

# Modeliranje potrošnje energije za ljetno hlađenje

---

Čule, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:512132>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-20**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Ivan Čule**

**Modeliranje potrošnje energije za ljetno hlađenje**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Urbano inženjerstvo  
Računalno modeliranje**

**Ivan Čule  
JMBAG: 0114031125**

**Modeliranje potrošnje energije za ljetno hlađenje**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan, 2024.**

## IZJAVA

Diplomski rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Ivan Čule

U Rijeci, 09.07.2024.

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentoru Ivici Kožar na pruženoj pomoći pri izradi rada. Također se zahvaljujem na pruženoj potpori od obitelji i prijatelja.

## SAŽETAK

Ovaj rad analizira energetske karakteristike pasivnih kuća u više klimatskih zona i podijeljen je u dva dijela. U prvom dijelu rada je prikazan osnovan koncept pasivnih kuća pri čemu su pokazani i objašnjeni njegovi osnovni principi poput toplinske izolacije, građevinskih otvora, ventilacije s povratom topline te zrakonepropusnosti zgrade. Objašnjena je današnja gradnja pasivnih kuća pri čemu važnu ulogu ima oblik zgrade i orijentacija, tehnologija poput zemljanih i sunčanih kolektora te tipovi konstrukcija. Opisane su razne pogodnosti poput energetske efikasnosti zgrada, komfora i očuvanja zdravlja, ekološkog aspekta i troškova. Također je objašnjeno kako pasivne kuće funkcioniraju u drugim klimatskim zonama. U drugom dijelu rada napravljen je proračun u skladu s normom HRN EN ISO 13790. Provedena je analiza kojom se utvrđuje hoće li pasivna kuća koja je izgrađena prema uvjetima za hladnu klimatsku zonu i dalje zadovoljavati sve potrebne uvjete kada se nalazi u drugim klimatskim zonama. Dobiveni rezultati su upućivali da to nije moguće bez većih preinaka na objektu.

Ključne riječi: pasivna kuća, hlađenje, klimatska klasifikacija, ušteda energije, građevinski materijali, energetska učinkovitost

## SUMMARY

This paper analyzes the energy characteristics of passive houses in several climate zones and is divided into two parts. In the first part of the paper, the established concept of passive houses is presented, while its basic principles such as thermal insulation, building openings, ventilation with heat recovery and air tightness of the building are shown and explained. Today's construction of passive houses is explained, where the shape of the building and its orientation, technology such as earth and solar collectors, and construction types play an important role. Various benefits such as energy efficiency of buildings, comfort and health preservation, ecological aspects and costs are described. It is also explained how passive houses function in other climate zones. In the second part of the work, a calculation was made in accordance with the HRN EN ISO 13790 standard. An analysis was carried out to determine whether a passive house that was built according to the conditions for a cold climate zone will still meet all the necessary conditions when it is in other climate zones. The obtained results indicated that this is not possible without major modifications to the building.

Keywords: passive house, cooling, climate classification, energy saving, building materials, energy efficiency

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
<b>2. PASIVNE KUĆE</b> .....	3
<b>2.1. Principi</b> .....	3
<i>2.1.1. Toplinska izolacija</i> .....	4
<i>2.1.2. Građevinski otvori</i> .....	5
<i>2.1.3. Ventilacija s povratom topline – rekuperator</i> .....	6
<i>2.1.4. Minimalizacija toplinskih mostova</i> .....	7
<i>2.1.5. Zrakonepropusnost zgrade</i> .....	8
<b>2.2. Današnja gradnja</b> .....	9
<i>2.2.1. Oblik zgrade i orijentacija</i> .....	9
<i>2.2.2. Tehnologije - zemljani i sunčani kolektori</i> .....	13
<i>2.2.3. Materijali</i> .....	15
<b>2.3. Zahtjevi za pasivne kuće</b> .....	18
<i>2.3.1. Kriteriji</i> .....	18
<i>2.3.2. Certifikati</i> .....	19
<b>2.4. Prednosti</b> .....	20
<i>2.4.1. Energetska efikasnost zgrade</i> .....	20
<i>2.4.2. Komfor i zdravlje</i> .....	21
<i>2.4.3. Ekološki aspekt</i> .....	22
<i>2.4.4. Cijena</i> .....	23
<b>2.5. Softveri</b> .....	24
<b>3. KLIMATSKA KLASIFIKACIJA</b> .....	25
<b>3.1. Hladna klima</b> .....	26
<b>3.2. Umjereno hladna klima</b> .....	29
<b>3.3. Umjereno topla klima</b> .....	32
<b>3.4. Topla klima</b> .....	35



---

<b>3.5. Vruća klima</b> .....	37
<b>3.6. Usporedba</b> .....	39
<b>4. HLAĐENJE PASIVNE KUĆE TIJEKOM LJETNIH MJESECI</b> .....	41
<b>4.1. Odabir gradova</b> .....	41
<b>4.1.2. Oslo</b> .....	43
<b>4.1.3. Houston</b> .....	44
<b>4.1.4. Dubai</b> .....	45
<b>4.1.5. Ponta Delgada</b> .....	46
<b>4.2. Podaci o objektu</b> .....	47
<b>4.3. Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje</b> .....	49
<b>4.4. Ukupni toplinski dobici za promatrani proračunski period</b> .....	50
<b>4.5. Izmijenjena toplinska energija proračunske zone za promatrani period</b> .....	57
<b>4.5.1. Transmisijom</b> .....	57
<b>4.5.2. Ventilacijom</b> .....	65
<b>4.6. Izmijenjena toplinska energija proračunske zone za promatrani period</b> .....	67
<b>4.7. Izračun mjesečnih vrijednosti toplinske energije za hlađenje</b> .....	68
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	70
<b>LITERATURA</b> .....	72

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Ilustrativni prikaz osnovnih principa pasivne kuće [3] .....	4
Slika 2. Termografska snimka toplinskog zračenja [5] .....	5
Slika 3. Usporedba efikasnosti tipova prozora [7] .....	6
Slika 4. Smještaj rekuperatora sa osnovnim dijelovima [8].....	7
Slika 5. Toplinski tok spoja poda sa zidom [9] .....	8
Slika 6. Termografska snimka brave [9] .....	9
Slika 7. Geometrijski oblik i faktor oblika [10] .....	10
Slika 8. Različiti tipovi građevina i faktor oblika [11].....	11
Slika 9. Ilustrativni prikaz utjecaja strehe [12] .....	11
Slika 10. Postavljanje zelenila (prema [13]) .....	12
Slika 11. Izmjenjivači topline zemlja – zrak [14].....	13
Slika 12. Shematski prikaz cirkuliranja zraka sa solarnim izmjenjivačem topline (prema [16]) .....	14
Slika 13. Postavljanje izolacije ispod podne ploče [9].....	17
Slika 14. Detalji različitih tipova krovnih konstrukcija [9].....	18
Slika 15. Budući izgled prve certificirane pasivne kuće u Hrvatskoj [19].....	20
Slika 16. Prikaz energetske potrošnje nisko energetske i pasivne kuće [20] .....	21
Slika 17. Utjecaj drvene i AB zgrade na emisiju ugljika (prema [21]) .....	22
Slika 18. Troškovi različitih tipova zgrada [1] .....	23
Slika 19. Prikaz rezultata u PHPP softveru [24] .....	24
Slika 20. Koppen-Geiber klasifikacija [26].....	25
Slika 21. Klimatska klasifikacija za pasivne kuće [27].....	26
Slika 22. Prikaz klimatskih podataka za Hudson [27] .....	27
Slika 23. Obiteljska kuća u Hudsonu [27].....	28
Slika 24. Tlocrt prizemlja obiteljske kuće u Hudsonu [27].....	28
Slika 25. Potrošnja energije zimi i ukupna potrošnja energije [27] .....	29
Slika 26. Prikaz klimatskih podataka za Darmstadt [27] .....	29
Slika 27. Pasivna zgrada u Darmstadtu [27] .....	30
Slika 28. Tlocrt i presjek zgrade u Darmstadtu [27] .....	31
Slika 29. Prikaz klimatskih podataka za Zhuozhou [27].....	32
Slika 30. Pasivna zgrada u Zhuozhou [27].....	33
Slika 31. Temperatura i relativna vlažnost zraka u zgradi [27].....	33

---

Slika 32. Rezultati energetskog praćenja [27].....	34
Slika 33. Prikaz klimatskih podataka za Atenu [27] .....	35
Slika 34. Obiteljska kuća u Ateni [27] .....	36
Slika 35. Lokacija klimatskog uređaja na tlocrtu [27] .....	36
Slika 36. Prikaz klimatskih podataka za Dubai [27] .....	37
Slika 37. Pasivna kuća u Dubaiu sa tlocrtnom i presjekom [27].....	38
Slika 38. Prikaz količine ugljičnog dioksida u godišnjem periodu [27] .....	39
Slika 39. Prikaz odabranih gradova preko Meteonorma sa geografskim podacima (Autor: Ivan Čule).....	41
Slika 40. Makro i mikro lokacija grada Rijeke (Autor: Ivan Čule).....	42
Slika 41. Makro i mikro lokacija Osla (Autor: Ivan Čule).....	43
Slika 42. Makro i mikro lokacija grada Houstona (Autor: Ivan Čule).....	44
Slika 43. Makro i mikro lokacija Dubaija (Autor: Ivan Čule) .....	45
Slika 44. Makro i mikro lokacija Ponta Delgade (Autor: Ivan Čule) .....	46
Slika 45. Tlocrt i presjek pasivne kuće (prema [28]) .....	48
Slika 46. Virtualne reprezentacije koeficijenata Fhor, Fov i Ffin [29].....	52
Slika 47. Prosječna mjesečna potrošnja energije.....	69

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Prednosti i nedostaci zidnih konstrukcija (Autor: Ivan Čule) .....	16
Tablica 2. Preporuka za svojstva građevinskih elemenata (prema [27]) .....	39
Tablica 3. Temperaturni čimbenici u različitim klimatskim zonama (Autor: Ivan Čule) .....	40
Tablica 4. Ukupna energetska učinkovitost pasivnih zgrada (Autor: Ivan Čule).....	40
Tablica 5. Klimatski podaci za Rijeku.....	42
Tablica 6. Klimatski podaci za Oslo.....	43
Tablica 7. Klimatski podaci za Houston.....	44
Tablica 8. Klimatski podaci za Dubai .....	45
Tablica 9. Klimatski podaci za Ponta Delgada.....	46
Tablica 10. Rezultati faktora zasjenjenja.....	52
Tablica 11. Srednji toplinski tok od sunčeva zračenja za grijani dio .....	53
Tablica 12. Srednji toplinski tok od sunčeva zračenja za ne grijani dio .....	53
Tablica 13. Rezultati toplinskog toka zračenjem prema nebu.....	56
Tablica 14. Rezultati toplinskih dobitaka od sunčevog zračenja.....	56
Tablica 15. Rezultati ukupnih toplinskih dobitaka .....	56
Tablica 16. Koeficijent transmisije izmjene topline prema vanjskom okolišu.....	58
Tablica 17. Koeficijenti transmisije izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša te grijanog i negrijanog prostora.....	59
Tablica 18. Koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša .....	60
Tablica 19. Koeficijent transmisije izmjene topline kroz negrijani prostora prema vanjskom okolišu .....	60
Tablica 20. Prikaz toplinskog otpora konstrukcije .....	63
Tablica 21. Rezultat toplinskog toka prema tlu.....	63
Tablica 22. Koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu .....	64
Tablica 23. Koeficijent transmisije izmjene topline proračunske zone .....	64
Tablica 24. Izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu.....	64
Tablica 25. Potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka .....	66
Tablica 26. Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije kod hlađenja zraka.....	67
Tablica 27. Koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone .....	67

---

Tablica 28. Potrebna toplinska energija za ventilaciju proračunske zone .....	67
Tablica 29. Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje .....	68
Tablica 30. Potrebna toplinska energija za hlađenje .....	69

**POPIS OZNAKA**

HRN EN ISO 13790 - Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade

$n_{50}$  - razlika tlakova između vanjskog i unutarnjeg zraka od 50 Pa ( $\text{h}^{-1}$ )

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

$\Psi$  - koeficijent toplinskog mosta ( $\text{W}/\text{mK}$ )

$G_h$  - globalna horizontalna iradijacija ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

$D_h$  - difuzna horizontalna iradijacija ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

$B_n$  - direktna normalna iradijacija ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

$T_a$  - temperatura zraka ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_d$  - temperatura rosišta ( $^{\circ}\text{C}$ )

$FF$  - brzina vjetra ( $\text{m}/\text{s}$ )

$Q_{C,nd}$  - potrebna toplinska energija za hlađenje ( $\text{kWh}$ )

$Q_{C,gn}$  - ukupni toplinski dobiti zgrade u periodu hlađenja: ljudi, rasvjeta, uređaji, solarni dobiti ( $\text{kWh}$ )

$Q_{C,ht}$  - ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu hlađenja ( $\text{kWh}$ )

$\eta_{C,ls}$  - faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja (-)

$Q_{int}$  - unutarnji toplinski dobiti zgrade: ljudi, rasvjeta i uređaji ( $\text{kWh}$ )

$Q_{sol}$  - toplinski dobiti od Sunčeva zračenja ( $\text{kWh}$ )

$Q_{Tr}$  - izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu ( $\text{kWh}$ )

$Q_{Ve}$  - potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu ( $\text{kWh}$ )

$q_{spec}$  - specifični unutarnji dobitak po  $\text{m}^2$  korisne površine ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$A_f$  - neto podna površina grijanog dijela zgrade ( $\text{m}^2$ )

$t$  - trajanje proračunskog razdoblja (h)

$\Phi_{sol,mn,k}$  - srednji toplinski tok od sunčeva izvora kroz k-ti građevni dio u grijani prostor (W)

$\Phi_{sol,mn,u,l}$  - srednji toplinski tok od sunčeva izvora kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor (W)

$b_{tr,l}$  - faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom l prema HRN EN ISO 13789 (-)

$F_{sh,ob}$  - faktor zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja (-)

$I_{S,k}$  - srednji toplinski tok od sunčevog zračenja na površinu građevnog dijela  $k$  za mjesečni proračun ( $W/m^2$ )

$A_{sol}$  - efektivna površina na koju upada sunčevo zračenje ( $m^2$ )

$F_r$  - faktor oblika između elementa i neba (-)

$\Phi_r$  - toplinski tok zračenjem od površine prema nebu (W)

$F_{hor}$  - parcijalni faktor zasjenjenja zbog konfiguracije terena u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu horizonta i zemljopisnoj širini (-)

$F_{ov}$  - parcijalni faktor zasjenjenja zbog gornjih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu gornjeg zasjenjenja  $\alpha$ , zemljopisnoj širini (-)

$F_{fin}$  - parcijalni faktor zasjenjenja zbog bočnih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu bočnog prozorskog zasjenjenja  $\beta$ , zemljopisnoj širini (-)

$F_F$  - udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora (-)

$g_{gl+sh}$  - ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente s uključenom posmičnom zaštitom (-)

$A_{pr}$  - ukupna površina prozora ( $m^2$ )

$F_c$  - faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja (-)

$F_w$  - faktor smanjenja zbog ne okomitog upada sunčevog zračenja (-)

$q_{\perp}$  - stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje kada pomično zasjenjenje nije uključeno (-)

$R_{se}$  - plošni toplinski otpor vanjske površine zida/krova ( $(m^2K)/W$ )

$A_c$  - projicirana površina zida ( $m^2$ )

$h_r$  - vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem ( $W/(m^2K)$ )

$\Delta\Phi_{er}$  - prosječna temperaturna razlika vanjske temperature zraka i temperature neba (K)

$H_{Tr}$  - koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone (W/K)

$\Phi_{int,C}$  - unutarnja proračunska temperatura hladene zone ( $^{\circ}C$ )

$\Phi_e$  - srednja vanjska temperatura za proračunski period ( $^{\circ}C$ )

$H_D$  - koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu (W/K)

- $H_U$  - koeficijent transmisivne izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu (W/K)
- $H_{g,m}$  - koeficijent transmisivne izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec (W/K)
- $H_A$  - koeficijent transmisivne izmjene topline prema susjednoj zgradi (W/K)
- $A_k$  - površina građevinskog elementa (m<sup>2</sup>)
- $U_k$  - koeficijent prolaska topline pojedinog građevinskog elementa (W/(m<sup>2</sup>K))
- $\Delta U_{TM}$  - dodatak za pasivne kuće (W/(m<sup>2</sup>K))
- $b_u$  - faktor smanjenja temperaturne razlike (-)
- $H_{iu}$  - koeficijent transmisivne i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)
- $H_{Tr,iu}$  - koeficijent transmisivne izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)
- $H_{Ve,iu}$  - koeficijent ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)
- $H_{Tr,ue}$  - koeficijent transmisivne izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (W/K)
- $H_{Ve,ue}$  - koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (W/K)
- $\rho_a$  - gustoća zraka (kg/m<sup>3</sup>)
- $c_{p,a}$  - specifični toplinski koeficijent zraka (J/(kgK))
- $\tilde{V}_{ue}$  - volumni protok zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (m<sup>3</sup>/h)
- $V_{ue}$  - volumen zraka negrijanog prostora (m<sup>3</sup>)
- $n_{ue}$  - broj izmjena zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (h<sup>-1</sup>)
- $\Phi_m$  - toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec (W)
- $\vartheta_{int,m}$  - unutarnja postavna temperatura za proračunski mjesec (°C)
- $\vartheta_{e,m}$  - srednja vanjska temperatura za proračunski mjesec (°C)
- $H_g$  - stacionarni koeficijent transmisivne izmjene topline prema tlu (W/K)
- $H_{pi}$  - unutarnji periodički koeficijent transmisivne izmjene topline (W/K)
- $H_{pe}$  - vanjski periodički koeficijent transmisivne izmjene topline (W/K)
- $\vartheta_{int}$  - srednja unutarnja temperatura za proračunski period (°C)
- $A$  - površina poda (m<sup>2</sup>)



$P$  - izloženi opseg poda (m)

$\psi_g$  - duljinski koeficijent prolaska topline za spoj zida i poda (W/mK)

$\lambda$  - koeficijent toplinske provodljivosti tla (W/(m K))

$d_t$  - ekvivalentna debljina poda (m)

$\delta$  - periodička dubina prodiranja (m)

$P$  - izloženi opseg poda (m)

$\omega$  - ukupna debljina zida (m)

$R_{si}$  - plošni unutarnji toplinski otpor (m<sup>2</sup>K)/W

$R_f$  - toplinski otpor podne konstrukcije (m<sup>2</sup>K/W)

$H_{ve}$  - koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone (W/K)

$H_{ve,inf}$  - potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka (W/K)

$H_{ve,win}$  - koeficijent ventilacijske izmjene uslijed otvaranja prozora (W/K)

$H_{C,ve,mech}$  - koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije kod hlađenja zraka (W/K)

$n_{inf}$  - broj izmjena zraka uslijed infiltracije (h<sup>-1</sup>)

$V_{vent}$  – volumen zraka koji se ventilira u zoni (m<sup>3</sup>/h)

$\eta_{rek}$  – učinkovitost rekuperatora (-)

$y_C$  - omjer toplinskih dobitaka i ukupne izmjenjenje topline transmisijom i ventilacijom u režimu hlađenja (-)

$a_C$  - bezdimenzijski parametar ovisan o vremenskoj konstanti zgrade (-)

$\tau$  - vremenska konstanta zgrade (h)

$\tau_{C,o}$  - referentna konstanta zgrade za hlađenje (h)

## 1. UVOD

Cilj ovog diplomskog rada je modelirati potrošnju energije kuće koja je izgrađena prema pasivnom standardu u hladnoj klimatskoj zoni za ostale klimatske zone. Rezultati modeliranja ovog rada trebaju pokazati može li se primjena oblika gradnje pasivnih kuća jedne klimatske zone primjenjivati i u ostalim ne srodnim klimatskim zonama ili su potrebne dodatne građevinske preinake.

Suočeni sa sve većim globalnim izazovima kao što su klimatske promjene i povećana potrošnja energije, građevinski sektor mora tražiti rješenja koja mogu omogućiti održivu gradnju. Pasivne kuće predstavljaju jedan od najnaprednijih pristupa u toj vrsti gradnji. Njegov dizajn i izvedba je usmjerena na smanjenu potrošnje energije za grijanje i hlađenje, te na stvaranje udobnosti i zdravog životnog okruženja. Koncepti prvih pasivnih kuća nastali su u Sjedinjenim Američkim Državama i Kanadi dok su kasnih 1980-ih u Njemačkoj doživjele značajnu nadogradnju. Desetljeće kasnije koncept pasivnih kuća je prepoznat kao specifičan standard te nastaju prvi projekti i certifikacije. Visoki stupanj toplinske izolacija i energetski učinkovitim prozorima (dvoslojnim ili češće troslojnim) dobivaju se stabilnije unutarnje temperature. Sa kontroliranom ventilacijom koja štedi energiju, ali i poboljšava kvalitetu zraka unutar prostora doprinosi se zdravijem životnom okruženju. Osim toplinske izolacije, prozora i ventilacije s povratom topline bitan nam je dizajn zgrade, orijentacija i krajolik. Odabirom povoljnijeg geometrijskog oblika znatno se smanjuju transmisijski gubici pri čemu dolazi do uštede energije. Orijentacija pasivne kuće je ključna kako bi se maksimalno iskoristila solarna energije, pri čemu bi se omogućilo pasivno grijanje u zimskim te zasjenjenje u ljetnim mjesecima. Sa svim navedenim stavkama postiže se više od 75% uštede u usporedbi s prosječnom novogradnjom, te do 90% s tradicionalnom izgradnjom.

Klimatska klasifikacija predstavlja sustav koji kategorizira različite klimatske uvjete u svijetu na osnovu meteoroloških podataka. Postoji više tih sustava, no za pasivnu gradnju posebno su razvijeni specifični klimatski standardi. Značajni podaci su oborine, temperatura, vlažnost zraka, jačina vjetera, solarna iradijacija i mnogi drugi. Ovaj sustav nam pruža nužne informacije za prilagodbu građevinskih tehnika i materijala pri izgradnji građevinskih objekata kako bi se postigla optimalna udobnost i energetska učinkovitost. Prilikom prilagodbe dizajna mogu se maksimalno iskoristiti prednosti te umanjiti nedostaci klimatskih uvjeta. Objekti izgrađeni u hladnim klimama trebaju imati snažnu izolaciju i dizajn koji će maksimalizirati solarne dobitke,

dok kuće u toplijim klimama trebaju biti osmišljene na način da se zaštite od prekomjerne topline pomoću reflektivnih materijala ili zasjenjenja.

Modeliranje potrošene energije za pasivne kuće u više klimatskih zona je provedeno u skladu s normom HRN EN ISO 13790 te je detaljan postupak objašnjen u nastavku ovog rada. Norma HRN EN ISO 13790 služi za energetska svojstva zgrade, tj. izračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora. Proračun rada je proveden u Microsoft Excelu dok su dobiveni klimatski podaci prikupljeni pomoću programa Meteonorm. Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće uzeti su gradovi iz hladne klimatske zone (Oslo), umjereno tople (Rijeka i Ponta Delgada), tople (Houston) i vruće (Dubai). Kako se modelirala pasivna kuća koja je izgrađena u hladnoj klimatskoj zoni odabran je grad iz tog područja kako bi provjerila točnost proračuna prema HRN EN ISO 13790. Uzeta su dva grada iz iste klimatske zone u svrhu moguće razlike u potrošnji energije.

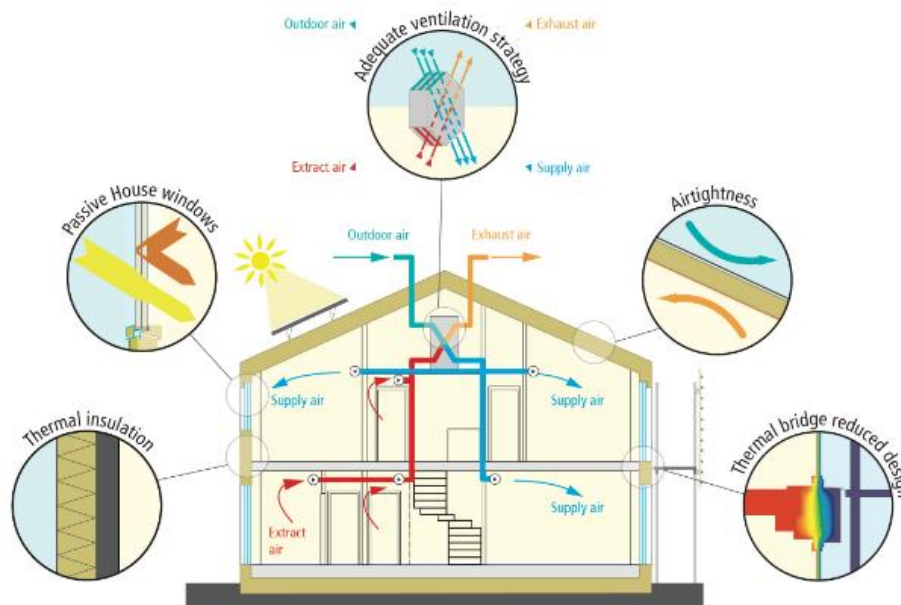
## 2. PASIVNE KUĆE

Pasivna kuća je vrsta energetske učinkovite zgrade u kojoj se postiže udobni i zdravi uvjeti stanovanja uz nisku potrošnju energije i minimalnom emisijom ugljika. Metode pasivne kuće uspješno su primijenjene u europskim klimama, Sjedinjenim Američkim Državama, Kanadi te u toplijim azijskim klimama. Uz određene varijacije dizajnerskih tehnika metoda se može primjenjivati gotovo u svim klimatskim zonama [1].

### 2.1. Principi

Osnovni koncept pasivne zgrade nastao je kao odgovor na potrebu kombiniranja energetske učinkovitosti, uštede prirodnih resursa, visoke kvalitete prirodnog zraka i optimalne toplinske udobnosti. Kako bi se postigla najkvalitetnija energetska učinkovita gradnja s vrlo niskom potražnjom za dodatnim grijanjem ili hlađenjem potrebno se pridržavati pet osnovnih principa. U osnovne principe spadaju toplinska izolacija, prozori, ventilacija s povratom topline, zrakonepropusnost zgrade i izostanak toplinskih mostova [2].

Na Slici 1. možemo vidjeti ilustrativni prikaz osnovnih principa pasivne kuće. Svi neprozirni vanjski građevinski elementi moraju biti dobro izolirani da koeficijent prijenosa topline bude maksimalno  $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Prozorski okviri trebaju biti dobro izolirani i opremljeni staklom s niskom emisijom (argon ili kripton) sa ukupnom prijenosom topline manjim od  $0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ventilacija s povratom topline (rekuperator) mora omogućavati dobru kvalitetu unutarnjeg zraka, a da pritom štedi energiju. Za pasivnu kuću najmanje 75% topline izlaznog zraka mora se prenositi na svjež zrak pomoću izmjenjivača topline. Zrakonepropusnost zgrade mora biti manje od 0,6 ukupnog volumena zgrade po satu tijekom testiranja tlaka pri 50 Pascala ( $n50 < 0,6\text{h}^{-1}$ ). Prilikom gradnje trebaju se izbjeći toplinski mostovi pažljivim planiranjem i izvedbom kutova, rubova, spojeva i proboja, ako se ne mogu izbjeći potrebno ih je minimalizirati [2].

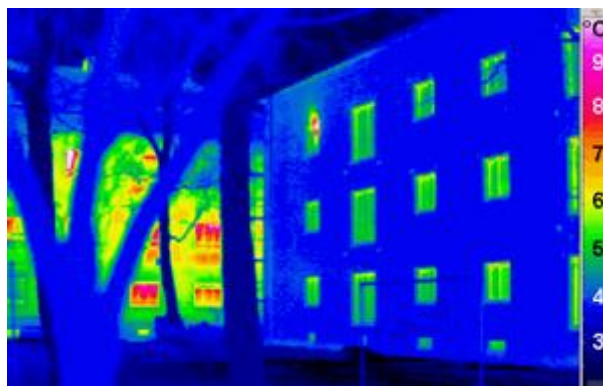


Slika 1. Ilustrativni prikaz osnovnih principa pasivne kuće [3]

### 2.1.1. Toplinska izolacija

Prilikom izvedbe toplinske izolacije potrebno je postići dizajn bez toplinskih mostova. Toplinski most predstavlja područje u omotaču u kojem je toplinski tok povećan radi promjene materijala, njegove debljine i/ili geometrije. Kod novijih zgrada postiže se s par jednostavnih detalja koji ne uključuju velike troškove u fazi planiranja, dok kod starijih zgrada i nakon dodataka komponenta pasivnih kuća mogu ostati i dalje veliki toplinski mostovi. Pažljiva briga o njima može biti ključno za postizanje Passivhaus standarda. Pri gradnji temelja koriste se temeljna ploča koji se najčešće koristi kod pasivne gradnje kako bi se riješili svi toplinski mostovi ispod zgrade i sa strane temelja. Kod gradnje zidova važno je postići što manji koeficijent toplinske provodljivosti. Koeficijent je idealan kada mu je vrijednost oko  $0.11 \text{ W/m}^2\text{K}$  jer postizanjem niže vrijednosti ne dostiže se veći efekt. Poželjno je ne mijenjati vrstu gradnje (upotreba različitih materijala, termodinamičkih svojstava i gustoće) kako bi struktura objekta imala iste termodinamičke vrijednosti u svakoj točki što sprječava mogućnost kondenzacije. Za stropnu konstrukciju odlično je rješenje koristiti Ytong stropnu konstrukciju zbog svoje male težine, statičke čvrstoće, brze montaže i odličnih izolacijskih svojstava. Nakon formiranja strop postaje dio cijele konstrukcije objekta te se ne pojavljuju toplinski mostovi [4].

Slika 2. prikazuje termografski snimak toplinskog zračenja pasivne kuće (desno) i konvencionalne kuće (lijevo). Može se primijetiti kako pasivna kuća preko svog vanjskog omotača gubi puno manje energije od obične kuće [5].



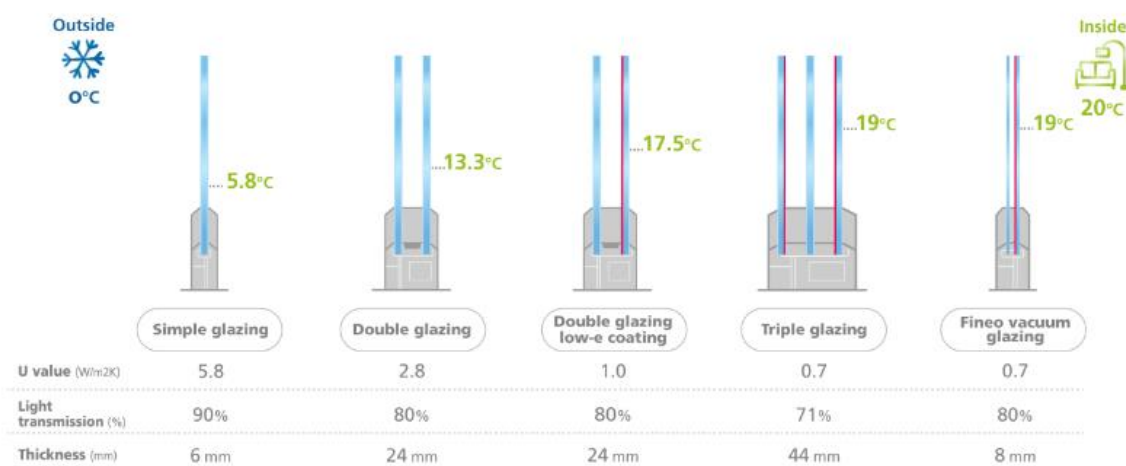
Slika 2. Termografska snimka toplinskog zračenja [5]

### 2.1.2. Građevinski otvori

Građevinski otvori trebaju biti dobro izolirani na način da im ukupni prijenos topline bude manji od  $0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Pri odabiru stakla za prozore postoji mogućnost odabira višeslojnih stakla (dvoslojni, troslojna stakla) s obzirom da se jednoslojna više ne koriste. Vrsta stakla ne utječe samo na izgled već i na termičke i tehničke karakteristike zgrade. Izolacija ovisi od materijala, veličine i broju komora, broju stakala, tipu plina koji ispunjava komoru i o dodatnim premazima po staklenim površinama. Veći sloj komora kod prozora više štiti od stakla koje ima jednu komoru, također dodatna izolacija se postiže plemenitim plinovima poput argona ili kriptonu. Dvoslojni prozori imaju slabije karakteristike od troslojnih no koriste se u skoro 90% objekata u Europi. Glavni razlog tome je cijena no unatoč tome u posljednje vrijeme uslijed klimatskih promjena i porasta temperature sve je veća potražnja za troslojnim prozorima. Dvoslojni prozori se sastoje od dva staklena panela, dok se između njih može nalaziti zrak, vakuum ili neki plemeniti plin. Najčešće oznaka dvoslojnog stakla je  $4 + 16 + 4$  gdje brojka 4 označava debljinu stakla od 4 mm dok brojka 16 prostor koji je između njih u mm. Debljina može varirati od 6 do 24 mm, ali su najbolji rezultati kad je prostor između 12 do 16 mm. Dodatak metalnog oksida utječe na termo-izolacijska svojstva prozora. Stakla koja ga sadrže u tankom sloju premaza nazivaju se i nisko-emisijska stakla (LOW – E stakla). S vanjske strane sprječava propuštanje UV (ultraljubičastih) zraka u prostoriju, dok s unutarnje reflektira infracrveno, tj. vraća zračenje nazad u prostoriju. Smanjuje se gubitak topline u odnosu na jednoslojno staklo za čak 70%.

Troslojni prozori u odnosu na dvoslojni se razlikuju jer imaju jednu komoru više i jedan stakleni panel više te se preporučuju za ekstremne vremenske uvjete. Imaju i odličnu zvučnu izolaciju kao i veća strukturna čvrstoća te su otporniji na kondenzaciju. Zbog boljeg odbijanja sunčevih zraka i sprječavanje protoka topline smanjuje se gubitak u odnosu na jednoslojno staklo za čak 90% [6].

Slika 3. nam prikazuje usporedbu jednoslojnih, dvoslojnih i troslojnih stakala sa njihovim debljinama. Pokazuje nam učinkovitost tih stakala kod koeficijenta prijenosa topline te možemo primijetiti kako je troslojno staklo zajedno sa jednoslojnom vakumiranim u ovom slučaju jedino prihvatljivo za pasivni standard (U vrijednost je manja od  $0.80 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) [7].



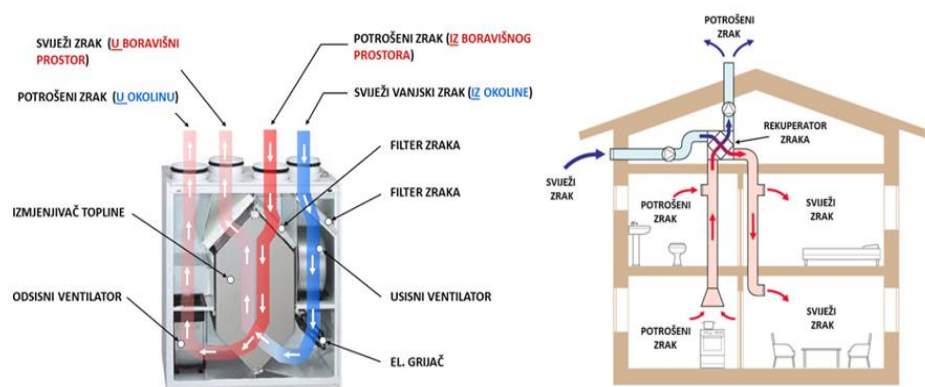
Slika 3. Usporedba efikasnosti tipova prozora [7]

### 2.1.3. Ventilacija s povratom topline – rekuperator

Može se smatrati i higijenskom ventilacijom zbog osiguravanja svježeg zraka za stambene i nestambene objekte. Posebno koristi zimi zbog izbjegavanja hladnih propuha, rasta plijesni i kondenzacije. Unatoč dobro podešenoj ventilaciji s povratom topline može se uštediti do 90% topline iz ustajalog zraka kojeg se izvlači iz kuhinja i kupaonica, dok se povratna topline dovodi u spavaće sobe i dnevni boravak. Ne koristeći takav jednostavan koncept obične zgrade gube jako puno energije te im je potrošnja veća. Oprema se sastoji od električno pogonjenih, malih dimenzija energetsko učinkovitih ventilatora koji provode ventilacijski zrak kroz filtre i pasivni izmjenjivač topline takvom brzinom da bi se dobila kvaliteta unutarnjeg zraka i učinkoviti povrat topline. Kod kućanstva se koristi samo 35 W snage što je dovoljno da se tijekom godine

uštedi deset puta više energije nego što se iskoristi. Za razliku od stambenih objekata, kod nestambenih ventilatori ne rade 24 sata dnevno već se podešavaju unutar radnog vremena. Sustavi ventilacije s povratom topline poboljšavaju kvalitetu unutarnjeg zraka u urbanim područjima. Lebdeće čestice se smatraju kao uzrok srčanih udara, astme i moždanih udara, a u studiji koji je proveo Institut za okoliš i zdravlje na Sveučilištu Cranfield (2013.) gdje se uspoređivala pasivna kuća sa konvencionalnom utvrđeno je da je upola manje PM 2.5 čestica (partikularnih materija promjera manjeg od 2,5 mikrometra) kod pasivne kuće. Dok se zimi uštedi do 90% otpadne topline, ljeti se može koristiti automatski zaobilazni sustav, a korisni zgrade mogu slobodno otvarati prozore kao i u običnim zgradama [1].

Slika 4. prikazuje smještaj rekuperatora sa dovodnim i odvodnim cijevima (desno) i njegove osnovne dijelove (lijevo) [8].



Slika 4. Smještaj rekuperatora sa osnovnim dijelovima [8]

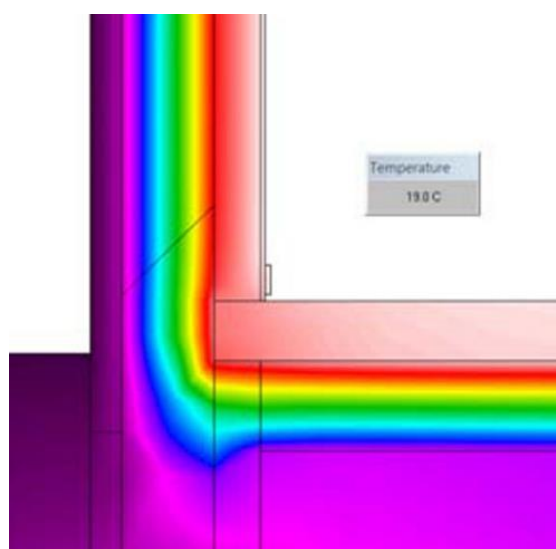
#### 2.1.4. Minimalizacija toplinskih mostova

Zgrade koje ispunjavaju standard pasivne kuće spojevi i sučelja zahtijevaju posebnu pažnju jer na tim točkama u građevinskoj strukturi može doći do gubitka topline kroz toplinske mostove. Niske površinske temperature mogu dovesti do kondenzacije i rast plijesni, ako se toplinski mostovi ne riješe može doći do gubitka topline kroz konstrukciju za više od 30%. Moguće ih je izračunati koristeći vanjske ili unutarnje dimenzije. Unutarnje dimenzije dovode do podcjenjivanja gubitka topline zbog čega se koriste vanjske dimenzije, te dvije različite veličine se ne bi trebale kombinirati. Postoje tri vrste toplinskih mostova, a to su ponovljeni toplinski most, linearni toplinski most Y-vrijednosti i čvorni toplinski most X-vrijednosti. Ponovljeni su tipovi mostova koji se javljaju na standardiziranim mjestima u građevinskoj konstrukciji kao



što su spoj zida i stropa. Linearni nastaju na spojevima dva građevinska elementa dok čvorni na spojevima tri građevinska elementa. Pod standardom pasivne kuće se smatra kada je detalj slobodan od termalnih mostova kada je  $\psi$  vrijednost manja od 0,01 W/mK. Za minimalizaciju toplinskih mostova može se poduzeti više mjera kao što je smanjenje složenosti kako bi se smanjila mogućnost pogreške, spojevi između elemenata i izolacijski slojevi trebaju se spojiti bez ikakvih praznina. Izolacijski slojevi trebaju se spajati bez prekida, rubovi i kutovi trebali bi biti što više tupi te se tijekom dizajnerskog procesa treba osigurati da se razvijaju jednostavni detalji s odgovarajućim tolerancijama gradnje [9].

Slika 5. prikazuje toplinski tok kod spoja poda sa zidom u PHPP (Passive House Planning Package) softveru [9].



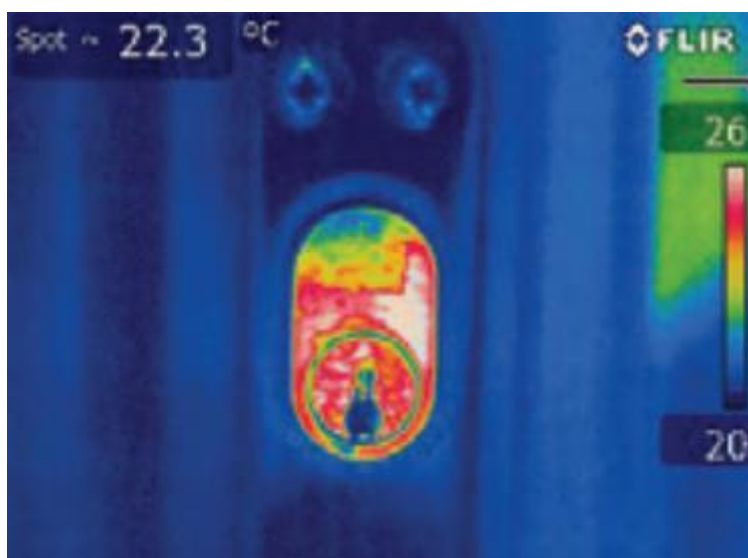
Slika 5. Toplinski tok spoja poda sa zidom [9]

### ***2.1.5. Zrakonepropusnost zgrade***

Zrakonepropusnost se često čini kao najteži element za postizanje kriterija pasivne kuće, no kada se uspostavi čvrsti dizajn nepropusnost pažnja se okreće na detalje. Pri razlici tlakova od 50 Pa broj izmjena zraka u prostoru ne smije prijeći vrijednost od  $0,6\text{h}^{-1}$  ( $n_{50} < 0,6\text{h}^{-1}$ ) za nove zgrade, a za projekte obnove  $1,0\text{h}^{-1}$  ( $n_{50} < 1,0\text{h}^{-1}$ ). Pri izvođenju testa nepropusnosti uspostavlja se stalno stanje tako da izbacujemo zrak iz zgrade ventilatorom dok se on ne uravnoteži sa zrakom koji ulazi u zgradu kroz pukotine, šupljine i otvore. Testira se pri tlaku od 50 Pa s minimalno sedam očitavanja. Prilikom istraživanja curenja nakon nezadovoljavajućeg početnog

testa može se koristiti kemijski dim, teleskopski anemometri i termografske kamere. Moguće je i postavljanje kvadratnog metra polietilena na površinu za koju se sumnja da curi. Ako se pri snižavanju tlaka membrana izboči prema unutra to znači da postoji curenje. Veliki izvor takvih puštanja možemo pronaći na bravama kod vrata. Za postizanje pasivnih strategija poželjno bi bilo navesti proizvođače brtvenih traka i membrana za nepropusnost kao i popis proboja i način njihovih brtvljenja. Na taj način osiguravamo identificiranje i ispravljanje potencijalnih izvora propuha prije završetka radova [9].

Slika 6. prikazuje termografsku snimku brave kod vrata koja propušta. Može se primijetiti da je ključanica znatno hladnija od susjedne metalne brave [9].



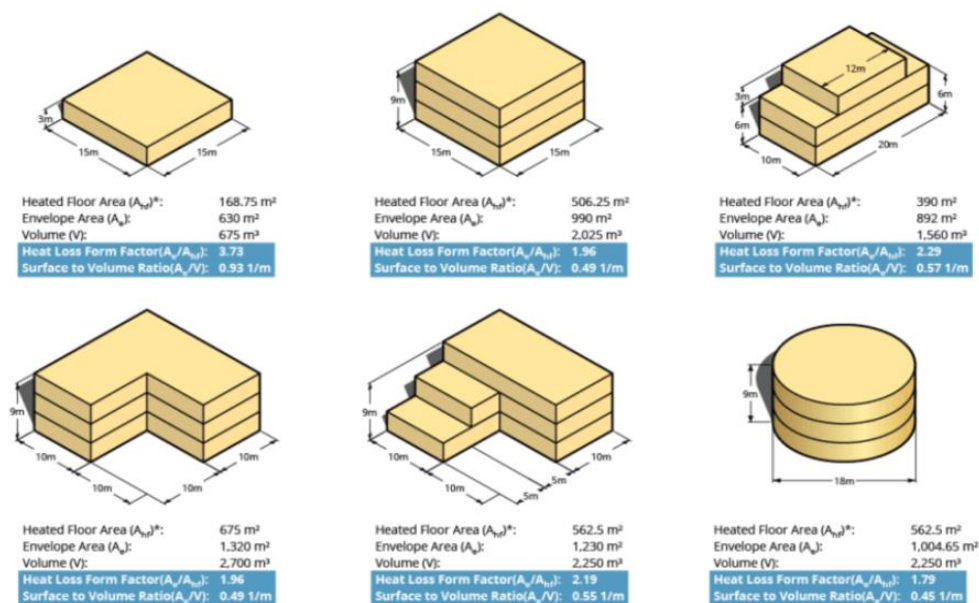
Slika 6. Termografska snimka brave [9]

## 2.2. Današnja gradnja

### 2.2.1. Oblik zgrade i orijentacija

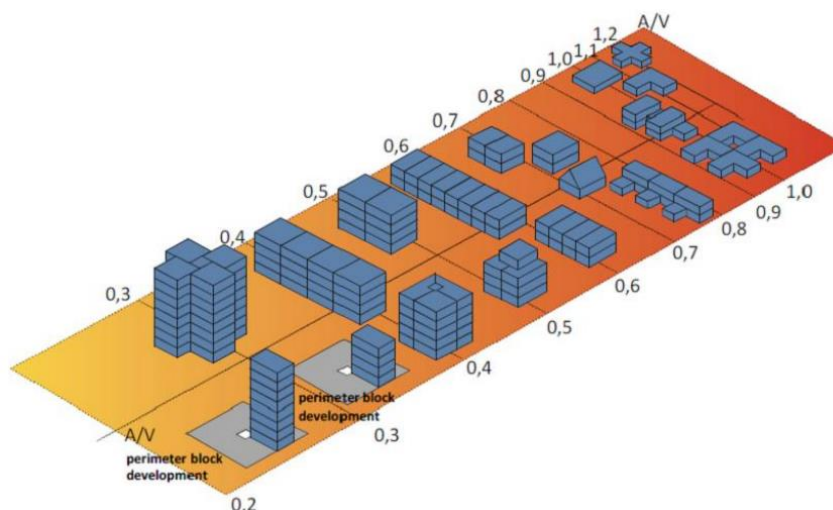
Oblik zgrade je bitan jer utječe na energetske učinkovitost zgrade. Toplina postupno prolazi kroz ovojnici zgrade, a što je veća vanjska površina to će više topline izlaziti. Kompaktnija zgrada lakše ispunjava energetske učinkovitost zgrada. Geometrijski oblici poput kugle, valjka, kocke i kvadra imaju puno bolji faktor oblika od plosnatog kvadra, L – oblika i U – oblika. L – oblik ima dodatan problem zbog bacanja sjenke na jedan dio zgrade, dok je U – oblik potpuno neprikladan za izgradnju pasivnih kuća.

Slika 7. nam prikazuje razne geometrijske oblike sa ulaznim podacima. Ulazni podaci su površina ovojnice zgrade, neto podna površina i volumen zgrade. Za izračun faktora oblika gubitka topline potrebno je podijeliti površina ovojnice zgrade sa neto podnom površinom. Rezultati se općenito kreću između 0,5 i 5, pri čemu niži broj predstavlja kompaktniju zgradu. Pasivne kuće ciljaju postići brojku manju od 3. Drugi način za izračun faktora oblika zgrade je omjer površine ovojnice zgrade i volumena. Njihov omjer za tipičnu obiteljsku kuću iznosi između 0,7 – 1,0 dok pasivne kuće bi trebale imati vrijednost manju od 0,8 [10].



Slika 7. Geometrijski oblik i faktor oblika [10]

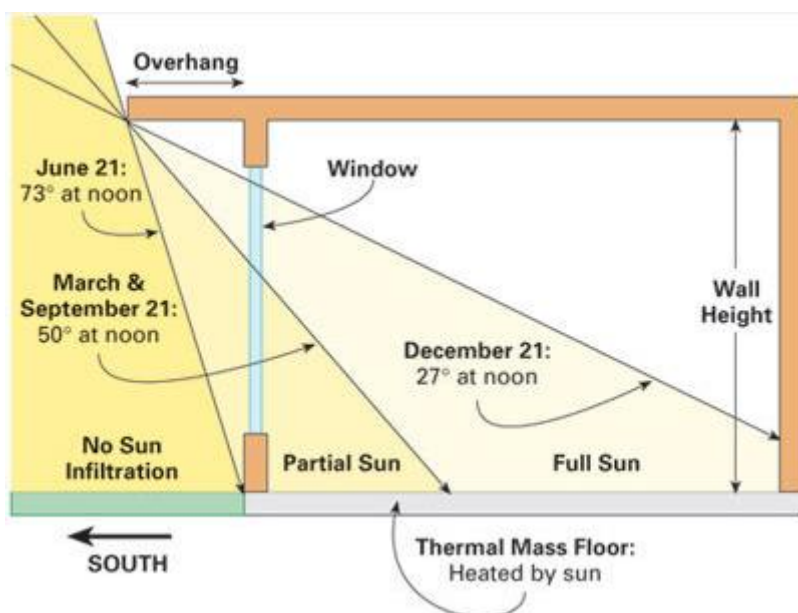
Slika 8. nam prikazuje omjere površine ovojnice zgrade i volumena različitih oblika zgrada. Može se primijetiti da veće zgrade za razliku od samostojećih kuća lakše postižu tražene rezultate [11].



Slika 8. Različiti tipovi građevina i faktor oblika [11]

Streha je bitan dio kod gradnje pasivne kuće. Treba je pažljivo dizajnirati kako bi tijekom ljetnih mjeseci prozori koji gledaju prema jugu bili potpuno zasjenjeni zbog sprječavanja pregrijavanja. Tijekom zimskih mjeseci sunčevo svjetlo mora dopirati do prozora kako bi se dobila potrebna toplina i svjetlina [12].

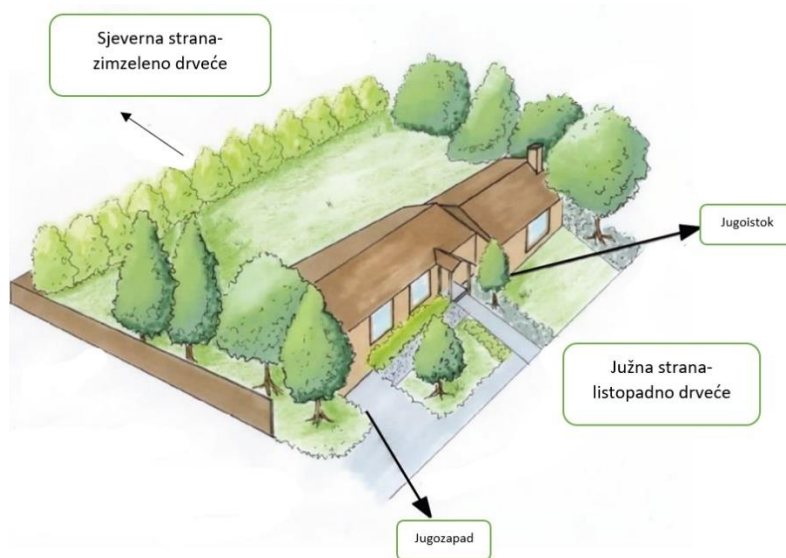
Slika 9. prikazuje primjer dizajna kuće smještene na 40° sjeverne geografske širine koja je okrenuta prema jugu. Može se primijetiti kako streha doprinosi tijekom ljetnih i zimskih mjeseci [12].



Slika 9. Ilustrativni prikaz utjecaja strehe [12]

Utjecaj krajolika može doprinijeti hlađenju ljeti te grijanju zimi. Dobro uređenim krajolikom može se uštedjeti velika količina energije. Položaj sunca ne utječe isto na sve orijentacije kuće. Istočna strana dobiva izravno jutarnje sunce, dok će poslijepodne biti zasjenjena sjenom same zgrade. Zapadna strana će ujutro biti zasjenjena, a popodne biti izložena poslijepodnevnom suncu. Južna strana je najvažnija za solarni dizajn pošto prima najviše sunčeve svjetlosti tijekom dana dok je sjeverna strana kuće gotovo uvijek u hladu. Stoga se na južnu stranu postavljaju listopadna drveća zbog stvaranja sjena preko ljeta i odbacivanja lišća u jesen kako bi sunce dospjevalo do objekta preko zimskih dana. Za optimalan potencijal sjenčanja krošnja bi trebala biti dovoljno gusta dok otvorena granata struktura zimi daje maksimalan pristup građevini. Zimzelena drveće se postavlja na sjever da bi se spriječio nalet hladnog vjetra zimi. Drveće moraju biti dimenzionirana da zadovolje potrebe kuće, kod visokih kuća treba osigurati višlja stabla dok kod niskih i dugačkih niska s bogatom krošnjom. Stablo mora biti prilagođeno lokalnim ekstremima, prihvaćati dovoljnu količinu vode i ne biti osjetljivo na štetočine i bolesti. Sadnju drveća treba posaditi dovoljno daleko od strukture kako granje i korijenje ne bi utjecale na samu strukturu građevine. Najbolji način postavljanja su šumarci pri čemu se dobiva raznolikost biljnih vrsta koja štiti od neočekivanih gubitaka kao što su oluje i bolesti [13].

Slika 10. nam prikazuje raspored krajolika za sunčevu arhitekturu pri čemu s zimzelena drveća postavljaju na sjevernu stranu, a na južnu stranu se postavljaju listopadna drveća [13].

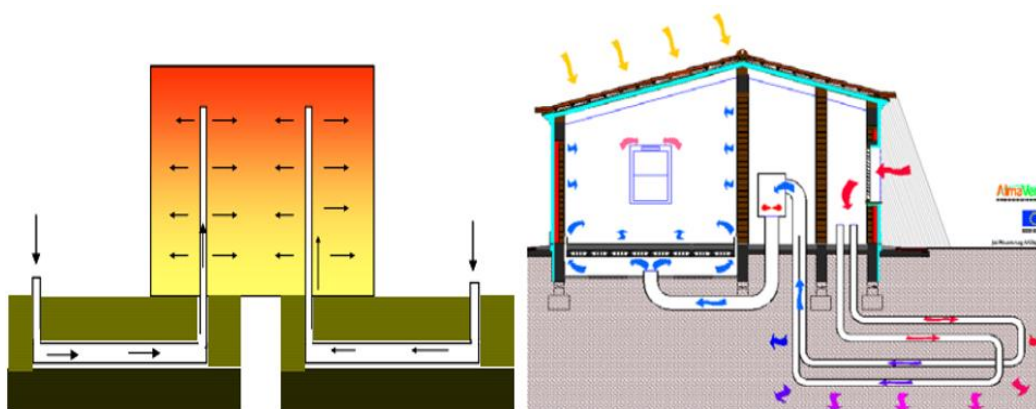


Slika 10. Postavljanje zelenila (prema [13])

### 2.2.2. Tehnologije - zemljani i sunčani kolektori

Temperatura zemlje je u prosjeku mnogo niža od temperature okolnog zraka tijekom ljetnog razdoblja i viša tijekom zimskog razdoblja. Hlađenje pomoću tla se temelji na odvođenju viška topline zgrade u tlo, a to se može postići korištenjem izmjenjivača topline zemlja – zrak. Sustav se može sastojati od zatvorenog ili otvorenog kruga. Kod otvorenog kruga okolni zrak cirkulira unutar cijevi te se onda prenosi u zgradu dok se kod zatvorenog kruga ulaz i izlaz nalaze unutar zgrade. Cijevi mogu biti plastične, betonske, keramičke ili metalne zakopane na dubini od 2 do 3 metra. Za bolji toplinski kontakt između zemlje i cijevi postavlja se sloj pijeska od 5 centimetara. Kondenzacija se rješava nagibom cijevi od 1% dok mala rupa na donjem dijelu cijevi može riješiti problem sa nakupljanjem vode. Duljina cijevi mora biti najmanje 20 metara, njegov promjer 0,2 do 0,2 metra, a brzina zraka između 6 i 10 m/s. Cijevi moraju biti odvojene po najmanje 2 metra kako bi se omogućila disipacija topline. Potrebno je osigurati da temperatura na izlazu cijevi bude najmanje 3 do 4 °C manja od unutarnje temperature (ljeti) te da je energija potrošnje u sustavu niža od energije hlađenja koju nudi sustav [14].

Slika 11. prikazuje dvije vrste izmjenjivača topline zemlja – zrak. Na lijevoj strani je prikazan otvoreni krug, dok se na desnoj strani nalazi zatvoreni krug [14].



Slika 11. Izmjenjivači topline zemlja – zrak [14]

Solarna energija se sve više koristi kod dizajniranja zgrada. Predstavlja jedan od najbogatijih izvora obnovljive energije koja se koristi za proizvodnju električne energije pomoću solarnih panela. Solarna energija je neiscrpna te se smatra održivim rješenjem za potrebe stanara. Postoji dvije vrste sustava solarnog grijanja, pomoću zraka i vode. Sa zrakom soba se izravno grije pomoću grijača zraka. Krovni ili zidni grijači uvlače zrak u solarni kolektor gdje se zrak



### 2.2.3. Materijali

Zidni, krovni i podni elementi u pasivnim kućama trebali bi težiti sa U vrijednošću između 0,10 W/m<sup>2</sup>K i 0,15 W/m<sup>2</sup>K. bez obzira na korištenu metodu gradnje. Za postizanje traženih toplinskih performansi debljina zidova može varirati od 300 do 500mm. Pasivne kuće moguće je graditi sa masivnom i laganom gradnjom, a odabir najčešće ovisi o željama investitora i dogovoru sa projektantom [9].

Za gradnju zidova drvenom konstrukcijom mogu se koristiti drveni okviri, drvene grede, rešetkaste I grede, dvostruke drvene grede i Larson rešetkama. U ovim konstrukcijama paropropusna brana mora biti zalijepljena kako bi se eliminirao toplinski most. Za izolaciju u zidovima može se koristiti fleksibilna izolacija između greda kako bi se prilagodila toplinskom širenju drva čime se može smanjiti mogućnost zračnih džepova ili se mogu uzeti krute ploče između drvenih greda u kojem je nužna pažljiva instalacija kako bi se osiguralo potpuno ispunjenje svih praznina. Zrakonepropusni sloj se često postiže korištenjem OSB ploča dobro zalijepljenih na spojevima, no one nisu namijenjene kao zrakonepropusni proizvod stoga se preporučuju debljine od najmanje 18 mm. Polietilenska folija se koristi za brtvljenje, ali jako je osjetljiva na oštećenja tijekom gradnje ili bilo kakvih naknadnih radova te ju je teško instalirati u kutovima. Željenu zrakonepropusnost najsigurnije se postiže s ojačano namjenskim izrađenim membranskim materijalima [9].

Kod gradnje zidova s opekom pristup treba prilagoditi kako bi se postigli zahtjevi standarda pasivne kuće. Zrakonepropusnost se može riješiti korištenjem mineralne vune koje se postavljaju u šupljinama i dizajnirane da upiju vlagu u prvih 10 do 15 mm od prodiranja kiše kroz poroznu ciglu ili kamen. Potrebno je pravilno postaviti vodonepropusne slojeve iznad otvora i paziti da se izolacijske ploče čiste od morta kako bi se osigurala da toplinska učinkovitost bude u skladu s projektom. Nehrđajuća čelična sidra smanjuju U vrijednost zida i mogu potencijalno dovesti do kondenzacije. Upotrebom specijalnih zidarskih sidara napravljenih od materijala s nižom toplinskom vodljivošću minimaliziraju se toplinski mostovi. Nepropusnost se može riješiti tradicionalnom stavljanje žbuke u dva sloja. Kada se susreće s drugim materijalima poput OSB ploče ili šperploče potrebno je koristiti specijalne trake za nepropusnost jer dolazi do diferencijalnog pomaka. Prije postavljanja međukatnih drvenih podova ili stepenica potrebno je staviti sloj od slabog pijeska i cimente smjese nanesen na zidne obloge [9].



Masivna zidana konstrukcija s vanjskom izolacijom je najlakša metoda za postizanje ciljeva pasivne kuće za zidove i može se postići s velikim izborom krutih ili polukrutih izolacijskih materijala. Konstrukcija koja je obično od blokova ili betona se nalazi unutar toplinskog omotača pružajući dobru toplinsku masu. Na vanjsku stranu konstrukcije u obliku sloja žbuke za izravnavanje nanosi se sloj za zrakonepropusnost. Obično se koriste mehanički pričvršćivači s termičkim prekidima. Bitno je koristiti imati ravnu površinu na koju se pričvršćuje izolacija s ravnomjerno nanosi ljepilo nazubljenom gletericom [9].

Konstruktivski izolirani paneli je jednostavan sustav zidova koji se sastoji od izolacije smještene između 15 mm ploča. Paneli trebaju biti postavljeni izvana kako bi se smanjili toplinski mostovi kod drvenog podnožja i zidnih ploča te nadoknabila dodatna drvena konstrukcija koja se koristi oko prozorskih i vratnih otvora [9].

Tablica 1. prikazuje prednosti i nedostatke različitih tipova zidnih konstrukcija u kojoj se nalazi konstrukcija s drvenim okvirom, zid od opeke, masivna gradnja s vanjskom izolacijom i konstruktivski izolirani paneli.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci zidnih konstrukcija (Autor: Ivan Čule)

TIP KONSTRUKCIJE	PREDNOSTI	NEDOSTACI
KONSTRUKCIJA S DRVENIM OKVIROM	Brzina postavljanja	Potreba za dodatnim strukturnim gredama što stvara dodatne toplinske mostove Opasnost od nakupljanja vlage u drvenom okviru tijekom ljetnih mjeseci kada sunčeva svjetlost potiskuje vlagu iz fasade od opeke ("solarna vlaga")
	Jednostavno praćenje kvalitete izolacija i membrana Mogućnost ranog testiranja zrakonepropusnosti i lakog ispravljanja grešaka	
ZID OD OPEKE	Lako dostupni materijali	Sporija gradnja u odnosu na drveni okvir
	Poznata metoda gradnje	Teže je provjeriti kvalitetu kontinuiteta izolacije
	Masivna konstrukcija pruža izvrsnu toplinsku pohranu i zvučnu izolaciju	Testiranje zrakonepropusnosti događa se kasnije što otežava ispravljanje skrivenih grešaka
	Nema opasnosti od međuslojne kondenzacije Jeftina metoda gradnje	Loše postavljene kutije za strujne priključke mogu stvoriti slabe točke Duže razdoblje sušenja strukture utječe na potražnju za grijanjem tijekom prve sezone
MASIVNA GRADNJA S VANJSKOM IZOLACIJOM	Izolacija i konstrukcija su potpuno odvojeni, što minimizira toplinske mostove	Vanjska žbuka može se lako oštetiti jer nema strukture iza nje
	Kvaliteta izrade je uglavnom vidljiva, što olakšava osiguranje kvalitete	Teža obloga može uzrokovati značajne probleme s toplinskim mostovima
	Nema potrebe za postavljanjem slojeva za odvodnju	
KONSTRUKCIJSKI IZOLIRANI PANELI	Izgradnja van gradilišta omogućava preciznost	Potrebne određene modifikacije za postizanje razina izvedbe pasivne kuće, posebno za toplinske mostove
	Jednostavnost i brzina podizanja konstrukcije	

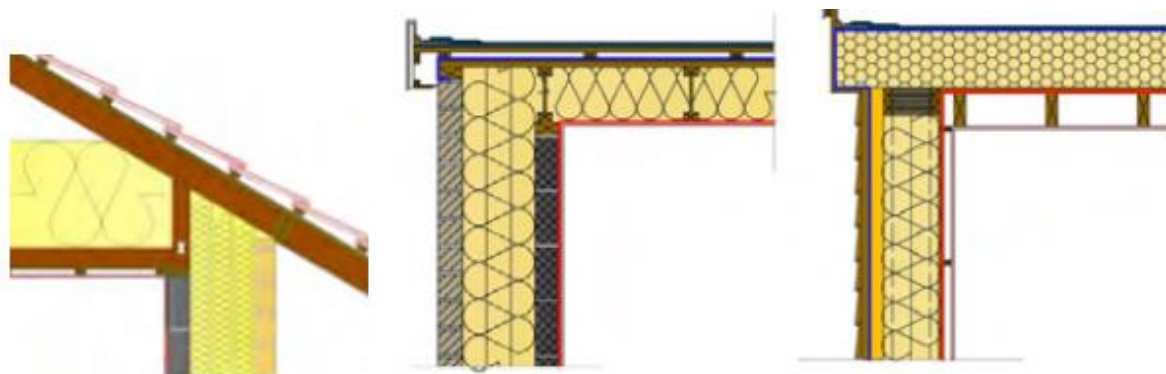
Podovi mogu biti čvrsti ili viseći. Čvrsti podovi su češće lakša i jeftinija opcija dok se viseći koriste gdje je toplinski omotač iznad podruma ili gdje postoji rizik od poplava. Viseći drveni podovi nisu preporučljivi za pasivne kuće zbog rizika od vlaga i potrebnih složenih detalja. Sustav prizemnog poda sa izoliranom pločom zadovoljava svim zahtjevima pasivne kuće. Izolacija je u kontinuitetu bez toplinskih mostova, betonska ploča je zrakonepropusna i nema problema s toplinskim mostovima. Dizajn ovisi o sustavu zidova koji se koristi, ako je lagana konstrukcija može se graditi izravno na ploči dok kod teške treba izravna podrška iz temelja. Pri odabiru izolacije potreban je pažljiv odabir jer toplinska učinkovitost može bit značajno smanjena ovisno o vrsti materijala koji se koristi. Za izolaciju u prizemnim podovima i temeljima najprikladniji materijal je ekstruzijski polistiren koji se postavlja ispod membrane za zaštitu od vlage. Slika 13. prikazuje postavljanje izolacija ispod podne ploče [9].



Slika 13. Postavljanje izolacije ispod podne ploče [9]

Krovovi kod stambenih zgrada pretežno su kosi i dizajnirani kao hladni krovovi s izolacijom na razini horizontalnog stropa ili kao katedralni krov gdje izolacija slijedi liniju nagiba krova. Kod hladnih krovova spuštene stropovi omogućuju spoj bez toplinskih mostova. Pomoću OSB ploča ili drugih čvrstih membrana postiže se zrakonepropusnost. Samo drveni potporni elementi rešetke probijaju izolaciju i tako su minimalizirani toplinski mostovi. Pomoću paropropusnih membrana sprječava se strujanje zraka. Za zadovoljavanje performansi pasivne kuće koriste se TJI grede koje dolaze u različitim dubinama, a zavise od potrebe izolacije. Spoj krova i zida osigurava minimalno stvaranje toplinskih mostova i zadovoljava estetske kriterije pri pažljivom izvođenju. Principi dizajna ravnih krovova za pasivne kuće su isti kao i za bilo koju drugu zgradu, a razlikujemo ventilirane krovove ili tople. Ventilirani ravni krov omogućuje isparavanje vlage, s razinama koje nudi pasivna kuća opasnost od toga je manja. TJI drvene

grede su i dalje povoljne za pružanje dobre strukturne čvrstoće. Topli krovovi uzrokuju manje problema s vlagom tako što odvajaju strukturu krova i postavljaju krutu izolaciju na vrh pokrova. Postoji mogućnost postavljanja obrnutog krova u kojem se izolacija postavlja na vrh krovne membrane da bi se zaštitila od sunčeve svjetlosti i naknadnog diferencijalnog termalnog pomaka. Projektirana U - vrijednost može biti urušena ako dođe do prisutnosti vlage oko izolacijskih materijala. Zidovi parapeta mogu predstavljati veliki toplinski most ako nisu pažljivo projektirani. Slika 14. prikazuje različite izvedbe krovnih konstrukcija. Lijeva slika prikazuje hladni katedralni krov, u sredini se nalazi tipični ravni krov s konstrukcijom drvenog zida, dok na desnoj slici vidimo tipični ravni krov s konstrukcijom zida s međuprostorom [9].



Slika 14. Detalji različitih tipova krovnih konstrukcija [9]

## 2.3. Zahtjevi za pasivne kuće

### 2.3.1. Kriteriji

Obvezni kriteriji pasivne kuće prema Senegačnik su [17]:

- koeficijent prolaska topline kroz zidove ne smije biti veći od  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- koeficijent prolaska topline kroz prozore i vrata (uključujući troslojna stakla i okno prozora) ne smije prekoračiti vrijednost od  $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$
- konstrukcija mora biti izvedena bez toplinskih mostova ( $\psi \leq 0,01 \text{ W/mK}$ )
- pri razlici tlakova od  $50 \text{ Pa}$  broj izmjena zraka u prostoru ne smije prelaziti  $0,6 \text{ h}^{-1}$  ( $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ )

- potrošnja električne energije za rad rekuperatora mora biti manji od  $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  prepumpanoga zraka
- minimalizacija toplinskih gubitaka pri pripremi i distribuciji sanitarne vode
- korištenje učinkovitih kućanskih aparata [A, A+]

### 2.3.2. *Certifikati*

Standard pasivne kuće je energetska standard zgrada koji se sastoji od niza propisanih pravila o zahtjevima potrošnje energije i ugone boravka. Za dobivanje certifikata od strane Passive House Institute iz Darmstadta svi se zahtjevi moraju zadovoljiti. Osim obiteljskih kuća moguće je certificirati različite objekte poput poslovnih zgrada, vjerskih ustanova, bolnica, škola, domova i mnogih drugih. Svi dijelovi pasivne kuće poput debljina izolacija, dijelova prozora, sustava ventilacija i grijanja točno su onoliki koliki trebaju biti čime se izbjegava neopravdano povećanje investicije. Osim toga nalazi se na optimalnoj točki koja nudi maksimalan rezultat uz minimalnu investiciju stoga projektiranje prema Passive House Standardu može se dobiti zgrada koja ni u čemu nije pretjerana, a pruža maksimum. Za dobivanje certifikata pri projektiranju mora sudjelovati CPHD – Certified Passive House Designer. Osoba ovlaštena od PH Instituta kako bi izgradila potrebne proračune i savjetovala projektante prilikom izrade projekta i u daljnjem izvođenju. Njegova uloga je pronaći optimalnu veličinu svih bitnih komponenti i kombinaciju kako bi se ostvarili uvjeti potrošnje i ugone za minimalnu investiciju. Nakon gradnje svi proračuni i modeli zgrade provjeravaju se od strane ovlaštene osobe od Passive House Instituta i provjerava sve dokaze o svim detaljima i komponentama koji su ugrađeni u zgradu. Nakon pregleda dobiva se certifikat i zgrada se unosi u svjetsku bazu podataka svih pasivnih kuća na svijetu. Razlikujemo još i EnerPhit certifikat koji je namijenjen za rekonstrukcije postojećih zgrada, teži nešto manjim razinama potrošnje energije dok nudi sve dobrobiti boravka unutra. PHI Low Energy Building je prigodan za sve zgrade koje iz određenih razloga ne mogu u potpunosti zadovoljiti sve kriterije pasivne kuće [18].

Slika 15. nam prikazuje model prve buduće certificirane pasivne kuće u Hrvatskoj koja se nalazi u Općini Barban.

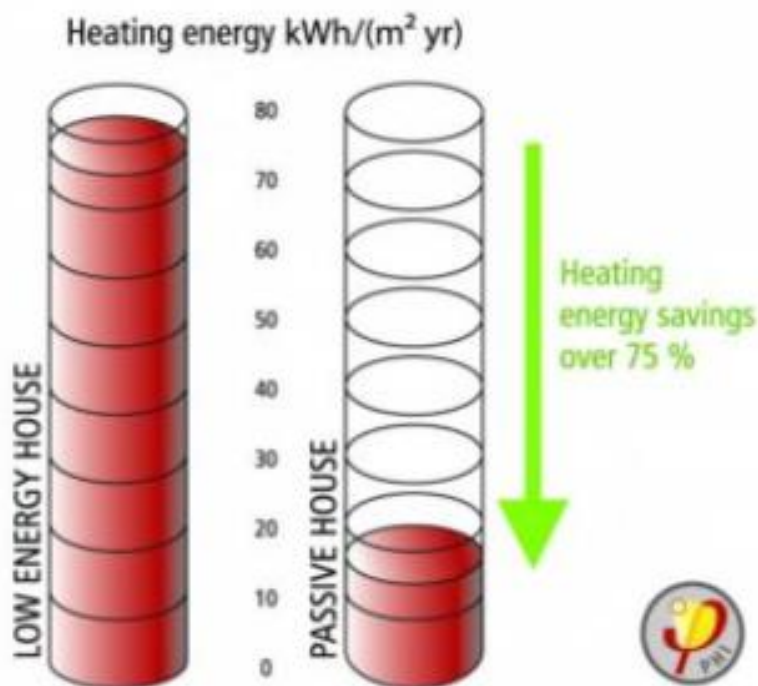


Slika 15. Budući izgled prve certificirane pasivne kuće u Hrvatskoj [19]

## 2.4. Prednosti

### 2.4.1. Energetska efikasnost zgrade

Pasivne kuće su dizajnirane i izgrađene kako bi imale maksimalnu uštedu energije, imaju potencijal koristiti do 90% manje energije s obzirom na trenutne građevine, dok obavljaju iste funkcije od tradicionalne zgrade. Prozori pasivne kuće mogu smanjiti gubitak topline za više od 70% u usporedbi s postojećim dvostrukim staklima, kvalitetna vanjska izolacija se smanjuje do 90% kao i gubitak topline ventilacijom. Potrebno je vrlo malo dodatnog grijanja ili hlađenja za održavanje ugodne unutarnje temperature. Zbog certifikacije osigurava se da nema razlike u performansama između očekivanih i stvarnih učinaka zgrade. Slika 16. nam prikazuje razliku u potrošnji između nisko energetske kuće sa pasivnom. Može se primijetiti da je energetska ušteda preko 75% u odnosu na nisko energetska kuću [20].



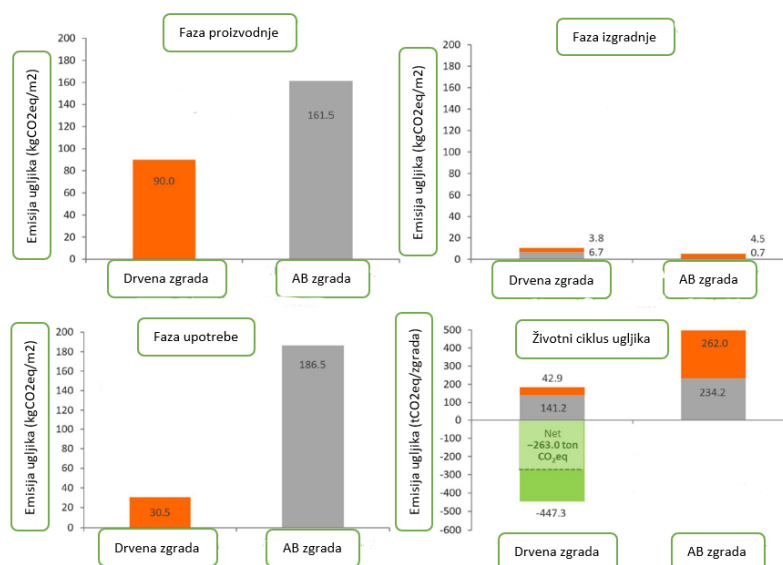
Slika 16. Prikaz energetske potrošnje nisko energetske i pasivne kuće [20]

#### 2.4.2. *Komfor i zdravlje*

Impresivna energetska učinkovitost je jedna od glavnih prednosti zgrada koje ispunjavaju standard pasivne kuće, no također je i rigorozan standard udobnosti. Gradnja prema standardu omogućava da zgrada bude bez propuha, hladnih točaka i prekomjernog zagrijavanja te da dobiva konstantan svježi i čist zrak. Postiže se dobrim planiranjem u fazi dizajna sa softverom i korištenjem visokokvalitetnih komponenti poput prozora, izolacijskih materijala i mehaničke ventilacije s povratom topline. Budući da se tijekom korone provodilo i oko 90% vremena u zatvorenom prostoru, udobnost u zgradi se treba shvaćati ozbiljno. Pasivne kuće također pružaju zdrav i tih unutarnji okoliš. Ventilacijski sustavi omogućuju stalnu opskrbu svježim zrakom, uklanjajući zagađivače i neugodne mirise dok održava ugodnu unutarnju temperaturu zraka. Ako se pasivna zgrada nalazi u prometno urbanom području, visokokvalitetna izolacija i prozori štite od onečišćenja bukom i stvara se mirna okolina [20].

### 2.4.3. Ekološki aspekt

Građevinski sektor je odgovoran za otprilike 40% globalne emisije ugljika. Istraživanja prikazuju kako drvo može pohraniti njegovu veliku količinu. Provedena je studija u Čileu na kojoj se uspoređivao 50 godišnjeg životnog vijeka drvene i armiranobetonske građevine. Drvena zgrada je pasivna zgrada dok se armiranobetonska provodila u skladu s minimalnim nacionalnim propisima. Slika 17. prikazuje četiri faze, a to su proizvodnja, izgradnja, uporaba i životni ciklus ugljika. U prvoj fazi možemo vidjeti kako je doprinos globalnom zagrijavanju kod drvene konstrukcije manji za 44%. U fazi izgradnji neznatno je veća emisija zbog duljeg transporta od tvornice do gradilišta, dok je u fazi instalacije manja. Faza upotrebe nam prikazuje da tijekom 50 godišnjeg životnog vijeka konstrukcije akumulirana emisija pasivne zgrade je manja za 83% od armiranobetonske. Životni ciklus ugljika nam pokazuje da drvena zgrada može pohraniti 447 tona u svojoj strukturi zbog utjecaja fotosinteze. Stoga se zaključuje da pasivne zgrade i korištenje drvenih proizvoda doprinosi smanjenju stakleničkih plinova [21].

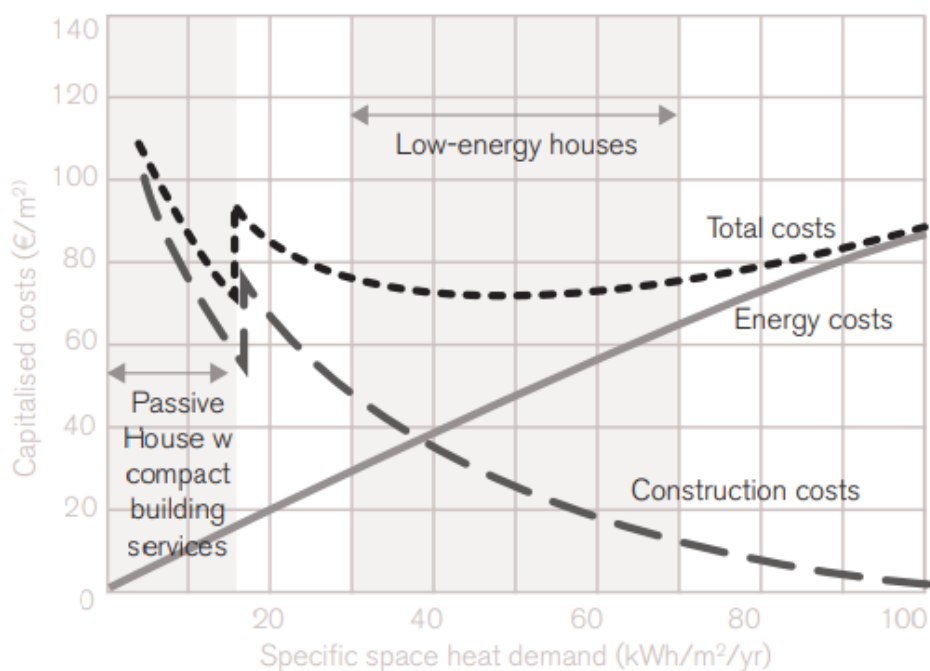


Slika 17. Utjecaj drvene i AB zgrade na emisiju ugljika (prema [21])

#### 2.4.4. Cijena

Zgrade pasivnih kuća troše 80 do 90% manje energije za grijanje i hlađenje i grade se uz male ili nikakve dodatne troškove. Pasivne kuće su postale najbrži rastuće standard gradnje koji je blizu nulte potrošnje u svijetu. Za smanjenje potrošnje ukupne energije koriste se pasivne strategije koje uključuju nepropusnost zraka i dobru izolaciju kako bi se održala željena toplina ili pregrijavanje prostora. Osigurava se dovoljno pasivne sunčeve topline da klima i tradicionalna peć nisu potrebni. Uzimajući u obzir uštedu tijekom vremena, pasivna kuća se smatra najekonomičniji način gradnje [22].

Slika 18. prikazuje graf troškova različitih tipova zgrada. Duga isprekidana linija prikazuje troškove gradnje dok puna linija potrošnju energije. Ukupni trošak predstavlja zbroj i prikazan je kratko isprekidanom linijom. Nakon 15 kWh/m<sup>2</sup>/god potrebni su dodatni troškovi investicija radi grijanja pomoću peći ili klime te se javlja skok u grafu. Može se primijetiti da pasivna kuća ima najniže troškove tijekom vijeka trajanja na upravo tom području [1].



Slika 18. Troškovi različitih tipova zgrada [1]



## 2.5. Softveri

Proces izgrade pasivne kuće temelji se na dobrom procesu planiranja. Učinkovitost zgrade moguće je izračunati prije početka gradnje sa programskim alatima koji pojednostavljaju proces dizajniranja. Najpoznatiji program koji se koristi je Passive House Planning Package (PHPP) i služi za planiranje energetske učinkovitosti. DesignPH služi kao dodatak za 3D softver SketchUp, bim2PH se koristi u BIM softverima i omogućuje unos podataka o učinkovitosti i prenosi informacije o izračunu energetske učinkovitosti u PHPP. Još od poznatijih programa je districtPH koji služi za izradu energetske ravnoteže skupina zgrada, kvartova ili naselja. Osim glavnih alata koji se koriste postoji i niz dodatnih koji mogu pomoći u različitim fazama projekta kao što je analiza toplinske ovojnice, identifikacija toplinskih mostova, utjecaj klima prozora i ventilacije, monitoring i učinak toplinske pumpe [23].

PHPP sadrži sve potrebne stvarni za projektiranje pravilno napravljene pasivne kuće. Priprema energetske bilans i izračunava godišnje energetske potrebe na temelju korisničkih unosa podataka. Glavni rezultati ove analize je godišnja potreba za grijanjem i njegovo maksimalno opterećenje, potreba za hlađenjem i njeno maksimalno opterećenje, učestalost pregrijavanja uz pasivno hlađenje i godišnja potreba za primarnom energijom za cijelu zgradu. Također je moguće i dimenzioniranje pojedinih komponenti (U – vrijednosti, kvaliteta prozora, sjenčanje, ventilacija) i izračun potrebe za toplom vodom i dizajn sustava za toplu vodu. Klimatski uvjeti za lokaciju zgrade su odabrani kao temeljni granični uvjeti stoga se može koristiti za različite klimatske regije. PHPP čini osnovu za osiguranje kvalitete i za certifikaciju pasivnih zgrada i zgrada za poboljšanje energetske učinkovitosti [24].

Slika 19. prikazuje listu s rezultatima za uzorak kuće izgrađene prema standardu pasivne kuće u PHPP softveru [24].

Specific building demands with reference to the treated floor area			Requirements	Fulfilled?*
	Treated floor area	156,0 m <sup>2</sup>		
Space heating	Heating demand	14 kWh/(m <sup>2</sup> a)	15 kWh/(m <sup>2</sup> a)	yes
	Heating load	10 W/m <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>	yes
Space cooling	Overall specif. space cooling demand	kWh/(m <sup>2</sup> a)	-	-
	Cooling load	W/m <sup>2</sup>	-	-
	Frequency of overheating (> 25 °C)	1,6 %	-	-
Primary energy	Heating, cooling, dehumidification, DHW, auxiliary electricity, lighting, electrical appliances	60 kWh/(m <sup>2</sup> a)	120 kWh/(m <sup>2</sup> a)	yes
	DHW, space heating and auxiliary electricity	33 kWh/(m <sup>2</sup> a)	-	-
	Specific primary energy reduction through solar electricity	25 kWh/(m <sup>2</sup> a)	-	-
Airtightness	Pressurization test result n <sub>50</sub>	0,2 1/h	0,6 1/h	yes

\* empty field: data missing; "-": no requirement

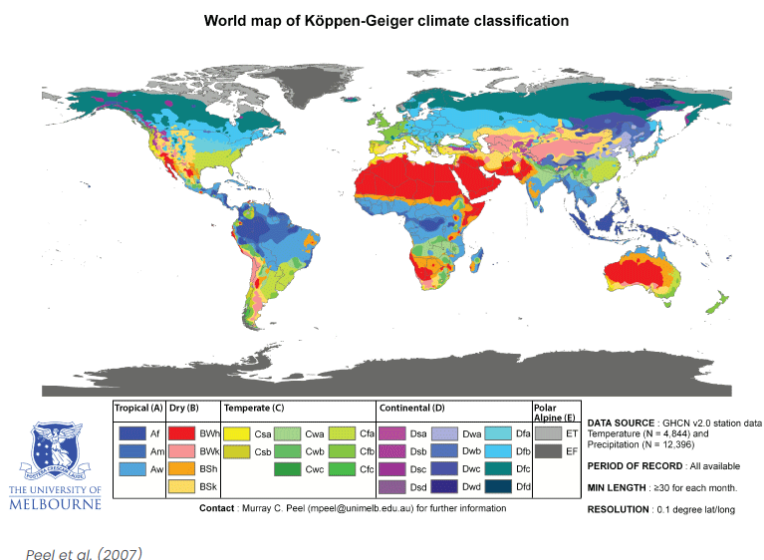
Slika 19. Prikaz rezultata u PHPP softveru [24]

### 3. KLIMATSKA KLASIFIKACIJA

Klimatska klasifikacija predstavlja sustav kategorizacije različitih klimatskih uvjeta na osnovu meteoroloških podataka poput oborina, temperatura, vlažnosti zraka, vjetrova i drugih karakteristika. Ovaj sustav nam pruža nužne informacije pri izgradnji građevinskih objekata. Bitna je u građevinskom sektoru zbog prilagodbe dizajna kako bi se maksimalno iskoristile prednosti te umanjili nedostaci klimatskih uvjeta. Poboljšava se energetska učinkovitost zbog identificiranja potrebe za grijanjem, hlađenjem i ventilacijom u zgradama. Tijekom pravilne izvedbe objekta te pridržavanjem klimatskih smjernica postiže se udobnost stanovanja [25].

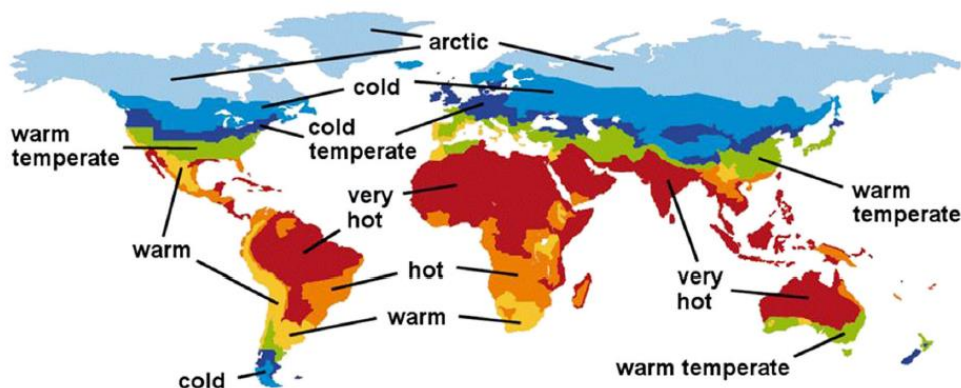
Razlikujemo dvije metode klimatskih klasifikacija, a to su empirijske i genetske. Genetske metode su manje uspješne u cjelini te se manje primjenjuju. Većina empirijskih klasifikacija nastoji grupirati klimu na temelju jednog ili više aspekta klimatskog sustava. Najpopularnija metoda je Köppen-Geiger klasifikacija bazirana na Köppenovoj klasifikaciji. Temelji se na podijeli klima na pet glavnih tipova označenih velikim slovima A, B, C, D i E. Svaki tip je definiran na osnovu temperature i količine padalina. Tip A predstavlja najtopliju klimu dok tip E najhladniju klimu [25].

Slika 20. prikazuje kartu na kojoj se nalazi klimatska klasifikacija prema Köppen-Geigerovoj podjeli [26].



Slika 20. Köppen-Geiber klasifikacija [26]

Standard Pasivne kuće je zasnovan na performansama i ne nameće nikakva izričita ograničenja glede rasporeda zgrade ili svojstava komponenti. Unatoč tome mogu se dati principi dizajna i polazišta za optimizaciju. Stvorena je nova klimatska klasifikacija koja se odnosi samo za pasivnu gradnju. Slika 21. prikazuje sedam klimatskih zona koje su identificirane na temelju razvoja konfiguracije zgrada optimiziranih za troškove za sve klime u svijetu. Za svaku klimatsku zonu mogu se izvesti tipična svojstva pasivnih kuća koja može služiti kao polazište pri optimizaciji zgrade [27].



Slika 21. Klimatska klasifikacija za pasivne kuće [27]

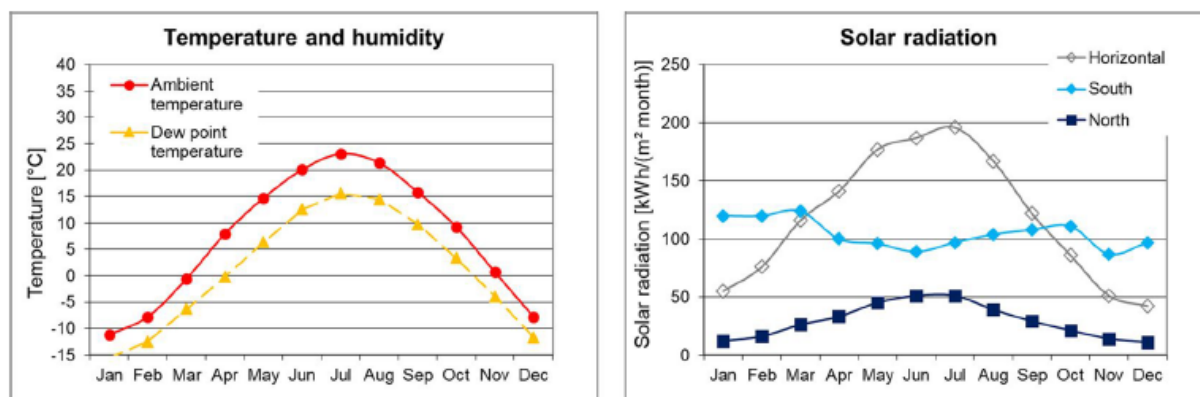
### 3.1. Hladna klima

Hladne klime karakteriziraju niske temperature tijekom većeg dijela godine te je nužno osigurati dobru toplinsku izolaciju i učinkovite sustave grijanja kako bi se održala udobnost unutar zgrade. Osim uporabe pasivnog solarnog dobitka koji omogućuje značajne uštede energije važno je redovito održavanje te nadzor za optimalno funkcioniranje i postizanje maksimalne učinkovitosti sustava.

Na primjeru obiteljske kuće Hudson koja se nalazi u surovoj klimi zimi s prosječnim temperaturama u siječnju ispod  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  te s prosječnim temperaturama u srpnju od  $23\text{ }^{\circ}\text{C}$  napravljena je analiza potrošnje energije. U ovim klimatskim uvjetima potrebno je pažljivo osmisliti omjer staklenih površina i orijentaciju kako bi se omogućili što bolji korisni solarni dobitci tijekom hladnih razdoblja te sprječavanje rizika od pregrijavanja uzrokovano visokim solarnim opterećenjem ljeti [27].

Na Slici 22. su prikazani klimatski podaci u Hudsonu. Na lijevom grafu je prikazana vanjska temperatura i temperatura rosišta, može se primijetiti da dostižu najveću temperaturu u srpnju

te da je okolna temperatura u prosjeku viša za 8 °C. Na desnom grafu je prikazana solarna radijacija na kojoj se uočava da je solarna radijacija na južnoj strani puno veća nego solarna radijacija na sjevernoj [27].



Slika 22. Prikaz klimatskih podataka za Hudson [27]

Na Slici 23. je prikazana zgrada se sastoji od tri spavaće sobe i dvije etaže s izlazom na podrum i krovnu terasu. Prva je certificirana pasivna kuća u saveznoj državi Wisconsin. Građevinsko zemljište pruža optimalno pasivno sunčevo izlaganje. S obnovljivim energetske sustavima planira se proizvoditi više energije nego što se ona troši te težiti neutralnom ugljiku. Omot zgrade je uniforman, garaža i vanjske čelične stepenice i struktura terase su samostalne i ne narušavaju omot zgrade. Sjeverna strana zgrade je većim dijelom zaštićena garažom te nema prozora. Južna strana je otvorena kako bi se maksimiziralo solarno zagrijavanje dok su prozori zasjenjeni vanjskim sustavom za zasjenjivanje. Ventilacijski sustav ima i podzemni izmjenjivač topline kako bi se mogao predzagrijavati dolazni zrak zimi te hladiti i odvlaživati ljeti. Zakopan je na dubini od 1,8 metara, dok su mu cijevi razmaknute 50 centimetara da bi se maksimizirao toplinski prijenos. Dimenzioniran je za isporuku 1 kW grijanja ili hlađenja dolaznom zračnom strujom. Sustav cjevovoda unutar zgrade opskrbljuje svježim zrakom prostore za druženje i spavaće sobe, a ispušni zrak se vraća iz kuhinje, kupaonica i mehaničkih prostora. HRV nudi ljetno obilaženje kako bi se maksimiziralo pasivno hlađenje kada je dostupno [27].



Slika 23. Obiteljska kuća u Hudsonu [27]

Na slici 24. se nalazi tlocrt obiteljske kuće u Hudsonu [27].

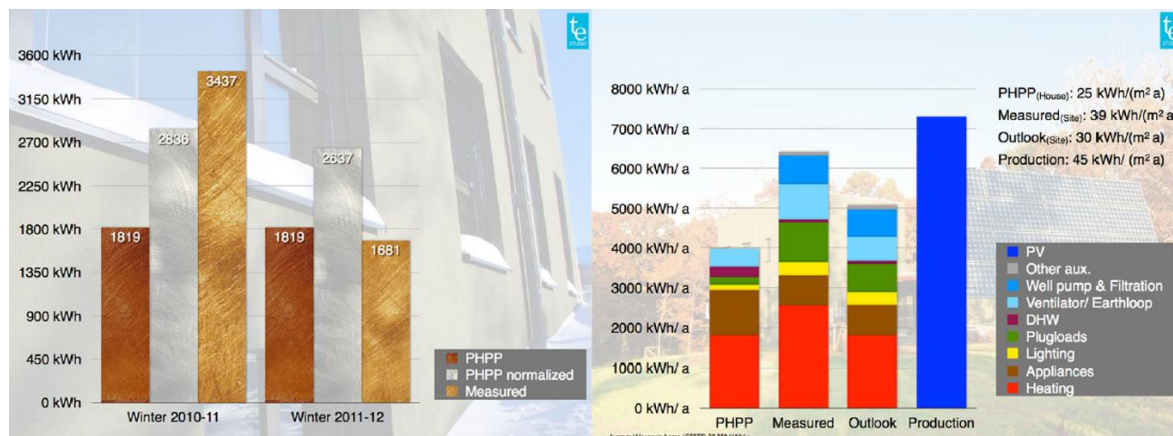


Slika 24. Tlocrt prizemlja obiteljske kuće u Hudsonu [27]

Zgrada je opremljena s visokim solarnim dobitkom topline te je procijenjeno da 64% toplinskog opterećenja osigurava pasivni dobitak topline, unutarnji toplinski dobici su činili 16% dok je aktivno grijanje pokrivalo ostalih 20%.

Na Slici 25. lijevi graf prikazuje izmjerenu potrošnju grijanja u dva zimska razdoblja u usporedbi s predviđanjima PHPP-a. Može se primijetiti da se u drugoj godini zbog prilagodbe korisnika trošilo puno manje energije. Ljetna udobnost je bila prihvatljiva s pasivnim hlađenjem. Desni graf prikazuje rezultate potrošnje energije te se može vidjeti kako će kuća trošiti više energije nego što je PHPP (The Passive House Planning Package) predvidio, većina

nedostataka izračuna iz faze dizajna objašnjena je manjkom informacija u vrijeme modeliranja [27].

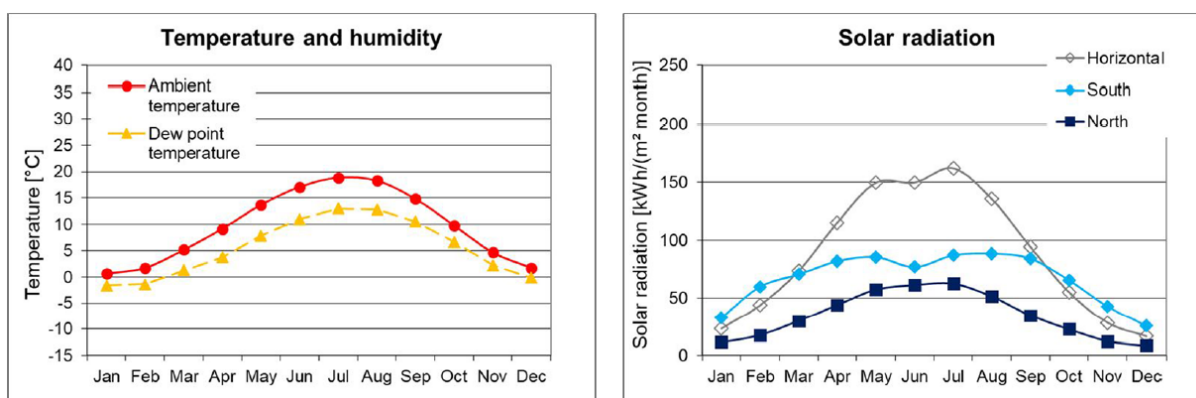


Slika 25. Potrošnja energije zimi i ukupna potrošnja energije [27]

### 3.2. Umjereno hladna klima

Klima koju karakteriziraju prosječne zimske temperature oko 0 °C. Ljeta su umjereno topla i suha pa je aktivno hlađenje stambenih zgrada rijetko. Potrebna je adekvatna izolacija i pažljivo dimenzionirati prozorske sustave kako bi se smanjili toplinski gubici zimi i pregrijavanje ljeti.

Darmstadt je jedno od najtoplijih gradova u Njemačkoj. Na Slici 26. prikazani su njegovi klimatski podaci. Na lijevom grafu je prikazana vanjska temperatura i temperatura rosišta, može se primijetiti da dostižu najveću temperaturu u srpnju te da je vanjska temperatura u ljetnom dijelu godine oko 18 °C. Na desnom grafu prikazana je solarna radijacija na kojoj se primjećuje da je najniža tijekom zimskih mjeseci. U lipnju je razlika između južne i sjeverne radijacije najmanja [27].



Slika 26. Prikaz klimatskih podataka za Darmstadt [27]

Na Slici 27. je prikazana krajnja kuća u nizu u Darmstadtu koja ima tri kata iznad zemlje i podrum unutar toplinskog omotača. Izgrađena je od vapnenačkog zidanja, međukatne konstrukcije i podrum su od betona, a krov je lagan te je prekriven ventiliranim krovnim pločicama. Koristi se sustav vanjske toplinske izolacije. Vanjski zidovi su obloženi sustavom vanjske toplinske izolacije s EPS izolacijom. Ovaj tip gradnje je rješenje za niskobudžetne nove zgrade u Njemačkoj. Zgrada je smještena u prigradskoj četvrti u kojoj se primjenjuju ograničenja u pogledu oblika i boje krova, boje zidova, visine grebena i oblika prozora. Glavne fasade su okrenute prema istoku i zapadu. Zgrada čini sjeverni kraj niza pri čemu se solarni dobici ograničeni zbog potpune odsutnosti prozora okrenutih prema jugu i relativno jakog zasjenjenja po orijentaciji. Zbog nepovoljne situacije korištene se komponente s većom učinkovitošću nego što je potrebno za ispunjavanje kriterija pasivne kuće u ovoj klimi. Podrum je potpuno integriran u toplinski omotač. Kako bi se osigurao dovoljni kapacitet grijanja ugrađen je konvencionalni hidraulički sustav grijanja s radijatorima. Zbog malih krovnih površina koje su okrenute prema istoku i zapadu ne koristi se solarna obnovljiva energija. Kao alternativa instaliran je sustav za povrat topline otpadne vode s ciljem smanjenja potrošnje energije za toplu vodu. Zaštita od smrzavanja rekuperacije topline postiže se smanjenjem protoka vanjskom zraka pri niskim temperaturama [27].

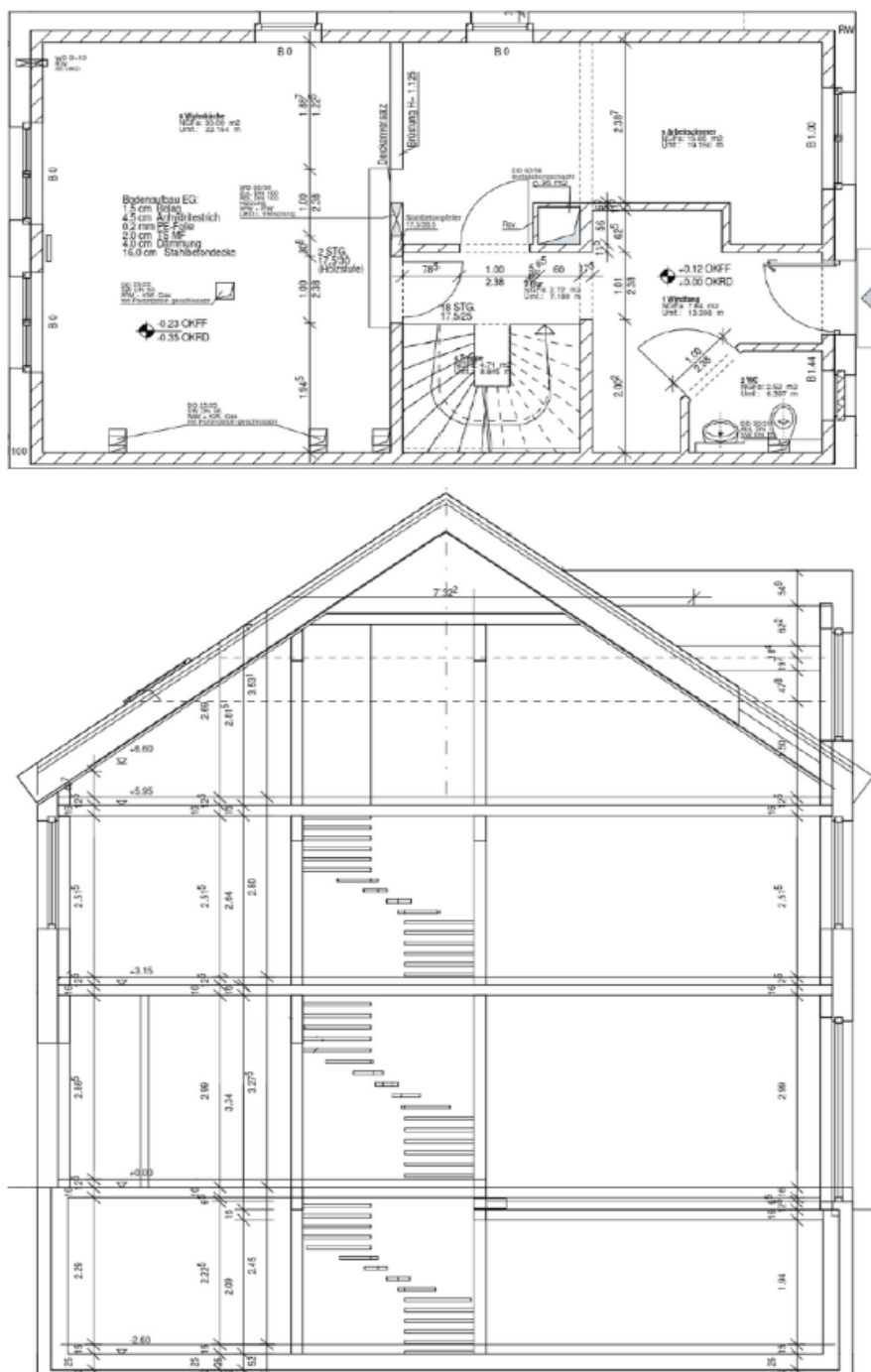


Slika 27. Pasivna zgrada u Darmstadtu [27]

Prema rezultatima istraživanja cijela zgrada je ugodno topla zimi. Kvaliteta zraka subjektivno ocijenjena kao dobra te prosječna relativna vlažnost zraka iznosi otprilike 40%. Ljetna udobnost

postiže se visokom toplinskom masom konstrukcije zgrade s vanjskim uređajima za zaštitu od sunca na istočnoj i zapadnoj fasadi. Unutarnje temperature se mogu održavati na 25°C čak i tijekom najtoplijih ljetnih dana [27].

Na Slici 28. se nalazi tlocrt i presjek pasivne zgrade u Darmstadtu [27].



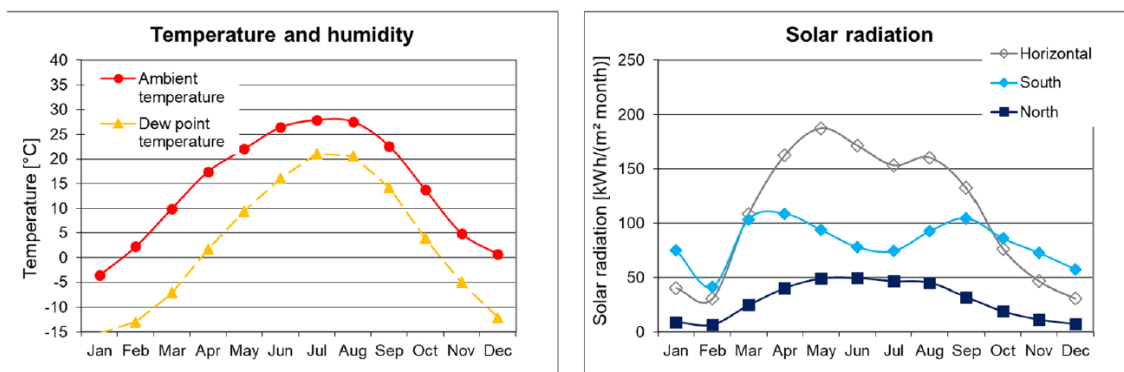
Slika 28. Tlocrt i presjek zgrade u Darmstadtu [27]



### 3.3. Umjereno topla klima

Klima koju karakteriziraju temperature s toplim ljetima i hladnim zimama. Važno je osigurati dobru ventilaciju i termalnu udobnost zgrade tijekom cijele godine. Upravljanje toplinom i vlagom postaju ključni čimbenici u dizajnu kuće kako bi se osigurala ugodna temperatura i kvaliteta zraka.

Zhuozhou se nalazi u regiji Pekinga u Kini, ima hladne zime i topla ljeta s 2 mjeseca značajno visoke vanjske vlažnosti zraka. Na Slici 29. prikazani su njegovi klimatski podaci. Na lijevom grafu je prikazana vanjska temperatura i temperatura rosišta, može se primijetiti da dostižu najveću temperaturu u srpnju u prosjeku 28 °C. Zimi dostiže temperaturu do -15 °C. Na desnom grafu prikazana je solarna radijacija na kojoj se primjećuje da je južna solarna radijacija najveća u ožujku, travnju i rujnu [27].



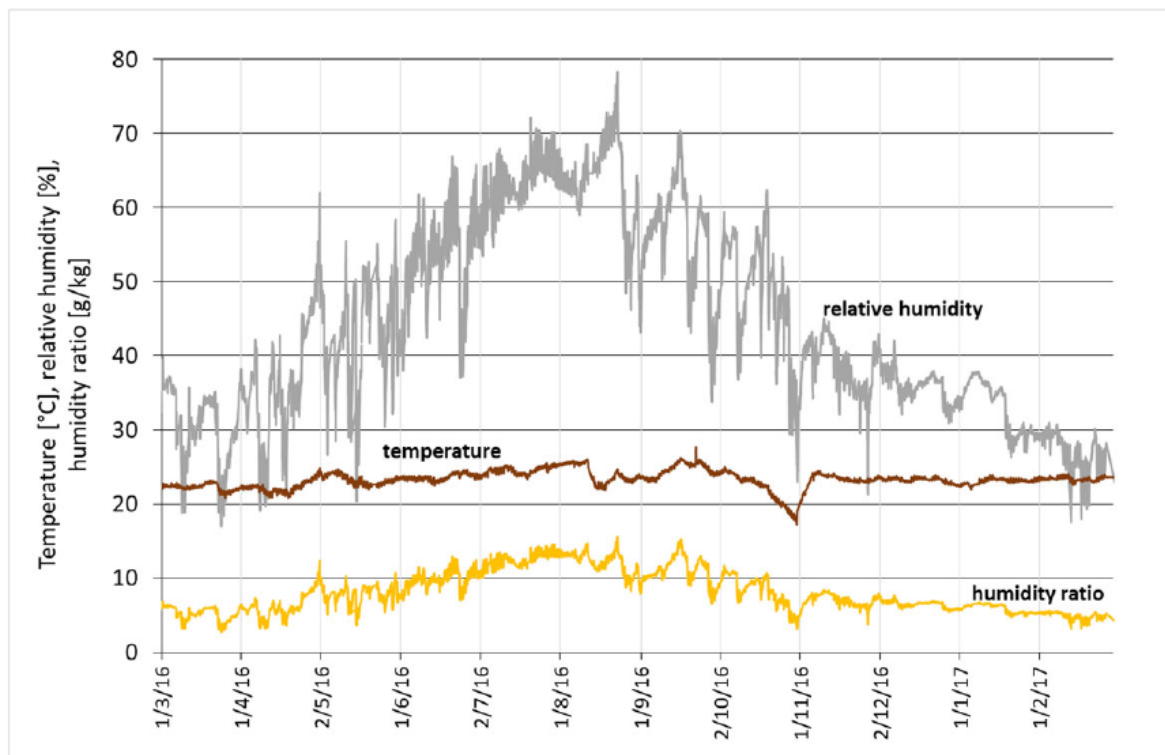
Slika 29. Prikaz klimatskih podataka za Zhuozhou [27]

Slika 30. prikazuje pasivnu zgradu u Zhuozhou koja se sastoji od ureda i sobe za goste dovršena je u srpnju 2015. godine. Kako je gradnja već bila započeta u trenutku kada je donesena odluka o pretvaranju zgrade u Pasivnu kuću, neki detalji u dizajnu nisu mogli biti potpuno optimizirani. To uključuje toplinske mostove na temeljima i kanale između ventilacijskog sustava za rekuperaciju topline i ulaza u termalni omotač. Sustav grijanja i hlađenja zračenjem je nadopunjen predkondicioniranom opskrbom zraka radi odvlaživanja [27].



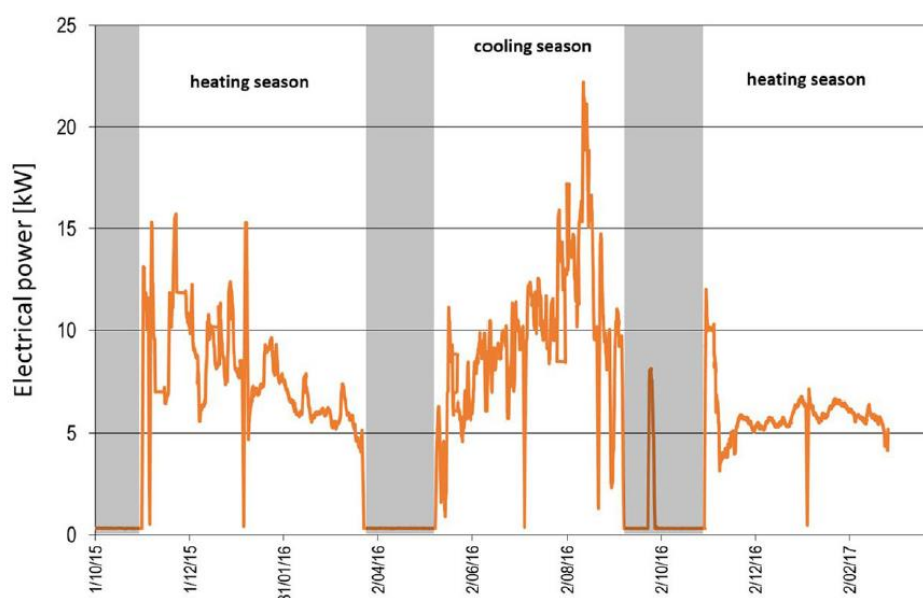
Slika 30. Pasivna zgrada u Zhuozhou [27]

Na Slici 31. su prikazane temperature i vlažnost u tipičnoj sobi. mogu se vidjeti na slici 16. Prosječne temperature u zgradi tijekom zime iznosile su otprilike 23 °C dok su tijekom ljeta bile oko 25 °C i nikada nisu prelazile 26 °C. Omjer vlage u zraku ljeta bio je prosječno 11 g/kg i rijetko je prelazio 14 g/kg, dok je relativna vlaga obično je bila ispod 70%. Zimi, prosječna relativna vlaga bila je 30%. Stoga su korisnici izrazili zadovoljstvo unutarnjim uvjetima [27].



Slika 31. Temperatura i relativna vlažnost zraka u zgradi [27]

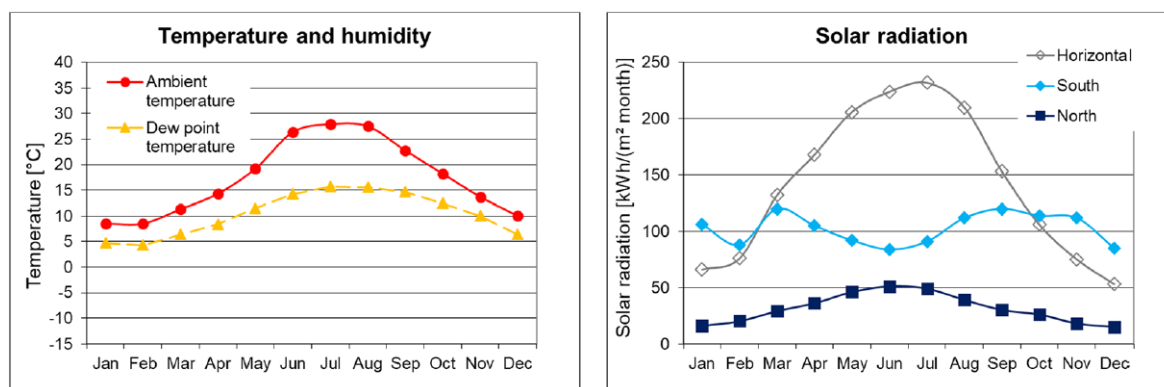
Na Slici 32. prikazani su rezultati energetskog praćenja tijekom nepune dvije sezone. U uredskoj zgradi ukupna potrošnja energije iznosila je 22 kWh/(m<sup>2</sup> godišnje) za grijanje tijekom oba zimska razdoblja i oko 26 kWh/(m<sup>2</sup> godišnje) za hlađenje tijekom ljeta 2016. Glavni faktor koji utječe na potrošnju energije za grijanje je produženo dnevno i tjedno funkcioniranje sustava ventilacije. Iako je dodatna potrošnja energije za grijanje i hlađenje veća u usporedbi s PHPP proračunom, ukupna potrošnja je i dalje izuzetno niska u usporedbi s konvencionalnim zgradama. Sezone grijanja i hlađenja za obje toplinske pumpe su jasno odvojene neutralnim razdobljem bez potrebe za grijanjem ili hlađenjem. Ovo potvrđuje druge nalaze o toplinskom ponašanju pasivnih kuća, a to su da zahvaljujući izuzetnoj izolaciji, zrakonepropusnosti i ventilaciji s rekuperacijom topline, zgrade se polako zagrijevaju ili hlade, što eliminira potrebu za grijanje i hlađenje istog dana. U proljeće i jesen, kada su vanjske temperature ugodne, pasivne kuće ne trebaju dodatno grijanje ili hlađenje. Zaključno, potrošnja energije za grijanje i hlađenje je neznatno viša od izračunate, ali i dalje unutar prihvatljivih granica [27].



Slika 32. Rezultati energetskog praćenja [27]

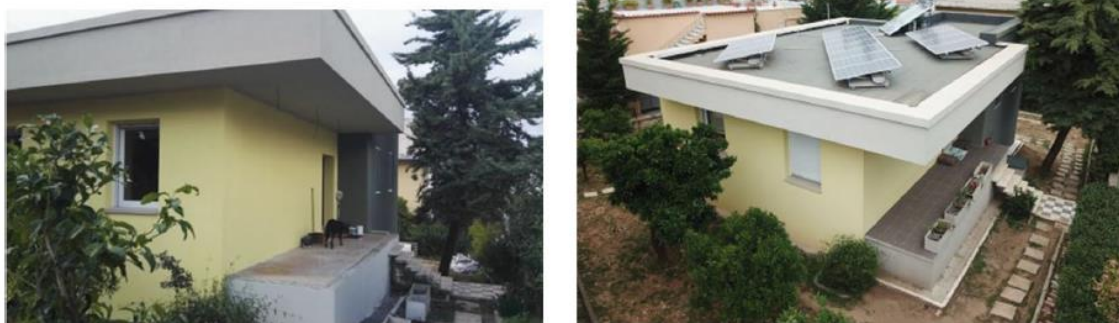
### 3.4. Topla klima

Topla klima karakterizira visoke temperature s obično malo sezonskih promjena. Zime su blage pa je potreba za hlađenjem često veća od grijanja. Atena se nalazi u toploj klimatskoj zoni i jedan je od najtoplijih gradova u Europi. Na Slici 33. prikazani su njegovi klimatski podaci. Na lijevom grafu je prikazana vanjska temperatura i temperatura rosišta. Prosječna vanjska temperatura u pravilu ne pada ispod 10 °C tijekom godine dok su kolovoz i rujan izmjereni s najvećim prosječnim temperaturama do 28 °C. Razina vlažnosti ljeti može se približiti granicama zone udobnosti. Na desnom grafu se nalazi solarno zračenje koje na južnoj fasadi zimi iznosi otprilike 100 kWh/m<sup>2</sup> mjesečno, što znači da se sa pasivnim solarnim strategijama može značajno smanjiti potreba za grijanjem [27].



Slika 33. Prikaz klimatskih podataka za Atenu [27]

Slika 34. predstavlja obiteljsku kuću iz 1960-ih u općini Papagou koja je obnovljena prema pasivnim značajkama. Cilj je smanjenje potrebe za konvencionalnim grijanjem ili klimatizacijom. Svi postojeći mostovi projektirani su na način da imaju minimalan utjecaj na potrebu za grijanjem. Dimenzije prozora na jugu u kupaonici i kuhinju su povećane i pretvoreni u jednokrilne kako bi se povećala površina ostakljenja. Prozori na sjeverozapadnoj, jugozapadnoj i jugoistočnoj strani imaju automatsko kontrolirane rolete za privremeno zasjenjenje ljeti. Ugrađen je i podzemni izmjenjivač topline koji smanjuje temperaturu ulaznog zraka na 25 – 27 °C ljeti. Instalirani su i novi sustavi rekuperacije topline koja je povezana sa podzemnim izmjenjivačem [27].



Slika 34. Obiteljska kuća u Ateni [27]

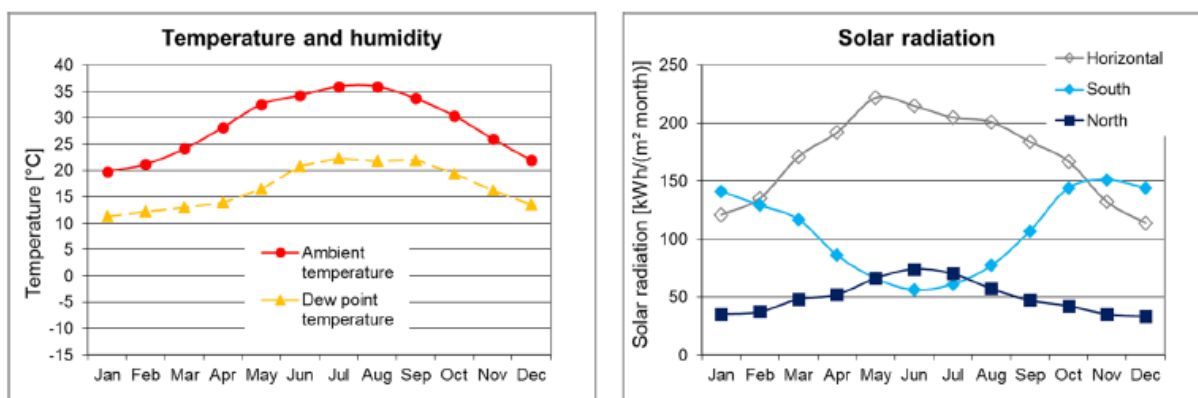
Na Slici 35. prikazan je tlocrt obiteljske kuće sa lokacijom klime uređaja snage 2 kW. Rezultati pokazuju da je bila dovoljna za hlađenje cijele rezidencije bez ikakvih problema. Unutarnja temperatura u spavaćim sobama i dnevnom boravku je bila ispod 26 °C. Sustav se koristio da pola snage i bila je dovoljna za hlađenje, ovu činjenicu treba uzeti u obzir zbog mogućnosti hlađenja zgrade bez neželjene buke. Izmjerena potrošnja za grijanjem nakon obnove je smanjena za 95% u usporedbi sa izvornom kućom [27].



Slika 35. Lokacija klimatskog uređaja na tlocrtu [27]

### 3.5. Vruća klima

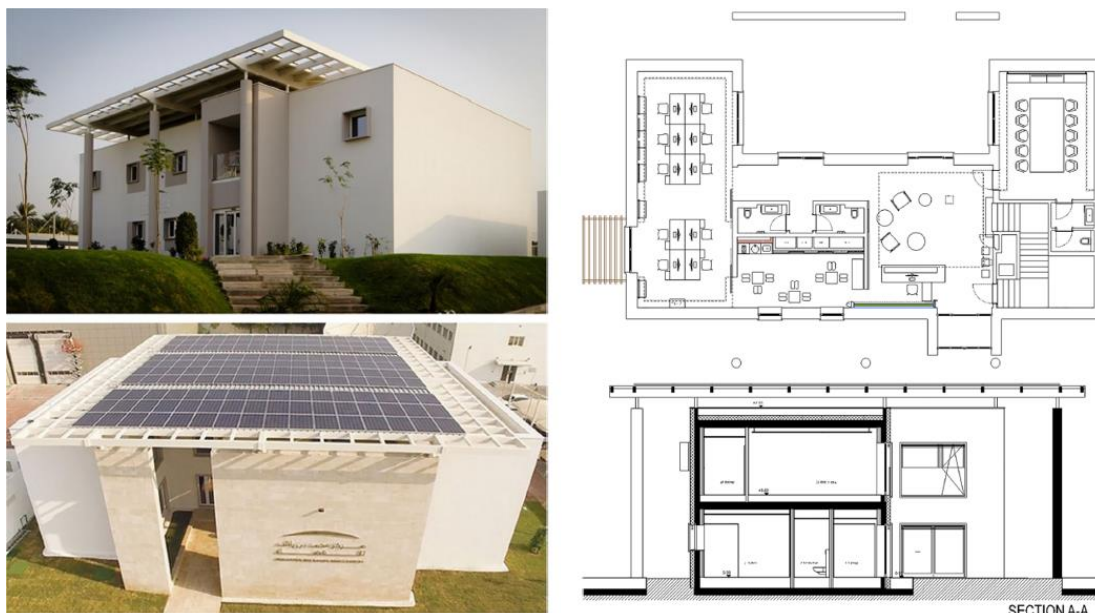
Vruću klimu karakteriziraju visoke temperature tijekom cijele godine s minimalnim promjenama između godišnjih doba. Često uključuje sušna razdoblja i visok stupanj sunčevog zračenja. Dubai je smješten u vrućem klimatskom pojasu gdje su i u zimskom periodu prosječne temperature oko 20 °C. Tradicionalne kuće ponekad trebaju grijanja zimi, dok nije neuobičajeno da se sustavi za hlađenje koriste tijekom cijele godine. Na Slici 36. prikazani su njegovi klimatski podaci. Na lijevom grafu je prikazana vanjska temperatura i temperatura rosišta. Prosječna vanjska temperatura preko ljeta zna dosežati 35 °C dok temperatura rosišta doseže 23 °C. Na desnom grafu je prikaz solarnog zračenja koje na južnoj fasadi zimi zna iznositi 150 kWh/m<sup>2</sup> mjesečno, dok u ljetnom razdoblju sjeverna fasada prima više solarnog zračenja. Pasivno solarnim strategijama se može značajno smanjiti potreba za grijanjem u ovoj klimatskoj zoni [27].



Slika 36. Prikaz klimatskih podataka za Dubai [27]

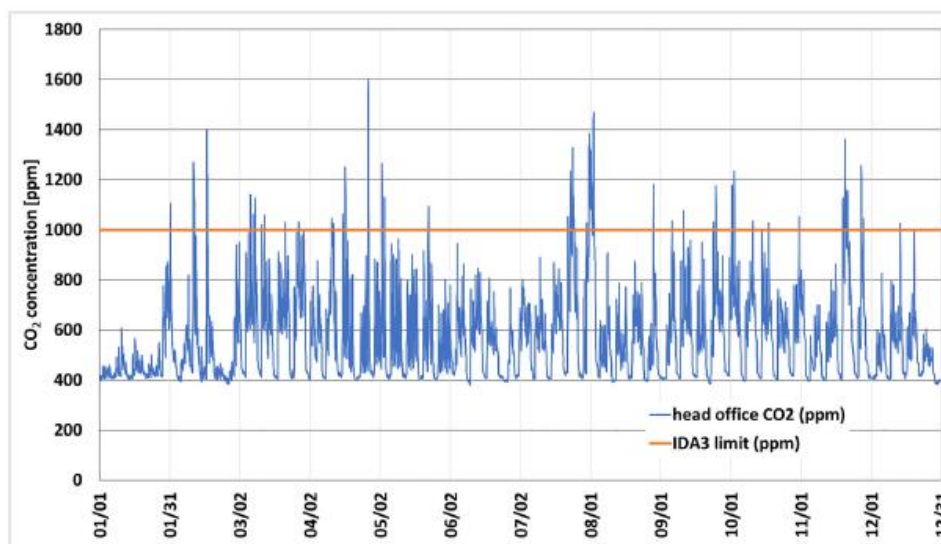
Na Slici 37. prikazan je centar za svemirska istraživanja Mohameda bin Rashida u Dubaiju koji se sastoji od dvije nadzemne etaže s korisnom površinom od 411 m<sup>2</sup> i faktorom oblika 0,58. Zgrada je izgrađena u blizini neizgrađenog područja te nije pogođena efektom toplinskog otoka. Sadržaj vlage u zraku je iznosio do 25 g/kg, ali relativna udaljenost od mora omogućuje smanjenje u odnosu za zgradu uz obalu. Istočno i zapadno pročelje gotovo nemaju otvora, dok južno pročelje podsjeća na koncept unutarnjeg dvorišta koji je tipičan za arhitekture toplih klima. Ukupno 65% staklene površine se koncentrira na unutarnje dvorište koje je zaštićeno pomoću fotonaponskog polja na ravnom krovu koji učinkovito djeluje kao sjenilo te sa vanjskim betonskim zidom. takav dizajn omogućuje niska direktna radijacijska opterećenja uz istovremeno korištenje prirodnog difuznog svjetla. Zgrada je izgrađena s konstrukcijom od

drva pomoću tehnologije platformskog okvira s prefabriciranim elementima kako bi se smanjila količina rada na gradilištu. Mehanički sustav je usredotočen na hlađenje te se hladnoća proizvodi pomoću pumpe voda/voda s vanjskom suhom klimom. Rashlađena voda ima projektiranu temperaturu protoka od 7 °C. Instalirano je podno grijanje s projektiranom temperaturom protoka od 20 °C kako bi se estrih održao dovoljno hladnim oko 23 °C. Na taj način se omogućuje niža prosječna zračna temperatura čime se poboljšava temperaturna udobnost. Električni sustav se temelji na automatizacije zgrade s HDL protokolom. Koriste se venecijanske zavjese koje su automatizirane da se potpuno zatvore nakon radnog vremena, te sustav prekida napajanje elektroničkog sustava kako bi se izbjegli gubici u pripravnosti. Proizvodnja električne energije se odvija pomoću polikristalnim silikonskim modulima povezanim s električnim spremnikom. Kombinacijom ta dva sustava omogućuje se energetska neovisnost [27].



Slika 37. Pasivna kuća u Dubaiju sa tlocrtnom i presjekom [27]

Sustav za rekuperaciju topline uspijeva aktivno osiguravati dobru kvalitetu unutarnjeg zraka, zbog sposobnosti razrjeđenja sadržaja ugljičnog dioksida. Na Slici 38. je prikazan graf količine ugljičnog dioksida kroz godišnji period koji treba biti ispod 1000 ppm. Može se primjetiti da su rijetki slučajevi kada se prelazi ta granica dok je najviša iznosila 1600 ppm u petom mjesecu.



Slika 38. Prikaz količine ugljičnog dioksida u godišnjem periodu [27]

### 3.6. Usporedba

Pasivna kuća je standard energetske učinkovitosti zasnovan na performansama koji vrijedi za sve klimatske zone svijeta. Kriterij se ostvaruje pomoću različitih sredstava koji ovise o vrsti zgrade, zakonskim uvjetima, lokaciji zgrade dizajnerskim idejama arhitekata te prioritetima klijenata.

Tablica 2. prikazuje preporuku za svojstva građevinskih elemenata u različitim klimatskim zonama. S povećanjem temperature potrebno je koristiti materijale s manjom vrijednošću koeficijenta prolaska topline kako bi se postigao standard pasivne kuće. Kod vlažnih ljeta nije prigodno koristiti sustav za rekuperaciju topline već sustav za rekuperaciju energije zbog mogućnošću razmjene vlage. Također su u tablici zadane i preporuke za tip staklene površine. kako bi se najefikasnije iskoristila solarna energija i poboljšalo prirodno osvjetljenje.

Tablica 2. Preporuka za svojstva građevinskih elemenata (prema [27])

Klimatska zona	Uprozora [W/(m <sup>2</sup> K)]	Uzid/krov [W/(m <sup>2</sup> K)]	HRV učinkovitost [%]	Staklena površina
Artička	0.45	0.09	80	Vakum ili četveroslojno low-e staklo
Hladna	0.65	0.12	80	Trostruko ili četveroslojno low-e staklo
Umjereno hladna	0.85	0.15	75	Trostruko low-e staklo
Umjereno topla	1.05	0.3	75	Trostruko low-e staklo
Topla	1.25	0.5	/	Dvostruko low-e staklo
Vruća	1.25	0.5	/	Dvostruko staklo sa solarnom zaštitom
Jako vruća	1.05	0.25	/	Trostruko staklo sa solarnom zaštitom



Tablica 3. prikazuje prosječne temperature i solarne radijacijske vrijednosti tijekom zimskih (plavi dio) i ljetnih (crveni dio) mjeseci u različitim klimatskim zonama. Podjela mjeseca je uzeti prema normi HRN EN 13790 gdje siječanj, veljača, ožujak, travanj, listopad, studeni i prosinac spadaju u zimske mjesece. Može se primijetiti da je solarna radijacija na južnoj strani zgrade veća te je bolja za zagrijavanje u hladnijim područjima dok je u toplijim klimama potrebno efikasno zasjenjivati fasadu kako ne bi došlo do pregrijavanja.

Tablica 3. Temperaturni čimbenici u različitim klimatskim zonama (Autor: Ivan Čule)

KLIMA	GRAD	TEMPERATURA (°C)		SOLARNA RADIJACIJA		
		VANJSKA	ROSIŠTA	HORIZONTALNA	JUŽNA	SJEVERNA
HLADNA	HUOSTON	-1.29	-6.64	81.43	107.14	20.00
UMJERENO HLADNA	DARMSTADT	4.71	2.00	52.86	55.00	22.86
UMJERENO TOPLA	ZHUOZHOU	6.57	-6.93	72.14	77.86	16.43
TOPLA	ATENA	11.86	7.50	97.14	106.43	23.57
VRUĆA	DUBAI	24.29	14.14	147.86	132.14	41.43

KLIMA	GRAD	TEMPERATURA (°C)		SOLARNA RADIJACIJA		
		VANJSKA	ROSIŠTA	HORIZONTALNA	JUŽNA	SJEVERNA
HLADNA	HUOSTON	18.90	11.50	168.00	99.00	43.00
UMJERENO HLADNA	DARMSTADT	16.60	10.80	138.00	82.00	53.00
UMJERENO TOPLA	ZHUOZHOU	25.20	15.80	162.00	88.00	47.00
TOPLA	ATENA	24.80	13.90	205.00	102.00	43.00
VRUĆA	DUBAI	34.50	20.70	205.00	72.00	61.00

Tablica 4. pokazuje da su pasivne kuće postigle uštedu energije od 60 do 90% u usporedbi s konvencionalnim novogradnjama s istom uporabom te još veću u usporedbi s postojećim građevinskim fondom. Gdje su primijenjene strategije pasivnog hlađenja zgrade su pokazale izvrsne performanse s minimalnim vanjskim toplinskim opterećenjima tijekom ljeta. Visoko izolirane zgrade pokazale su se učinkovitije u pružanju ljetne udobnosti u usporedbi s konvencionalnim zgradama. U vrućim klimatskim zonama pasivne kuće i dalje zahtijevaju energetske učinkovitu aktivnu klimatizaciju.

Tablica 4. Ukupna energetska učinkovitost pasivnih zgrada (Autor: Ivan Čule)

LOKACIJA	UKUPNA ENERGETSKA UŠTEDA (%)
HUDSON	88
DARMTSADT	91
ZHUOZHOU	57
ATENA	82








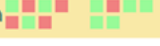









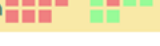







## 4. HLAĐENJE PASIVNE KUĆE TIJEKOM LJETNIH MJESECI

Analizirat će se izvedba modela zgrade koji je primjeren za pasivne kuće građene u hladnim zonama. Pomoću programa Meteonorm prikupljeni su klimatski podaci za odabrane gradove omogućavajući preciznu analizu u različitim klimatskim zonama. Prema međunarodnom standardu HRN EN ISO 13790 koji služi za izračunavanje energetske potrebe za grijanje i hlađenje izračunata je potrebna energija koristeći program Microsoft Excel. Sve tablice u nastavku ovog radu su proračunate i izrađene od strane autora.

### 4.1. Odabir gradova

Gradovi koji su analizirani u proračunu su Rijeka, Oslo, Houston, Dubai i Ponta Delgada. Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće Rijeka i Ponta Delgada pripadaju istoj klimatskoj zoni kako bi se provjerile moguće varijacije unutar zone. Slika 39. prikazuje gradove sa njihovim meteorološkim stanicama i specifičnim podacima poput geografske širine, dužine i visini.

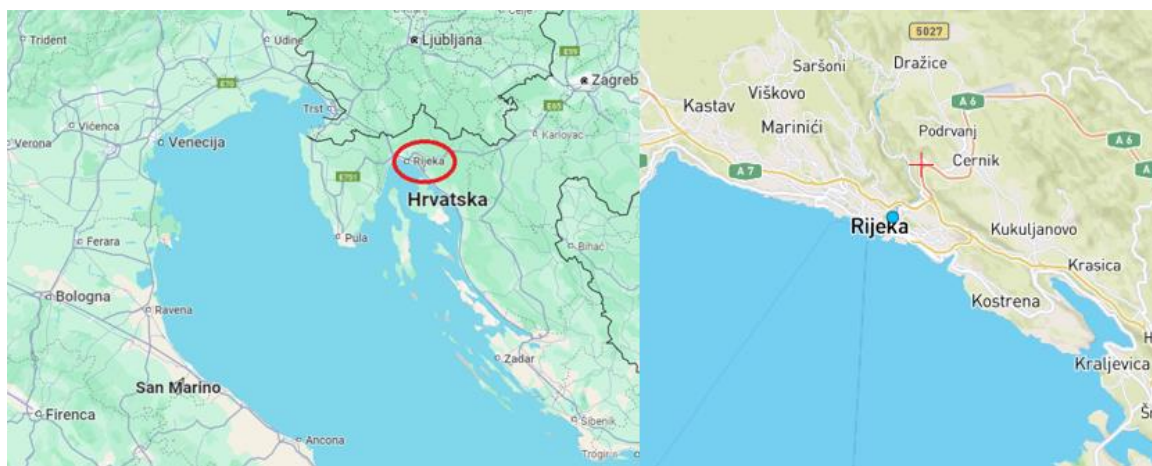
5 of 100 locations selected

<b>Oslo-blindern</b>	60,0°N / 10,7°E, 94 m	 
Weather station w/o global radiation		 
<b>Dubai Intl Airp.</b>	25,3°N / 55,3°E, 5 m	 
Weather station w/o global radiation		 
<b>Houston Airp. TX</b>	30,0°N / -95,4°E, 29 m	 
Weather station		 
<b>Rijeka/Kogala</b>	45,3°N / 14,5°E, 125 m	 
Weather station w/o global radiation		 
<b>Ponta Delgada</b>	37,8°N / -25,7°E, 36 m	 
Weather station		 

Slika 39. Prikaz odabranih gradova preko Meteonorma sa geografskim podacima (Autor: Ivan Čule)

### 4.1.1. Rijeka

Grad Rijeka se nalazi na sjeverozapadnoj obali Jadranskog mora u Hrvatskoj na  $45,3^{\circ}$  N geografske širine i  $14,5^{\circ}$  E geografske širine. Na Slici 40. prikazana je makro lokacija (lijeva slika) i mikro lokacija (desna slika) grada Rijeke. Na desnoj slici plavim kružićem je označena meteorološka postaja Kozala.



Slika 40. Makro i mikro lokacija grada Rijeke (Autor: Ivan Čule)

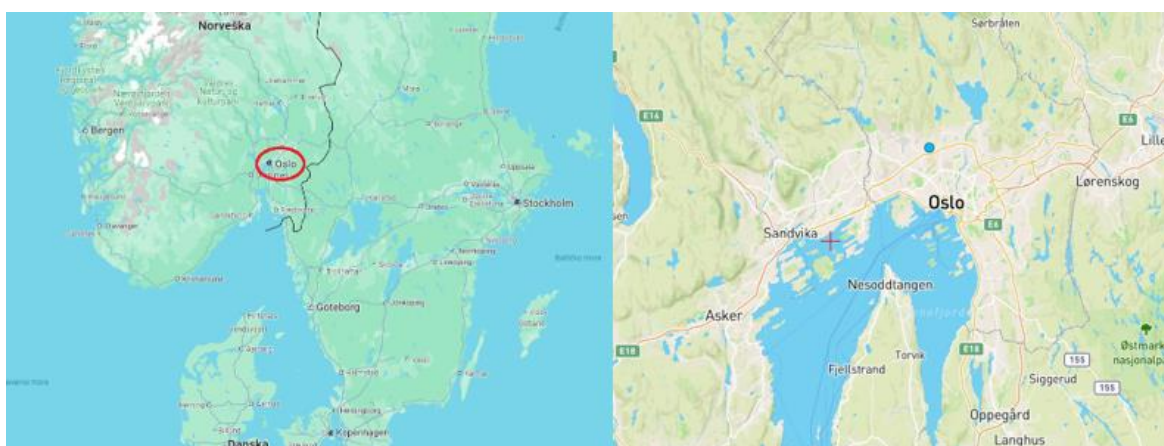
Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće Rijeka pripada umjereno toploj klimatskoj zoni. U Tablici 5. prikazani su klimatski podaci iz Meteodorma za grad Rijeku poput globalne horizontalne iradijacije ( $Gh$ ), difuzne horizontalne iradijacije ( $Dh$ ), direktne normalne iradijacije ( $Bn$ ), temperature zraka ( $Ta$ ), temperature rosišta ( $Td$ ) i brzine vjetra ( $FF$ ).

Tablica 5. Klimatski podaci za Rijeku

Ljetni mjeseci	$Gh$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$Dh$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$Bn$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$Ta$ °C	$Td$ °C	$FF$ m/s
Svibanj	165	89	120	18.5	10.6	1.8
Lipanj	190	84	157	23.2	13.7	1.8
Srpanj	192	81	171	25.4	14.3	1.9
Kolovoz	169	70	163	25.3	14.6	1.9
Rujan	107	54	98	20.1	12	1.9
	164.6	75.6	141.8	22.5	13.04	1.86

### 4.1.2. Oslo

Oslo je glavni grad Norveške i nalazi se na njegovom jugoistočnom dijelu na 60,0° N geografske širine i 10,7° E geografske širine. Na Slici 41. prikazana je makro lokacija (lijeva slika) i mikro lokacija (desna slika) Osla. Na desnoj slici plavim kružićem je označena meteorološka stanica prema kojoj su dobiveni rezultati u tablici \_.



Slika 41. Makro i mikro lokacija Osla (Autor: Ivan Čule)

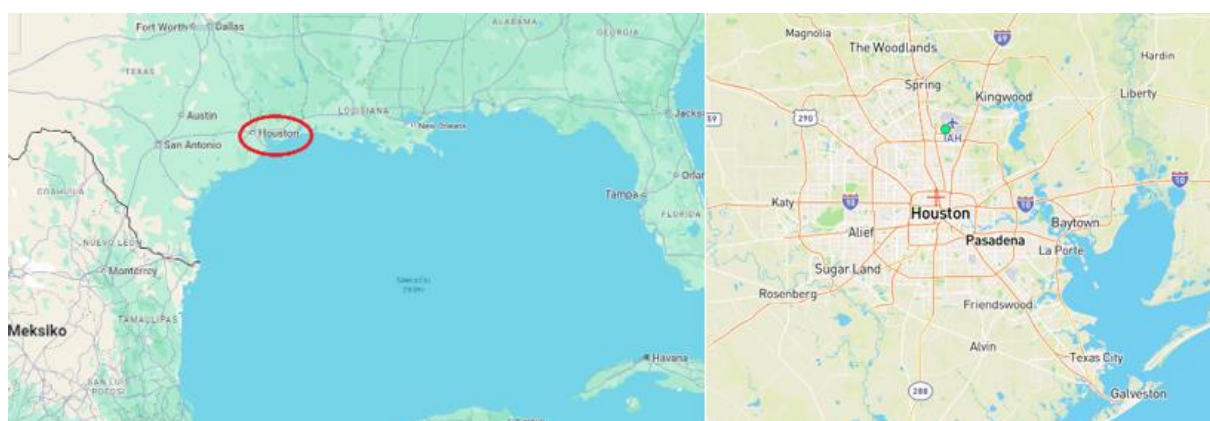
Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće Oslo pripada hladnoj klimatskoj zoni. U tablici 6. prikazani su klimatski podaci iz Meteodorma za Oslo. Može se primijetiti da je temperatura zraka puno niža nego kod Rijeke dok je iradijacija slične jačine.

Tablica 6. Klimatski podaci za Oslo

Ljetni mjeseci	Gh (kWh/m <sup>2</sup> )	Dh (kWh/m <sup>2</sup> )	Bn (kWh/m <sup>2</sup> )	Ta °C	Td °C	FF m/s
Svibanj	157	77	157	11.9	4	2.9
Lipanj	170	81	166	15.5	7.2	2.9
Srpanj	165	81	155	17.9	11.2	2.6
Kolovoz	126	60	133	16.4	10.9	2.6
Rujan	81	37	113	12.3	7.3	2.7
	139.8	67.2	144.8	14.8	8.12	2.74

### 4.1.3. Houston

Houston se nalazi u južnom dijelu SAD-a na  $30,0^{\circ}$  N geografske širine i  $-95,4^{\circ}$  E geografske širine. Na Slici 42. prikazana je makro lokacija (lijeva slika) i mikro lokacija (desna slika) Osla.



Slika 42. Makro i mikro lokacija grada Houstona (Autor: Ivan Čule)

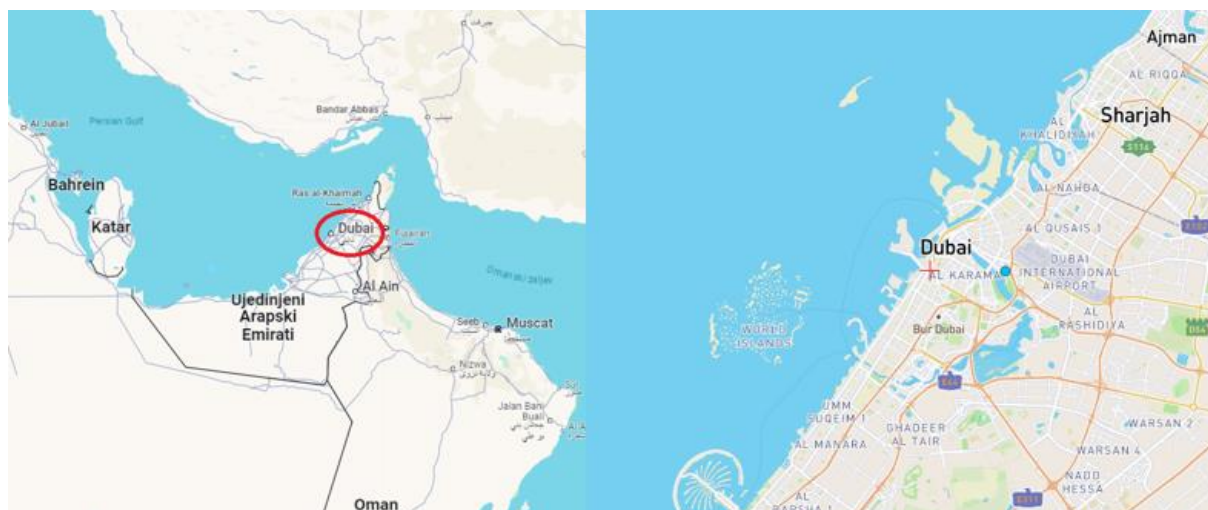
Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće Houston pripada toploj klimatskoj zoni. U Tablici 7. prikazani su klimatski podaci iz Meteorodorma za Houston. Može se primijetiti da je temperatura zraka i rosišta veća nego kod grada Rijeke.

Tablica 7. Klimatski podaci za Houston

Ljetni mjeseci	Gh (kWh/m <sup>2</sup> )	Dh (kWh/m <sup>2</sup> )	Bn (kWh/m <sup>2</sup> )	Ta °C	Td °C	FF m/s
Svibanj	169	88	115	24.8	19	3.9
Lipanj	178	84	133	27.8	22	3.1
Srpanj	191	86	150	28.7	22.8	2.6
Kolovoz	169	91	112	28.9	22.7	2.6
Rujan	152	69	126	26.3	20.6	2.8
	171.8	83.6	127.2	27.3	21.42	3

#### 4.1.4. Dubai

Dubai se nalazi u Ujedinjenim Arapskim Emiratima na Bliskom Istoku na  $25,3^{\circ}$  N geografske širine i  $55,3^{\circ}$  E geografske širine. Na Slici 43. prikazana je makro lokacija (lijeva slika) i mikro lokacija (desna slika) Dubaija.



Slika 43. Makro i mikro lokacija Dubaija (Autor: Ivan Čule)

Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće Dubai se nalazi u vrućoj klimatskoj zoni. U Tablici 8. prikazani su klimatski podaci iz Meteorodroma za Dubai. Može se primijetiti da je temperatura zraka u ovoj tablici veća nego u ostalim gradovima.

Tablica 8. Klimatski podaci za Dubai

Ljetni mjeseci	Gh (kWh/m <sup>2</sup> )	Dh (kWh/m <sup>2</sup> )	Bn (kWh/m <sup>2</sup> )	Ta °C	Td °C	FF m/s
Svibanj	226	88	180	32.5	16.4	3.9
Lipanj	222	99	156	34.3	20.7	3.8
Srpanj	214	103	142	36.3	22.1	3.9
Kolovoz	205	101	133	36.3	21.7	3.9
Rujan	187	69	168	34	22	3.6
	210.8	92	155.8	34.68	20.58	3.82

#### 4.1.5. Ponta Delgada

Ponta Delgada se nalazi na Azorskom otočju na otoku Sao Miguel u Portugalu na  $37,8^{\circ}$  N geografske širine i  $-25,7^{\circ}$  E geografske širine. Na Slici 44. prikazana je makro lokacija (lijeva slika) i mikro lokacija (desna slika) Sao Miguela. Na desnoj slici zelenim kružićem je označena meteorološka postaja Ponta Delgada.



Slika 44. Makro i mikro lokacija Ponta Delgade (Autor: Ivan Čule)

Prema klimatskoj klasifikaciji za pasivne kuće Ponta Delgada nalazi se u umjereno toploj klimatskoj zoni kao i grad Rijeka. U Tablici 9. prikazani su klimatski podaci iz Metodorma za Ponta Delgadu. Može se primijetiti da je temperatura zraka malo niža nego kod Rijeke dok je temperatura rosišta viša.

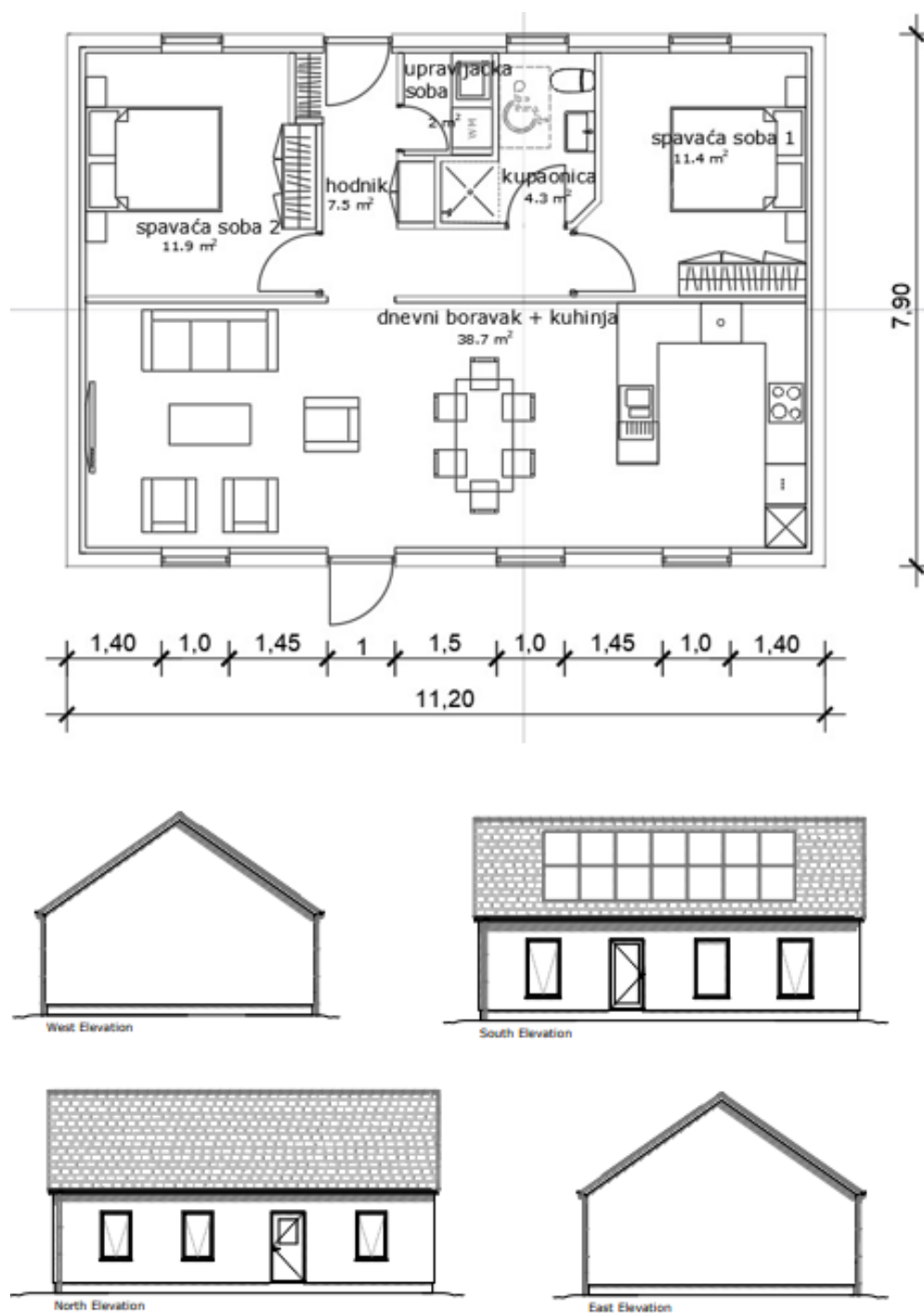
Tablica 9. Klimatski podaci za Ponta Delgada

Ljetni mjeseci	Gh (kWh/m <sup>2</sup> )	Dh (kWh/m <sup>2</sup> )	Bn (kWh/m <sup>2</sup> )	Ta °C	Td °C	FF m/s
Svibanj	195	79	172	16.5	12.9	4.3
Lipanj	196	86	160	18.7	15.3	4
Srpanj	199	78	181	20.9	17.2	3.5
Kolovoz	187	75	170	22.1	18.2	3.6
Rujan	144	62	137	21.4	17.4	3.8
	184.2	76	164	19.92	16.2	3.84

## 4.2. Podaci o objektu

Pasivna kuća koja je poslužila kao model za analizu potrošnje energije u ovom radu projektirana je prema standardima za hladnu klimatsku zonu. Kuća ima jednostavan pravokutan dizajn koji je karakterističan za niskoenergetske kuće dok kosi krov služi za maksimalizaciju sunčeve energije preko solarnih panela čiji dobici u ovom radu nisu računati. Fasada ima bijelu boju koja u toplijim klimama služi za reflektiranje većeg dijela sunčeve svjetlosti i pri tome štiti od pregrijavanja ljeti. Na južnoj i sjevernoj fasadi nalaze se vrata i tri prozora čiji su okviri napravljeni od aluminijskih elemenata, površina prozornih elemenata na južnoj fasadi iznosi  $6 \text{ m}^2$  dok na sjevernoj  $3 \text{ m}^2$ . Zapadno i istočno pročelje nemaju građevinskih otvora. Pasivna kuća je podijeljena na dva dijela u kojemu je prizemlje grijani dio dok se potkrovlje smatra ne grijanim područjem. Neto podna površina grijanog dijela zgrade iznosi  $75,8 \text{ m}^2$  dok je neto obujam u kojemu se nalazi grijani zrak  $176,43 \text{ m}^3$ . Objekt je izgrađen od pretežno laganih građevinskih materijala. Pod je izveden na tlu i temeljen je na šljunku, iznad temeljne betonske ploče nalazi se  $300 \text{ mm}$  izolacije sa sveukupnom toplinskom provodljivošću poda od  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Zidovi su  $145 \text{ mm}$  drvenog okvira sa  $145 \text{ mm}$  izolacije sa mogućom dogradnjom od  $70 - 190 \text{ mm}$  izolacije. Toplinska provodljivost zida iznosi  $0,10 - 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Krov je dvostrešan i proteže se u smjeru sjever - jug sa toplinskom provodljivošću  $0,06 - 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Prozori su troslojni sa niskom emisijom stakla i plemenitim plinom između (argon) stakala sa toplinskom provodljivošću od  $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$  dok vrata imaju  $0,6 - 0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Pasivna kuća mora sadržavati ventilacijski sustav sa izmjenom topline te njena učinkovitost u ovom radu je uzeta da iznosi  $88\%$ . Slika 45. prikazuje tlocrt i pročelja analizirane pasivne kuće. Objekt je kompaktnog oblika i sastoji se od dvije spavaće sobe, dnevnog boravka i kuhinje, kupaonice, hodnika i upravljačke sobe.





Slika 45. Tlocrt i presjek pasivne kuće (prema [28])

### 4.3. Godišnja potrebna toplinska energija za hlađenje

Proračun je izveden na temelju podataka za ljetne mjesece kako bi se analizirali uvjeti u razdoblju najintenzivnijeg hlađenja. Koristile su se mjesečni vrijednosti umjesto satnih zbog nedostupnosti podataka zbog čega rezultati mogu odstupati. Unutarnja postavna temperatura za hlađenje prostora unutar zone iznosi 24 °C. Potrebna toplinska energija za hlađenje proračunske zone:

$$Q_{C,nd} = Q_{C,gn} - \eta_{C,ls} * Q_{C,ht} \quad (\text{kWh}) \quad (1)$$

$Q_{C,nd}$  – potrebna toplinska energija za hlađenje (kWh)

$Q_{C,gn}$  – ukupni toplinski dobici zgrade u periodu hlađenja: ljudi, rasvjeta, uređaji, solarni dobici (kWh)

$Q_{C,ht}$  – ukupno izmijenjena toplinska energija u periodu hlađenja (kWh)

$\eta_{C,ls}$  – faktor iskorištenja toplinskih gubitaka kod hlađenja (-)

Pri čemu se ukupni toplinski dobici zgrade u periodu hlađenja sastoje od unutarnjih dobitaka i Sunčeva zračenja dok se ukupno izmijenjena toplinska energija sastoji od izmijenjena toplinska energija transmisijom i potrebne toplinske energije za ventilaciju.

$$Q_{C,nd} = Q_{int} + Q_{sol} - \eta_{C,ls} * (Q_{Tr} + Q_{Ve}) \quad (\text{kWh}) \quad (2)$$

$Q_{int}$  – unutarnji toplinski dobici zgrade: ljudi, rasvjeta i uređaji (kWh)

$Q_{sol}$  – toplinski dobici od Sunčeva zračenja (kWh)

$Q_{Tr}$  – izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu (kWh)

$Q_{Ve}$  – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu (kWh)

#### 4.4. Ukupni toplinski dobitci za promatrani proračunski period

Prema sljedećoj formuli se računaju ukupni toplinski dobitci zgrade u periodu hlađenja:

$$Q_{C,gn} = Q_{int} + Q_{sol} \quad (\text{kWh}) \quad (3)$$

$Q_{C,gn}$  – ukupni toplinski dobitci zgrade u periodu hlađenja: ljudi, rasvjeta, uređaji, solarni dobitci (kWh)

$Q_{int}$  – unutarnji toplinski dobitci zgrade: ljudi, rasvjeta i uređaji (kWh)

$Q_{sol}$  – toplinski dobitci od Sunčeva zračenja (kWh)

Pri čemu se unutarnji toplinski dobitci zgrade računaju prema sljedećoj formuli:

$$Q_{int} = \frac{q_{spec} * A_f * t}{1000} \quad (\text{kWh}) \quad (4)$$

$q_{spec}$  – specifični unutarnji dobitak po  $\text{m}^2$  korisne površine ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$A_f$  – neto podna površina grijanog dijela zgrade ( $\text{m}^2$ )

$t$  – trajanje proračunskog razdoblja (h)

Za specifični unutarnji dobitak uzeta je vrijednost od  $5 \text{ W}/\text{m}^2$  pošto se radi o stambenom prostoru, neto podna površina grijanog dijela zgrade iznosi  $75,80 \text{ m}^2$ . Za ljetne mjesece svibanj, srpanj i kolovoz (744 sati u mjesecu) dobivena je vrijednost  $281,98 \text{ kWh}$ , dok za lipanj i rujanj (720 sati u mjesecu) ta vrijednost iznosi  $272,88 \text{ kWh}$ .

Za proračun toplinskih dobitaka od Sunčevog zračenja koristi se sljedeća formula:

$$Q_{sol} = \left[ \sum_k \phi_{sol,mn,k} \right] * t + \left[ \sum_l (1 - b_{tr,l}) * \phi_{sol,mn,u,l} \right] * t \quad (\text{kWh}) \quad (5)$$

$\phi_{sol,mn,k}$  – srednji toplinski tok od sunčeva izvora kroz k-ti građevni dio u grijani prostor (W)

$\Phi_{sol,mn,u,l}$  – srednji toplinski tok od sunčeva izvora kroz l-ti građevni dio u susjedni negrijani prostor (W)

$b_{tr,l}$  – faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom l prema HRN EN ISO 13789 (-)

$t$  – trajanje proračunskog razdoblja (h)

Faktor smanjenja za susjedni negrijani prostor s unutarnjim toplinskim izvorom iznosi 0,1. Računata su tri različita srednja toplinska toka od sunčeva izvora kroz građevinu, prolaz kroz otvore i zatvorene dijelove u grijanom dijelu i prolaz kroz zatvorene dijelove u negrijanom dijelu. Koristila se sljedeća formula pri kojoj se  $F_{sh,ob}$  izuzeo za zatvorene dijelove.

$$\Phi_{sol} = F_{sh,ob} * I_{S,k} * A_{sol} - F_{r,k} * \Phi_{r,k} \quad (W) \quad (6)$$

$F_{sh,ob}$  – faktor zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja (-)

$I_{S,k}$  – srednji toplinski tok od sunčevog zračenja na površinu građevnog dijela k za mjesečni proračun ( $W/m^2$ )

$A_{sol}$  – efektivna površina na koju upada sunčevo zračenje ( $m^2$ )

$F_r$  – faktor oblika između elementa i neba (-)

$\Phi_r$  – toplinski tok zračenjem od površine prema nebu (W)

Prilikom računanja faktora zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja potrebno je uračunati faktore zasjenjenja od konfiguracije terena te zbog gornjih i bočnih elemenata prozorskih otvora. Koristila se sljedeća formula za izračunavanje:

$$F_{sh,ob} = F_{hor} * F_{ov} * F_{fin} \quad (-) \quad (7)$$

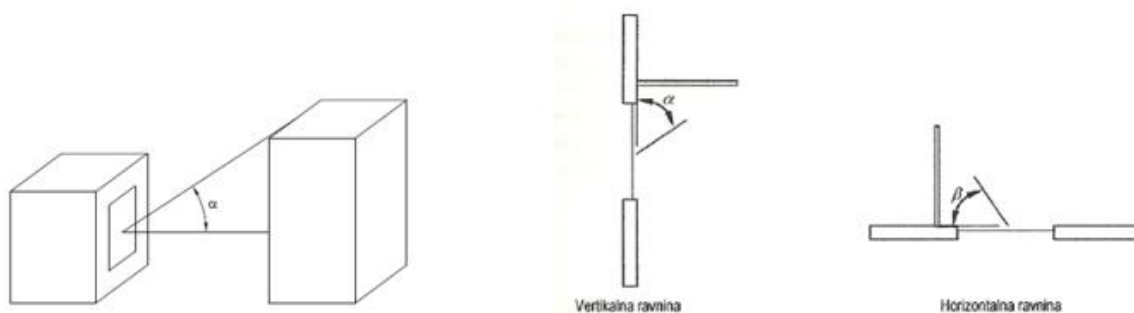
$F_{sh,ob}$  – faktor zasjenjena od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja (susjedne zgrade, konfiguracije terena, vanjski dijelovi otvora prozora) (-)

$F_{hor}$  – parcijalni faktor zasjenjenja zbog konfiguracije terena u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu horizonta i zemljopisnoj širini (-)

$F_{ov}$  - parcijalni faktor zasjenjenja zbog gornjih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu gornjeg zasjenjenja  $\alpha$ , zemljopisnoj širini (-)

$F_{fin}$  - parcijalni faktor zasjenjenja zbog bočnih elemenata prozorskog otvora u ovisnosti o orijentaciji plohe, kutu bočnog prozorskog zasjenjenja  $\beta$ , zemljopisnoj širini (-)

Odabrana pasivna kuća nije imala nikakve dodatne (zaštitne elemente) prozorskih otvora te vrijednosti tih koeficijenata iznosi 1. Na Slici 46. Prikazane su vizualne reprezentacije koeficijenata u kojoj lijevi dio slike predstavlja  $F_{hor}$ , srednji  $F_{ov}$  te desni  $F_{fin}$ .



Slika 46. Virtualne reprezentacije koeficijenata  $F_{hor}$ ,  $F_{ov}$  i  $F_{fin}$  [29]

U Tablici 10. su prikazani rezultati faktora zasjenjenja od vanjskih prepreka direktnom upadu sunčevog zračenja. Rezultati su dobiveni preko Tablice 1.12 za standarda HRN EN ISO 13790. Gradovi kojima vrijednost nije mogla bit iščitana zbog nedostupne geografske širine koristila se linearna interpolacija za dobivanje rezultata. Može se primijetiti da sjeverna strana sadrži veće koeficijente jer je više zasjenjenija od južne.

Tablica 10. Rezultati faktora zasjenjenja

$F_{shob}$	Oslo		Houston		Dubai		Ponta Delgada		Rijeka	
	J	S	J	S	J	S	J	S	J	S
svibanj	0.68	0.95	0.83	0.92	0.92	0.94	0.62	0.85	0.62	0.94
lipanj	0.49	0.89	0.72	0.91	0.75	0.99	0.46	0.89	0.46	0.90
srpanj	0.49	0.89	0.72	0.91	0.75	0.99	0.46	0.89	0.46	0.90
kolovoz	0.68	0.95	0.83	0.92	0.92	0.94	0.62	0.85	0.62	0.94
rujan	0.94	0.99	0.92	0.94	0.97	0.95	0.85	0.95	0.85	0.98

Za izračun srednjeg toplinskog toka od sunčevog zračenja na površinu građevnog dijela potrebno je poznavati geografsku širinu i dužinu lokacije, dan u godini kad se vrši obračun te difuznu i direktnu iradijaciju. Deklinacija Sunca je kut između ekvatorijalne ravnine Zemlje i linije koja spaja centar Zemlje i centar Sunca i dobiva se preko dana u godini. Pomoću geografske širine i deklinacije Sunca izračuna se kut zenita koji predstavlja kut između Sunčevih zraka i pravca okomitog na Zemljinu površinu. Direktna i difuzna radijacija se dobiva kao ovisnost kuta zenita sa iradijacijama dok se srednji toplinski tok od sunčevog zračenja na površinu građevnog dijela dobiva kao zbroj difuzne i direktne radijacije. Tablica 11. Predstavlja *Isk* za proračune grijanog dijela dok Tablica 12. Za proračune negrijanog dijela. Mjerne jedinice su u  $W/m^2$ .

Tablica 11. Srednji toplinski tok od sunčeva zračenja za grijani dio

Mjesec/Grad	Oslo			Houston			Dubai			Ponta Delgada			Rijeka		
	J	I/Z	S	J	I/Z	S	J	I/Z	S	J	I/Z	S	J	I/Z	S
svibanj	253	150	103	159	138	118	162	145	106	196	143	106	201	149	120
lipanj	254	187	113	142	151	117	150	172	125	180	171	119	203	175	117
srpanj	234	180	109	140	155	116	146	170	131	167	163	105	196	173	109
kolovoz	200	128	81	154	145	122	159	159	113	179	144	101	195	142	94
rujan	176	113	51	156	108	96	166	109	86	181	102	86	139	88	75

Tablica 12. Srednji toplinski tok od sunčeva zračenja za ne grijani dio

Mjesec/Grad	Oslo			Houston			Dubai			Ponta Delgada			Rijeka		
	J	I/Z	S	J	I/Z	S	J	I/Z	S	J	I/Z	S	J	I/Z	S
svibanj	225	150	103	233	138	118	307	145	118	278	143	106	228	149	120
lipanj	265	187	113	262	151	117	309	172	138	293	171	119	281	175	117
srpanj	248	180	109	276	155	116	288	170	138	299	163	105	285	173	109
kolovoz	191	128	81	236	145	122	273	159	136	275	144	101	254	142	94
rujan	129	113	51	222	108	96	272	109	96	216	102	86	159	88	75

Za izračun efektivne površine otvora  $k$  (prozirnog elementa) na koju upada sunčevo zračenje koristi se sljedeća formula:

$$A_{sol,k} = g_{gl+sh} * (1 - F_F) * A_{pr} \quad (m^2) \quad (8)$$

$$g_{gl+sh} = F_c * F_w * q_{\perp} \quad (-) \quad (9)$$

$F_F$  – udio ploštine prozorskog okvira u ukupnoj površini prozora

$g_{gl+sh}$  – ukupna propusnost Sunčeva zračenja kroz prozirne elemente s uključenom posmičnom zaštitom (-)

$A_{pr}$  – ukupna površina prozora ( $m^2$ )

$F_c$  – faktor smanjenja zbog sjene od pomičnog zasjenjenja (-)

$F_w$  – faktor smanjenja zbog ne okomitog upada sunčevog zračenja (-)

$q_{\perp}$  - stupanj propuštanja ukupnog zračenja okomito na ostakljenje kada pomično zasjenjenje nije uključeno (-)

Računate su vrijednosti za sjevernu i južnu stranu jer na istočnoj i zapadnoj ne postoje otvori.

$$A_{sol,k,sjever} = 0,1125 * (1 - 0,2) * 3 = 0,27 \quad (m^2)$$

$$A_{sol,k,jug} = 0,1125 * (1 - 0,2) * 6 = 0,54 \quad (m^2)$$

$$g_{gl+sh} = 0,25 * 0,9 * 0,5 = 0,1125$$

Prilikom proračuna uzete su vrijednosti za  $F_F = 0,2$  kako bi bila što veća staklena površina za što bolje toplinske performanse. Za napravu za zaštitu od sunčeva zračenja uzete su naprave s vanjske strane (žaluzine, lamele koje se mogu okretati, otraga provjetravano  $F_C = 0,25$  prema tablici 1.8. Uzeto je trostruko izolirajuće staklo s dva stakla niske emisije (dvije Low-E obloge)  $q_{\perp} = 0,5$  prema tablici 1.9. Faktor smanjenja zbog ne okomitog upada sunčevog zračenja iznosi 0,9. Površina prozora sa prozorskim okvirom iznosi  $9 m^2$ .

Za izračun efektivne površine neprozirnog građevinskog elementa na koju upada sunčevo zračenje koristi se sljedeća formula:

$$A_{sol,c} = \alpha_{s,c} * R_{se} * U_c * A_c \quad (m^2) \quad (10)$$

$$A_{sol,l} = \alpha_{s,c} * R_{se} * U_c * A_c \quad (m^2) \quad (11)$$

$\alpha_{s,c}$  – bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent zida/vrata (-)

$R_{se}$  – plošni toplinski otpor vanjske površine zida/vrata ( $(m^2K)/W$ )

$U_c$  – koeficijent prolaska topline zida/vrata ( $W/(m^2K)$ )

$A_c$  – projicirana površina zida/vrata ( $m^2$ )

$$A_{sol,c,sjever} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 30,04) + (0,4 * 0,04 * 0,7 * 2,8) = 0,08 \quad (m^2)$$

$$A_{sol,c,jug} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 27,04) + (0,4 * 0,04 * 0,7 * 2,8) = 0,07 \quad (m^2)$$

$$A_{sol,c,istok} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 25,28) = 0,04 \quad (m^2)$$

$$A_{\text{sol},c,\text{zapad}} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 25,28) = 0,04 \quad (\text{m}^2)$$

$$A_{\text{sol},l,\text{sjever}} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 58) = 0,09 \quad (\text{m}^2)$$

$$A_{\text{sol},l,\text{jug}} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 58) = 0,09 \quad (\text{m}^2)$$

$$A_{\text{sol},l,\text{istok}} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 5,47) = 0,01 \quad (\text{m}^2)$$

$$A_{\text{sol},l,\text{zapad}} = (0,4 * 0,04 * 0,1 * 5,47) = 0,01 \quad (\text{m}^2)$$

Pri čemu indeks  $c$  predstavlja grijani dio dok  $l$  negrijani. Koristi se zid svijetle boje kojem je bezdimenzijski apsorpcijski koeficijent 0,4 prema Tablici 1.15 za standard HRN EN ISO 13790. Prema Tablici 3.2 (HRN EN ISO 13790) koristi se vrijednost plošnog toplinskog otpora vanjske površine zida od 0,04 (m<sup>2</sup>K)/W. Vrata su izrađena od PVC-a i bijele su boje te imaju iste koeficijente kao zid. Uzet je koeficijent prolaska topline kroz zid u vrijednosti od 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) dok za vrata iznosi 0,7 W/(m<sup>2</sup>K). Projicirana površina zida iznosi 107,64 m<sup>2</sup>, a vrata 5,6 m<sup>2</sup>. Ukupna vrijednost efektivne površine neprozirnog elementa iznosi 0,23 m<sup>2</sup>.

Faktor oblika između elementa i neba je za zidove i prozore uzet 0,5 dok je za krov koji je pod nagibom od 35 °C linearnom interpolacijom dobivena vrijednost 0,8.

Toplinski tok zračenjem od površine prema nebu se dobiva prema sljedećoj formuli:

$$\Phi_{r,k} = R_{se} * U_c - A_c * h_r * \Delta\Phi_{er} \quad (\text{W}) \quad (11)$$

$\Phi_r$  – toplinski tok zračenjem od površine prema nebu (W)

$R_{se}$  – plošni toplinski otpor vanjske površine zida/krova ((m<sup>2</sup>K)/W)

$U_c$  – koeficijent prolaska topline zida/krova prema (W/(m<sup>2</sup>K))

$A_c$  – projicirana površina zida (m<sup>2</sup>)

$h_r$  – vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem (W/(m<sup>2</sup>K))

$\Delta\Phi_{er}$  – prosječna temperaturna razlika vanjske temperature zraka i temperature neba (K)

Tablica 13. prikazuje toplinski tok zračenjem prema nebu.  $\Phi_{r,k}$  predstavlja zračenje prozora dok  $\Phi_{r,c}$  zbroj ukupnog zračenja neprozirnih elemenata.  $\Phi_{r,l}$  se povezuje sa negrijanim dijelom zgrade. Prema Tablici 3.2 iz standarda HRN EN ISO 13790 uzet je  $R_{se}$  od 0,04 (m<sup>2</sup>K)/W.  $U_c$  za zid i krov uzet 0,1 W/(m<sup>2</sup>K), vrata 0,7 W/(m<sup>2</sup>K), a za prozore 0,85 W/(m<sup>2</sup>K). Zbog korištenja



stakla s niskom emisijom premaza smanjuje se gubitak topline zračenjem, vanjski koeficijent prijelaza topline zračenjem iznosi manje od zidova i vrata. Prosječna temperaturna razlika vanjske temperature zraka i temperature neba za Rijeku iznosi 10 K, zbog sličnih klimatskih uvjeta isto je uzeto za Houston i Ponta Delgadu. Zbog hladnije klime za Oslo je uzeto 10 K, dok je za toplije odnosno Dubai uzeto 8 K.

Tablica 13. Rezultati toplinskog toka zračenjem prema nebu

Toplinski tok	Strana svijeta/Grad	Oslo	Dubai	Rijeka/Houston/Ponta Delgada
$\phi_{r,k}$	sjever	15.30	8.16	10.20
	jug	30.60	16.32	20.40
	istok	0.00	0.00	0.00
	zapad	0.00	0.00	0.00
$\phi_{r,c}$	sjever	134.03	71.48	89.35
	jug	125.93	67.16	83.95
	istok	68.26	36.40	45.50
	zapad	68.26	36.40	45.50
$\phi_{r,l}$	sjever	34.80	18.56	23.20
	jug	34.80	18.56	23.20
	istok	14.77	7.88	9.85
	zapad	14.77	7.88	9.85

Proračun toplinskih dobitaka od sunčevog zračenja  $Q_{sol}$  (kWh) su prikazane u Tablici 14.

Tablica 14. Rezultati toplinskih dobitaka od sunčevog zračenja

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	119.06	108.20	120.76	104.15	109.18
lipanj	103.26	94.44	108.68	92.34	96.83
srpanj	98.88	97.54	110.92	87.67	95.94
kolovoz	90.96	108.29	121.00	97.17	100.39
rujan	84.58	100.27	111.26	102.14	78.66

Ukupni toplinski dobitci zgrade u periodu hlađenja  $Q_{c,gn}$  (kWh) su prikazani u Tablici 15.

Tablica 15. Rezultati ukupnih toplinskih dobitaka

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	401.04	390.17	402.73	386.12	391.16
lipanj	376.14	367.32	381.56	365.22	369.71
srpanj	380.86	379.52	392.90	369.64	377.91
kolovoz	372.94	390.26	402.98	379.15	382.36
rujan	357.46	373.15	384.14	375.02	351.54

#### 4.5. Izmijenjena toplinska energija proračunske zone za promatrani period

Izmijenjena toplinska energija se dobiva kao zbroj energije transmisijom i ventilacijom.

$$Q_{C,ht} = Q_{Tr} + Q_{Ve} \quad (\text{kWh}) \quad (12)$$

$Q_{Tr}$  - izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu (kWh)

$Q_{Ve}$  - izmijenjena toplinska energija ventilacijom za proračunsku zonu (kWh)

##### 4.5.1. Transmisijom

Izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu se računa prema idućim izrazima:

$$Q_{Tr} = \frac{H_{Tr}}{1000} * (\varnothing_{int,C} - \varnothing_e) * t \quad (\text{kWh}) \quad (13)$$

$H_{Tr}$  - koeficijent transmisijske izmjene topline proračunske zone (W/K)

$\varnothing_{int,C}$  - unutarnja proračunska temperatura hlađene zone (°C)

$\varnothing_e$  - srednja vanjska temperatura za proračunski period (°C)

Za izračun koeficijenta transmisijske izmjene topline proračunske zone koristi se sljedeća formula:

$$H_{Tr} = H_D + H_U * H_{g,m} + H_A \quad (\text{W/K}) \quad (14)$$

$H_D$  - koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu (W/K)

$H_U$  - koeficijent transmisijske izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu (W/K)

$H_{g,m}$  - koeficijent transmisijske izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec (W/K)

$H_A$  - koeficijent transmisijske izmjene topline prema susjednoj zgradi (W/K)

Za izračun koeficijenta transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu koristi se sljedeća formula:

$$H_D = \sum_k A_k * (U_k + \Delta U_{TM}) \quad (\text{W/K}) \quad (15)$$

$A_k$  - površina građevinskog elementa ( $\text{m}^2$ )

$U_k$  - koeficijent prolaska topline pojedinog građevinskog elementa ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

$\Delta U_{TM}$  - dodatak za pasivne kuće ( $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ )

Pri čemu su se za izračun koristili građevinski elementi s površinama zadanim u  $\text{m}^2$  i koeficijentom prolaska topline potrebnim da zadovolji pasivnu gradnju. Vrijednost dodatka za pasivne kuće iznosi 0. U Tablici 16. su prikazane korištene vrijednosti u W/K.

Tablica 16. Koeficijent transmisijske izmjene topline prema vanjskom okolišu

	Površina elementa	Koeficijent prolaska topline
zid	46.52	0.1
vrata	5.6	0.7
prozor	9	0.85
<b>Hd</b>	<b>16.22</b>	

Za izračun koeficijenta transmisijske izmjene topline kroz negrijani/nehlađeni prostor prema vanjskom okolišu koristi se sljedeća formula:

$$H_U = b_u * H_{iu} \quad (\text{W/K}) \quad (16)$$

$b_u$  - faktor smanjenja temperaturne razlike (-)

$H_{iu}$  - koeficijent transmisijske i ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)

Faktor smanjenja temperaturne razlike dobivamo pomoću formule:

$$b_U = \frac{H_{Tr,ue} + H_{Ve,ue}}{H_{Tr,iu} + H_{Ve,iu} + H_{Tr,ue} + H_{Ve,ue}} \quad (-) \quad (17)$$

$H_{Tr,iu}$  - koeficijent transmisijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)

$H_{Ve,iu}$  - koeficijent ventilacijske izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora (W/K)

$H_{Tr,ue}$  - koeficijent transmisivne izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (W/K)

$H_{Ve,ue}$  - koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (W/K)

Koeficijent  $H_{Ve,iu}$  može se zanemariti jer ne postoji ventilacijska izmjena topline na tom području. Za izračun koeficijenta transmisivne izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša te koeficijenta transmisivne izmjene topline između grijanog i negrijanog prostora koristili su se građevinski elementi s površinama zadanim u  $m^2$  i koeficijentom prolaska topline potrebnim da zadovolji pasivnu gradnju. U Tablici 17. su prikazane korištene vrijednosti.

Tablica 17. Koeficijenti transmisivne izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša te grijanog i negrijanog prostora

	Površina elementa	Koeficijent prolaska topline
krov	116	0.1
$H_{tr,ue}$	11.6	
stropna ploča	88.48	0.1
$H_{tr,iu}$	8.848	

$$H_{iu} = H_{Tr,iu} + H_{Ve,iu} \quad (\text{W/K}) \quad (18)$$

Koeficijent  $H_{Tr,ue}$  iznosi nula jer ne postoji transmisivna izmjena topline na tom području.

$$H_{iu} = 8,848 + 0 = 8,848 \quad (\text{W/K})$$

Koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša se računa prema sljedećoj formuli:

$$H_{Ve,ue} = \frac{\rho_a * c_{p,a} * \tilde{V}_{ue}}{3600} \quad (\text{W/K}) \quad (19)$$

$\rho_a$  – gustoća zraka ( $\text{kg/m}^3$ )

$c_{p,a}$  – specifični toplinski koeficijent zraka ( $\text{J}/(\text{kgK})$ )

$\tilde{V}_{ue}$  – volumni protok zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

Volumni protok zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša se računa prema sljedećoj formuli:

$$\tilde{V}_{ue} = V_{ue} * n_{ue} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (20)$$

$V_{ue}$  – volumen zraka negrijanog prostora ( $\text{m}^3$ )

$n_{ue}$  – broj izmjena zraka između negrijanog prostora i vanjskog okoliša (za pasivne kuće vrijednost mora biti manja od 0,6)

Pri čemu volumen zraka u negrijanom prostoru, u ovom slučaju tavan iznosi  $107,17 \text{ m}^3$ , dok broj izmjene zraka je dobiven prema HRN EN 13789 iz Tablice 1.2. i iznosi 0,1.

$$\tilde{V}_{ue} = 107,17 * 0,1 = 10,717 \quad (\text{m}^3/\text{h})$$

Tablica 18. prikazuje koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša ( $H_{ve,ue}$ ). Mjerna jedinica je u W/K.

Tablica 18. Koeficijent ventilacijske izmjene topline između negrijanog prostora i vanjskog okoliša

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	3.70	3.53	3.13	3.67	3.62
lipanj	3.61	3.43	3.08	3.62	3.52
srpanj	3.55	3.39	3.04	3.56	3.49
kolovoz	3.57	3.38	3.05	3.52	3.49
rujan	3.66	3.46	3.09	3.55	3.52

Na temelju dobivenih rezultata može se izračunati faktor smanjenja temperaturne razlike koji za sve gradovi iznosi oko 0,63. Jedini faktor koji predstavlja razliku je gustoća zraka.

Tablica 19. prikazuje koeficijent transmisivne izmjene topline kroz negrijani prostor prema vanjskom okolišu ( $H_u$ ). Mjerna jedinica je u W/K.

Tablica 19. Koeficijent transmisivne izmjene topline kroz negrijani prostora prema vanjskom okolišu

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	5.61	5.58	5.53	5.60	5.60
lipanj	5.59	5.57	5.52	5.60	5.58
srpanj	5.59	5.56	5.52	5.59	5.58
kolovoz	5.59	5.56	5.52	5.58	5.58
rujan	5.60	5.57	5.52	5.59	5.58

Sljedeća formula prikazuje izračun koeficijenta transmisije izmjene topline prema tlu za proračunski mjesec:

$$H_{g,m} = \frac{\phi_m}{\vartheta_{int,m} - \vartheta_{e,m}} \quad (\text{W/K}) \quad (21)$$

$\phi_m$  – toplinski tok izmjene topline s tlom za proračunski mjesec (W)

$\vartheta_{int,m}$  – unutarnja postavna temperatura za proračunski mjesec (°C)

$\vartheta_{e,m}$  – srednja vanjska temperatura za proračunski mjesec (°C)

Pretpostavlja se konstantan toplinski tok prema tlu kroz cijeli dan:  $\vartheta_h = \vartheta_m$

$$\phi_m = H_g (\vartheta_{int} - \vartheta_e) - H_{pi} (\vartheta_{int} - \vartheta_{int,m}) + H_{pe} (\vartheta_e - \vartheta_{e,m}) \quad (\text{W}) \quad (22)$$

$H_g$  – stacionarni koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu (W/K)

$H_{pi}$  – unutarnji periodički koeficijent transmisije izmjene topline (W/K)

$H_{pe}$  – vanjski periodički koeficijent transmisije izmjene topline (W/K)

$\vartheta_{int,C}$  - unutarnja proračunska temperatura hlađene zone (°C)

$\vartheta_e$  - srednja vanjska temperatura za proračunski period (°C)

$\vartheta_{int,m}$  – unutarnja temperatura za proračunski mjesec m (°C)

$\vartheta_{e,m}$  – vanjska temperatura za proračunski mjesec m (°C)

$m$  – broj mjeseca

Pri izračunu stacionarnog koeficijenta transmisije izmjene prema tlu koristio se sljedeći izraz:

$$H_g = A * U + P * \psi_g \quad (\text{W/K}) \quad (23)$$

$A$  – površina poda (m<sup>2</sup>)

$U$  – koeficijent prolaska topline između unutarnjeg i vanjskog prostora (W/(m<sup>2</sup>K))

$P$  – izloženi opseg poda (m)

$\psi_g$  – duljinski koeficijent prolaska topline za spoj zida i poda (W/mK)

Površina poda iznosi 75,8 m<sup>2</sup>, uzet je koeficijent prolaska topline 0,1 W/(m<sup>2</sup>K) kako bi zadovoljili potrebe pasivnih kuća, izloženi opseg poda iznosi 35,8 m dok duljinski koeficijent prolaska topline smije iznositi najviše 0,01 W/mK (prema Senegačnik).

$$H_g = 75,8 \cdot 0,1 + 35,8 \cdot 0,01 = 7,938 \quad (\text{W/K})$$

Koeficijenti  $H_{pi}$  i  $H_{pe}$  računaju se na način da je pod izgrađen na tlu prema sljedećim formulama:

$$H_{pi} = A \frac{\lambda}{d_t} * \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{\delta}{d_t}\right)^2 + 1}} \quad (\text{W/K}) \quad (24)$$

$$H_{pe} = 0.37 \cdot P \cdot \lambda \cdot \ln\left(\frac{\delta}{d_t} + 1\right) \quad (\text{W/K}) \quad (25)$$

$A$  – površina poda (m<sup>2</sup>)

$\lambda$  – koeficijent toplinske provodljivosti tla

$d_t$  – ekvivalentna debljina poda (m)

$\delta$  – periodička dubina prodiranja (m)

$P$  – izloženi opseg poda (m)

Pri čemu se ekvivalentna debljina poda računa prema sljedećem izrazu:

$$d_t = \omega + \lambda(R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (\text{m}) \quad (26)$$

$\omega$  – ukupna debljina zida (m)

$R_{si}$  – plošni unutarnji toplinski otpor (m<sup>2</sup>K)/W

$R_f$  – toplinski otpor podne konstrukcije (m<sup>2</sup>K/W)

$R_{se}$  – plošni vanjski toplinski otpor (m<sup>2</sup>K/W)

Zid je debljine 0,3 metara, dok se za koeficijent toplinske provodljivosti tla uzima 2 W/(m K).  $R_{si}$  i  $R_{se}$  su uzeti iz Tablice 3.2 prema HRN EN 13790. Prema tehničkom propisu koji se odnosi na racionalnu uporabu energije i toplinsku zaštitu provodljivosti u zgradama (Tablice 3.1 prema HRN EN 13790) izračunat je  $R_f$  kao omjer debljine materijala i toplinske provodljivosti. Dobivene vrijednosti su u m<sup>2</sup>K/W. Tablica 20. prikazuje izračunat toplinski otpor konstrukcije poda.

Tablica 20. Prikaz toplinskog otpora konstrukcije

Redni broj	Građevni materijal	Debljina (m)	Toplinska provodljivost (W/(mK))
2.01	armirani beton	0.15	2.6
3.19	cementni estrih	0.1	1.6
4.05	drvo	0.02	0.15
5.01	bitumenska traka s uloškom staklenog voala	0.001	0.23
6.04	pijesak, šljunak, tucanik (drobljenac)	0.15	0.81
7.04	tvrdna poliuretanska pjena (PUR)	0.3	0.025
Rf		12.44	

Prema Formuli 26. dobiveni rezultat iznosi 25,45 metara.

$$d_t = 0,3 + 2 * (0,13 + 12,44 + 0) = 25,45 \text{ (m)}$$

Periodička dubina prodiranja je uzeta pomoću prodiranja ovisno o vrsti tla iz Tablice 1.3 prema HRN EN 13789 za kategoriju 2 (pijesak ili šljunak) i iznosi 3,2 metra. Uvrštavajući u Formulu 24. i 25. za koeficijente  $H_{pi}$  i  $H_{pe}$  dobiveni su sljedeći rezultati:

$$H_{pi} = 75,8 * \frac{2}{25,45} * \sqrt{\frac{2}{\left(1 + \frac{3,2}{25,45}\right)^2 + 1}} = 5,60 \text{ (W/K)}$$

$$H_{pe} = 0.37 \cdot 35,8 \cdot 2 \cdot \ln\left(\frac{3,2}{25,45} + 1\right) = 3,14 \text{ (W/K)}$$

Tablica 21. prikazuje rezultate konstantnog toplinskog toka prema tlu kroz cijeli dan  $\phi_m$  (W) koji iznosi:

Tablica 21. Rezultat toplinskog toka prema tlu

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	76.66	-23.82	-83.40	37.65	18.99
lipanj	65.37	-33.23	-89.05	30.75	4.24
srpanj	57.84	-36.05	-95.33	23.85	-2.66
kolovoz	62.54	-36.68	-95.33	20.08	-2.35
rujan	75.41	-28.52	-88.11	22.28	13.97



Tablica 22. prikazuje izračun koeficijenta transmisije izmjene topline  $H_{g,m}$  (W/K) prema tlu za proračunski mjesec.

Tablica 22. Koeficijent transmisije izmjene topline prema tlu

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	6.34	29.77	9.81	5.02	3.45
lipanj	7.69	8.74	8.65	5.80	5.31
srpanj	9.48	7.67	7.75	7.69	1.90
kolovoz	8.23	7.49	7.75	10.57	1.80
rujan	6.45	12.40	8.81	8.57	3.58

Pasivna zgrada nije povezana s drugim zgradama već je samostojeća zbog čega koeficijent transmisije izmjene topline prema susjednoj zgradi  $H_A$  nije potrebno računati jer je jednak nuli.

U Tablici 23. nalazi se izračun koeficijenta transmisije izmjene topline proračunske zone ( $H_{tr}$ ). Mjerna jedinica je u W/K.

Tablica 23. Koeficijent transmisije izmjene topline proračunske zone

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	51.74	182.42	70.45	44.35	35.55
lipanj	59.24	64.92	63.95	48.69	45.84
srpanj	69.18	58.90	58.97	59.20	26.82
kolovoz	62.21	57.86	58.97	75.21	26.29
rujan	52.32	85.35	64.87	64.08	36.22

U Tablici 24. je prikazana izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu  $Q_{tr}$  (W/K).

Tablica 24. Izmijenjena toplinska energija transmisijom za proračunsku zonu

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	354.16	-447.88	-559.83	134.62	39.67
lipanj	392.44	-154.25	-491.72	143.02	49.51
srpanj	473.55	-144.62	-468.55	179.71	29.93
kolovoz	425.80	-142.07	-468.60	228.31	29.34
rujan	346.54	-202.79	-498.85	188.23	39.12

#### 4.5.2. Ventilacijom

Izmijenjena toplinska energija ventilacijom za proračunsku zonu se računa prema idućim izrazima:

$$Q_{Ve} = \frac{H_{Ve}}{1000} * (\varnothing_{int,C} - \varnothing_e) * t \quad (\text{kWh}) \quad (27)$$

$Q_{Ve}$  – potrebna toplinska energija za ventilaciju/klimatizaciju za proračunsku zonu (kWh)

$H_{Ve}$  – koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone (W/K)

$\varnothing_{int,C}$  – unutarnja proračunska temperatura hlađene zone (°C)

$\varnothing_e$  – srednja vanjska temperatura za proračunski period (°C)

$t$  – trajanje proračunskog razdoblja (h)

Za izračun koeficijenta ventilacijske izmjene topline proračunske zone koristi se sljedeća formula:

$$H_{Ve} = H_{ve,inf} + H_{ve,win} + H_{C,ve,mech} \quad (\text{W/K}) \quad (28)$$

$H_{ve,inf}$  – potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka (W/K)

$H_{ve,win}$  – koeficijent ventilacijske izmjene uslijed otvaranja prozora (W/K)

$H_{C,ve,mech}$  – koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije kod hlađenja zraka (W/K)

Pri čemu se potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka računa prema sljedećem izrazu:

$$H_{ve,inf} = n_{inf} * V + \rho_a * c_{p,a} \quad (\text{W/K}) \quad (29)$$

$n_{inf}$  – broj izmjena zraka uslijed infiltracije ( $\text{h}^{-1}$ )

$V$  – volumen zraka u zoni ( $\text{m}^3$ )

$\rho_a$  – gustoća zraka ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_{p,a}$  – specifični toplinski kapacitet zraka ( $\text{J}/(\text{kgK})$ )

Broj izmjena zraka uslijed infiltracije koje je uzet maksimalan za pasivne kuće  $0,6 \text{ h}^{-1}$  potrebno je pomnožit sa faktorom zaštićenosti zgrade od vjetra prema Tablici 1.6 (HRN EN ISO 13789 Tablica C.4). Smatra se da je izloženo više od jedne fasade vjetru i da je srednje zaklonjena pa mu pripada koeficijent 0,07. Gustoća zraka ovisi o lokaciji, ali je u prosjeku uzeta oko  $1,2 \text{ kg/m}^3$ , specifični toplinski koeficijent iznosi  $0,279 \text{ Wh/(kgK)}$ . Volumen zraka u grijanoj zoni iznosi  $176,43 \text{ m}^3$ .

U Tablici 25. je prikazana potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka za odabrane gradove i mjesece  $H_{ve,inf}$  (W/K).

Tablica 25. Potrebna toplinska energija uslijed infiltracije vanjskog zraka

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	2.56	2.44	2.16	2.54	2.50
lipanj	2.50	2.37	2.13	2.50	2.44
srpanj	2.45	2.34	2.10	2.46	2.41
kolovoz	2.46	2.34	2.11	2.43	2.41
rujan	2.53	2.39	2.13	2.45	2.43

Koeficijent ventilacijske izmjene uslijed otvaranja prozora se zanemario pošto se prozori kod pasivnih kuća rijetko otvaraju.

Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije/klimatizacije kod hlađenja zraka se računa preko sljedeće formule:

$$H_{c,ve,mech} = V_{vent} * \rho_a * c_{p,a} * (1 - \eta_{rek}) \quad (\text{W/K}) \quad (30)$$

$V_{vent}$  – volumen zraka koji se ventilira u zoni ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$\rho_a$  – gustoća zraka ( $\text{kg/m}^3$ )

$c_{p,a}$  – specifični toplinski kapacitet zraka ( $\text{J/(kgK)}$ )

$\eta_{rek}$  – učinkovitost rekuperatora

Volumen zraka koji se ventilira se dobije kao umnožak volumena grijanog dijela zgrade sa brojem izmjena zraka u prostoriji ACH koji je uzet 0,4. Učinkovitost rekuperatora je uzeta 88%.

Tablica 26. prikazuje koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije kod hlađenja zraka  $H_{c,ve,mech}$  (W/K).

Tablica 26. Koeficijent ventilacijske izmjene topline uslijed mehaničke ventilacije kod hlađenja zraka

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	2.92	2.79	2.47	2.90	2.86
lipanj	2.85	2.71	2.43	2.86	2.78
srpanj	2.80	2.68	2.40	2.81	2.76
kolovoz	2.82	2.67	2.41	2.78	2.76
rujan	2.89	2.74	2.44	2.80	2.78

Tablica 27. nam prikazuje koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone  $H_{ve}$  (W/K).

Tablica 27. Koeficijent ventilacijske izmjene topline proračunske zone

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	5.48	5.22	4.63	5.44	5.36
lipanj	5.35	5.07	4.55	5.36	5.22
srpanj	5.26	5.02	4.51	5.28	5.17
kolovoz	5.28	5.01	4.51	5.21	5.17
rujan	5.41	5.13	4.57	5.25	5.21

Tablica 28. nam prikazuje potrebnu toplinsku energiju za ventilaciju/klimatizaciju proračunske zone  $Q_{ve}$  (kWh).

Tablica 28. Potrebna toplinska energija za ventilaciju proračunske zone

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	37.51	-12.82	-36.79	16.51	5.99
lipanj	35.45	-12.05	-35.02	15.76	5.64
srpanj	35.99	-12.32	-35.80	16.02	5.77
kolovoz	36.14	-12.29	-35.87	15.83	5.77
rujan	35.86	-12.19	-35.16	15.42	5.63

#### 4.6. Izmijenjena toplinska energija proračunske zone za promatrani period

Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje  $\eta_{C,ls}$  računa se preko sljedeće formule:

$$\eta_{C,ls} = \frac{1 - y_C^{-a_C}}{1 - y_C^{-(a_C+1)}} \quad \text{za } y_C > 0 \quad (-) \quad (31)$$

$$\eta_{C,ls} = 1 \quad \text{za } y_C < 0 \quad (-) \quad (32)$$

$y_C$  - odnos toplinskih dobitaka i ukupne izmijenjene topline transmisijom i ventilacijom.

$$y_C = \frac{Q_{C,gn}}{Q_{C,ht}} \quad (-) \quad (33)$$

$a_C$  - bezdimenzijski numerički parametar koji uzima u obzir utjecaj toplinske inercije.

$$a_C = a_o + \frac{\tau}{\tau_{C,o}} \quad (-) \quad (34)$$

$\tau$  - vremenska konstanta zgrade (h)

$\tau_{C,o}$  - referentna vremenska konstanta za hlađenje (h)

Vrijednosti  $\tau_{C,o}$  i  $a_o$  preuzeti su iz HRN EN 13790 za mjesečni proračun. Tablica 29. prikazuje faktore iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje

Tablica 29. Faktor iskorištenja toplinskih gubitaka za hlađenje

Mjesec/Grad	Oslo	Houston	Dubai	Ponta Delgada	Rijeka
svibanj	0.51	1.00	1.00	0.72	0.90
lipanj	0.47	1.00	1.00	0.70	0.87
srpanj	0.43	1.00	1.00	0.65	0.91
kolovoz	0.45	1.00	1.00	0.61	0.92
rujan	0.48	1.00	1.00	0.65	0.89

#### 4.7. Izračun mjesečnih vrijednosti toplinske energije za hlađenje

Prilikom proračuna uzete su mjesečne vrijednosti umjesto satnih zbog nepristupačnosti podataka zbog čega rezultati mogu odstupati. Unutarnje prostorije su se hladile na temperaturu od 24 °C te gradovi u kojima je manja prosječna mjesečna temperatura od temperature hlađenja se izuzimaju iz rezultata jer se na njima vodio krivi proračun.

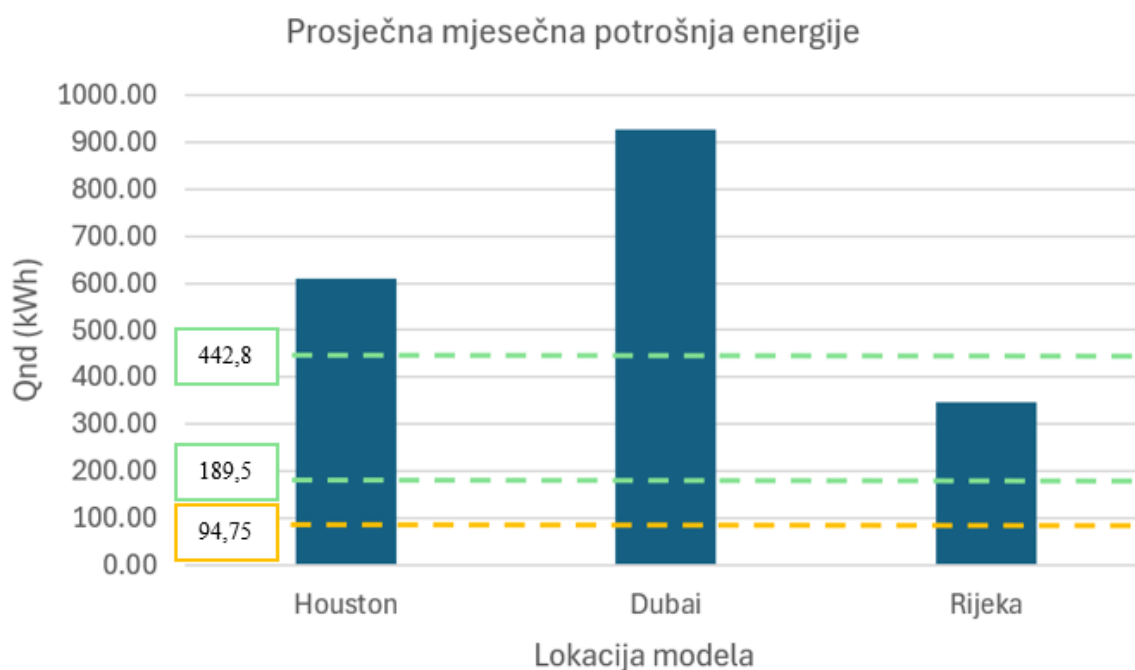
Tablica 30. prikazuje rezultate potrebne toplinske energije za hlađenje u kWh prema Formuli 1. Može se primijetiti da su gradovi Oslo i Ponta Delgada izuzeti iz proračuni dok su za grad Rijeku uključeni srpanj i kolovoz. Prosječna potrošnja toplinske energije za hlađenje kod Houstona iznosi 610,74 kWh, Dubajja 926,10 kWh te Rijeke 347,73 kWh. Maksimalna dozvoljena potrošnja za pasivne kuće je 15 kWh/m<sup>2</sup> godišnje. Neto podna površina hlađenog dijela zgrade iznosi 75,8 m<sup>2</sup> te nam ukupna mjesečna potrošnja ne smije iznositi više od 94,75 kWh. Odabrana pasivna kuća koristi vrstu gradnje koja je primjerena hladnim klimatskim

uvjetima. U drugim klimatskim zonama takva gradnja ne odgovara te se treba pridržavati specifičnih principa gradnje za svaku zonu. Gradnja ovakvog objekta u Rijeci ulazi u kategoriju s niskoenergetskim kućama koje troše  $60 \text{ kWh/m}^2$ , sa mjesečnom potrošnjom od  $379 \text{ kWh}$ .

Tablica 30. Potrebna toplinska energija za hlađenje

Mjesec/Grad	Houston	Dubai	Rijeka
svibanj	850.87	999.35	/
lipanj	533.62	908.30	/
srpanj	536.46	897.24	345.27
kolovoz	544.62	907.44	350.19
rujan	588.13	918.15	/
$Q_{c,nd}$	610.74	926.10	347.73

Na Slici 47 prikazani su rezultati u obliku grafa sa dodanom mjesečnom potrošnjom za pasivne kuće (narančasta linija) i niskoenergetskom potrošnjom (zelene linije). Može se primijetiti da se model u Rijeci nalazi između zelenih linija te pripada niskoenergetskoj gradnji dok gradovi Houston i Dubai ne pripadaju toj kategoriji.



Slika 47. Prosječna mjesečna potrošnja energije

## 5. ZAKLJUČAK

U ovom diplomskom radu prikazani su osnovni principi pasivnih kuća i proračun u kojoj je analiziran model pasivne kuće građen po zahtjevima za hladnu klimatsku zonu te njenu moguću primjenu u ostalim klimatskim zonama. Razvoj pasivnih kuća nastao je zbog potrebe za smanjenjem energetske potrošnje u građevinskom sektoru čime bi se ublažili negativni utjecaji na okoliš. Osnovni principi koji se trebaju pridržavati su toplinska izolacija, prozori, ventilacija s povratom topline, zrakonepropusnost zgrade i izostanak toplinskih mostova. U procesu izvođenja toplinske izolacije pažnju treba posvetiti dizajnu koji ne dopušta prisutnost toplinskih mostova. Pri gradnji temelja najčešće se koristi temeljna ploča zbog najlakšeg rješavanja toplinskih mostova. Kod zidova moguće je graditi s jako puno tipova konstrukcija, ali je poželjno ne mijenjati vrstu gradnje kako bi struktura imala ista termodinamičke vrijednosti što sprječava mogućnost pojave kondenzacije. Zidni, krovni i podni elementi trebaju težiti koeficijentu prolaska topline koji je između  $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$  i  $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Prozore je potrebno odabrati s višeslojnim staklima, preporučuju se troslojni sa komorama između njih ispunjenim plemenitim plinom poput argona ili kriptona. Ukupni prijenos topline mora biti manji od  $0,80 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Ventilacija s povratom topline se može smatrati i higijenskom ventilacijom zbog osiguravanja svježeg zraka, a pritom može uštediti do 90% topline iz ustajalog zraka kojeg se izvlači iz kuhinja i kupaonica. Gubitak topline kroz konstrukciju može iznositi za više od 30% ako se ne riješe toplinski mostovi. Za zrakonepropusnost je ključno da pri razlici tlakova od 50 Pa broj izmjena zraka u prostoru ne smije prijeći vrijednost od  $0,6 \text{ h}^{-1}$  za nove zgrade, a za projektne obnove  $1,0 \text{ h}^{-1}$ . Oblik zgrade je važan pri čemu kompaktnija zgrada lakše ispunjava energetske učinkovitost. Geometrijski oblici poput plosnatog kvadra i L - oblika nisu najpogodniji pri čemu je U - oblik potpuno neprikladan za izgradnju pasivnih kuća. Zgrade i neboderi puno lakše postižu tražene rezultate od samostojećih kuća. Dizajn strehe je ključan radi sprječavanja pregrijavanja preko ljetnih mjeseca te doprinosi topline i svjetline preko zimskih mjeseci. Utjecaj ima i krajolik pri čemu se listopadna drveća postavljaju na južnu stranu zbog stvaranja sjena tijekom ljeta i pružanja svjetlosti tijekom zime. Zimzeleno drveće se postavlja na sjevernu stranu zbog sprječavanja naleta hladnog vjetera tijekom zime. Osim ventilacije s povratom topline poželjno je koristiti i druge tehnologije koje koriste obnovljive izvore energije. Zemljani kolektori koriste konstantnu toplinu zemlje da ohlade dolazeći zrak u objekt tijekom ljetnih mjeseci i ugrije tijekom zimskih. Solarni paneli prikupljaju sunčevu energiju i pretvaraju u električnu koja se koristi za potrebe objekta.

Ovaj rad je ispitivao može li model pasivne kuće građen po zahtjevima za hladnu klimatsku zonu udovoljiti ostalim klimatskim zonama. Modeliranje potrošnje energije za ljetno hlađenje pasivnih kuća provedeno je u skladu s normom HRN EN ISO 13790. Svi potrebni klimatski podaci preuzeti su iz programa Meteonorm za gradove Rijeka i Ponta Delgada za umjereno toplu klimatsku zonu, Houston za toplu klimatsku zonu, Dubai za vruću klimatsku zonu te Oslo za hladnu klimatsku zonu. Oslo je uzet za provjeru točnosti proračuna prema HRN EN ISO 13790 dok su gradovi Rijeka i Ponta Delgada u svrhu moguće razlike u potrošnji energije kod iste klimatske zone. Prilikom proračun za ljetne mjeseci uzeti su mjesečni podaci zbog nepristupačnosti satnih podataka zbog čega su određeni rezultati odstupali. Iz tog razloga nije bilo moguće izračunati hlađenje za sve gradove čiji su mjeseci imali nižu prosječnu temperaturu od temperature hlađenja. Pasivna kuća nije imala nikakve dodatne zaštite elemente kod prozora što je utjecalo nepogodnije kod toplijih klimatskih zona. Rezultati su pokazali da niti jedan grad ne zadovoljava kriterije pasivne kuće. Rijeka je pogodnija za gradnju ovakvog objekta od gradova Houstona i Dubaija koji se nalaze u toplijim klimatskim zonama. Kada bi se proračunata količina energije trošila ravnomjerno tijekom cijele godine, gradnja ovakvog objekta u Rijeci ulazila bi u kategoriju niskoenergetskih kuća. Međutim kod toplijih klimatskih zona se tijekom zimskih mjeseci troši puno manje energije te postoji mogućnost da gradnja u Houstonu i Dubaiju može pripadati kategoriji niskoenergetskih kuća. Model pasivne kuće je imao solarne kolektore koji nisu uzeti u proračun, no njegovim dodavanjem bi se znatno smanjili energetske troškovi. Rad je prikazao da prilikom procesa projektiranja i gradnje pasivnih kuća važno je uskladiti dizajn sa klimatskim uvjetima.



## LITERATURA

- [1] Bere, J. (2019). *An Introduction to Passive House (1st ed.)*. RIBA Publishing.  
<https://doi.org/10.4324/9780429347696>, pristup 08.04.2024.
- [2] Ceesen.org, <https://ceesen.org/en/2024/01/12/passive-houses-basic-principles/>, pristup 08.04.2024.
- [3] Passiv.de, [https://passiv.de/en/02\\_informations/02\\_passive-house-requirements/02\\_passive-house-requirements.htm](https://passiv.de/en/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm), pristup 08.04.2024.
- [4] Gradnja\_kuce.com <https://gradnjakuce.com/pasivna-niskoenergetska-gradnja/pasivna-kuca-zasto-bi-to-bio-vas-odabir/>, pristup 11.04.2024.
- [5] Wikiwand.com, [https://www.wikiwand.com/hr/Niskoenergetska\\_kuća](https://www.wikiwand.com/hr/Niskoenergetska_kuća), pristup 11.04.2024.
- [6] Izgradnja\_kuce.com, <https://www.izgradnjakuce.com/dvoslojna-ili-troslojna-stakla-na-prozorima/>, pristup 11.04.2024.
- [7] Agc-glass.eu, <https://www.agc-glass.eu/en/sustainability/glass-sustainable-architecture/energy-saving-glass>, pristup 11.04.2024.
- [8] Mcsolar.hr, <https://mcsolar.hr/rekuperacija-zraka/>, pristup 12.04.2024.
- [9] Hines, J., Goldber, S., Butcher, B., Siddall, M., Jennings, P., Grant, N., Clarke, A., Mead, K., Parsons, C., Passivhaus Trust. (2015). *How to Build a Passivhaus: Rules of Thumb.*,  
<https://www.passivhaustrust.org.uk/UserFiles/File/Technical%20Papers/How%20to%20Build%20a%20Passivhaus%20-%20Rules%20of%20Thumb%20-%20compressed.pdf>, pristup 12.04.2024.
- [10] Modelur.com, <https://modelur.com/use-form-factor-to-reduce-energy-consumption-of-buildings/>, pristup 12.04.2024.
- [11] Localim\_pact\_design.ca, <https://localimpactdesign.ca/passive-house/>, pristup 12.04.2024.
- [12] Pmc\_architects.com, <https://www.pmcarchitects.com/sustainability-information-blog-content/windows-and-overhangs-in-passive-solar-heating>, pristup 18.04.2024.

- [13] Landscaping\_network.com, <https://www.landscapingnetwork.com/landscape-design/sustainable/solar.html>, pristup 18.04.2024.
- [14] Santamouris, M., Air Infiltration and Ventilation Centre. (2006). *Use of Earth to Air Heat Exchangers for Cooling.*, [https://www.aivc.org/sites/default/files/members\\_area/medias/pdf/VIP/VIP11\\_Ground\\_cooling.pdf](https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/VIP/VIP11_Ground_cooling.pdf), pristup 18.04.2024.
- [15] Solar\_reviews.com, <https://www.solarreviews.com/blog/active-passive-home-solar-heating-system>, pristup 18.04.2024.
- [16] Passive\_house\_plus.ie, <https://passivehouseplus.ie/articles/ventilation/solar-enhanced-ventilation?highlight=WyJzb2xhciIsInNvbGFyJ3MiLCInc29sYXliXQ==>, pristup 18.04.2024.
- [17] Senegačnik Zbašnik, M. (2009) *Pasivna kuća*. Zagreb: Sun arh.
- [18] Aprion.eu, <https://www.aprion.eu/pasivne-kuće-1>, pristup 26.04.2024.
- [19] Egradnja.hr, <https://egradnja.hr/nekretnine/posjetili-smo-gradiliste-prve-pasivne-kuće-u-hrvatskoj-koja-će-dobiti-certifikat-passive>, pristup 26.04.2024.
- [20] Blog.passivehouse-international.org, <https://blog.passivehouse-international.org/benefits-passive-house-buildings/>, pristup 26.04.2024.
- [21] + Felmer, G.; Morales-Vera, R.; Astroza, R.; González, I.; Puettmann, M.; Wishnie, M. A; Lifecycle Assessment of a Low-Energy Mass-Timber Building and Mainstream Concrete Alternative in Central Chile. *Sustainability* **2022**, 14, 1249. <https://doi.org/10.3390/su14031249>, pristup 25.02.2022.
- [22] Local\_impact\_design.ca, <https://localimpactdesign.ca/explainer/business-case-for-passive-house/>, pristup 02.05.2024.
- [23] Passipedia.org, <https://passipedia.org/planning/tools>, pristup 02.05.2024.
- [24] Passipedia.org, [https://passipedia.org/planning/calculating\\_energy\\_efficiency/php - the\\_passive\\_house\\_planning\\_package#continuously\\_developed\\_further](https://passipedia.org/planning/calculating_energy_efficiency/php - the_passive_house_planning_package#continuously_developed_further), pristup 02.05.2024.

- [25] Britannica.com, <https://www.britannica.com/topic/classification-1703397> pristup 11.03.2024.
- [26] Scied.ucar.edu, [https://scied.ucar.edu/image/climate\\_classification](https://scied.ucar.edu/image/climate_classification), pristup 02.05.2024.
- [27] Schnieders, J., Eian, T.D., Filippi, M. *et al.* Design and realisation of the Passive House concept in different climate zones. *Energy Efficiency* **13**, 1561–1604 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12053-019-09819-6>, pristup 02.05.2024.
- [28] Scanhome.ie, [https://www.scanhome.ie/archive/promo/Scandinavian\\_Homes\\_Catalogue.pdf?cfchlt](https://www.scanhome.ie/archive/promo/Scandinavian_Homes_Catalogue.pdf?cfchlt), pristup 20.04.2024.
- [29] „HRN EN ISO 13790. *Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade.* Hrvatski zavod za norme, Zagreb, 2008.“