C. Maduta, M. Giulia, D. Delia i B. Paolo, »Defining zero-emission buildings,« Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.
- [3] B. Milovanović i M. Bagarić, »Kako postići standard zgrade gotovo nulte energije,« *Građevinar*, pp. 703-720, 2020.
- [4] M. Bagarić, D. Tkalčić i B. Milovanović, *Auditorne vježbe - Proračun geometrijskih karakteristika zgrade & BIM model*, 2022.
- [5] S. Novak, Z. Stapić i K. Lenić, Upute za rad s računalnim programom Ki Expert Plus: verzija 1608.
- [6] B. Milovanović, *Predavanje - Toplinski mostovi*.
- [7] O. John i G. Orlando, How to calculate embodied carbon, London: The Institution of Structural Engineers, 2020.
- [8] Simone, S. et al, Whole life carbon assessment for the built environment, London: Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS), 2017.
- [9] B. Milovanović, *Webinar- Uloga građevnih materijala u smanjenju CO2 emisija te zdravom i održivom stanovanju*, Wienerberger.
- [10] I. Carević, *Auditorne vježbe - LCA*.
- [11] P. Konnerup, Interviewee, *How Denmark leads the way in decarbonising the construction industry*. [Intervju]. 12 12 2020.