

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Antonio Črešnar

**UTVRĐIVANJE UTJECAJA VENTILIRANOG SLOJA ZRAKA NA HIGROTERMALNO  
PONAŠANJE VANJSKE OVOJNICE ZGRADE KORIŠTENJEM NUMERIČKIH  
SIMULACIJA**

Zagreb, 2016.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za materijale Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom prof. dr. sc. Ivane Banjad Pečur, dipl. ing. građ. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2015./2016.

## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
2.	CILJEVI I HIPOTEZE RADA .....	2
2.1.	Ciljevi rada .....	2
2.2.	Hipoteze rada .....	2
3.	PRIJENOS TOPLINE, ZRAKA I VLAGE .....	3
3.1.	Vanjska ovojnica .....	3
3.1.1.	<i>Higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice</i> .....	3
3.2.	Prijenos topline .....	5
3.2.1.	<i>Konvekcija (strujanje)</i> .....	5
3.2.2.	<i>Radijacija (zračenje)</i> .....	6
3.2.3.	<i>Kondukcija (vođenje)</i> .....	7
3.2.4.	<i>Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid</i> .....	12
3.2.5.	<i>Prijenos topline kroz višestruki vanjski zid</i> .....	14
3.3.	Prijenos vlage .....	15
3.3.1.	<i>Adsorpcija</i> .....	17
3.3.2.	<i>Kapilarni proces</i> .....	17
3.3.3.	<i>Difuzija</i> .....	18
3.4.	Prijenos zraka .....	19
3.5.	Utjecaj prijenosa topline, zraka i vlage na higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade .....	20
4.	METODE PRORAČUNA .....	24
4.1.	Standardne stacionarne metode proračuna .....	24
4.2.	Numerički dinamički nestacionarni modeli proračuna .....	25
4.2.1.	<i>WUFI®</i> .....	27
5.	VENTILIRANE FASADE .....	29
5.1.	Mehanizmi prijenosa topline i vlage u ventiliranim fasadama .....	31
5.2.	Pregled postojećih istraživanja o analizama HAM modela laganih ventiliranih fasada .....	33
5.3.	Ventilirani predgotovljeni betonski zidni sandwich paneli .....	34
6.	EKSPERIMENTALNI RAD .....	37
6.1.	Geometrija i karakteristike materijala panela .....	37
6.2.	Početni uvjeti .....	40
6.3.	Vanjski rubni uvjeti .....	42

---

6.4.	Unutarnji rubni uvjeti.....	45
6.5.	Orijentacija panela.....	46
6.6.	Vremenski period proračuna .....	47
6.7.	Stabilnost numeričkih simulacija.....	50
7.	REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA.....	51
7.1.	Promjena ukupne količine vode u panelu .....	51
7.2.	Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune .....	53
7.3.	Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka.....	55
7.4.	Promjena koeficijenta prolaska topline .....	60
8.	ANALIZA REZULTATA.....	62
8.1.	Promjena ukupne količine vode u panelu .....	62
8.2.	Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune .....	63
8.3.	Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka.....	64
8.4.	Promjena koeficijenta prolaska topline .....	66
9.	ZAKLJUČAK.....	67
	LITERATURA.....	69
	SAŽETAK.....	74
	SUMMARY.....	75
	ZAHVALE.....	76
	ŽIVOTOPIS.....	77

---



## POPIS SLIKA

Slika 1. Vanjska ovojnica zgrade .....	3
Slika 2. Higrotermalna opterećenja na zgradu .....	4
Slika 3. Osnovni oblici prijenosa topline.....	5
Slika 4. Prijenos topline strujanjem u zgradama .....	6
Slika 5. Prijenos topline radijacijom u zgradama.....	7
Slika 6. Prijenos topline kondukcijom u zgradama .....	8
Slika 7. Potrebna debljina materijala kojom se ostvaruje jednak toplinski otpor za sve materijale .....	9
Slika 8. Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke .....	11
Slika 9. Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid .....	13
Slika 10. Raspodjela ukupne potrošnje energije u EU .....	15
Slika 11. Smjer kretanja topline i vlage .....	16
Slika 12. Kapilarno dizanje vode.....	17
Slika 13. Difuzija.....	18
Slika 14. Ovisnost toplinskog gubitka o zrakopropusnosti vanjske ovojnice zgrade .....	20
Slika 15. Neki od znakova povećane vlažnosti zraka u zgradi .....	21
Slika 16. Termografska slika koja prikazuje postojanje toplinskih mostova uzrokovanih upotrebom različitih materijala .....	22
Slika 17. Izvori vlage u prosječnom kućanstvu .....	22
Slika 18. Razvoj gljivica oko prozora zbog kondenzacije vodene pare.....	23
Slika 19. Princip higrotermalnih proračuna u WUFI®-ju.....	27
Slika 20. Shema ulaznih i izlaznih parametara WUFI®-ja.....	28
Slika 21. Slojevi ventilirane fasade .....	29
Slika 22. Ugradnja ventilirane fasade s otvorenim fugama .....	31
Slika 23. Princip ventilacije i mehanizmi prijenosa topline u ventiliranim fasadama sa otvorenim fugama.....	32
Slika 24. Mehanizmi prijenosa vlage u ventiliranim fasadama sa otvorenim fugama .....	32
Slika 25. Izrada ECO-SANDWICH® panela u tvornici .....	35
Slika 26. Presjek ECO-SANDWICH® panela .....	35
Slika 27. Slojevi modeliranog panela .....	38
Slika 28. Podešavanje položaja „kamera“ u presjeku panela u WUFI®-ju .....	39
Slika 29. Podešavanje ventilacije u WUFI®-ju .....	39

---

Slika 30. Podešavanje osnovnih parametara u WUFI®-ju .....	40
Slika 31. Shematski prikaz prodora vlage uslijed oborina u presjek građevnog dijela zgrade .....	41
Slika 32. Podešavanje utjecaja kiše nošene vjetrom u WUFI®-ju .....	41
Slika 33. Podešavanje početnih uvjeta u WUFI®-ju .....	42
Slika 34. Klimatski parametri u Tromsou .....	43
Slika 35. Klimatski parametri u Frankfurtu .....	44
Slika 36. Klimatski parametri u Malagi .....	45
Slika 37. Ovisnost temperature i relativne vlažnosti unutarnjeg i vanjskog prostora u Tromsou .....	46
Slika 38. Podešavanje orijentacije panela u Tromsou i Frankfurtu u WUFI®-ju .....	47
Slika 39. Podešavanje vremenskog perioda proračuna u WUFI®-ju .....	48
Slika 40. Usporedba rezultata u WUFI®-ju za proračunsko razdoblje od 2 i 5 godina .....	49
Slika 41. Simulacija promjena higrotermalnih parametara kroz presjek panela u vremenu u WUFI®-ju .....	49
Slika 42. Ispis podataka o stabilnosti provedenog numeričkog proračuna u WUFI®-ju .....	50
Slika 43. Promjena ukupne količine vode u panelima u Tromsou .....	52
Slika 44. Promjena ukupne količine vode u panelima u Frankfurtu .....	52
Slika 45. Promjena ukupne količina vode u panelima u Malagi .....	53
Slika 46. Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune panela u Tromsou .....	54
Slika 47. Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune panela u Frankfurtu .....	54
Slika 48. Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune panela u Malagi .....	55
Slika 49. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u NV u Tromsou .....	56
Slika 50. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V5 u Tromsou .....	56
Slika 51. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V20 u Tromsou .....	57
Slika 52. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u NV u Frankfurtu .....	57
Slika 53. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V5 u Frankfurtu .....	58
Slika 54. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V20 u Frankfurtu .....	58

---

Slika 55. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u NV u Malagi.....	59
Slika 56. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V5 u Malagi .....	59
Slika 57. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V20 u Malagi .....	60
Slika 58. Promjena koeficijenta prolaska topline u Frankfurtu .....	61
Slika 59. Učinkovitost ventiliranih panela u odnosu na neventilirani panel u pogledu smanjenja prosječne ukupne količine vode u panelu po pojedinim klimama .....	62
Slika 60. Učinkovitost ventiliranih panela u odnosu na neventilirani panel u pogledu smanjenja prosječne relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune po pojedinim klimama.....	64
Slika 61. Učinkovitost ventiliranih panela u odnosu na neventilirani panel u pogledu smanjenja prosječne relativne vlažnosti u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka po pojedinim klimama.....	66

---

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti toplinske provodljivosti često korištenih građevinskih materijala .....	10
Tablica 2. Pregled zadataka svrstanih u četiri razine sistematične metode za analizu higrotermalnog ponašanja zgrade upotrebom HAM-modela.....	26
Tablica 3. Pregled osnovnih klimatskih podataka odabranih lokacija .....	42
Tablica 4. Slučajevi proračuna sa pripadnim variranim parametrima modela.....	51
Tablica 5. Pregled vrijednosti relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka .....	65

---

## 1. UVOD

Posljednjih godina podiže se svijest o energetske učinkovitosti i očuvanju prirodnih resursa. Sukladno tome, postavljaju se sve veći zahtjevi na današnje zgrade. Glavni preduvjet energetske učinkovitih zgrada jest kvalitetna vanjska ovojnica. Sve češća pojava u građevinskoj praksi je gradnja ventiliranih ovojnica koje se uglavnom pojavljuju u obliku laganih ili srednje teških konstrukcija glede njihove masivnosti, no danas se istražuju i razvijaju sustavi ventiliranih betonskih fasada, tj. teških (masivnih) ventiliranih ovojnica. Ventilirane ovojnice imaju zračni sloj između toplinske izolacije i vanjske fasadne obloge čiji doprinos ponašanju vanjske ovojnice zgrade dosad nije dovoljno istražen. Trenutno nema dostupnih niti numeričkih niti eksperimentalnih rezultata istraživanja higrotermalnog ponašanja takvih ovojnica. Prema tome, to je područje s velikim potencijalom za znanstvena istraživanja.

Za razumijevanje higrotermalnog ponašanja vanjske ovojnice zgrade potrebno je poznavati osnovne principe prijenosa topline, zraka i vlage. Te tri komponente su u neraskidivoj vezi i ne mogu se promatrati individualno jer promjena jedne komponente povlači za sobom promjene ostale dvije.

U Hrvatskoj su u uporabi standardne stacionarne metode proračuna za predviđanje i analizu higrotermalnog ponašanja vanjske ovojnice zgrade. Standardne stacionarne metode proračuna ne daju sliku stvarnog stanja higrotermalnog ponašanja vanjskih građevnih dijelova zbog pretpostavki na kojima se temelje. Kod njih se prijenos topline, zraka i vlage promatra odvojeno, a pojedini važni učinci neopravdano su zanemareni. S ciljem detaljnijih i složenijih proračuna higrotermalnog ponašanja građevnih dijelova, koji bi prikazali realnije ponašanje u vremenu, razvijeni su numerički dinamički nestacionarni modeli proračuna.

## 2. CILJEVI I HIPOTEZE RADA

### 2.1. Ciljevi rada

1. Unaprijediti znanja o numeričkom modeliranju higrotermalnih procesa koji se odvijaju uslijed utjecaja iz okoliša u presjeku vanjskih građevnih dijelova zgrada.
2. Utvrditi razliku između higrotermalnog ponašanja neventiliranih i ventiliranih presjeka građevnih dijelova zgrada.
3. Utvrditi utjecaj klimatskih uvjeta (temperature i relativne vlažnosti zraka, intenziteta sunčevog zračenja, količine oborina te djelovanja vjetra) na higrotermalno ponašanje neventiliranih i ventiliranih građevnih dijelova zgrada.
4. Usporediti modeliranu vrijednost koeficijenta prolaska topline u promatranom razdoblju s konstantnom vrijednosti koeficijenta prolaska topline prema *Algoritmu*.
5. Definirati geometriju i karakteristike materijala pojedinih slojeva presjeka građevnih dijelova zgrada da u slučaju ventiliranog presjeka bude što sličniji ECO-SANDWICH® fasadnom panelu razvijenom na Zavodu za materijale, Građevinskog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu.
6. Definirati numerički model, početne i rubne uvjete koji će omogućiti provjeru obje postavljene hipoteze programskim paketom WUFI®.

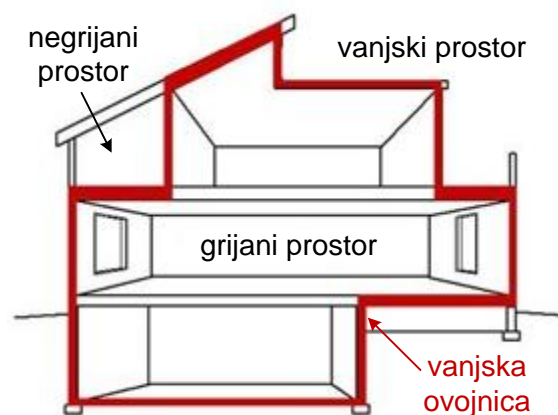
### 2.2. Hipoteze rada

1. Ventilirani sloj zraka u presjeku građevnog dijela zgrade doprinijet će smanjenju sadržaja vlage u materijalima u odnosu na neventilirani panel.
2. Ventilirani sloj zraka imat će različit utjecaj na smanjenje sadržaja vlage u materijalima ovisno o klimatskim uvjetima u kojima se predmetni građevni dio zgrade nalazi.

### 3. PRIJENOS TOPLINE, ZRAKA I VLAGE

#### 3.1. Vanjska ovojnica

Najveći utjecaj na kvalitetu zgrade u smislu potrošnje energije za grijanje i hlađenje te trajnosti ima vanjska ovojnica zgrade. Pri tome na kvalitetu i trajnost zgrade ne utječe samo vrsta upotrijebljenih materijala već i izvedba pojedinih detalja [1]. Vanjska ovojnica zgrade, slika 1., jest skup objedinjenih elemenata zgrade koji razdvajaju njezin unutarnji grijani/hlađeni prostor od vanjskog prostora i od negrijanog prostora (negrijanim prostorom smatraju se potkrovni prostor, garaža, kotlovnica, strojarnica, negrijano stubište i sl.) [2]. Kvalitetna vanjska ovojnica treba zaštititi čovjeka od utjecaja vanjskog okoliša (sunce, vjetar, vlaga, buka, itd.), ublažiti i odgoditi temperaturne promjene te osigurati zdravu unutarnju klimu i željenu razinu ugodnosti boravka unutar zgrade. Također, suvremena vanjska ovojnica mora biti energetska vrlo učinkovita, što podrazumijeva ponašanje koje minimizira potrošnju energije za grijanje i hlađenje. Navedeno se postiže jedino ukoliko se vanjsku ovojnicu promatra kao aktivnog sudionika u procesima grijanja i hlađenja, tj. u procesima prijenosa topline, zraka i vlage.



Slika 1. Vanjska ovojnica zgrade [3]

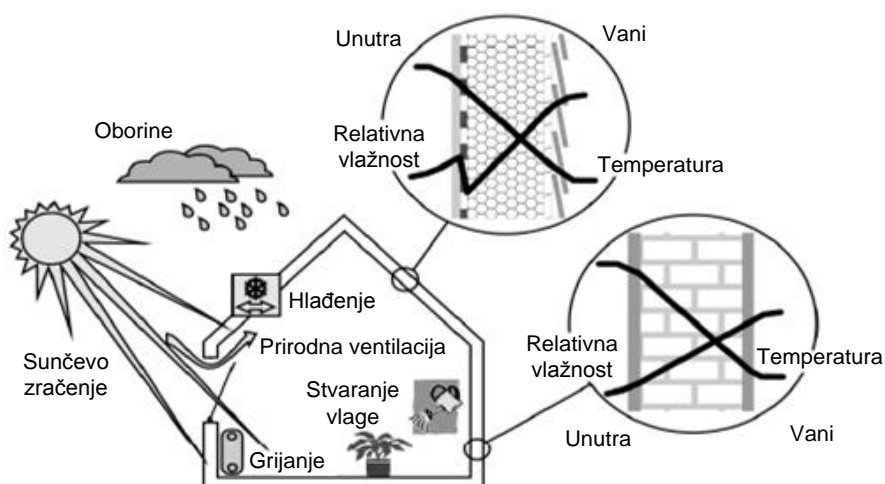
##### 3.1.1. Higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice

Promatrajući zgradu kao sustav, i njenu vanjsku ovojnicu koja razdvaja unutarnji prostor zgrade od vanjskog okoliša u kojem se ta zgrada nalazi, može se povući korelacija s

čovjekom i njegovom kožom. Kroz kožu čovjeka se odvijaju bitni procesi za njegovo svakodnevno funkcioniranje (grijanje i hlađenje organizma, zaštita organizma od vanjskih utjecaja, itd.), a upravo isti slučaj se pojavljuje i kod vanjske ovojnice zgrade. Preko nje na zgradu djeluju mehanička i higrotermalna opterećenja iz okoliša kojima se zgrada odupire i nastoji uspostaviti ravnotežu u smislu mehaničke otpornosti i stabilnosti te u smislu dinamičke higrotermalne ravnoteže. Pod higrotermalnim opterećenjima iz vanjskog okoliša podrazumijeva se djelovanje sunca, vlage i vjetra, slika 2. Navedena opterećenja nikada ne djeluju pojedinačno, već uvijek djeluju kombinirano. Također, u unutrašnjosti zgrade vladaju određeni unutarnji higrotermalni uvjeti koji se razlikuju od vanjskih higrotermalnih uvjeta.

Ponašanje vanjske ovojnice uvjetovano razlikama između unutarnjih i vanjskih higrotermalnih uvjeta naziva se higrotermalno ponašanje. Higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade podrazumijeva kombinirani prijenos topline, zraka i vlage kroz vanjsku ovojnicu koji je prvenstveno potaknut različitim temperaturnim uvjetima i različitim uvjetima relativne vlažnosti zraka (različiti parcijalni tlakovi vodene pare) vanjskog okoliša i unutarnjeg okoliša. Navedeni uvjeti predstavljaju rubne uvjete ovojnice zgrade. Vanjski rubni uvjeti ovojnice određeni su vremenom koje pokazuje ponovljivost na određenoj lokaciji. Stoga se utjecaj vremena na zgradu ocjenjuje odabirom reprezentativnih meteoroloških podataka za određenu lokaciju zgrade. Unutarnji rubni uvjeti su određeni namjenom zgrade i navikama ponašanja korisnika [4].

Na prijenos topline, zraka i vlage kroz vanjsku ovojnicu, odnosno na njezino higrotermalno ponašanje, izuzev vanjskih i unutarnjih rubnih uvjeta, uvelike utječe i tip vanjske ovojnice sa svojim karakterističnim slojevima.

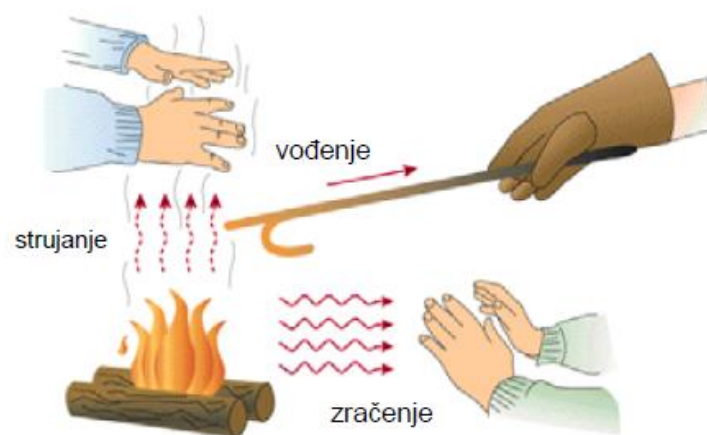


Slika 2. Higrotermalna opterećenja na zgradu [5]



## 3.2. Prijenos topline

Toplina je energija koja zbog razlike temperatura prelazi iz područja više temperature u područje niže temperature dok se ne uspostavi toplinska ravnoteža, odnosno to je energija koja se transportira kroz granice sustava kao posljedica temperaturne razlike između sustava i njegova okoliša. Navedeno definira drugi zakon termodinamike. Postoje tri osnovna principa prelaska topline (slika 3.): kondukcija (vođenje), konvekcija (strujanje) i radijacija (zračenje) [6].



Slika 3. Osnovni oblici prijenosa topline [6]

### 3.2.1. Konvekcija (strujanje)

Konvekcija je prijenos topline kretanjem mase fluida kao što su zrak ili voda. Konvekcija nastaje kada se zagrijani fluid kreće od izvora topline i nosi energiju sa sobom kao što se na primjer zagrijani zrak iznad radijatora diže uvis, a hladan zrak dolazi do radijatora odozdo te se strujanjem zraka toplina raznosi po sobi. Dakle, za prijenos topline konvekcijom potrebna je struja nekog fluida. Fluid poprima toplinu na nekom mjestu i odnosi je svojom strujom na neko drugo mjesto, gdje je predaje nekom hladnijem čvrstom tijelu ili se miješa s hladnijim dijelom fluida i njemu predaje toplinu. Brzina prijenosa topline konvekcijom ovisi o razlikama temperatura i brzini strujanja zraka. Glavni uzrok gibanja fluida je razlika u gustoći nastala nejednolikom temperaturom dijelova fluida. Takvu konvekciju nazivamo prirodnom. Konvekcija može biti i prisilna ukoliko je gibanje fluida prouzrokovano nekim

mehaničkim uređajem kao što je pumpa, kompresor, ventilator i sl. [6, 7]. Slika 4. prikazuje prijenos topline strujanjem u zgradama.

Količina topline koja uslijed razlike temperatura na dvije granične površine elementa prijeđe u jedinici vremena okomito kroz  $1 \text{ m}^2$  površine promatranog elementa naziva se gustoća toplinskog toka  $q$  [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]. Gustoća toplinskog toka u slučaju prijenosa topline strujanjem definira se na sljedeći način [6]:

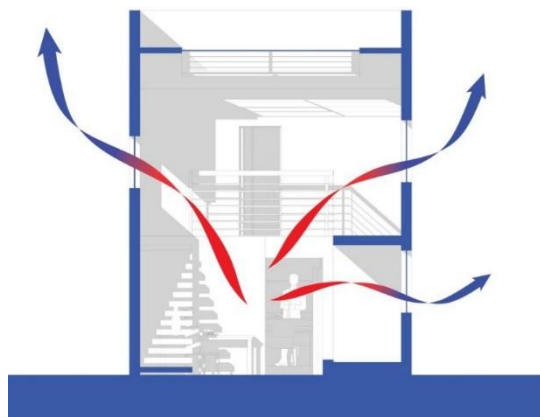
$$q_c = h_c (T_p - T_f)$$

gdje je:  $q_c$  – gustoća toplinskog toka prouzrokovanog strujanjem [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

$T_p$  – temperatura čvrste plohe uz koju struju fluid [K],

$T_f$  – temperatura fluida dalje od granične plohe [K],

$h_c$  – plošni koeficijent prelaska topline strujanjem [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ].



**Slika 4.** Prijenos topline strujanjem u zgradama [8]

### 3.2.2. *Radijacija (zračenje)*

Radijacija se odnosi na mehanizam prijenosa topline emisijom i apsorpcijom elektromagnetskih valova. Na temperaturi iznad  $0 \text{ K}$  sva tijela emitiraju elektromagnetsko zračenje (treći zakon termodinamike). Za prijenos topline zračenjem nije potreban medij. Molekule, atomi i atomske jezgre prelaskom u više energijsko stanje emitiraju energiju, a prelaskom u niže energijsko stanje apsorbiraju energiju. Energija je u obliku

elektromagnetskog zračenja koje se prenosi i kroz vakuum brzinom svjetlosti od 300 000 km/s [6, 9]. Svakodnevni primjer prijenosa topline radijacijom je sunčevo zračenje. Slika 5. prikazuje prijenos topline radijacijom u zgradama.

Gustoća toplinskog toka u slučaju prijenosa topline zračenjem definira se na sljedeći način [6]:

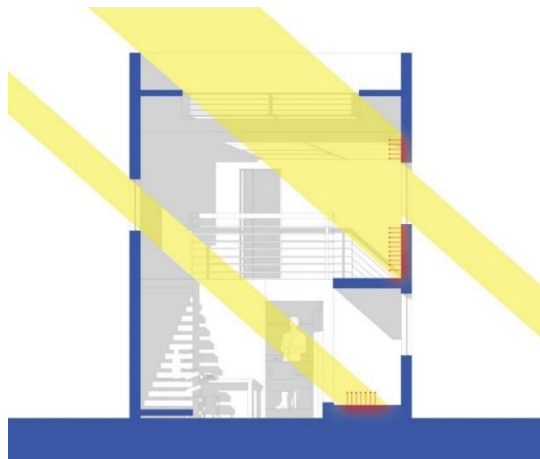
$$q_r = h_r (T_1 - T_2)$$

gdje je:  $q_r$  – gustoća toplinskog toka prouzrokovanog zračenjem [ $\text{W}/\text{m}^2$ ],

$T_1$  – temperatura prvog tijela [K],

$T_2$  – temperatura drugog tijela [K],

$h_r$  – koeficijent radijacije [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ].

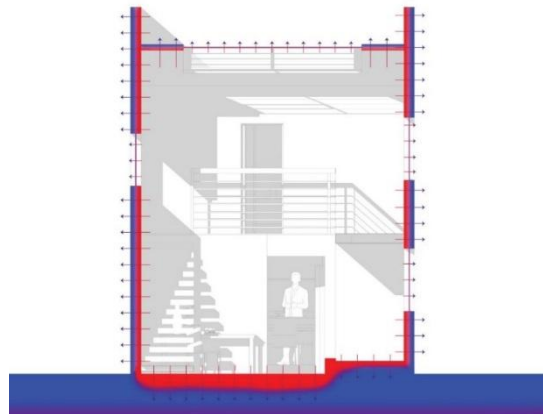


**Slika 5.** Prijenos topline radijacijom u zgradama [8]

### **3.2.3. Kondukcija (vođenje)**

Kondukcija je prijenos topline molekularnim gibanjem, tj. titranjem molekula oko ravnotežnog položaja. Javlja se u svim tvarima – krutim, tekućim i plinovitim, a izrazito je važna za prenošenje topline kroz građevinske materijale. Slika 6. prikazuje prijenos topline kondukcijom u zgradama.

Kako bi se toplina mogla prenijeti kondukcijom potrebna su dva tijela različitih temperatura koja su u kontaktu ili dvije točke istog tijela različitih temperatura [9]. Molekule koje se brzo gibaju imaju visoku temperaturu, a molekule koje se sporo gibaju imaju nisku temperaturu. Uslijed kaotičnog gibanja i stalnog sudara molekula, brže molekule predaju dio svoje kinetičke energije susjednim sporijim molekulama, a one zatim svojim susjedima i tako se energija prenosi iz područja više temperature u područje niže temperature, u skladu s drugim zakonom termodinamike. Metali su najbolji vodiči topline zbog svoje strukture, tj. postojanja slobodnih elektrona. Gibanje slobodnih elektrona izjednačuje temperature u svim točkama grijanog ili hlađenog metala [6]. Brzina prenošenja topline je veća što je veća razlika u temperaturama, ali ovisi i o svojstvima same tvari kroz koju se provodi toplina. Najbitnije svojstvo građevinskih materijala u tom pogledu je toplinska provodljivost,  $\lambda$  [W/(mK)].



**Slika 6.** Prijenos topline kondukcijom u zgradama [8]

Toplinska provodljivost je svojstvo građevinskih materijala da provode toplinu uslijed razlike temperatura na dvije granične površine elementa. Toplinska provodljivost opisana je Fourierovim zakonom vođenja topline [6]:

$$\lambda = \frac{Q}{A(T_1 - T_2)} \cdot \frac{d}{t}$$

gdje je:  $Q$  – količina topline [J],

$(T_1 - T_2)$  – razlika temperatura na dvije granične površine elementa [K],

$A$  – površina materijala [m<sup>2</sup>],

$d$  – debljina sloja materijala [m],

$t$  – vrijeme [s].

Ona fizikalno predstavlja količinu topline u J, koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala ploštine presjeka  $1 \text{ m}^2$  i debljine 1 m okomito na njegovu površinu pri razlici temperatura od 1 K. Ako materijal ima nisku vrijednost toplinske provodljivosti kažemo za njega da je toplinski izolator, a ako materijal ima visoku vrijednost toplinske provodljivosti onda je on vodič topline. Slika 7. prikazuje pojedine materijale i njihove potrebne debljine kojima se ostvaruje jednak toplinski otpor za sve materijale. To znači da 5 cm mineralne vune ima isti toplinski otpor kao i 54,2 cm šuplje opeke, odnosno čak 248 cm armiranog betona. Što je potrebna debljina manja, to materijal ima manju toplinsku provodljivost, tj. bolji je toplinski izolator. Stoga, mineralna vuna ima gotovo 50 puta bolja toplinsko izolacijska svojstva od armiranog betona.



**Slika 7.** Potrebna debljina materijala kojom se ostvaruje jednak toplinski otpor za sve materijale [6]

Vrijednost toplinske provodljivosti ovisi o [7]:

- gustoći, odnosno volumenskoj masi materijala
- kemijskom sastavu materijala
- vlažnosti materijala
- temperaturi materijala, itd.

Većina građevinskih materijala je porozna, što podrazumijeva da sadrže mnogo pora i šupljina ispunjenih zrakom. Vrijednost toplinske provodljivosti zraka koji se nalazi u porama je jako mala i iznosi svega oko 0,023 W/(mK). Zbog toga će vrijednost toplinske provodljivosti građevinskog materijala biti jednaka nekoj srednjoj vrijednosti između one za osnovnu čvrstu tvar i vrijednosti za zrak sadržan u porama. Što se više pora nalazi u materijalu, to je manja vrijednost njegove toplinske provodljivosti [7]. Vrijednosti toplinske provodljivosti često korištenih građevinskih materijala nalazi se u tablici 1.

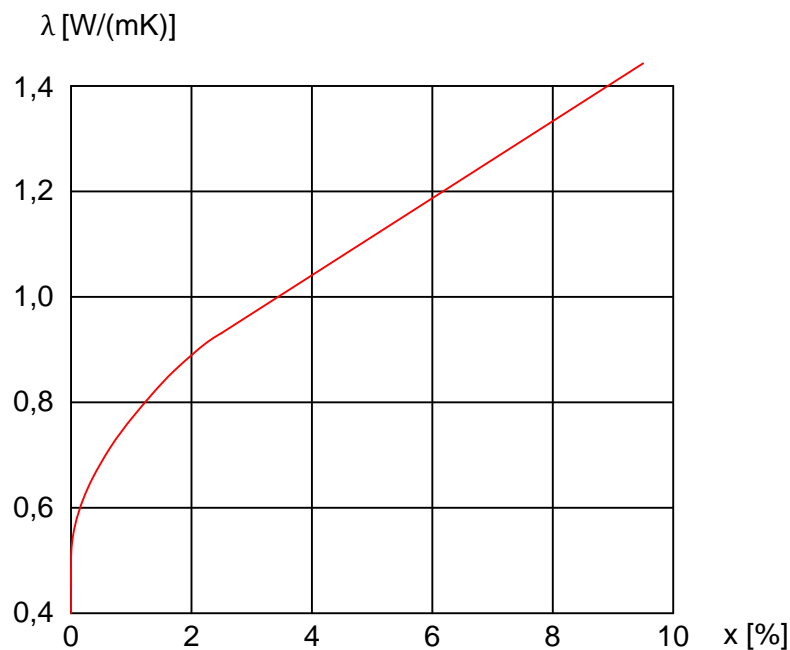
Na vrijednost toplinske provodljivosti nekog materijala utječe i vrijednost toplinske provodljivosti apsolutno gustog materijala bez pora, tzv. osnovne čvrste tvari. Zbog toga materijali različitog kemijskog sastava, a jednake gustoće, poroznosti i strukture imaju različite vrijednosti toplinske provodljivosti [6].

**Tablica 1.** Vrijednosti toplinske provodljivosti često korištenih građevinskih materijala [10, 11]

Materijal	Toplinska provodljivost $\lambda$ [W/mK]
aluminij	220
beton	1,15 - 2,50
čelik	50
drvo	0,09 - 0,24
ekspandirani polistiren (EPS)	0,040 - 0,045
ekstrudirani polistiren (XPS)	0,034 - 0,040
mineralna vuna	0,035 - 0,050
olovo	35
opeka	0,43 - 1,61
pamuk	0,048 - 0,055
poliuretanska (PUR) pjena	0,028 - 0,035
polivinilklorid (PVC)	0,17
staklo	1,0 - 1,4
željezo	50 - 75

Dobar primjer međusobne ovisnosti prijenosa topline, zraka i vlage je ovisnost toplinske provodljivosti o vlažnosti materijala što direktno utječe na kvalitetu vanjske ovojnice

zgrade. Na slici 8. prikazana je ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke. Povećanjem vlažnosti materijala naglo raste vrijednost njegove toplinske provodljivosti. Razlog tome je što povećanjem vlažnosti materijala voda zamjenjuje zrak u porama, a voda ima vrijednost toplinske provodljivosti 0,57 W/(mK), što je preko 20 puta više od vrijednosti za zrak. Smrzavanjem vode u porama nastaje led čija toplinska provodljivost iznosi oko 2,3 W/(mK), što je oko 4 puta veća vrijednost u odnosu na vrijednost za vodu, odnosno čak 100 puta više od vrijednosti toplinske provodljivosti zraka [7]. Povećanjem toplinske provodljivosti materijala dolazi do povećanja toplinskih gubitaka kroz građevne dijelove zgrade koji su izgrađeni od tog materijala. Povećanje toplinskih gubitaka dovodi do povećanja potrošnje energije za grijanje, odnosno dolazi do narušavanja energetske učinkovitosti zgrade.



**Slika 8.** Ovisnost toplinske provodljivosti zida od opeke o vlažnosti opeke [7]

Iz prethodno navedenog proizlazi da je utjecaj sadržaja vlage u materijalu na vrijednost njegove toplinske provodljivosti značajan i da su samim time prijenos vlage i topline u međusobnoj direktnoj ovisnosti te da je njihovo neovisno promatranje nemoguće.

Vrijednost toplinske provodljivosti nekog materijala raste s porastom njegove srednje temperature. U građevinskoj praksi ovisnost toplinske provodljivosti o temperaturi nema većeg praktičnog značaja jer je promjena temperature građevnih dijelova zgrade relativno malog raspona. Zbog toga se za toplinske proračune u građevinarstvu koriste vrijednosti

toplinske provodljivosti izmjerene u suhom stanju kod srednje vrijednosti temperature materijala od 10°C [6].

### 3.2.4. Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid

Jednostruki vanjski zid podrazumijeva vanjski zid koji se sastoji od samo jednog homogenog sloja. Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid zgrade prikazanog na slici 9. odvija se u tri faze [7]:

- u prostoriji strujanjem i zračenjem na unutarnju površinu zida

$$\begin{aligned}q_c &= \alpha_c \cdot (\theta_i - \theta_{si}) & q_r &= \alpha_r \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \\q &= q_c + q_r = (\alpha_c + \alpha_r) \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \\q &= h_{si} \cdot (\theta_i - \theta_{si}) \\q &= \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{(1/h_{si})} = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{R_{si}}\end{aligned}$$

- kroz zid vođenjem

$$\begin{aligned}q &= \frac{\lambda \cdot (\theta_{si} - \theta_{se})}{d} \\q &= \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{(d/\lambda)} = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R}\end{aligned}$$

- s vanjske površine zida u vanjski prostor strujanjem i zračenjem

$$\begin{aligned}q_c &= \alpha_c \cdot (\theta_{se} - \theta_e) & q_r &= \alpha_r \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \\q &= q_c + q_r = (\alpha_c + \alpha_r) \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \\q &= h_{se} \cdot (\theta_{se} - \theta_e) \\q &= \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{(1/h_{se})} = \frac{(\theta_{se} - \theta_e)}{R_{se}}\end{aligned}$$

gdje je:  $q$  – gustoća ukupnog toplinskog toka [W/m<sup>2</sup>],

$\alpha_c$  – koeficijent strujanja [W/(m<sup>2</sup>K)],

$\alpha_r$  – koeficijent zračenja [W/(m<sup>2</sup>K)],

$\theta_i$  – temperatura zraka u prostoriji [K],



$\theta_{si}$  – temperatura unutarnje površine zida [K],

$\theta_{se}$  – temperatura vanjske površine zida [K],

$\theta_e$  – temperatura vanjskog zraka [K],

$h_{si}$  – unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline [W/(m<sup>2</sup>K)],

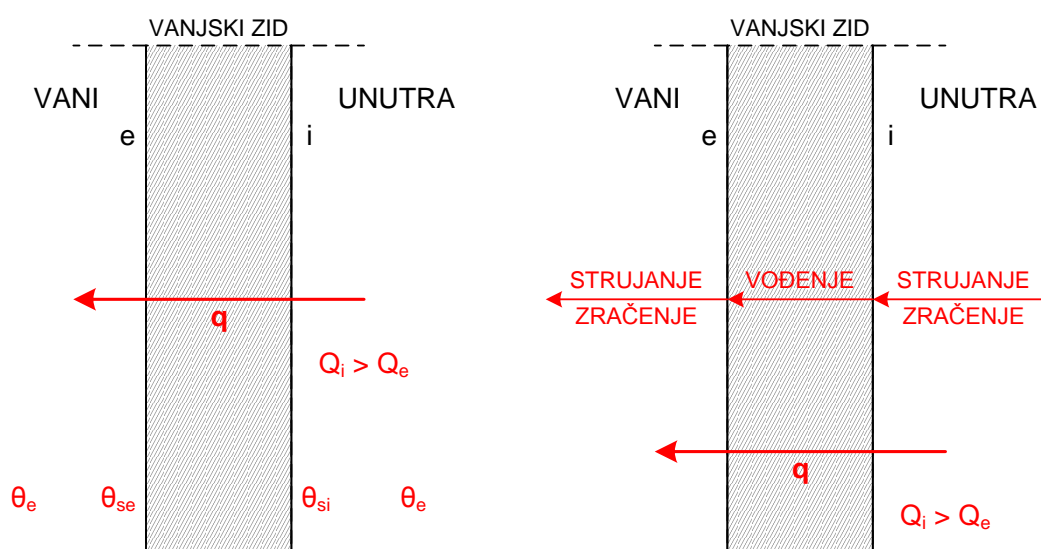
$h_{se}$  – vanjski plošni koeficijent prijelaza topline [W/(m<sup>2</sup>K)],

$R_{si}$  – unutarnji plošni otpor prijelaza topline [(m<sup>2</sup>K)/W],

$R_{se}$  – vanjski plošni otpor prijelaza topline [(m<sup>2</sup>K)/W],

$R$  – otpor prijelaza topline [(m<sup>2</sup>K)/W].

Unutarnji plošni koeficijent prijelaza topline  $h_{si}$  predstavlja količinu topline koja u razlici vremena prijeđe sa zraka u prostoriji na jedinicu ploštine građevinskog elementa pri jediničnoj razlici temperature zraka i površine elemenata. Vanjski plošni koeficijent prijelaza topline  $h_{se}$  predstavlja količinu topline koja u jedinici vremena prijeđe s jedinice vanjske ploštine građevinskog elementa na vanjski zrak pri jediničnoj razlici temperature površine elementa i vanjskog zraka. Ovisno o vrsti građevinskog elementa, njegovom kutu nagiba u odnosu na horizontalnu podlogu te ovisno o smjeru toplinskog toka postoje pretpostavljene vrijednosti plošnih koeficijenata prijelaza topline [6, 12].



**Slika 9.** Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid [7]

Zbrajanjem svih utjecaja dobivamo koeficijent prolaska topline, odnosno toplinski otpor građevnog dijela zgrade kao najbitnija svojstva vezana za prijenos topline [7]:

$$q = \frac{(\theta_i - \theta_e)}{R_{si} + R + R_{se}} = U \cdot (\theta_i - \theta_e)$$
$$R_T = R_{si} + R + R_{se}$$
$$U = \frac{1}{R_{si} + R + R_{se}} = \frac{1}{R_T},$$

gdje je:  $U$  – koeficijent prolaska topline [W/(m<sup>2</sup>K)],

$R_T$  – ukupni toplinski otpor jednostrukog vanjskog zida [(m<sup>2</sup>K)/W].

Koeficijent prolaska topline  $U$  karakterizira prenošenje topline iz jednog prostora, preko građevnog dijela, u susjedni prostor. Njegova recipročna vrijednost, odnosno zbroj pojedinih toplinskih otpora, jest ukupni toplinski otpor  $R_T$  građevnog dijela zgrade i karakterizira svojstvo toplinske izolacije [7].

### 3.2.5. Prijenos topline kroz višestruki vanjski zid

U slučaju da se vanjski zid ili neki drugi građevni dio zgrade sastoji od više slojeva, potrebno je uzeti u obzir karakteristike i utjecaj svakog pojedinog sloja kako bi se proračunski odredio koeficijent prolaska topline  $U$  cijelog građevnog dijela zgrade te sukladno tome i ukupni toplinski otpor  $R_T$  građevnog dijela zgrade [7]:

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_{se}$$
$$R_T = R_{si} + \sum R_i + R_{se},$$

gdje je:  $R_1$  – toplinski otpor prvog sloja [(m<sup>2</sup>K)/W],

$R_2$  – toplinski otpor drugog sloja [(m<sup>2</sup>K)/W], itd.

Postavlja se pitanje zašto je prijenos topline toliko značajan u fizici zgrade. Protok topline podrazumijeva gubitak i/ili dobitak energije. Ugodnost stanovanja zahtijeva da grijanjem i hlađenjem prostora kontinuirano održavamo temperaturu u zgradi na određenoj razini. U svakoj razvijenoj zemlji grijanje i hlađenje zgrada ima značajnu ulogu u potrošnji primarne energije, što je osobito vidljivo iz činjenice da su zgrade odgovorne za potrošnju 40

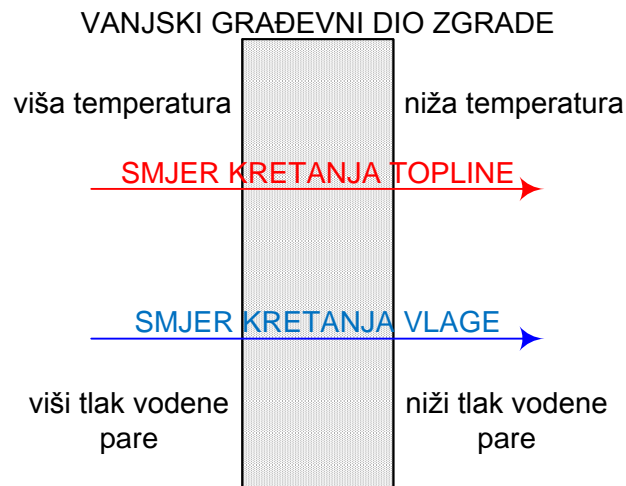
% ukupne energije u EU (slika 10.) i za 36 % emisije CO<sub>2</sub> [13]. Količine fosilnih goriva su ograničene, a njihovo izgaranje je odgovorno za ekološke probleme, stoga je projektiranje zgrada s niskim zahtjevima za potrošnju energije danas izazov, ali i obaveza [9]. Zgrade niske potrošnje energije postaju standard gradnje diljem Europe i svijeta, a principi projektiranja takvih zgrada zahtijevaju poznavanje temeljnih zakonitosti prijenosa topline te njihovo vješto korištenje kako bi upravo vanjska ovojnica postala faktor koji svojim dinamičkim higrotermalnim ponašanjem doprinosi smanjenju potrebne energije za grijanje i hlađenje, odnosno doprinosi energetskej učinkovitosti zgrade i povećanju ugodnosti stanovnika.



**Slika 10.** Raspodjela ukupne potrošnje energije u EU [14]

### 3.3. Prijenos vlage

Vlaga je vodena para koja se uz ostale plinove nalazi u zraku. Vlažan zrak može se promatrati kao mješavina suhog zraka i vodene pare. Zrak ne može sadržavati vodenu paru u neograničenoj količini, već može primiti samo određenu količinu vodene pare pri toj temperaturi. Što je temperatura zraka viša, to on može primiti veću količinu vlage. Kada masa vodene pare sadržana u nekom volumenu zraka na određenoj temperaturi dosegne za tu temperaturu najvišu vrijednost, kažemo da je zrak zasićen vodenom parom. Daljnjim povećavanjem količine vodene pare dolazi do kondenzacije, tj. višak vodene pare se pretvara u tekućinu. Količina vodene pare u zraku može se izražavati i parcijalnim tlakom vodene pare. Vodena para se procesom difuzije kreće kroz svaki porozni građevni dio koji odjeljuje dva prostora s različitim parcijalnim tlakovima vodene pare. Kod toga se molekule vodene pare kreću iz prostora s višim parcijalnim tlakom vodene pare prema prostoru s nižim parcijalnim tlakom vodene pare, što je isti smjer kretanja kojim se kreće i toplina, slika 11., jer topli zrak ima veći pritisak vodene pare [6].



**Slika 11.** Smjer kretanja topline i vlage [6]

Vlagu s obzirom na načine transporta možemo podijeliti na [6]:

- likvidnu vlagu
- higroskopnu vlagu
- kondenznu vlagu
- ugradbenu ili građevinsku vlagu.

Likvidna vlaga je vlaga koju je prouzrokovala tekuća voda – kiše, podzemne vode, poplave i curenje raznovrsnih vodnih instalacija. Higroskopna vlaga nastaje tako što soli akumulirane u zidu zbog svoje higroskopnosti upijaju vodenu paru iz zraka. Kondenzna vlaga nastaje iz vodene pare u zraku, ali se izlučuje, tj. kondenzira na površini zida u obliku rose kada topao zrak dođe u dodir s hladnijim zrakom ili hladnijom površinom. Hladniji zrak ili hladnija površina podrazumijeva temperaturu zraka ili površine koja je manja od rosišta zraka koji ju dodiruje. Ugradbena vlaga je vlaga zarobljena u konstrukciji [6].

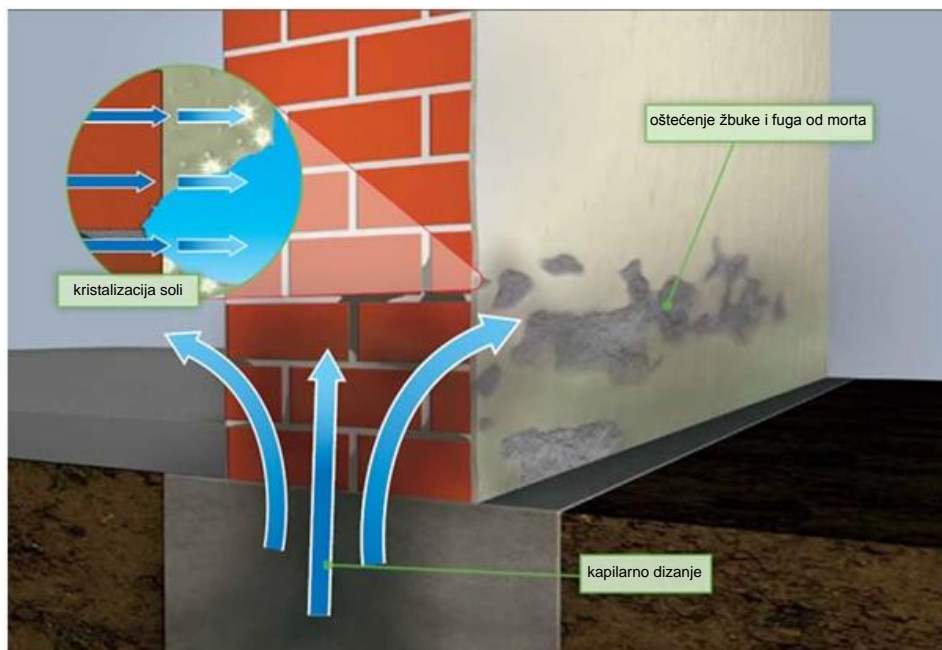
Osnovni mehanizmi transporta vlage su adsorpcija, kapilarni proces i difuzija koji u materijalu mogu nastupiti odvojeno, ali i zajedno, ovisno o karakteristikama materijala i uvjetima okoline.

### 3.3.1. Adsorpcija

Adsorpcija je sposobnost neke čvrste tvari, tzv. adsorbenta, da na svojoj graničnoj površini veže molekule tekućine ili plina, tzv. adsorptiva, formirajući film. Zapravo radi se o nagomilavanju neke tvari na površini čvrste tvari. Količina adsorptiva koji može vezati adsorbent ovisi o prirodi adsorbenta, temperaturi i koncentraciji adsorbenta [6].

### 3.3.2. Kapilarni proces

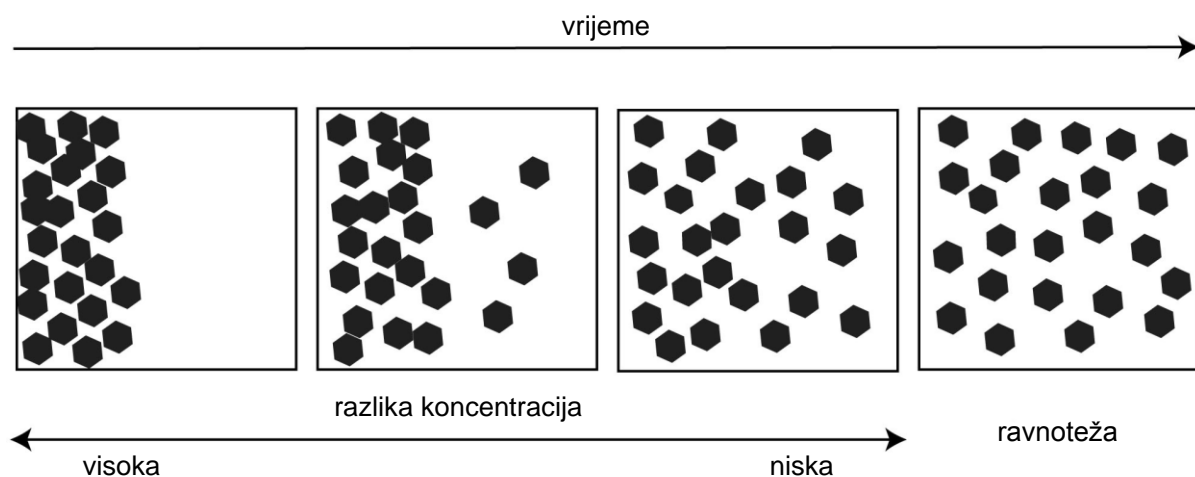
Kapilarni proces je dizanje vode u kapilarama kao rezultat površinskog privlačenja između tekućine i krutog tijela kojeg uzrokuju sile adhezije. Česta pojava je vertikalno kapilarno dizanje vode, slika 12., kroz građevinske porozne materijale, uzrokovano pritiskom iz okolnog tla. Vлага se zatim kreće kroz zid noseći na svom putu rastopljene soli koje naknadnim sušenjem kristaliziraju. Kristali uzrokuju oštećenja jer pri kristalizaciji volumen topivih soli može narasti za čak deset puta [6].



Slika 12. Kapilarno dizanje vode [15]

### 3.3.3. Difuzija

Difuzija je fizikalni proces kretanja čestica iz područja više koncentracije u područje niže koncentracije s ciljem postizanja ravnoteže u koncentracijama, slika 13. Što je veća razlika u koncentracijama, to je veća brzina difuzije. Porastom temperature također raste brzina difuzije. Difuzija se najbrže odvija u plinovima.



**Slika 13.** Difuzija [16]

Ukoliko se usredotočimo na mehanizam prijenosa vlage difuzijom, jer je upravo taj mehanizam prijenosa najproblematičniji kod zgrada niske potrošnje energije, može se ustvrditi da svaki građevni dio, u ovisnosti od strukture materijala građevnog dijela, pruža određeni otpor difuziji vodene pare. Zato je ovakav način kretanja vodene pare relativno spor.

Masa vodene pare koja uslijed razlike parcijalnih tlakova vodene pare s obje strane elementa difundira u jedinici vremena okomito na površinu promatranog elementa zove se difuzijski tok vodene pare  $Q_m$  [kg/h]. Ako se difuzijski tok vodene pare svede na jedinicu površine elementa, dobivena veličina naziva se gustoća difuzijskog toka vodene pare  $q_m$  [kg/(m<sup>2</sup>h)].

Zakon o difuziji prvi je 1855. godine eksperimentalnim putem utvrdio A. Fick [7]:

$$q_m = D \frac{dc}{dx}$$

gdje je:  $D$  – koeficijent difuzije vodene pare kroz zrak [ $\text{m}^2/\text{h}$ ],

$dc/dx$  – gradijent koncentracije vodene pare  $c$  u smjeru  $x$  [ $\text{kg}/\text{m}^4$ ].

Kao što je već prethodno navedeno, kod prijenosa vlage može se povući paralela s prijenosom topline. Navedeno se vidi u osnovnoj jednadžbi difuzije vodene pare kroz građevne dijelove koja je formalno analogna osnovnoj jednadžbi prenošenja topline kroz višeslojne građevne dijelove [7]:

$$q_m = \frac{p_i - p_e}{\frac{1}{\beta_i} + \frac{d_1}{\delta_1} + \frac{d_2}{\delta_2} + \dots + \frac{1}{\beta_e}}$$

gdje je:  $p_i$  – parcijalni tlak vodene pare u zraku s unutarnje strane elementa [Pa],

$p_e$  – parcijalni tlak vodene pare u zraku s vanjske strane elementa [Pa],

$\beta_i$  – koeficijent prijelaza vodene pare s unutarnjeg zraka na unutarnju površinu [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{hPa})$ ],

$\beta_e$  – koeficijent prijelaza vodene pare s vanjske površine na vanjski zrak [ $\text{kg}/(\text{m}^2\text{hPa})$ ],

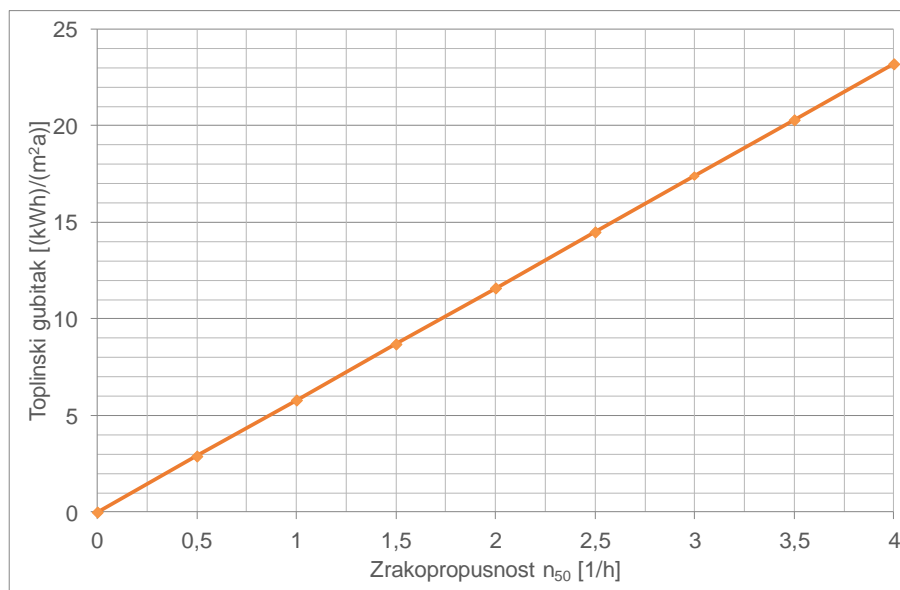
$d$  – debljina pojedinog sloja višeslojnog građevinskog elementa [m],

$\delta$  – koeficijent difuzijske vodljivosti vodene pare kroz građevinski materijal [ $\text{kg}/(\text{mhPa})$ ].

### 3.4. Prijenos zraka

Prijenos zraka je u tekstu već djelomično dotaknut, jer posredno ulazi u definicije prijenosa topline i vlage u ulozu potrebnog medija za njihov prijenos. Ipak, valja dodatno naglasiti ulogu zrakopropusnosti, odnosno zrakonepropusnosti u higrotermalnom ponašanju vanjske ovojnice. Pod pojmom zrakopropusnost podrazumijeva se infiltracija i ekfiltracija zraka kroz „slaba mjesta“ u vanjskoj ovojnici zgrade, uslijed razlike tlakova, kao posljedica lošeg projektiranja i izvođenja detalja [17].

Mjerenje zrakopropusnosti se najčešće provodi tzv. „Blower door“ testom tijekom razlike tlakova u rasponu od  $\pm 10$  Pa i  $\pm 50$  Pa. Uz „Blower door“ test može se koristiti i termografija za detektiranje konkretnih mjesta propuštanja zraka. Rezultat testa je broj izmjena zraka u zgradi tijekom sat vremena,  $n_{50}$  [1/h]. Što je broj  $n_{50}$  veći, izraženiji je problem s dodatnim toplinskim gubicima (slika 14.) i dodatnom količinom vlage koja prolazi kroz vanjsku ovojnicu zgrade. Što je broj manji, javlja se problem kvalitete zraka u zgradi. Higijenski minimum je osigurati izmjenu od  $n_{50} = 0,5$  [1/h] u zgradi [6].

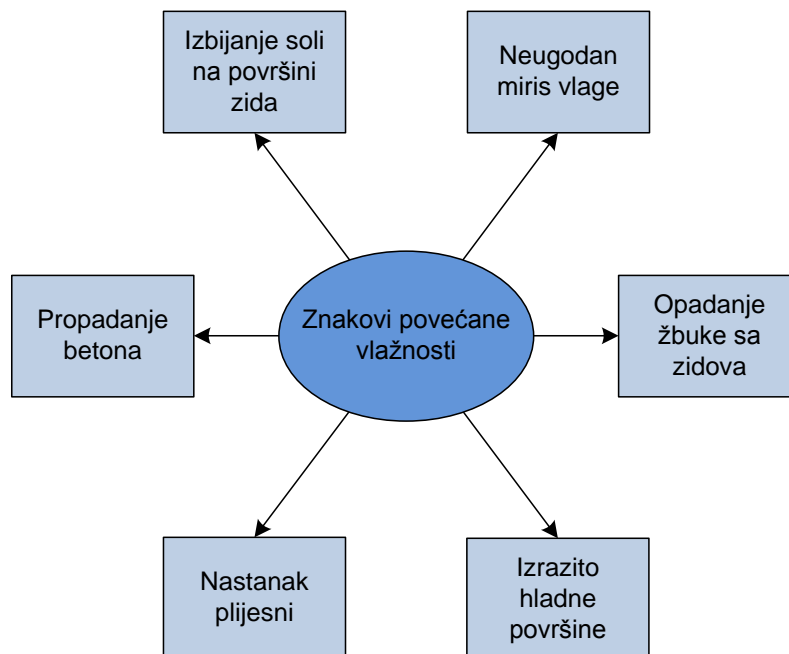


**Slika 14.** Ovisnost toplinskog gubitka o zrakopropusnosti vanjske ovojnice zgrade [18]

### 3.5. Utjecaj prijenosa topline, zraka i vlage na higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade

Kada se promatra vanjska ovojnica zgrade, 75 – 90 % svih građevinskih šteta je uzrokovano vlagom. Dobrim dijelom uzrok tome je što je većina materijala koji se koriste u građevinarstvu porozna, što građevinske materijale čini pogodnim za zadržavanje vlage u plinovitom ili u tekućem stanju [19]. Slika 15. prikazuje česte znakove povećane vlažnosti u zgradi.





**Slika 15.** Neki od znakova povećane vlažnosti zraka u zgradi

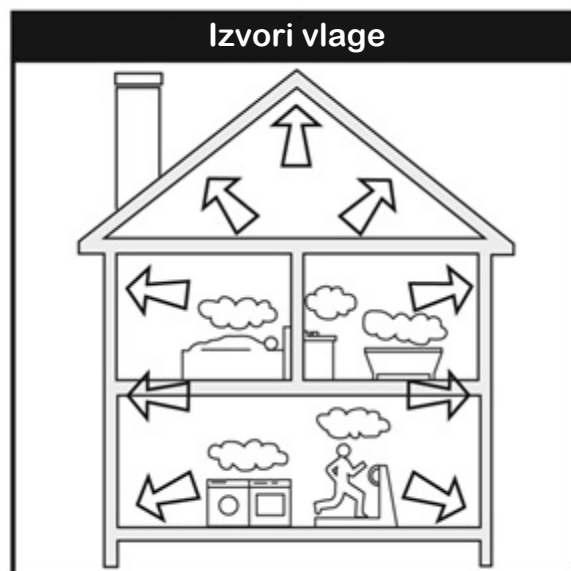
Posljednjih godina došlo je do povećane aktivnosti oko poboljšanja energetske učinkovitosti postojećih zgrada, posebno uslijed pojačane promidžbe svih prednosti energetske obnove, ali i povećanja troškova za grijanje i hlađenje prostora [1]. Kontrola vlage je postala veliki izazov u građevinskoj praksi. Potreba za očuvanjem energije rezultirala je bolje izoliranim i zrakonepropusnim zgradama kod kojih je vanjska ovojnica znatno osjetljivija na vlagu nego kod starijih, lošije izoliranih zgrada [20]. U starijim građevinama kondenzat se pravilno raspoređivao, upijao u materijale i isušivao s vremenom bez štetnih posljedica, što nije slučaj kod novih zgrada niske potrošnje energije. Kod novih, dobro izoliranih građevina, utjecaj tzv. toplinskih mostova je jače izražen i dodatno doprinosi problemima s vlagom.

Toplinski mostovi, slika 16., su manja područja u vanjskoj ovojnici zgrade kroz koje je toplinski tok povećan radi promjene materijala, debljine ili geometrije građevnog dijela [2]. Posljedica povećanog toka topline jest niža površinska temperatura na ograničenim dijelovima vanjske ovojnice. Ukoliko je ta temperatura ispod temperature rosišta, za unutarnji zrak određene temperature, dolazi do kondenzacije vodene pare jer se zrak u kontaktu s hladnom površinom hladi i ne može više sadržavati tu istu količinu vodene pare. Upravo su zato mjesta toplinskih mostova pogodna za razvoj gljivica i plijesni, čime se narušavaju higijenski uvjeti prostora, dolazi do degradacije materijala i potrebe sanacije koja uzrokuje dodatne troškove.



**Slika 16.** Termografska slika koja prikazuje postojanje toplinskih mostova uzrokovanih upotrebom različitih materijala [1]

U četveročlanom kućanstvu svakodnevno se kuhanjem proizvede do 2 litre vode u obliku vodene pare. Kupanjem, pranjem rublja, zalijevanjem cvijeća i ostalim kućanskim poslovima proizvede se do 3 litre vode. Svaki ukućanin generira 1 – 2 litre vode samo disanjem, što znači da se dnevno u prosječnom kućanstvu stvori otprilike 10 litara vode koju je potrebno odvesti iz zgrade, slika 17.



**Slika 17.** Izvori vlage u prosječnom kućanstvu [21]

Nužno je kontrolirati količinu vlage u unutarnjim prostorima zgrade prirodnim provjetranjem ili mehaničkom ventilacijom kako bi se osiguralo dovođenje kisika, uklanjanje ugljičnog dioksida i drugih onečišćenja, osigurali higijenski uvjeti, osigurala

odgovarajuća udobnost prostora te spriječila pojava građevinskih šteta uslijed povećane vlažnosti kao što su podizanje parketa, degradacija materijala brtvi, podlijevanje vode, pojava gljivica i plijesni i sl., slika 18.



**Slika 18.** Razvoj gljivica oko prozora zbog kondenzacije vodene pare [1]

Promjenom stolarije se, kao i ugradnjom materijala velike toplinske izolacijske moći, mijenja higrotermalno ponašanje zgrade. Postavljanjem stolarije visoke kvalitete i pravilne ugradnje (pod pravilnu ugradnju podrazumijeva se dobro brtvljenje stolarije), smanjuje se zrakopropusnost vanjske ovojnice zgrade, odnosno smanjuje se broj izmjena zraka u prostoriji. Bolje brtvljenje nove stolarije uzrokuje povećanje relativne vlažnosti zraka u prostoriji i smanjenje kvalitete zraka u prostoriji, a kasnije dolazi do rošnja unutarnje površine stakala pa čak i do podizanja parketa te pojave gljivica i plijesni. Navedeni problem se rješava prirodnim provjetravanjem prostora. Prilikom provjetravanja prostora nameće se problem gubitka topline pa je potrebno osigurati ravnotežu između potrošnje energije i kvalitete zraka u prostoriji [1]. U spomenutom slučaju uočljiva je međusobna povezanost prijenosa topline, zraka i vlage. Rješavanjem problema prijenosa jedne komponente neizbježno smo utjecali na pojavu problema s kontrolom preostale dvije komponente što jasno dokazuje da se prijenos topline, zraka i vlage ne može promatrati odvojeno, već da su to složeni dinamički procesi koji su u direktnoj i neraskidivoj ovisnosti i da se kao takvi moraju proučavati kao jedna cjelina kako bi se osigurala udobnost življenja.

Toplinski dobro izolirane zgrade, koje na korektan način „upravljaju“ vlagom, su zgrade povećane trajnosti za koje je smanjena potreba održavanja tokom godina.

## 4. METODE PRORAČUNA

Postavlja se pitanje kako predvidjeti higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade za definiranu geometriju zgrade, definirane slojeve i materijale vanjske ovojnice te za definiranu klimu, tj. lokaciju zgrade. Postoje dva pristupa:

- standardne stacionarne metode proračuna
- numerički dinamički nestacionarni modeli proračuna.

### 4.1. Standardne stacionarne metode proračuna

Kako je ranije navedeno, vlaga je jedan od glavnih uzročnika građevinskih šteta te je prilikom projektiranja energetski učinkovitih zgrada i zgrada bez oštećenja posebnu pažnju potrebno posvetiti upravo kontroli vlage. H. Glaser je 1958. godine predložio relativno jednostavan grafičko – analitički postupak za proračun difuzije vodene pare kroz vanjske građevne dijelove zgrade [7]. Ukoliko količina kondenzata ne prekoračuje određene granice i ukoliko je manja od količine vode koja se može isušiti u određenim klimatskim uvjetima, smatra se da se tada građevina nalazi na sigurnoj strani [22].

Standardna metoda koja se koristi u građevinskoj praksi u Hrvatskoj za ocjenu ponašanja građevnih dijelova vanjske ovojnice zgrade glede prolaska vlage bazirana je upravo na standardnoj Glaserovoj metodi [23]. Glaserova metoda se temelji na sljedećim pretpostavkama [4]:

- transport topline i vlage su međusobno neovisni, jednodimenzionalni procesi
- vlaga se prenosi samo procesom difuzije, koji je opisan Fickovim zakonom
- toplina se prenosi jedino vođenjem, koje je opisano Fourierovim zakonom
- ne postoji sorpcija vlage u materijalu i migracija tekuće vode unutar zida
- transportna svojstva građevnih materijala su konstante
- kao rubni uvjeti se uzimaju konstante, srednje vrijednosti temperature zraka i relativne vlažnosti s obje strane građevnog dijela zgrade (stacionarno stanje)
- tekućina unutar zida javlja se zbog kondenzacije vodene pare, koja se javlja na granici između dva sloja materijala gdje je tlak vodene pare jednak ili veći od tlaka zasićenja
- ne uzima se u obzir ugradbena vlaga građevnih materijala.

Kako bi se Glaserovom metodom ustanovilo dolazi li unutar građevnog dijela zgrade do kondenzacije vodene pare koja se difuzijom kreće kroz građevni dio, potrebno je grafički, kroz poprečni presjek građevnog dijela, ucrtati krivulju parcijalnog tlaka vodene pare i krivulju tlaka zasićenja. U svakom sloju promatranog građevnog dijela mora biti zadovoljen uvjet da je vrijednost tlaka zasićenja manja od vrijednosti parcijalnog tlaka. Ukoliko su te dvije vrijednosti jednake (krivulje u grafičkom prikazu se sijeku), dolazi do pojave kondenzacije.

Pretpostavke na kojima se temelji Glaserova metoda ne odgovaraju stvarnom stanju. Prije svega, transport topline, zraka i vlage su u direktnoj međusobnoj povezanosti, što je u potpunoj suprotnosti s prvom pretpostavkom, a također to nisu isključivo stacionarni i jednodimenzionalni procesi. Prolazak zraka i likvidne vlage mogu prenijeti znatno veću količinu vlage nego difuzija, što Glaserovom metodom nije uzeto u obzir, a zasigurno je i jedan od ključnih problema metode. Građevinski materijali su uglavnom porozni i mogu apsorbirati određenu količinu vlage. Mnogo puta zanemarena tzv. ugradbena vlaga je sve češći problem u građevinskoj praksi zbog sve kraćih rokova građenja u kojima se ugrađeni materijali ne stignu osušiti te zbog sve zrakonepropusnijih vanjskih ovojnica koje su preduvjet energetski učinkovitih zgrada (niskoenergetske, pasivne zgrade i zgrade gotovo nulte energije). Osim prirodno ugradbene vlage, materijal može upiti veće količine vlage zbog uvjeta na gradilištu ili prije svega u skladištu [20].

Valja naglasiti da je Glaserova metoda izvorno razvijena za potrebe proračuna hladnjača i da su u tom slučaju navedene pretpostavke korektne. Međutim, za zgrade namijenjene stanovanju i boravku ljudi ne mogu se primijeniti pretpostavke i pojednostavljenja Glaserove metode, jer za zgrade izvedene uobičajenim građevinskim materijalima ne daje sliku stvarnog ponašanja u pogledu prolaska vlage i ocjenu opasnosti od kondenzacije.

S ciljem detaljnijih i složenijih proračuna higrotermalnog ponašanja građevnih dijelova, koji bi prikazali realnije ponašanje u vremenu, razvijeni su numerički dinamički nestacionarni modeli proračuna.

#### **4.2. Numerički dinamički nestacionarni modeli proračuna**

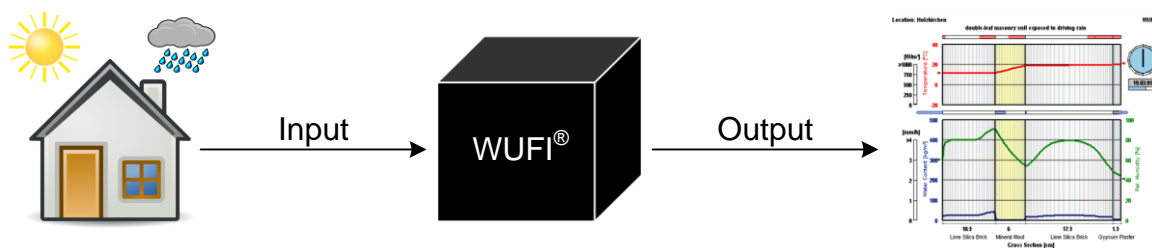
Na temelju eksperimentalnih istraživanja i razvoja analitičkih rješenja, razvijeni su alati za opsežnu analizu kombiniranog prijenosa topline, zraka i vlage. Higrotermalni (HAM) modeli (eng. *Heat, Air, Moisture modelling* – HAM) su alati koji služe za predviđanje nestacionarnih temperaturnih uvjeta i uvjeta vlažnosti u građevnim dijelovima vanjske

ovojnice, kao što su zidovi i krovovi. Higrotermalni modeli, odnosno simulacije higrotermalnog ponašanja zgrada su numeričke metode za ocjenu i predviđanje dugoročnih higrotermalnih karakteristika građevnih dijelova vanjske ovojnice zgrade [4]. Tablica 2. prikazuje razine rada higrotermalnih modela.

**Tablica 2.** Pregled zadataka svrstanih u četiri razine sistematične metode za analizu higrotermalnog ponašanja zgrade upotrebom HAM-modela [24]

<b>ELEMENTI ANALIZE &amp; ZADACI</b>
<b>Razina 1: Definiranje problema</b> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Ciljevi</li><li>2. Konstrukcija</li><li>3. Izvori vlage</li><li>4. Mehanizmi prijenosa topline, zraka i vlage</li><li>5. Mogući problemi ponašanja</li><li>6. Pretpostavljeni troškovi i trajanje</li><li>7. Potrebna točnost</li></ol>
<b>Razina 2: Postavljanje simulacije i ulazni parametri</b> <ol style="list-style-type: none"><li>A. Postavljanje simulacije<ol style="list-style-type: none"><li>1. Tipovi provjera ponašanja</li><li>2. Statistički pristup</li><li>3. Izbor alata za simulaciju</li><li>4. Preliminarna simulacija</li><li>5. (Odabrani) slučajevi za simulaciju</li></ol></li><li>B. Ulazni parametri<ol style="list-style-type: none"><li>1. Vanjski klimatski podaci</li><li>2. Unutarnji klimatski podaci</li><li>3. Svojstva materijala</li><li>4. Početni uvjeti</li><li>5. Ostali ulazni podaci</li></ol></li></ol>
<b>Razina 3: HAM-simulacija</b> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Pripreme/oblikovanje ulaznih parametara</li><li>2. Simulacija</li><li>3. Kontrola/priprema izlaznih podataka</li></ol>
<b>Razina 4: Analiza higrotermalnog ponašanja</b> <ol style="list-style-type: none"><li>A. Analiza higrotermalnih uvjeta<ol style="list-style-type: none"><li>1. Točnost i pouzdanost rezultata</li><li>2. Uzroci higrotermalnog ponašanja</li><li>3. Moguće varijacije rezultata</li></ol></li><li>B. Ocjena ponašanja<ol style="list-style-type: none"><li>1. Pronalazak vrijednosti ponašanja</li><li>2. Ocjena ponašanja</li><li>3. Novi slučajevi za analizu</li></ol></li></ol>

Validacija složenih HAM modela provedena je od strane različitih istraživača i napravljeni su tzv. "benchmarking" slučajevi kako bi se ocijenila kvaliteta i pouzdanost pojedinih modela. A. N. Karagiozis je usporedbom 12 najrazvijenijih HAM modela kroz 13 bitnih značajki, koje HAM model mora zadovoljiti, zaključio da je WUFI® model najnapredniji [25]. U nastavku ovog rada detaljnije će se opisati pozadina (tzv. „black box“) proračuna u WUFI®-ju, slika 19.



Slika 19. Princip higrotermalnih proračuna u WUFI®-ju

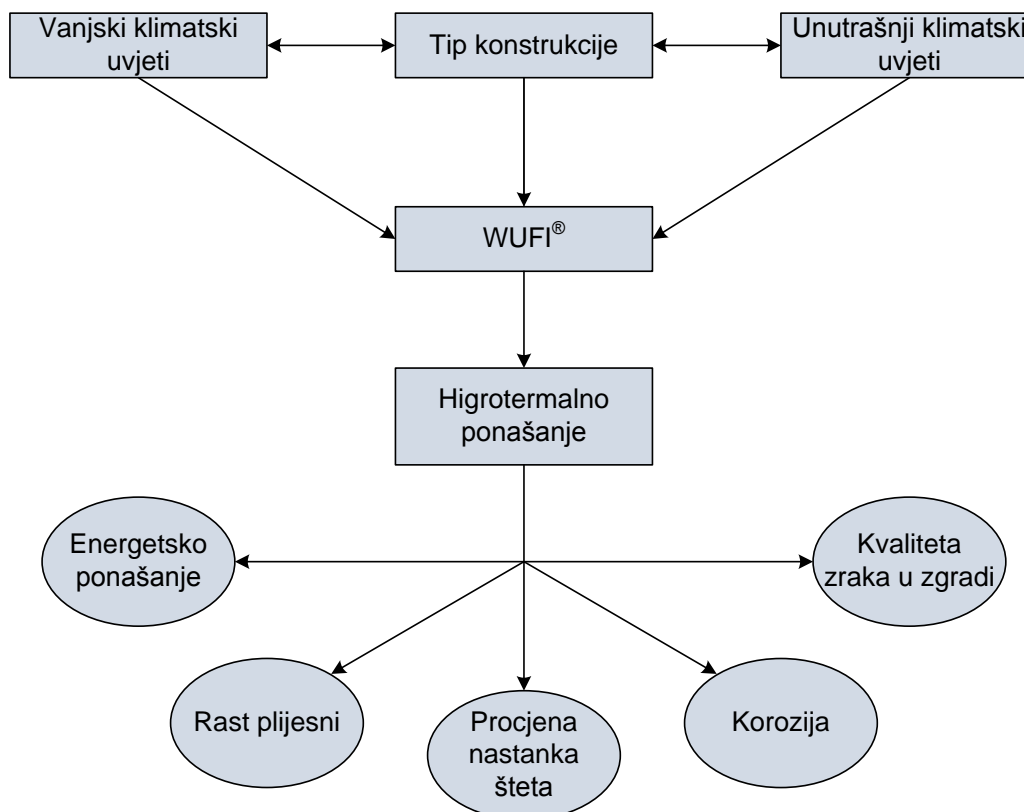
#### 4.2.1. WUFI®

WUFI® (njem. *Wärme und Feuchte instationär*) je alat razvijen od strane Fraunhofer Instituta za građevinsku fiziku. Programski paket WUFI® je danas najrašireniji alat za numeričku procjenu higrotermalnog ponašanja pojedinih građevnih dijelova i vanjske ovojnice zgrade u cjelini. Program je usklađen sa zahtjevima definiranim standardom BS 15026 *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation* [26]. Fraunhofer Institut za građevinsku fiziku redovito provodi eksperimentalna istraživanja čije rezultate koristi za kontinuiranu validaciju i unaprjeđivanje WUFI®-ja. Postoje različite verzije WUFI®-ja koje se razlikuju po složenosti proračuna:

- **WUFI® Pro** izvršava jednodimenzionalne higrotermalne proračune kroz presjek građevnog dijela zgrade. Između ostalog, uzima u obzir neophodne učinke na higrotermalno ponašanje kao što su ugradbena vlaga, kiša nošena vjetrom, sunčevo zračenje, dugovalno zračenje, kapilarni prijenos vlage i kondenzacija u ljetnim mjesecima, koje standardne metode proračuna ne uzimaju u obzir [27].
- **WUFI® 2D** omogućuje dvodimenzionalne analize. 2-D analize su neophodne za geometrijski zahtjevnije slučajeve kao što su uglovi zgrada, prozori, kontakti s tlom, tj.

mjesta u kojima postoji kontakt građevnih dijelova različitog higrotermalnog ponašanja [28].

- **WUFI® Plus** je najsloženiji i najkompletniji simulacijski alat iz WUFI®-jeve softverske ponude. Radi na principu 3-D dinamičke analize, tj. omogućuje promatranje cijele zgrade u vidu higrotermalnog ponašanja. Pruža mogućnost analize toplinskih mostova i analize zrakopropusnosti. Ova verzija sadrži i proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje [29].



**Slika 20.** Shema ulaznih i izlaznih parametara WUFI®-ja [25]

Pojedini ulazni i izlazni parametri, slika 20., biti će detaljnije opisani u Eksperimentalnom dijelu ovog rada.



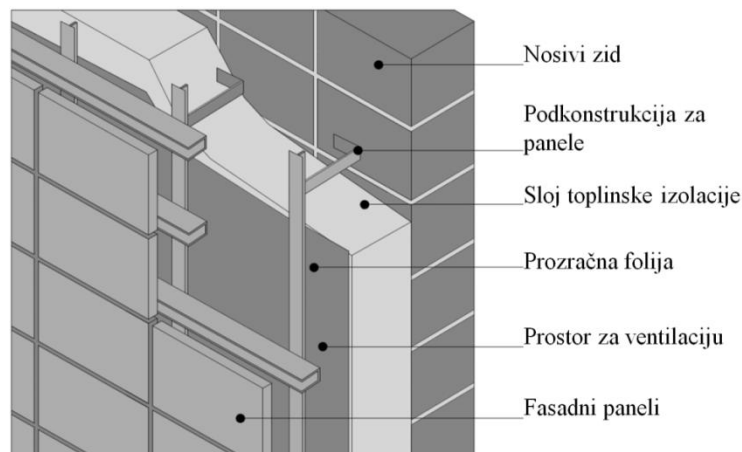
## 5. VENTILIRANE FASADE

Ventilirane fasade su sustavi vanjske ovojnice zgrade u kojima postoji sloj ventiliranog zraka između vanjske završne obloge i toplinske izolacije. Smatraju se jednim od najučinkovitijih sustava za istovremeno rješavanje problema toplinske zaštite zgrade, smanjenje utjecaja toplinskih mostova, kao i problema uzrokovanih kondenzacijom vodene pare, čime se postiže optimalno higrotermalno ponašanje zgrade.

Sustav ventilirane fasade je sustav gradnje vanjskog zida zgrade, sastavljenog od karakterističnih dijelova koji imaju strogi raspored i pripadnu ulogu unutar sustava, slika 21.

Dijelovi sustava ventilirane fasade su, gledano iz unutrašnjosti zgrade prema vanjskom okolišu, sljedeći [30]:

- vanjski (nosivi) zid zgrade
- podkonstrukcija za panele
- sloj toplinske izolacije
- prozračna folija
- prostor za ventilaciju (sloj ventiliranog zraka)
- vanjski završni sloj (fasadni paneli i ploče).



**Slika 21.** Slojevi ventilirane fasade [30]

Ovakav fasadni sustav je složeniji i teži za montažu od primjerice klasičnog ETICS (eng. *External Thermal Insulation Composite System*) sustava, a svaki od navedenih slojeva mora zadovoljiti određene zahtjeve kako bi se ostvarila učinkovita i trajna ventilirana fasada.

Vanjski (nosivi) zid treba ispuniti 1. temeljni zahtjev za građevine (osigurati mehaničku otpornost i stabilnost cijele građevine), treba omogućiti difuziju vodene pare kroz sebe te imati dovoljan otpor prolasku topline (ispunjenje 6. temeljnog zahtjeva za građevine – gospodarenje energijom i očuvanje topline).

Podkonstrukcija može biti drvena ili metalna, ali je kao i za vanjski (nosivi) zid bitno da bude dovoljno čvrsta da može prenijeti opterećenje vanjskog završnog sloja i da može odolijevati djelovanju vjetra, mehaničkim djelovanjima i djelovanju potresa, što je posebno bitno za hrvatske prilike.

Sloj toplinske izolacije je obično sloj mineralne vune, a njegova debljina varira u odnosu na razinu toplinske zaštite koju je potrebno postići za određenu zgradu. Mineralna vuna se najčešće koristi kao materijal za toplinsku izolaciju u ventiliranim fasadama iz razloga velike paropropusnosti (omogućen nesmetan prolazak vodene pare) i zaštite od požara (razred reakcije na požar A1 – čime se ograničava vertikalno i horizontalno širenje požara u zračnom prostoru fasade).

Prozračne folije su paropropusne – vodonepropusne folije koje sprječavaju prodiranje vode u sloj toplinske izolacije s vanjske strane, a istovremeno dopuštaju prolazak viška vodene pare iz unutrašnjeg prostora zgrade.

Sloj ventiliranog zraka omogućuje određeni stupanj toplinske izolacije u zimskom periodu te toplinsko rasterećenje u ljetom periodu. Unutar sloja ventiliranog zraka potrebno je osigurati nesmetanu cirkulaciju topline i vodene pare te spriječiti kondenziranje vodene pare na površini zida i u sloju toplinske izolacije.

Vanjski završni sloj štiti cjelokupni sustav od atmosferskih djelovanja (oborina, vjetra, sunčevog zračenja, zagađenja zraka i sl.). Fasadni paneli moraju spriječiti ulazak vode (kiše nošene vjetrom – eng. *Wind driven rain*) u ventilirani sloj zraka, omogućiti mehaničku zaštitu toplinske izolacije i prozračne folije, te moraju imati što niži koeficijent emisije zračenja, kako bi se smanjio prijenos topline zračenjem i kako bi se smanjile degradacije materijala zbog djelovanja sunčevog zračenja. Fasadne obloge čine dekorativno lice zgrade, a mogu biti izrađeni od različitih materijala – metalnih, staklenih, poliuretanskih, furnirnih, kamenih i drugih ploča [30]. Također, vanjski završni sloj čini i prekid prolasku kapilarne vlage.

Fuge između pojedinih panela se ostavljaju otvorene, slika 22., kako bi se, uz otvore na dnu i vrhu vanjske ovojnice, omogućilo da zrak nesmetano ulazi u zračni sloj panela, struji i na taj način ventilira vanjsku ovojnicu [4].

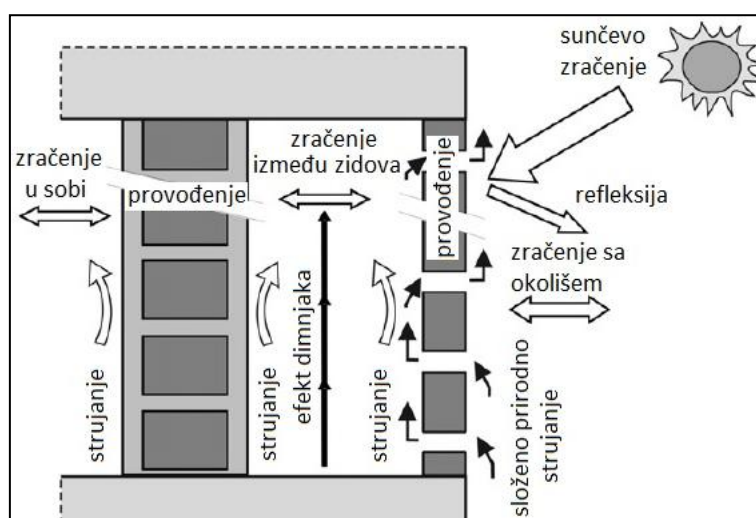


**Slika 22.** Ugradnja ventilirane fasade s otvorenim fugama

### 5.1. Mehanizmi prijenosa topline i vlage u ventiliranim fasadama

Na „efektu dimnjaka“ počiva ideja funkcioniranja ventiliranih fasada, slika 23. Sunčevo zračenje zagrijava vanjski sloj i aktivira strujanje unutar zračnog sloja, čime potiče ventilaciju vanjske ovojnice. „Efekt dimnjaka“ je pojava pri kojoj se zrak diže uzduž cijele visine zračnog sloja, akumulirajući toplinu svojim strujanjem koje je uzrokovano razlikama temperature vanjskog i unutarnjeg sloja. Zrak se zagrijava i u trenutku kada dosegne temperaturu veću od temperature okoliša, izlazi kroz gornji otvor i otvorene fuge čime „izvlači“ toplinu iz prostora zračnog sloja. Time se smanjuje temperatura unutarnjeg sloja i tok topline prema unutrašnjosti zgrade, što dovodi do smanjenja potrebne energije za hlađenje unutarnjeg prostora [4]. Riječ je zapravo o pasivnoj ventilaciji, tj. ventilaciji pod kojom se podrazumijeva izmjena i strujanje zraka bez korištenja dodatnih uređaja.

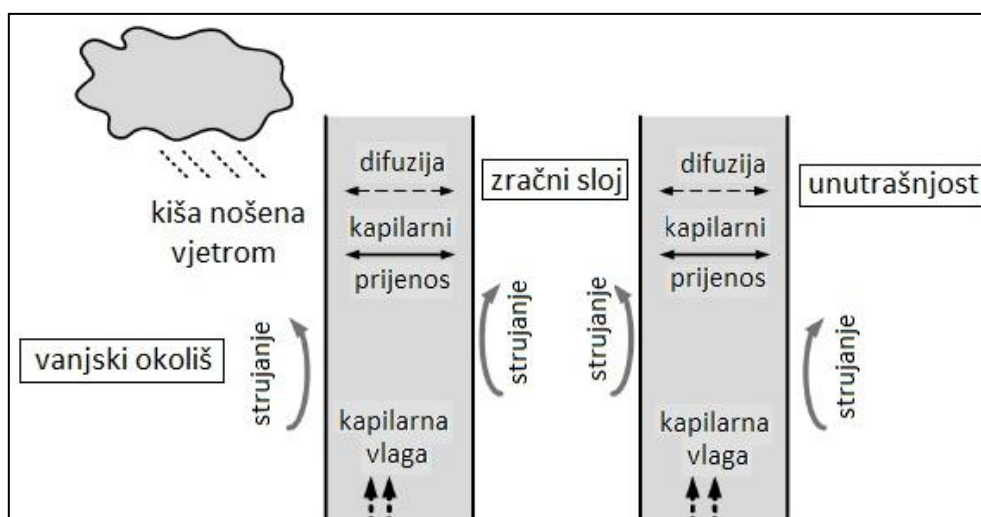
Osim „efekta dimnjaka“ potaknutog razlikama temperature, ventilaciju zraka u zračnom sloju uzrokuju i razlike tlakova unutar zračnog sloja te djelovanje vanjskog vjetera. Učinkovitost ventilirane fasade očituje se količinom energije apsorbirane zrakom koji struji u zračnom sloju [4].



**Slika 23.** Princip ventilacije i mehanizmi prijenosa topline u ventiliranim fasadama s otvorenim fugama [31]

Mnogi znanstvenici i stručnjaci uz ventilaciju zraka navode i ostale prednosti ventiliranih fasada kao što su [32]:

- kapilarni prekid vanjskog i unutarnjeg sloja ovojnice
- odvodnja oborinskih voda
- izjednačavanje tlakova čime se sprječava infiltracija vodene pare
- isušivanje sloja toplinske izolacije u slučaju kondenzacije vodene pare



**Slika 24.** Mehanizmi prijenosa vlage u ventiliranim fasadama s otvorenim fugama [33]

Na slici 24. prikazani su mehanizmi prijenosa vlage u ventiliranim fasadama sa otvorenim fugama. Kiša nošena vjetrom donosi vlagu koja difuzijom i kapilarnim prijenosom

ulazi u slojeve panela. Uslijed pritiska iz okolnog tla vlaga se vertikalno kapilarno uzdiže u panele. Zrak koji struji kroz ventilirani prostor grije se pod utjecajem topline zgrade što uzrokuje sušenje kondenzirane vodene pare nakupljene na stražnjem dijelu fasadnih ploča. Fasadna obloga dozvoljava odvodnju kišnih kapi i kondenzirane vodene pare kroz fuge, a zrak koji cirkulira kroz ventilirani prostor pomaže u sprječavanju kondenzacije i potiče isušivanje slojeva vanjskog zida ukoliko je došlo do kondenzacije vodene pare. Vanjski zidovi su suhi što doprinosi njihovoj trajnosti kroz dugi niz godina [34].

## **5.2. Pregled postojećih istraživanja o analizama HAM modela laganih ventiliranih fasada**

Pojavom većeg broja građevinskih šteta uzrokovanih problemima s vlagom, 70-ih i 80-ih godina prošlog stoljeća započelo je istraživanje uloge i učinka ventiliranog sloja. Fraunhofer Institut za građevinsku fiziku proveo je eksperimentalni monitoring protoka ventilacije i učinka na proces isušivanja za različite vrste obloga u ventiliranim fasadama. Popp i suradnici [35] su promatrajući vlažne zidove od blokova porobetona zaključili da je brzina sušenja znatno veća kod ventiliranih obloga. Mayer i Kunzel [36] su tijekom provedenih mjerenja ventilacije iza obloga vanjske ovojnice troetažne zgrade došli do sličnih saznanja o učinkovitosti sušenja. Utvrdili su da smjer vjetra ima veći utjecaj na brzinu ventilacije u zračnom sloju od brzine vjetra. Preporučili su da u slučaju korištenja materijala osjetljivih na vlagu za izgradnju vanjskih zidova, gornji i donji otvor za ventilaciju moraju biti što je moguće većih dimenzija kako bi se povećala brzina strujanja zraka u zračnom sloju. Utjecaj ventiliranog sloja zraka na isušivanje i ujednačavanje tlakova iza obloge od pune opeke i vinil obloge proučavali su Straube i Burnett [37, 38]. Istraživanje je rezultiralo glavnim crtama za proračun protoka zraka i utvrdilo da ventilacija iza obloga može biti korisna u vidu kontrole prolaska vodene pare prema unutrašnjosti zgrade. Finch, Hubbs i Straube [39] su pet godina provodili monitoring na pet zgrada u Vancouveru s vanjskom ovojnicom od ventiliranih drvenih okvirnih zidova, ali s različitim oblogama. Zaključili su da je ventilacija pogodna za isušivanje slučajnog prodora vlage i za „izvlačenje“ vlage nakupljene unutar apsorbirajućeg materijala obloga. Nedovoljna ventilacija iza apsorbirajućih obloga dovodi do mogućnosti povećanja sadržaja vlage u unutarnjim slojevima vanjske ovojnice do kritične razine.

Za razliku od ostalih, Hershfield [40] je promatranjem laganih vanjskih zidova sa stucco oblogom zaključio da je isušivanje bilo sporo kod svih promatranih zidova te da ventilirani sloj nije doprinio isušivanju vode koja je ušla u zračni sloj. Hens [41] je na temelju svojih istraživanja na ventiliranim fasadama izvedenim na vanjskim zidovima od opeke zaključio da je ponašanje neventiliranih fasada bolje od ponašanja ventiliranih, odnosno da je i bez ventilacije zračnog sloja tolerancija na vlagu takvih ovojnica izvrsna.

Može se primijetiti da su rezultati navedenih istraživanja oprečni. Objašnjenje vrlo vjerojatno leži u sljedećem: učinkovitost ventilacije iza obloge ovisna je o tipu vanjske ovojnice i o vanjskoj klimi. Veliki temperaturni gradijenti i gradijenti tlaka uzrokovani vjetrom potiču veće brzine strujanja u zračnom sloju. Künzel i suradnici [42] naglašavaju da je sloj ventiliranog zraka u pravilu nepotreban u slučaju tradicionalne gradnje ventiliranih zidova od opeke. U današnjoj suvremenoj gradnji koja mora zadovoljiti stroge energetske zahtjeve, ventilacija zračnog sloja može imati prednosti u vidu zaštite toplinske izolacije i vanjskog zida od vlage. Stoga, važno je znati procijeniti u kojima sustavima je potrebna ventilacija zračnog sloja, a u kojim sustavima ona nije potrebna [4].

### **5.3. Ventilirani predgotovljeni betonski zidni sandwich paneli**

Iako se ventilirane ovojnice u pravilu pojavljuju u obliku laganih ili srednje teških konstrukcija glede njihove masivnosti, danas se istražuju i razvijaju sustavi teških ventiliranih ovojnica. Riječ je o predgotovljenim betonskim zidnim sandwich panelima, koji u odnosu na klasične betonske sandwich panele imaju i zračni sloj između toplinske izolacije i vanjske fasadne obloge. Zrak u tom sloju je ventiliran, a njegova brzina i količina ventilacije (eng. *Air Change Rate – ACR*) ovisi o dimenzijama panela, debljini zračnog sloja, veličini fuga i otvora, brzini i smjeru vjetra, sunčevom zračenju, emisivnosti vanjske fasadne obloge (primarno ovisi o boji vanjske fasadne obloge), itd.

Prednosti takvih panela je i u modularnoj gradnji kojom se postiže osiguranje kvalitete zbog izrade u kontroliranim tvorničkim uvjetima (slika 25.), smanjenje vremena izrade što se očituje u manjim troškovima gradnje, ekološka prihvatljivost, veća sigurnost i higijenski uvjeti na gradilištu [43] i sl.



**Slika 25.** Izrada ECO-SANDWICH® panela u tvornici [43]

Predgotovljeni zidni sandwich paneli s izolacijom od mineralne vune i slojem ventiliranog zraka su inovativni paneli koji pronalaze svoje mjesto na tržištu. Primjer takvog panela je ECO-SANDWICH® zidni panel, slika 26. ECO-SANDWICH® panel je nastao kao rezultat opsežnih znanstvenih istraživanja provedenih na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu [44].



**Slika 26.** Presjek ECO-SANDWICH® panela [45]

Valja naglasiti kako je pregledom dostupne literature ustanovljeno da trenutno nema dostupnih niti numeričkih niti eksperimentalnih rezultata istraživanja higrotermalnog ponašanja ventiliranih betonskih fasada, tj. teških ventiliranih ovojnica. Nije poznat doprinos ventiliranog zraka na ponašanje takvih teških ventiliranih ovojnica.

Proučavanjem higrotermalnog ponašanja betonskih sandwich panela u svom doktorskom radu bavio se F. Al-Neshawy [46]. Međutim, navedeni betonski sandwich panel nije bio ventilirani te se spoznaje tog istraživanja ne mogu primijeniti na higrotermalno ponašanje ventiliranih predgotovljenih zidnih sandwich panela.

Stoga, postoji područje s potencijalom za daljnja znanstvena istraživanja. Smatra se da će numeričko istraživanje doprinijeti boljem razumijevanju higrotermalnog ponašanja ventiliranih predgotovljenih zidnih sandwich panela kao takvih, kao i razumijevanju utjecaja ventilacije na takve panele ovisno o veličini ventilacije i klimatskom području u kojem se zgrada nalazi.



## 6. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni dio ovog rada obuhvaća izradu numeričkog modela predgotovljenog ventiliranog fasadnog panela za proračun njegovog dinamičkog higrotermalnog ponašanja. Korišten je programski alat WUFI® Pro 5.2 predstavljen u poglavlju 4.2.1. Provedena je detaljna parametarska analiza pri kojoj su varirana dva parametra:

- lokacija panela – klimatski uvjeti kao vanjski rubni uvjet
- veličina ventilacije zraka u zračnom sloju

Ti parametri su odabrani za analizu jer se smatra da oni, uz sastav same vanjske ovojnice, imaju najznačajniji utjecaj na dinamičko higrotermalno ponašanje. Cilj je bio utvrditi utjecaj veličine ventilacije zraka na dinamičko higrotermalno ponašanje panela te učinkovitost ventilacije za različita klimatska područja.

### 6.1. Geometrija i karakteristike materijala panela

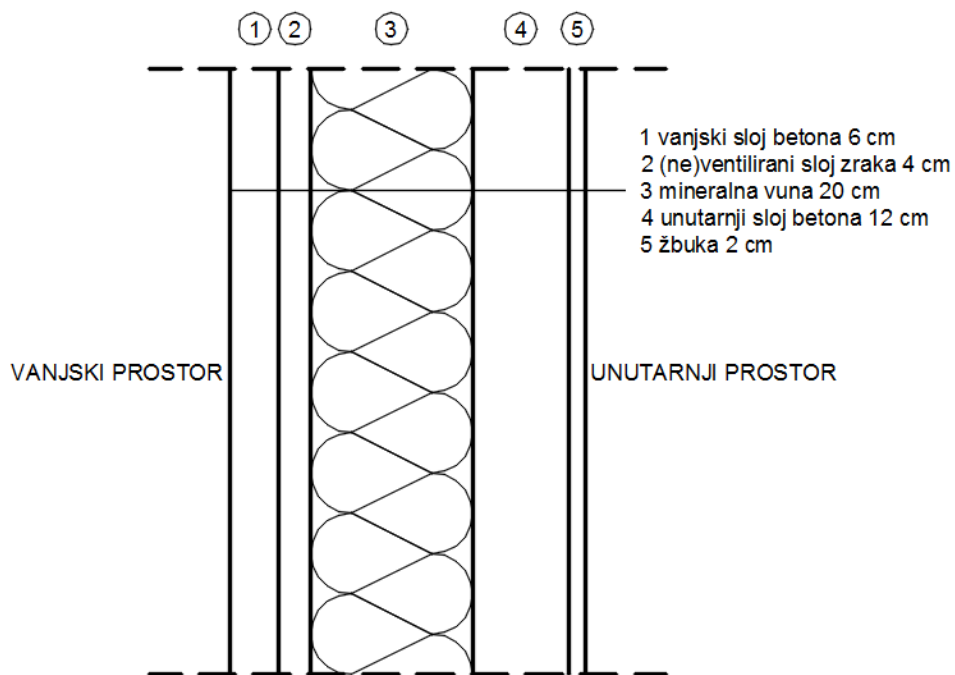
Modelirani panel je po geometrijskim karakteristikama istovjetan ECO-SANDWICH® panelu, tj. potpuno je identičan osim što vanjski i unutarnji sloj betona nisu od recikliranog agregata nego su uzeti kao obični betoni sa karakteristikama dostupnim u bazi materijala programskog alata WUFI®. Nije modeliran panel s recikliranim agregatom isključivo iz razloga jer još uvijek nema dostupnih rezultata istraživanja svih higrotermalnih svojstava betona s recikliranim agregatom kakav se nalazi u ECO-SANDWICH® panelu, osobito s naglaskom na sorpcijske krivulje koje su neophodne kako bi se što realnije mogao opisati prijenos vlage kroz materijal. Slojevi modeliranog panela, poredani iz vanjskog prostora prema unutarnjem, s pripadnim debljinama, prikazani su na slici 27.

Napravljena su tri različita modela panela, a jedina razlika je u sloju zraka, odnosno veličini ventilacije zračnog sloja. U jednom modelu panela je sloj zraka definiran kao neventilirani, u drugom je definiran kao ventilirani s 5 izmjena volumena zraka u satu, a u trećem je modelu definiran kao ventilirani sloj zraka s 20 izmjena volumena zraka u satu.

Broj izmjena zraka  $n = 5$  [1/h] je odabran kao od strane Fraunhofer Instituta za građevinsku fiziku preporučena minimalna vrijednost ventilacije zraka.

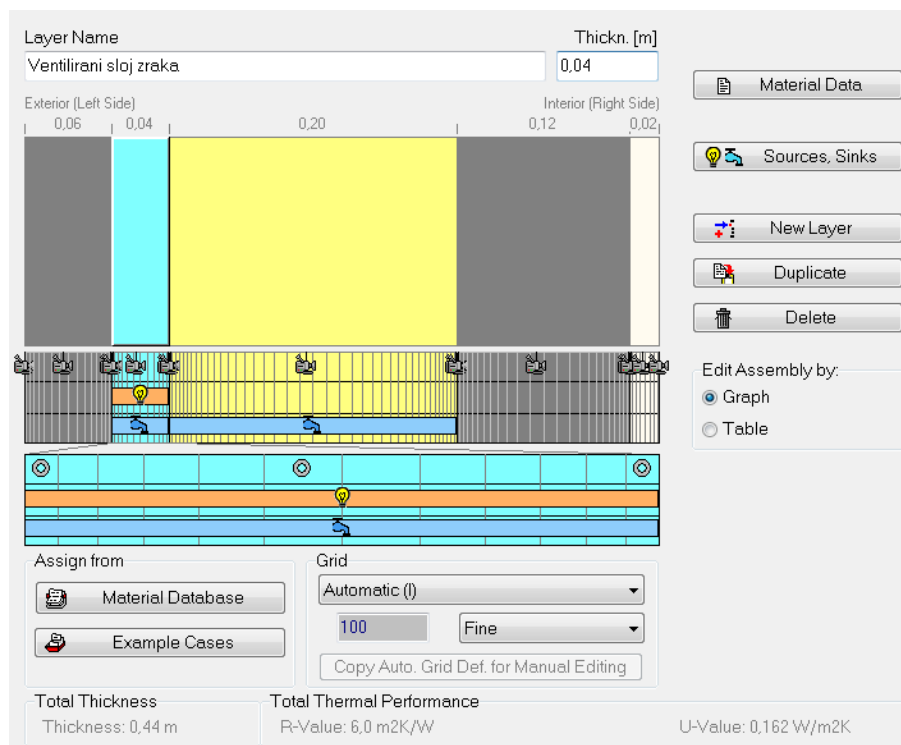
Broj izmjena zraka  $n = 20$  [1/h] je odabran kao neka srednja vrijednost ventilacije zraka.

Bio je napravljen i preliminarni proračun za panel s brojem izmjena zraka  $n = 50$  [1/h], kao deseterostruko većom vrijednosti od preporučene minimalne ventilacije zraka. Međutim, simulacijama je utvrđeno da se ponašanje takvog panela praktički podudara s ponašanjem panela čija ventilacija zraka iznosi  $n = 20$  [1/h], te je odlučeno nastaviti sve proračune za panel s brojem izmjene zraka  $n = 20$  [1/h] čiji su rezultati i prikazani u nastavku rada.



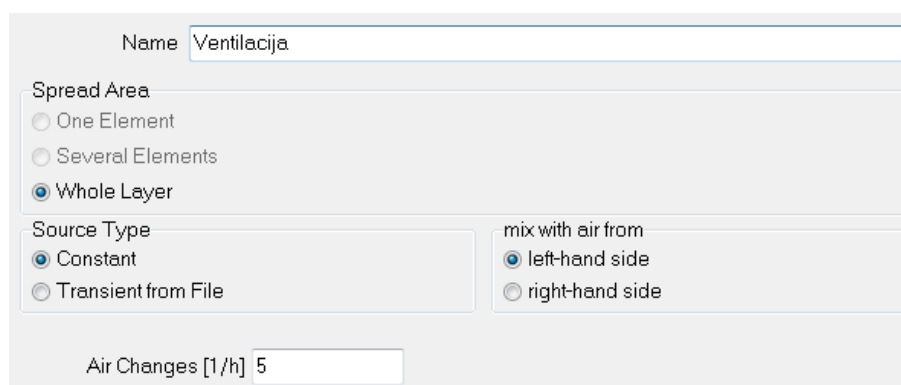
**Slika 27.** Slojevi modeliranog panela

Kroz svaki modelirani panel su postavljene „kamere“, tj. označeni su isti karakteristični presjeci za koje će se proračunom dobiti konkretne vrijednosti higrotermalnog ponašanja, slika 28. Za dobivene vrijednosti u istim presjecima, moći će se provesti usporedba i analiza rezultata te na temelju toga izvesti zaključci o utjecaju veličine ventilacije i klime na higrotermalno ponašanje panela. Odabrani presjeci nalaze se na početku i na kraju svakoga sloja te u sredini svakoga sloja. Time će se dobiti šira slika o prolasku vlage i topline kroz cijeli panel.



**Slika 28.** Podešavanje položaja „kamera“ u presjeku panela u WUFI®-ju

Za panele s ventiliranim slojem zraka bilo je potrebno definirati ventilaciju zraka i njezinu količinu. Količina ventilacije definira se kao broj izmjene zraka (volumena zraka u zračnom sloju) u jednom satu. Dodan je izvor ventilacije (slika 29.) te je označeno da se ventilacija zraka odvija kroz cijeli presjek sloja zraka (dakle kroz svih 4 cm) te da je ona konstantna. To je pretpostavka i naravno da u stvarnosti u ventiliranim fasadama ventilacija zraka nije uvijek konstantna. Međutim, da bi imali stvarni profil ventilacije zraka u zračnom sloju potrebno je provesti eksperimentalni monitoring zračnog sloja što nije slučaj ovoga rada.



**Slika 29.** Podešavanje ventilacije u WUFI®-ju

## 6.2. Početni uvjeti

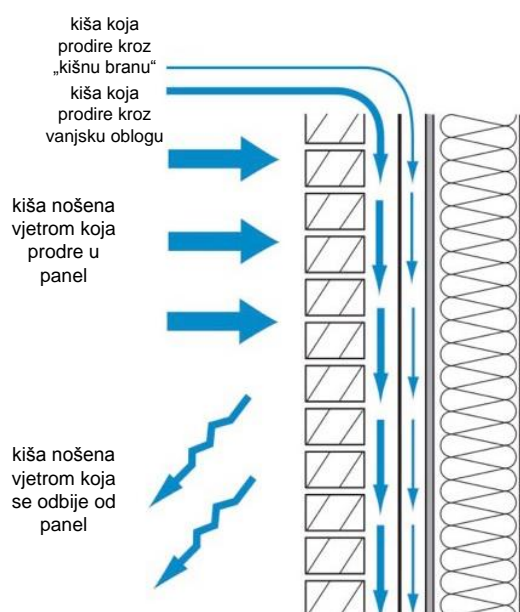
Za sve vrste panela postavljeni su isti osnovni parametri, slika 30. Za unutarnji i vanjski plošni koeficijent prijelaza topline postavljene su uobičajene vrijednosti. Upijanje kratkovalnog zračenja i emisija dugovalnog zračenja određeni su materijalom sloja izloženog vanjskom okolišu, tj. njegovom bojom. Odabrana je crvena boja jer je cilj modelirati panel svojstvima što bližim ECO-SANDWICH® panelu, a njegov završni sloj je crvene boje. Za refleksiju kratkovalnog zračenja od tla uzeta je standardna vrijednost.

The image shows a software interface for configuring wall parameters. It is divided into two main sections: 'Exterior Surface (Left Side)' and 'Interior Surface (Right Side)'. Each section contains several input fields and dropdown menus.

Exterior Surface (Left Side)		
Heat Resistance [m <sup>2</sup> K/W]	0,0588	External Wall
includes long-wave radiation parts [W/m <sup>2</sup> K]	6,5	
wind-dependent	<input type="checkbox"/>	...
Sd-Value [m]		
	—	No coating
Note: This setting does not affect rain absorption		
Short-Wave Radiation Absorptivity [-]	0,68	Brick, red
Long-Wave Radiation Emissivity [-]	0,9	
Explicit Radiation Balance	<input type="checkbox"/>	...
Note: Be sure to have appropriate values for the atmospheric counter-radiation in the climate file you use before enabling the explicit radiation balance. Otherwise unrealistic temperatures may result at the exterior surface.		
Ground Short-Wave Reflectivity [-]	0,2	Standard value
Adhering Fraction of Rain [-]	0,7	According to inclination and construction type
Interior Surface (Right Side)		
Heat Resistance [m <sup>2</sup> K/W]	0,125	(External Wall)
Sd-Value [m]		
	—	No coating

**Slika 30.** Podešavanje osnovnih parametara u WUFI®-ju

Eksperimentalno je utvrđeno da se 30 % kiše nošene vjetrom odbija od vanjske fasadne površine panela, dok se 70 % kiše upija u panel, slika 31. Od tih 70 % kiše uzima se da 1 % prodire kroz panel prema unutarnjem prostoru [47]. Za svaki slučaj kod modeliranih panela uzeto je da tih 1 % kiše nošene vjetrom prodire u sloj toplinske izolacije i to kroz cijelu njegovu debljinu, slika 32. Iako je malo vjerojatno da će kiša prodrijeti kroz svih 20 cm toplinske izolacije, ova opcija je odabrana jer ona predstavlja najtežu moguću varijantu tog opterećenja, tzv. „*worst case scenario*“.



**Slika 31.** Shematski prikaz prodora vlage uslijed oborina u presjek građevnog dijela zgrade

Name: Kiša nošena vjetrom

Spread Area:  
 One Element  
 Several Elements  
 Whole Layer

Source Type:  
 Transient from File  
 Fraction of Driving Rain  
 Air Infiltration model IBP  
 Constant Monthly Moisture Load

Source Term Clipping [kg/m<sup>3</sup>]:  
 No Clipping  
 Clipping to max. Water Content  
 Clipping to Free Water Saturation  
 User Defined

Fraction [%]: 1

**Slika 32.** Podešavanje utjecaja kiše nošene vjetrom u WUFI®-ju

Jedno od ograničenja Glaserove metode je to što ne uzima u obzir ugradbenu vlagu u materijalima i proizvodima. Zbog načina proizvodnje, skladištenja i procesa same gradnje, ugradbena vlaga je neizbježna pojava. Stoga se u sklopu proračuna iskoristila mogućnost WUFI®-ja da se definira ugradbena vlaga u panelu.

Za ugradbenu (početnu) količinu vlage nije odabrana konstantna vlaga duž panela, već je svakom sloju pridružena karakteristična vrijednost ugradbene ili građevinske vlage za pripadni materijal sloja, kako bi se što bolje prikazali stvarni uvjeti, tj. kako bi se dobio uvid u utjecaj ugradbene vlage na higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice i na vrijeme koje je potrebno da promatrani panel dođe u dinamičko stanje ravnoteže, tj. da se ta ugradbena

vлага posuši. Za početnu temperaturu odabrana je konstantna temperatura duž panela od 20 °C, slika 33.

Initial Moisture in Component

Constant Across Component

In each Layer

Read from File

Initial Temperature in Component

Constant Across Component

Read from File

Assign Typical Build-In Moisture

Initial Temperature in Component [°C] 20

Initial Water Content in Different Layers

No.	Material Layer	Thickn. [m]	Water Content [kg/m3]
1	Vanjski sloj betona	0,06	147,0
2	Ventilirani sloj zraka	0,04	1,88
3	Mineralna vuna	0,20	0,7
4	Unutarnji sloj betona	0,12	147,0
5	Žbuka	0,02	210,0

**Slika 33.** Podešavanje početnih uvjeta u WUFI®-ju

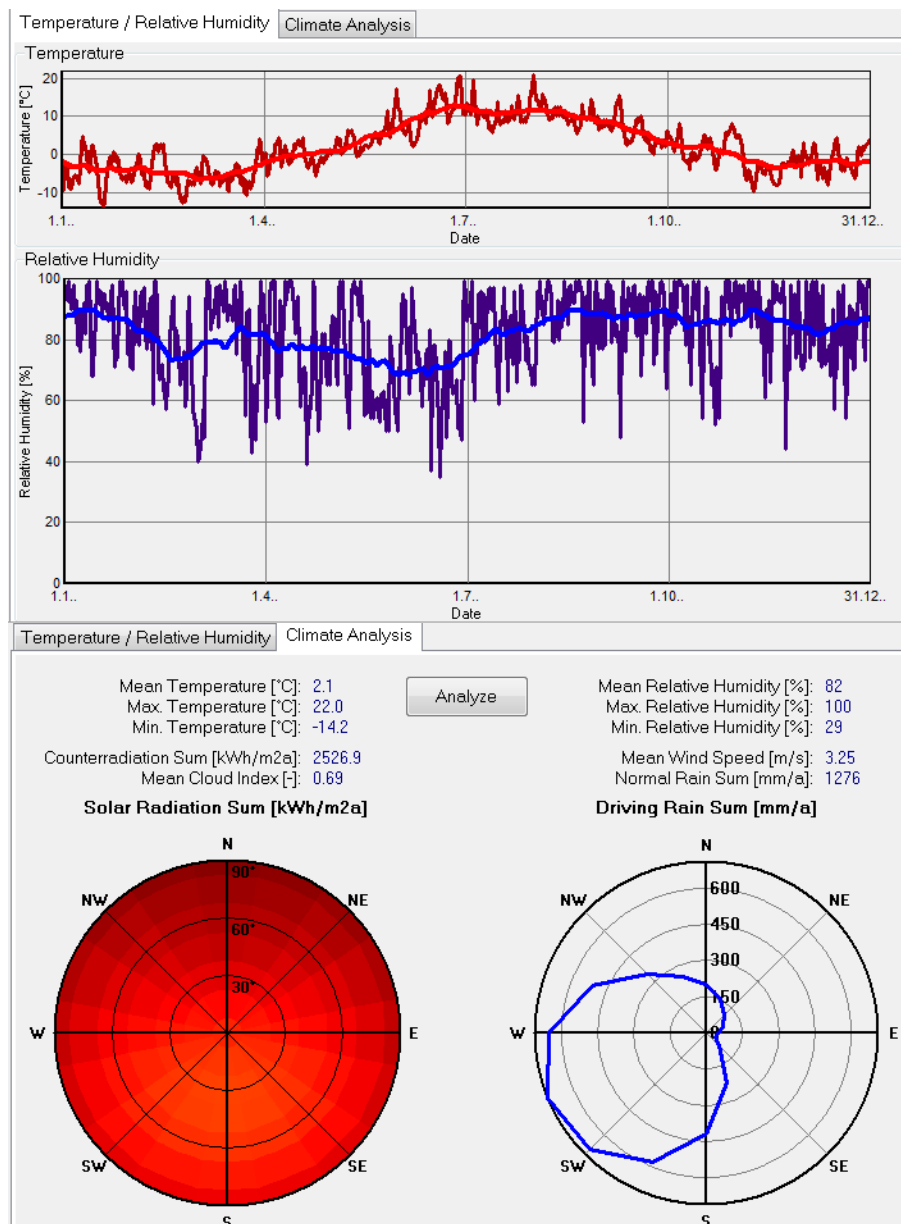
### 6.3. Vanjski rubni uvjeti

Pregledom dostupnih klimatskih podataka u WUFI®-jevoj bazi odabrane su tri lokacije, tj. tri grada koji imaju potpuno različitu klimu, tablica 3., kako bi se dobio uvid u ponašanje panela u različitim klimatskim uvjetima i učinkovitost ventilacije u različitim klimama. Sva tri različito ventilirana panela (neventilirani i dva ventilirana panela) modelirana su u trima različitim klimama, što čini ukupno devet slučajeva proračuna.

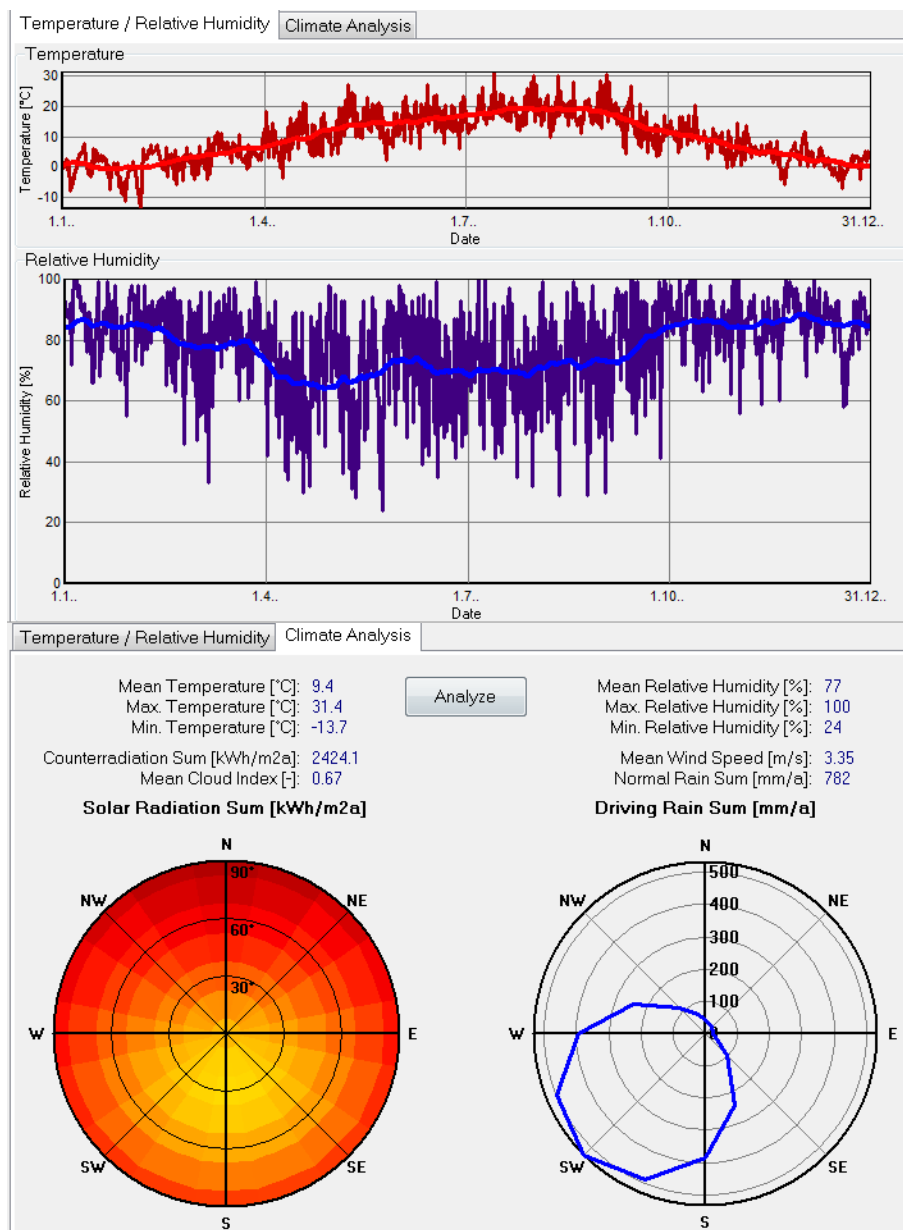
**Tablica 3.** Pregled osnovnih klimatskih podataka odabranih lokacija

	Tromso	Frankfurt	Malaga
Klima	hladna	kontinentalna	sredozemna
Min. temperatura [°C]	-14,2	-13,7	0
Max. temperatura [°C]	22	31,4	40
Prosječna temperatura [°C]	2,1	9,4	18,3
Min. relativna vlažnost [%]	29	24	8
Max. relativna vlažnost [%]	100	100	100
Prosječna relativna vlažnost [%]	82	77	64

Na sljedećim slikama (34. - 36.) prikazani su klimatski parametri na navedenim lokacijama – kretanje temperature i relativne vlažnosti tijekom godine, ekstremi i srednje vrijednosti temperature i relativne vlažnosti, srednja brzina vjetra i količina kiše tijekom godine, grafički prikazi količine i smjera sunčeva zračenja (od crvene boje koja označava najmanju količinu, preko žute, do zelene boje koja označava najveću količinu), grafički prikazi količine i smjera kiše, itd.

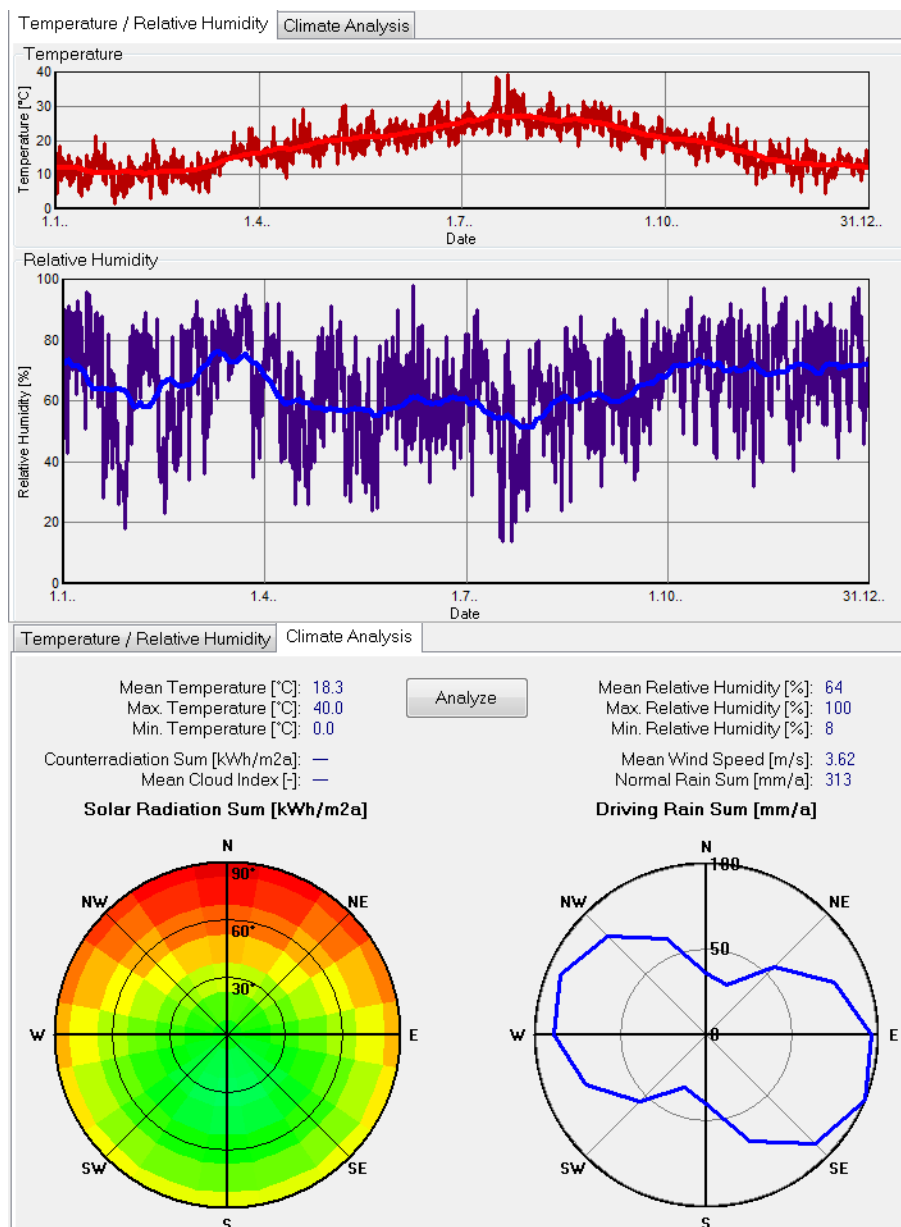


Slika 34. Klimatski parametri u Tromsøu



Slika 35. Klimatski parametri u Frankfurtu



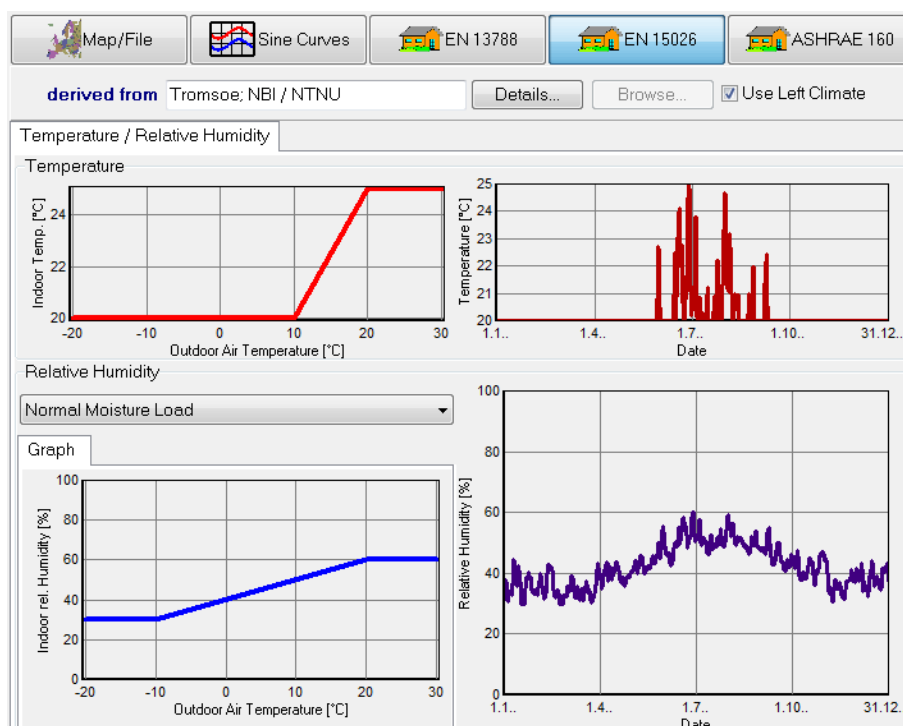


Slika 36. Klimatski parametri u Malagi

#### 6.4. Unutarnji rubni uvjeti

Temperatura i relativna vlažnost unutarnjeg prostora ovisna je o temperaturi i relativnoj vlažnosti vanjskog prostora te o navikama korisnika unutarnjeg prostora. Navike korisnika su uvijek individualne i njih je teško pretpostaviti već se mogu jedino kontinuirano pratiti eksperimentalnim putem u nekoj postojećoj zgradi koja se modelira. Budući da se u sklopu ovoga rada numerički analizira panel koji bi činio vanjsku ovojnicu neke potencijalne

zgrade, ponašanje korisnika se može tek pretpostaviti i pojednostavljeno uzeti prema normi EN 15026 koja ponajbolje opisuje stvarno stanje. Stoga su postavke unutarnje klime definirane upravo prema toj normi. Za sve lokacije u sezoni grijanja temperatura unutarnjeg prostora je podešena na 20 °C, a u sezoni hlađenja na 25 °C. Relativna vlažnost zraka se kreće između 30 % i 60 %, slika 37. Ostale ponuđene opcije nude konstantnu temperaturu unutarnjeg prostora tokom cijele godine ili promjenu temperature i relativne vlažnosti zraka po čistom sinusoidnom zakonu, što nije realno stanje.

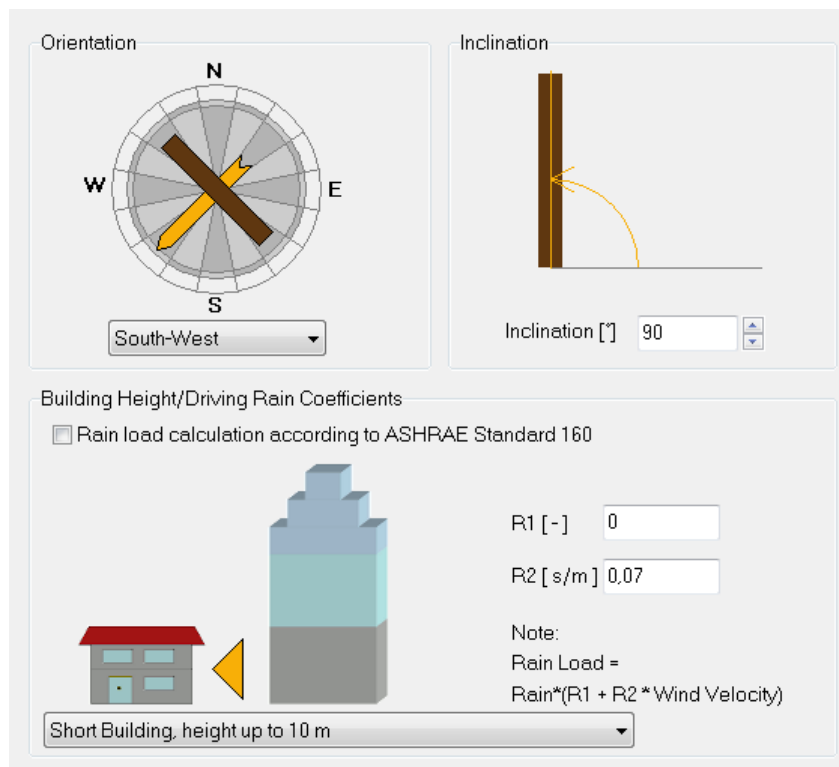


**Slika 37.** Ovisnost temperature i relativne vlažnosti unutarnjeg i vanjskog prostora u Tromsøu

## 6.5. Orientacija panela

Iz grafičkog prikaza (slike 34. - 36.) količine i smjera sunčeva zračenja te iz grafičkog prikaza količine i smjera kiše nošene vjetrom određena je kritična orijentacija panela, slika 38. Pod kritičnom orijentacijom panela smatra se ona strana svijeta na kojoj je najveće higrotermalno opterećenje koje djeluje na panel. Za Tromsø i Frankfurt ekstremne vrijednosti kiše i sunčeva zračenja su na jugozapadu, dok su za Malagu na jugoistoku. Paneli su u numeričkoj simulaciji okrenuti prema pripadnoj kritičnoj strani svijeta jer je to „worst case

scenario“, a nastojanje je dobiti uvid u dinamičko higrotermalno ponašanje pri najvećem higrotermalnom opterećenju kojem panel na određenoj lokaciji može biti izložen.



Slika 38. Podešavanje orijentacije panela u Tromsou i Frankfurtu u WUFI®-ju

## 6.6. Vremenski period proračuna

WUFI® pruža mogućnost višegodišnjeg proračuna čime se dobiva slika dugoročnog dinamičkog higrotermalnog ponašanja vanjskih ovojnica zgrada. Jedino je na taj način moguće utvrditi periode isušivanja i periode vlaženja građevnih dijelova te utvrditi eventualne zakonitosti ponašanja za određenu lokaciju proračuna – postizanje dinamičke ravnoteže.

U radu je simulirano ponašanje panela za prethodno navedena tri klimatska uvjeta u vremenskom razdoblju od dvije godine, točnije od 1.10.2016. 0:00 do 1.10.2018. 0:00, slika 39. Dvije godine je dovoljno dugo razdoblje za uočavanje higrotermalnog ponašanja panela i razdoblje u kojem bi panel trebao dosegnuti stanje dinamičke ravnoteže i pokazati određeno periodično ponašanje. Kraći vremenski period (npr. godina dana) ne bi bio dovoljan za razumijevanje higrotermalnog ponašanja panela jer se ne bi stigla uspostaviti zakonitost ponašanja, dok bi duži vremenski period (npr. pet ili deset godina) donio zanemarive razlike,

a istovremeno bi produljio vrijeme trajanja same numeričke simulacije, što ne bi bilo ekonomično. Na slici 40. je prikazana promjena ukupne količine vode u panelu u vremenskom razdoblju od pet godina. Vidljivo je da se nakon vremenskog perioda od dvije godine ponašanje počinje periodički ponavljati, a razlike iz godine u godinu gotovo da i ne postoje. Upravo stoga je vremenski period proračuna skraćen na dvije godine.

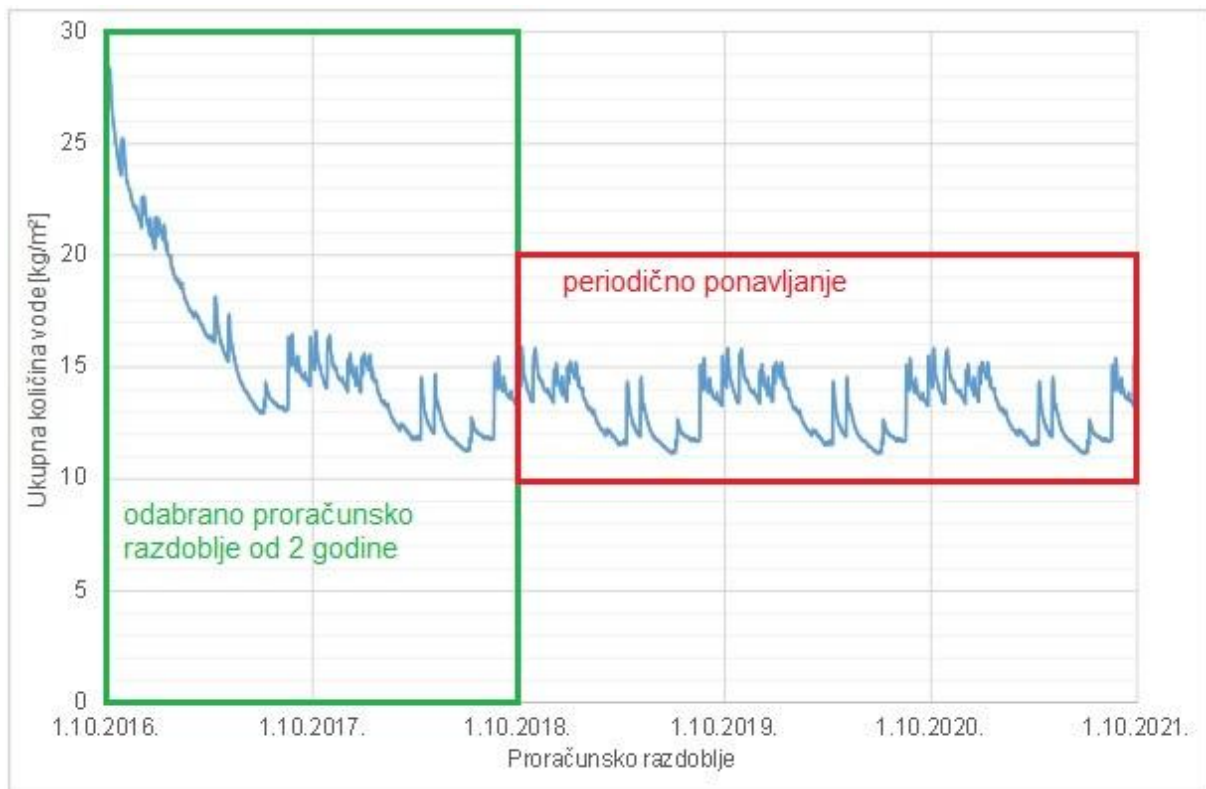
Start & End / Profiles			
Calculation	Profiles	Date	Hour
Start	Profile 1	1.10.2016.	0:00:00
End	Profile 2	1.10.2018.	0:00:00
		19.4.2016.	0:00:00

Time Steps [h]

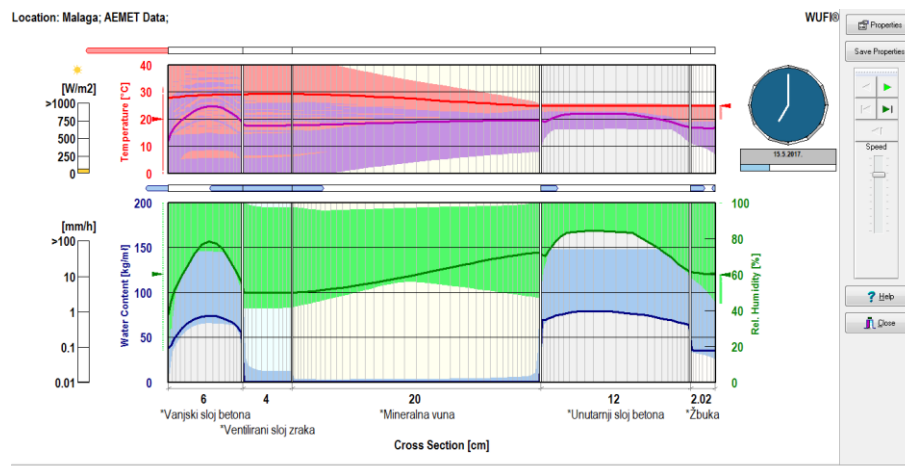
**Slika 39.** Podešavanje vremenskog perioda proračuna u WUFI®-ju

Za vremenski korak odabran je jedan sat čime se postiže visoka preciznost proračuna. Ukupan broj sati u dvije godine je 17.521, što znači da je numeričkom simulacijom za proizvoljnu točku panela stvoreno 17.521 zapisa higrotermalnih parametara – temperature, relativne vlažnosti, sadržaja vode, itd.

Tijekom numeričkog proračuna, moguće je promatrati simulaciju promjena higrotermalnih parametara kroz presjek panela u vremenu, slika 41. Crvenom krivuljom prikazana je temperatura kroz presjek panela u određenom satu, ljubičastom bojom temperatura kondenzacije, zelenom bojom relativna vlažnost, a plavom bojom količina vode. Anvelope promjena higrotermalnih parametara obojane su pripadno crvenom, ljubičastom, zelenom ili plavom bojom.



Slika 40. Usporedba rezultata u WUFI®-ju za proračunsko razdoblje od 2 i 5 godina



Slika 41. Simulacija promjena higrotermalnih parametara kroz presjek panela u vremenu u WUFI®-ju

## 6.7. Stabilnost numeričkih simulacija

Numeričke simulacije u WUFI®-ju bazirani su na rješavanju niza parcijalnih diferencijalnih jednažbi korištenjem početnih i rubnih uvjeta. Pri završetku numeričkih simulacija u WUFI®-ju pojavljuje se ispis podataka o kvaliteti, tj. stabilnosti provedenog proračuna, slika 42. U slučaju stabilnog numeričkog proračuna vrijednosti „Balance 1“ i „Balance 2“ trebaju biti gotovo identične. Korektno je ako se razlika pojavljuje tek na decimalama. U slučaju velikih razlika proračun je nestabilan i potrebno je identificirati i ukloniti izvor numeričkog problema.

Check for numerical quality		
Integral of fluxes, left side (kl,dl)	[kg/m2]	6,63 -2,87
Integral of fluxes, right side (kr,dr)	[kg/m2]	3,37 5,78
Balance 1	[kg/m2]	-17,03
Balance 2	[kg/m2]	-17,04

**Slika 42.** Ispis podataka o stabilnosti provedenog numeričkog proračuna u WUFI®-ju

## 7. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

U svrhu jednostavnijeg pisanja i praćenja rezultata numeričkih simulacija i analize rezultata, u daljnjem tekstu, koristiti će se sljedeće kratice:

- NV – neventilirani panel
- V5 – ventilirani panel s pet izmjena volumena zraka u satu
- V20 – ventilirani panel s dvadeset izmjena volumena zraka u satu

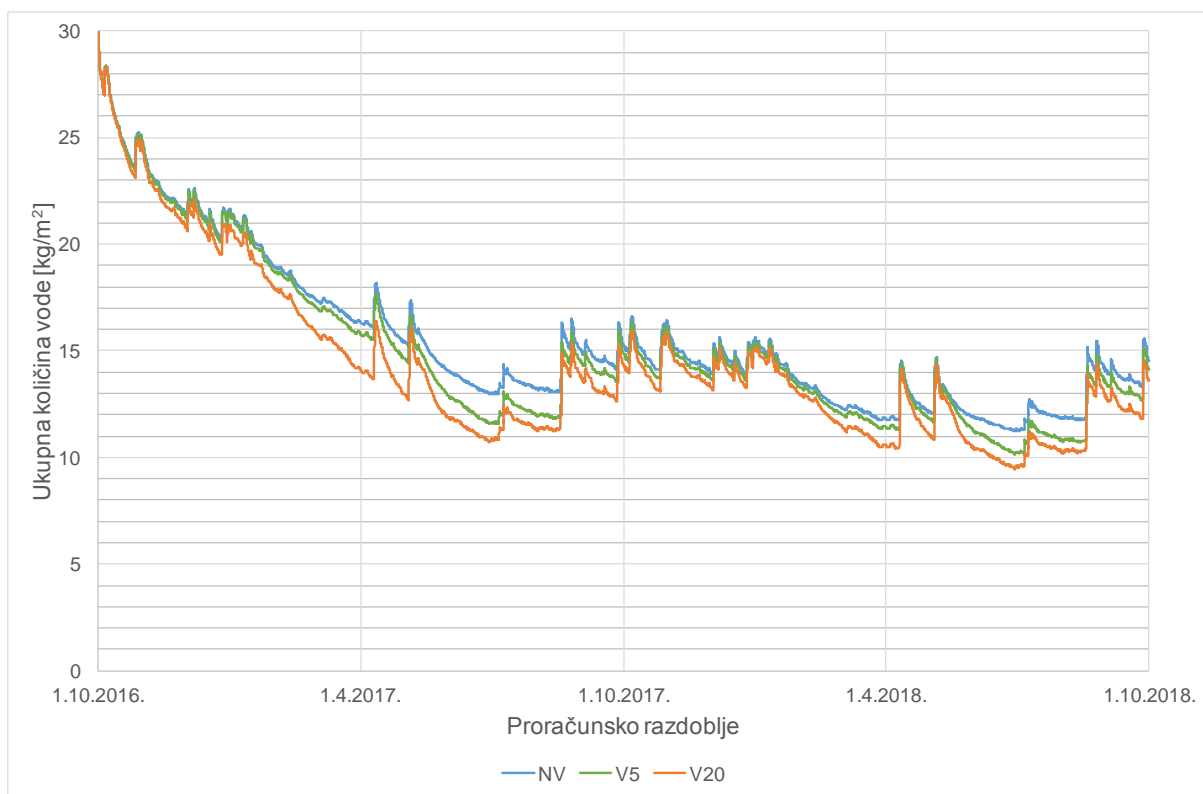
Prije prikaza samih rezultata higrotermalnog ponašanja panela, još jednom će se sumarno prikazati slučajevi proračuna sa pripadnim variranim parametrima modela u tablici 4.

**Tablica 4.** Slučajevi proračuna sa pripadnim variranim parametrima modela

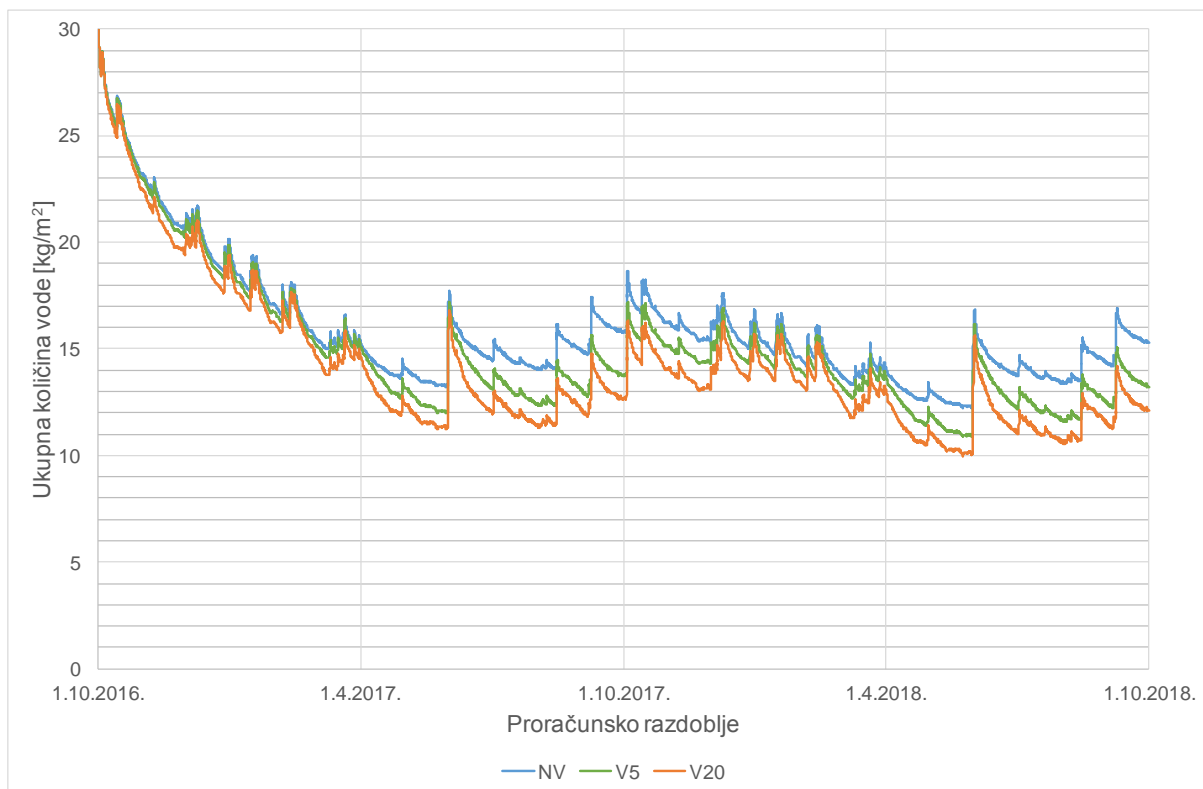
	Slučaj proračuna	Lokacija	Ventilacija zračnog sloja
NV	1	Tromso	neventilirani sloj zraka
V5	2	Tromso	5 izmjena volumena zraka u satu
V20	3	Tromso	20 izmjena volumena zraka u satu
NV	4	Frankfurt	neventilirani sloj zraka
V5	5	Frankfurt	5 izmjena volumena zraka u satu
V20	6	Frankfurt	20 izmjena volumena zraka u satu
NV	7	Malaga	neventilirani sloj zraka
V5	8	Malaga	5 izmjena volumena zraka u satu
V20	9	Malaga	20 izmjena volumena zraka u satu

### 7.1. Promjena ukupne količine vode u panelu

Jedan od reprezentativnih rezultata za razumijevanje higrotermalnog ponašanja je ukupna količina vode koja je sadržana u svim slojevima panela. Na slikama 43. – 45. je prikazana varijacija ukupne količine vode u cijelom panelu kroz vremenski period proračuna za pojedine lokacije. Rezultati svih slučajeva proračuna su grupirani po lokacijama.

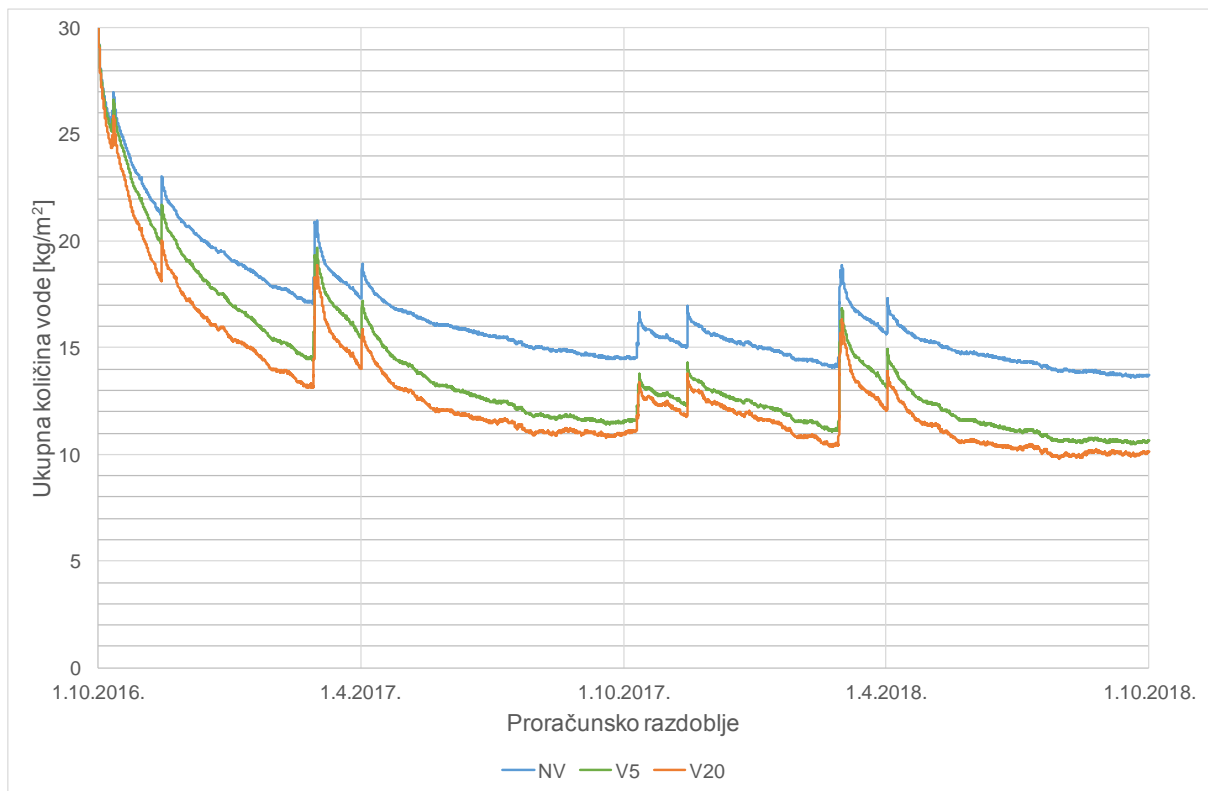


**Slika 43.** Promjena ukupne količine vode u panelima u Tromsøu



**Slika 44.** Promjena ukupne količine vode u panelima u Frankfurtu

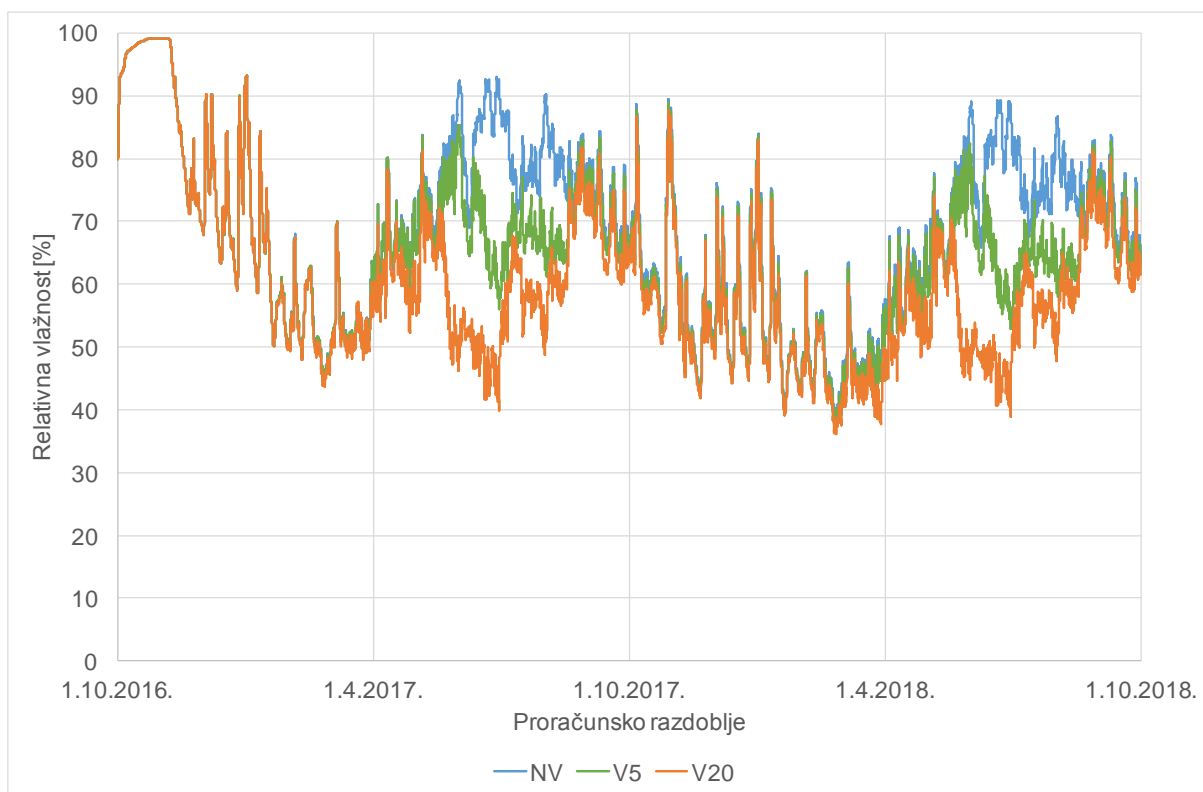




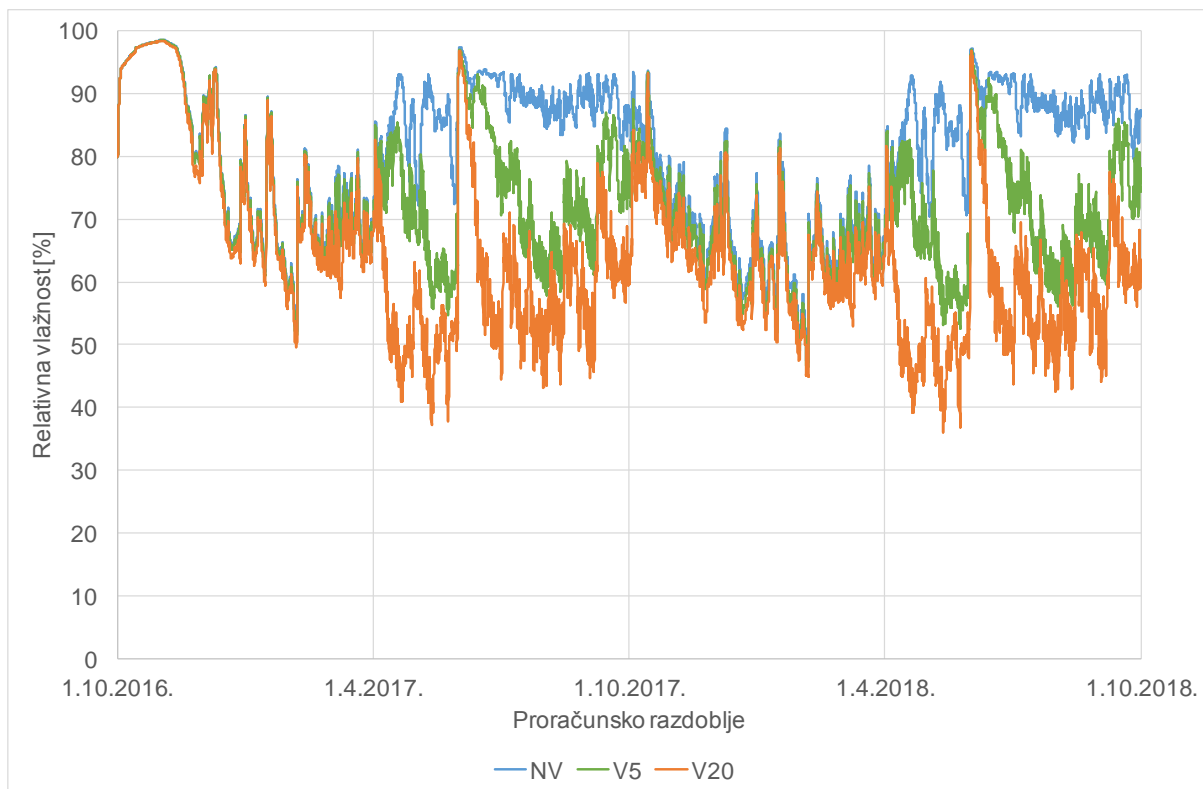
**Slika 45.** Promjena ukupne količina vode u panelima u Malagi

## 7.2. Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune

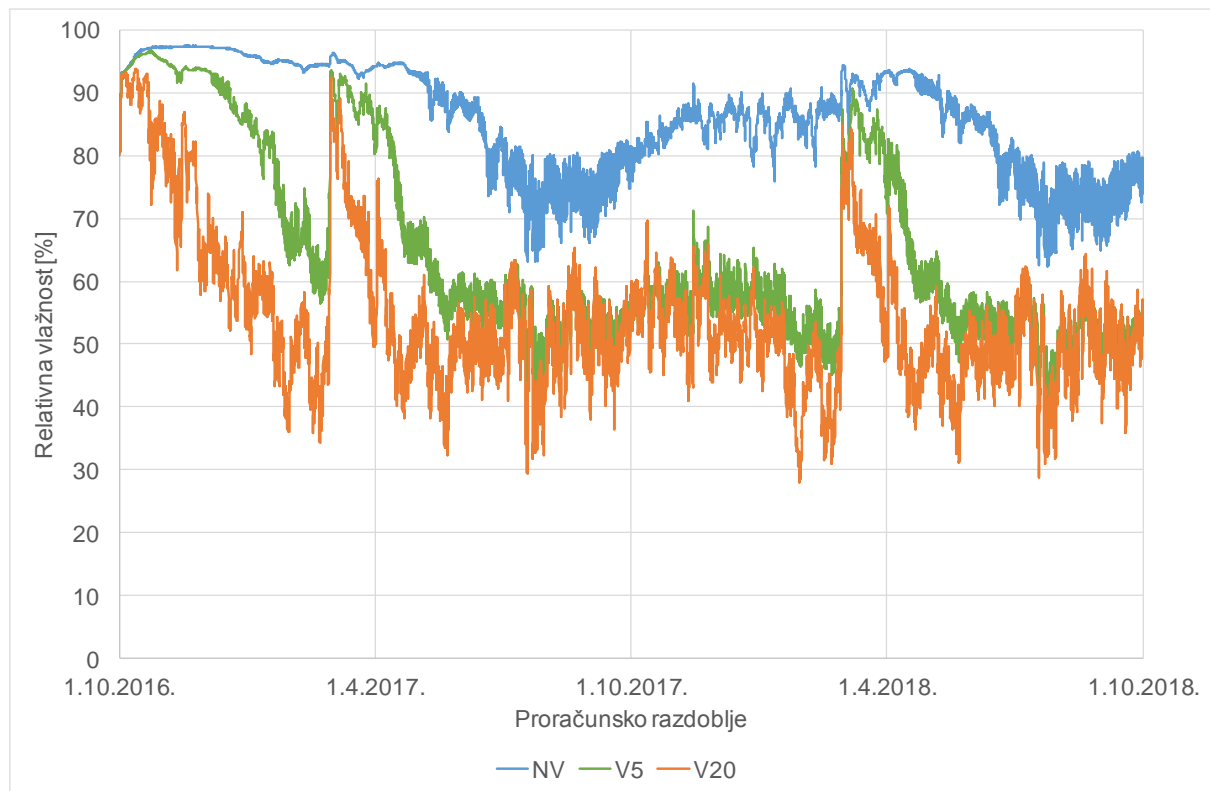
Od velikog je značaja da ne dođe do kondenzacije vodene pare i akumulacije vlage u panelu, a ponajviše u sloju toplinske izolacije kako ona ne bi izgubila svoja toplinska svojstva i kako ne bi došlo do nastanka građevinskih šteta. Za vrednovanje učinka ventilacije sloja zraka odabrani su rezultati koji se odnose na presjek u sredini sloja mineralne vune. Dobivene krivulje promjene relativne vlažnosti u proračunskom vremenu od dvije godine za pojedine lokacije prikazani su na slikama 46. – 48.



**Slika 46.** Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune panela u Tromsøu



**Slika 47.** Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune panela u Frankfurtu



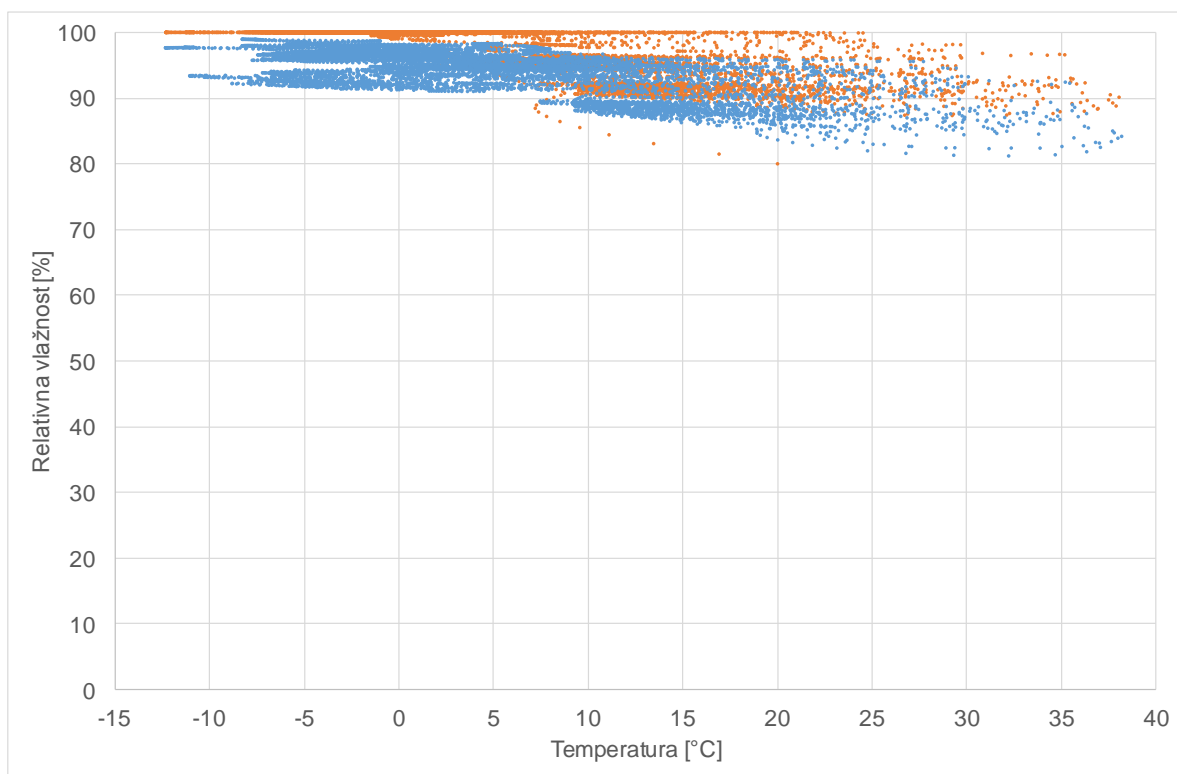
**Slika 48.** Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune panela u Malagi

### 7.3. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka

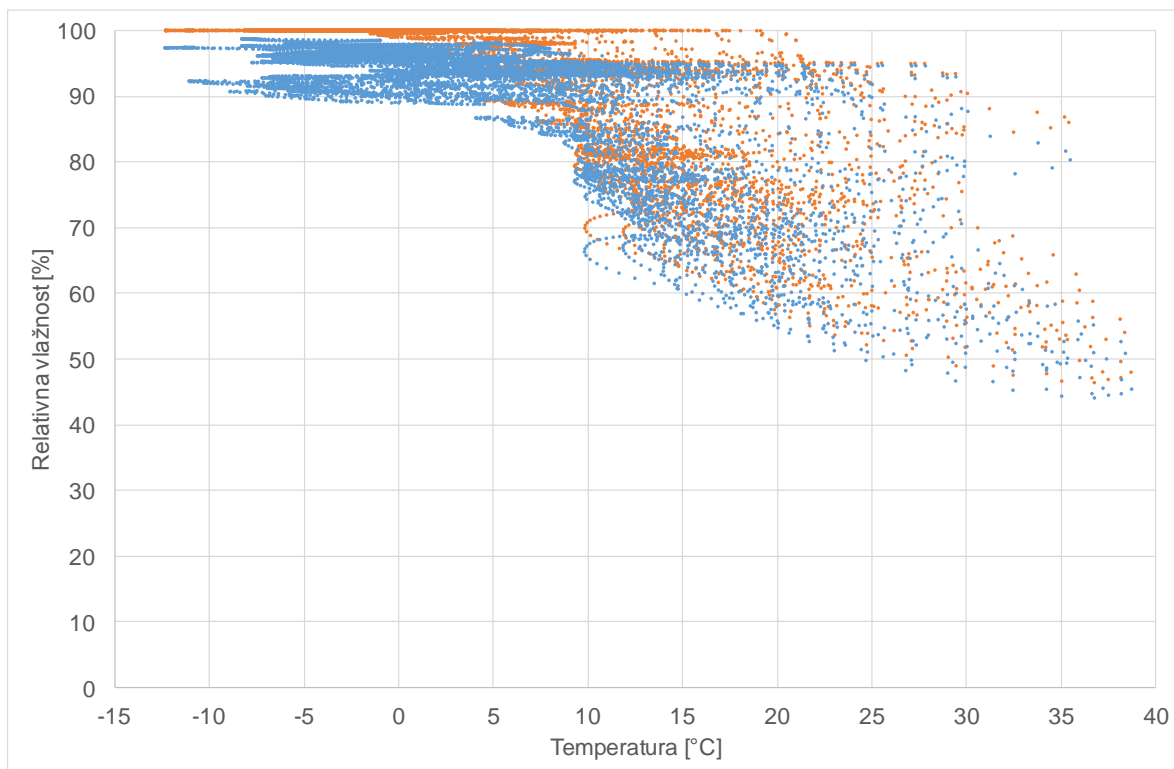
Na sljedećim slikama (49. - 57.) prikazane su točke kretanja relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka.

Određena točka označava relativnu vlažnost i temperaturu u određenom satu proračunskog vremena. Kako proračunsko vrijeme od dvije godine sadrži ukupno 17.521 sat, to znači da se na pojedinoj slici nalazi ukupno 17.521 točka koja pokazuje koncentracije relativne vlažnosti i temperature u navedenom presjeku.

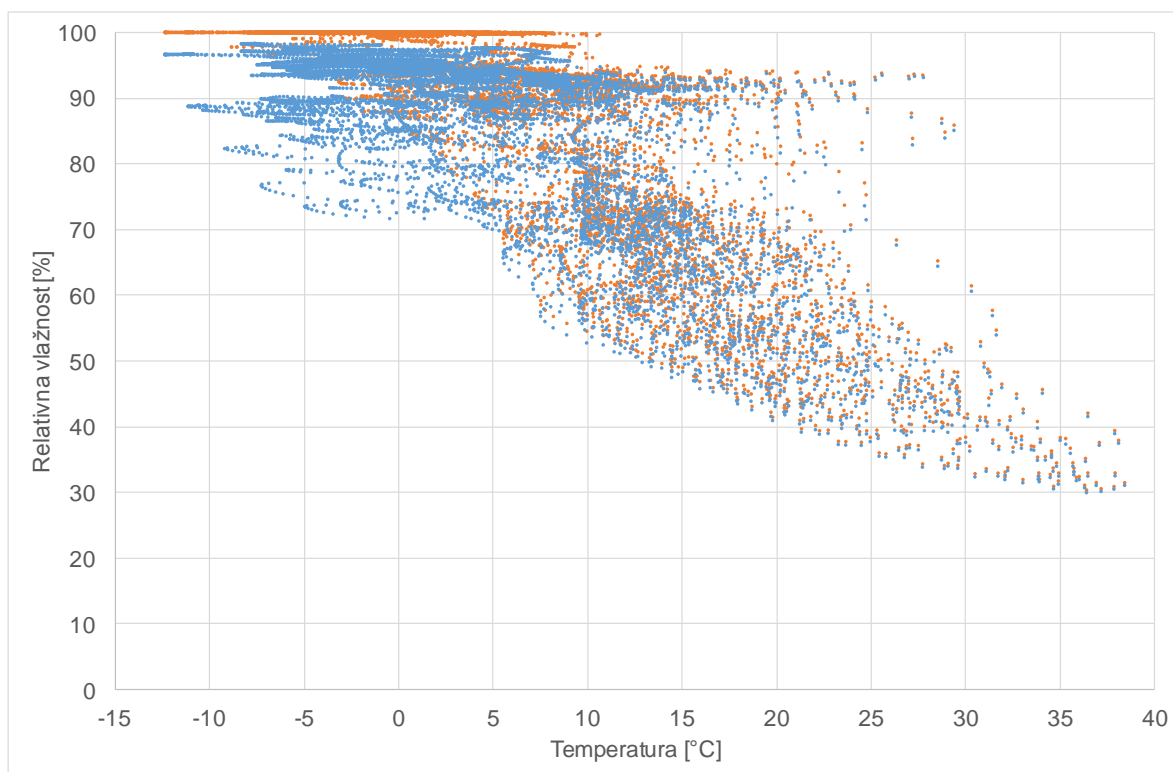
Narančastom bojom označene su točke koje odgovaraju prvoj godini proračuna, a plavom točke koje odgovaraju drugoj godini proračuna.



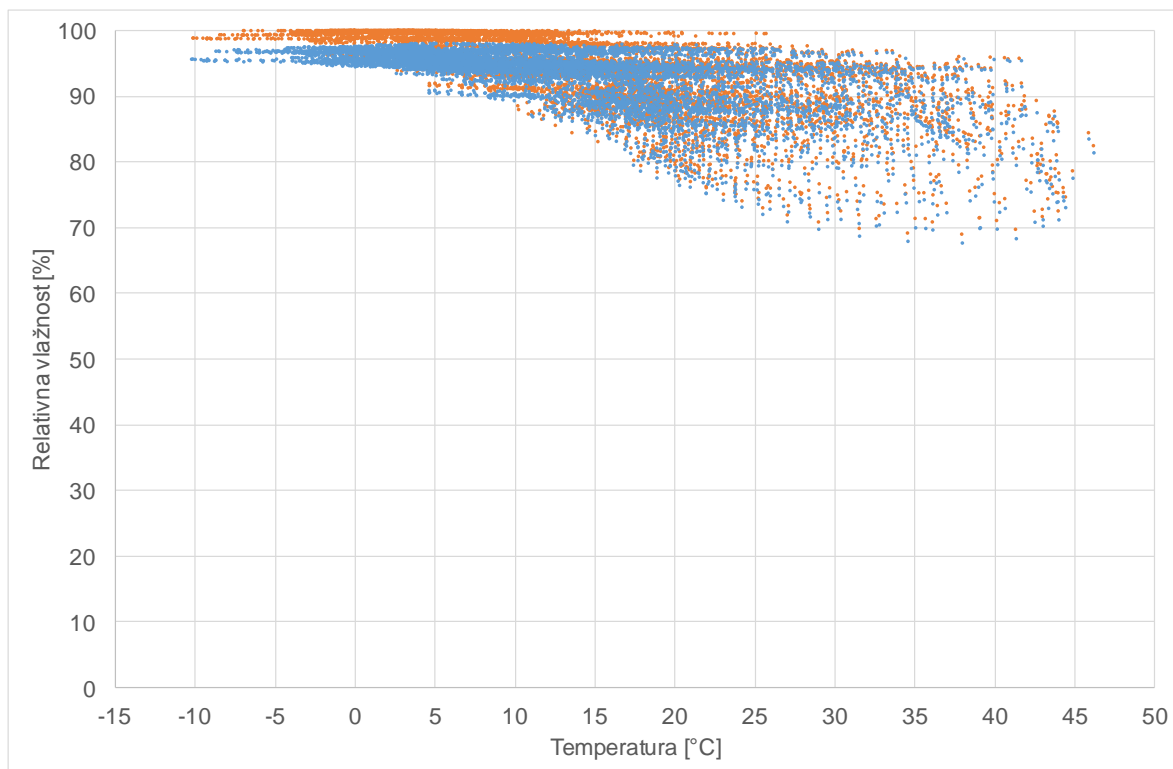
**Slika 49.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u NV u Tromsøu



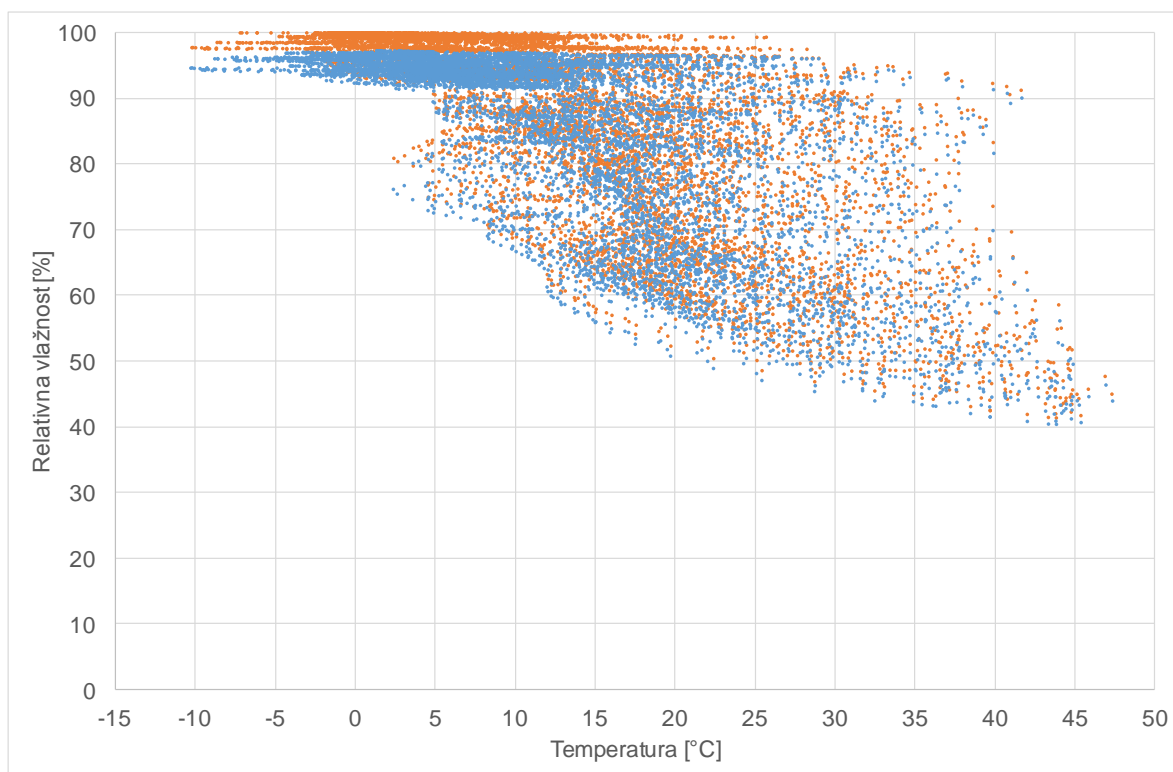
**Slika 50.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V5 u Tromsøu



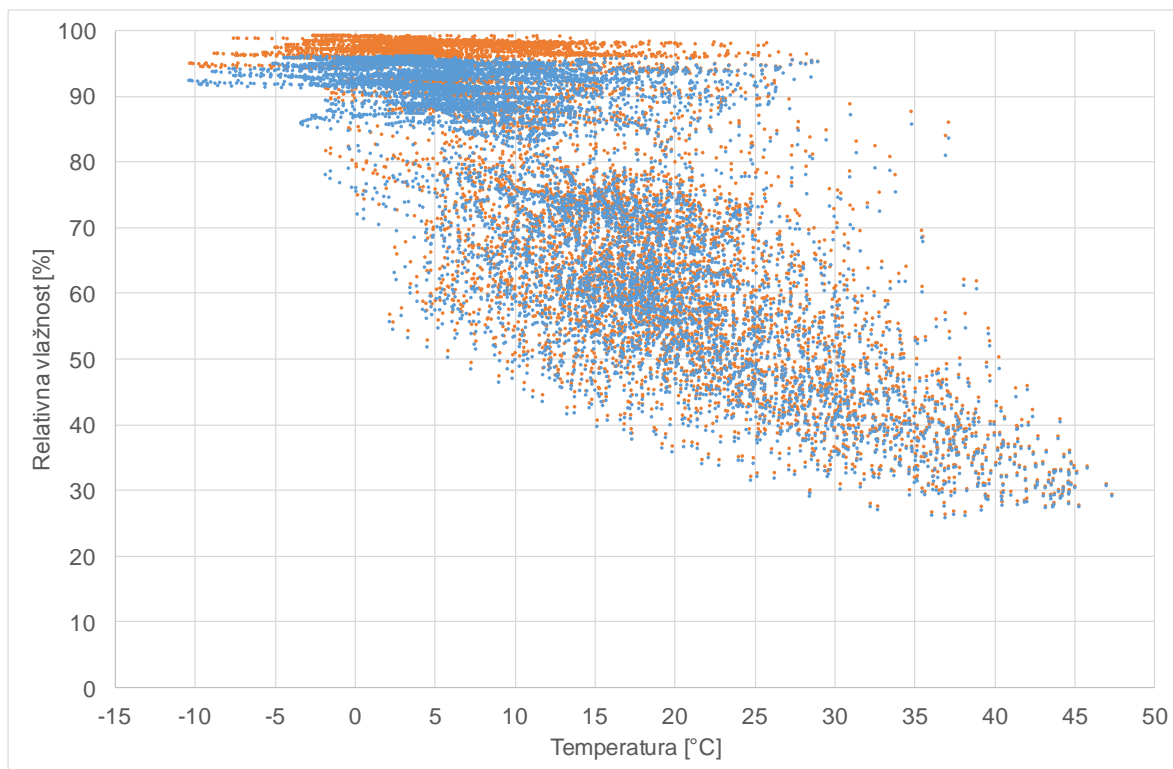
**Slika 51.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V20 u Tromsøu



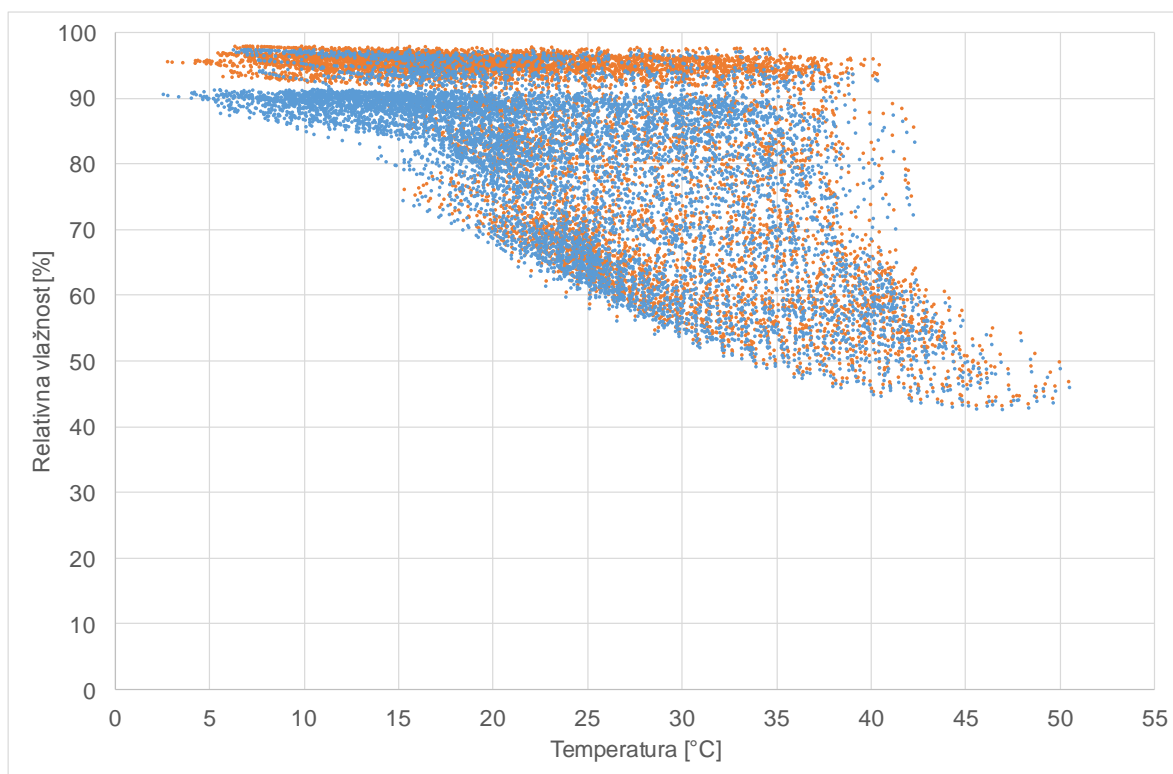
**Slika 52.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u NV u Frankfurtu



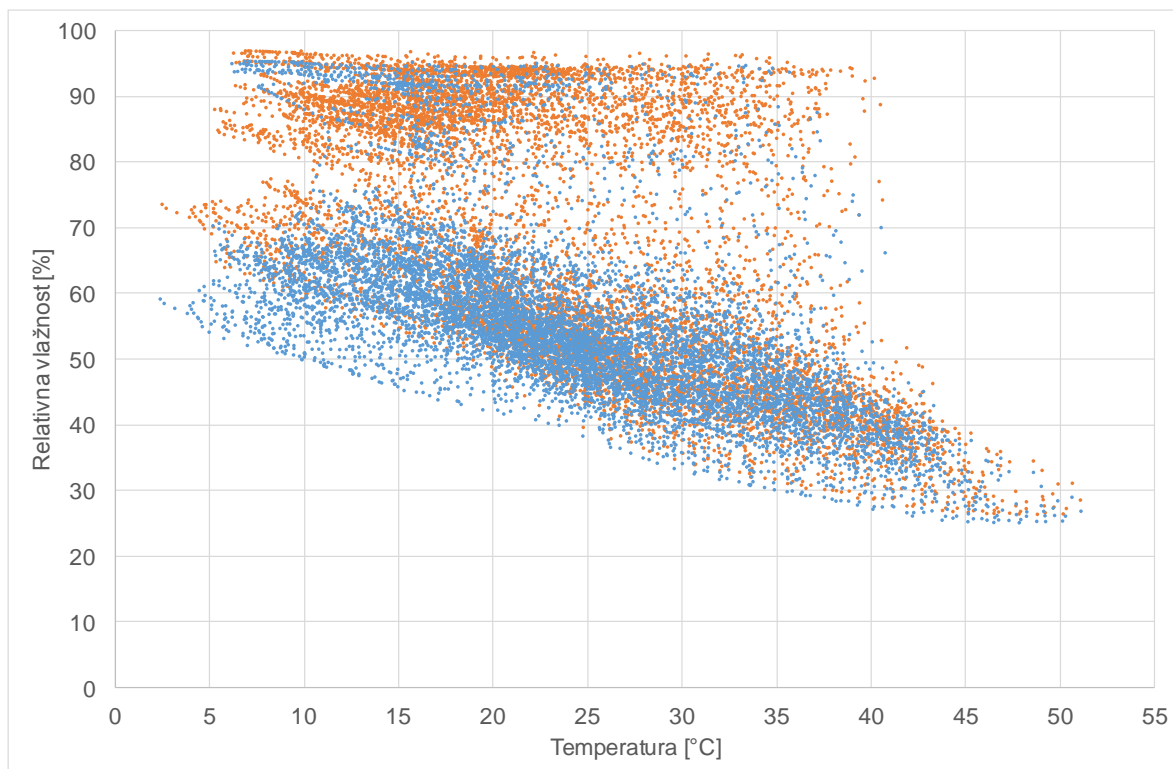
**Slika 53.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V5 u Frankfurtu



**Slika 54.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V20 u Frankfurtu

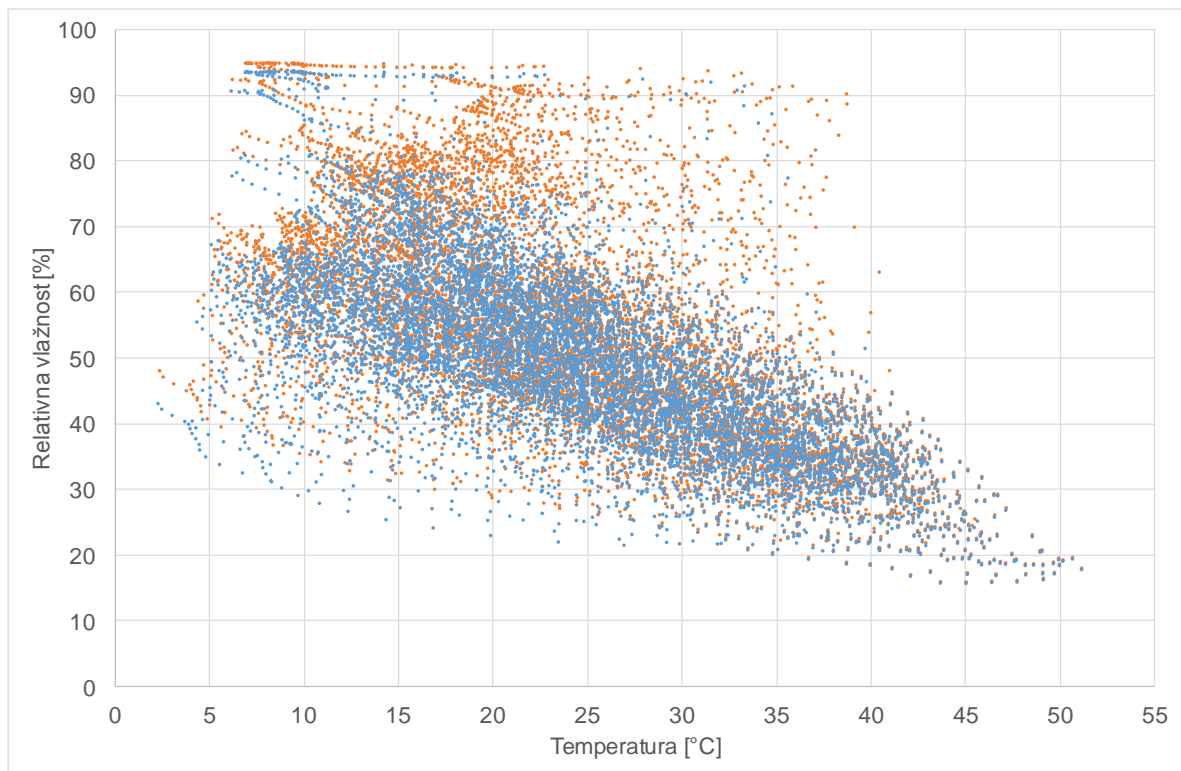


**Slika 55.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u NV u Malagi



**Slika 56.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V5 u Malagi



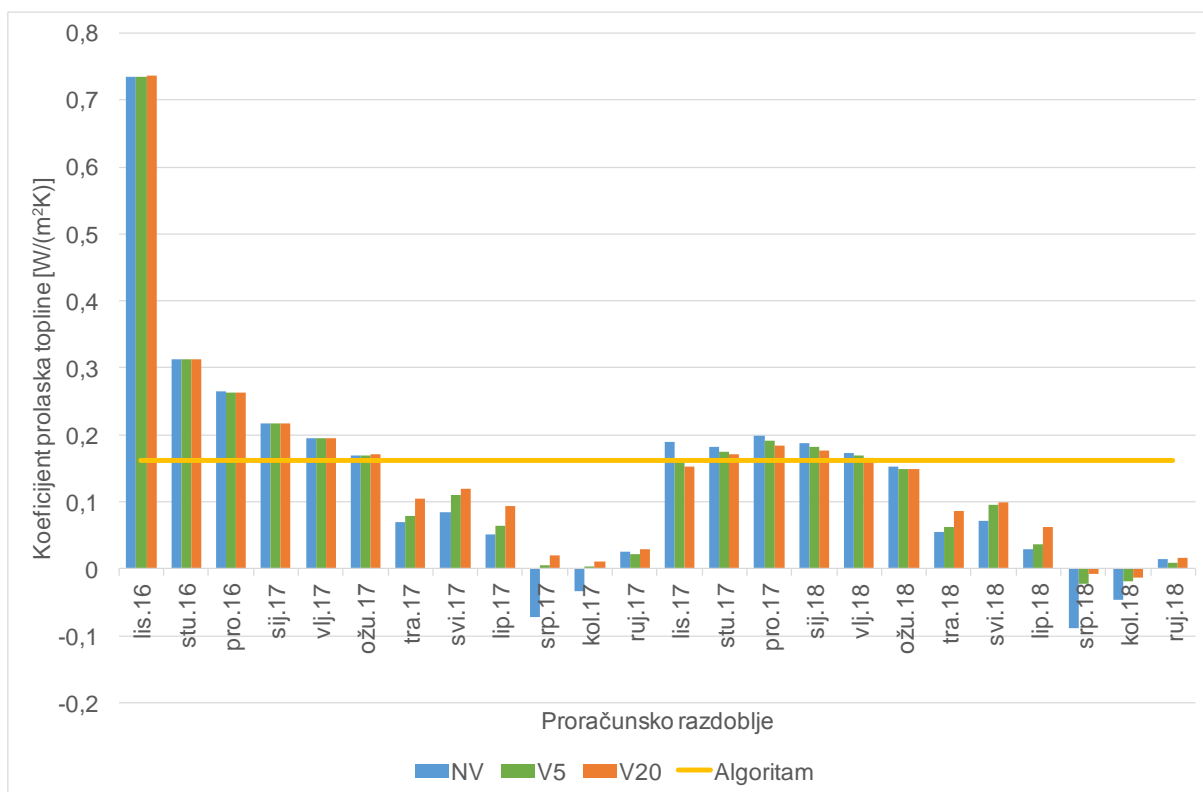


**Slika 57.** Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka u V20 u Malagi

#### 7.4. Promjena koeficijenta prolaska topline

*Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790 propisuje korištenje konstantnog koeficijenta prolaska topline  $U$  u proračunima. U poglavlju 3.2.5. objašnjeno je da koeficijent prolaska topline između ostalog ovisi i o toplinskoj provodljivosti  $\lambda$  koja ovisi o vlažnosti građevnog dijela zgrade. Dakle, koeficijent prolaska topline nije konstantna vrijednost već je ovisan o vlažnosti građevnog dijela zgrade. Na slici 58. je prikazana promjena vrijednosti koeficijenta prolaska topline sve tri vrste panela u promatranom razdoblju od dvije godine u Frankfurtu.*





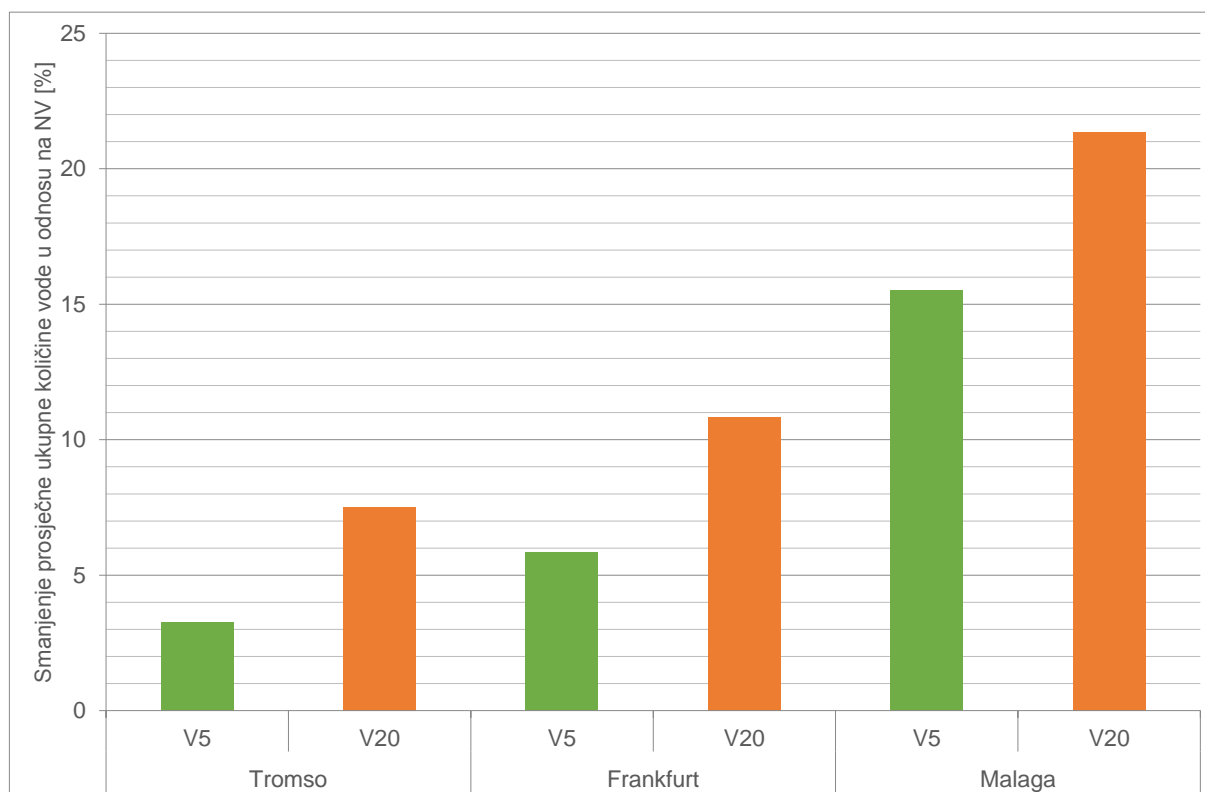
Slika 58. Promjena koeficijenta prolaska topline u Frankfurtu

## 8. ANALIZA REZULTATA

### 8.1. Promjena ukupne količine vode u panelu

Dobivene vrijednosti ukupne količine vode u panelu, prikazane na slikama 43. – 45. pokazuju visoke vrijednosti tokom zimskih mjeseci i približno održavanje količine vode u panelu zimi, dok se ljeti sušenjem količine vode smanjuju. U ljetnom razdoblju mjestimično dolazi do naglih skokova što je posljedica ljetnih pljuskova. Kroz dvije godine svi paneli na svim lokacijama dosegnu dinamičko stanje ravnoteže, odnosno počinju pokazivati periodično ponavljanje u svom ponašanju.

Uspoređujući prosječne vrijednosti ukupnog sadržaja vode u ventiliranim panelima u odnosu na neventilirani panel po pojedinim klimama, donesen je zaključak da ventilacija panela uvjerljivo najviše doprinosi smanjenju ukupnog sadržaja vode u panelu u Malagi, tj. u sredozemnoj klimi, slika 59.



**Slika 59.** Učinkovitost ventiliranih panela u odnosu na neventilirani panel u pogledu smanjenja prosječne ukupne količine vode u panelu po pojedinim klimama

U Tromsou V5 smanjuje prosječnu vrijednost ukupne količine vode za 3,29 %, a V20 za 7,52 % u odnosu na NV. U Frankfurtu je učinkovitost ventilacije veća. V5 smanjuje količinu vode za 5,84 %, a V20 za 10,85 %. U Malagi je V5 je učinkovitiji 15,54 % u odnosu na NV, a V20 smanjuje ukupni sadržaj vode u svim slojevima panela za čak 21,37 %.

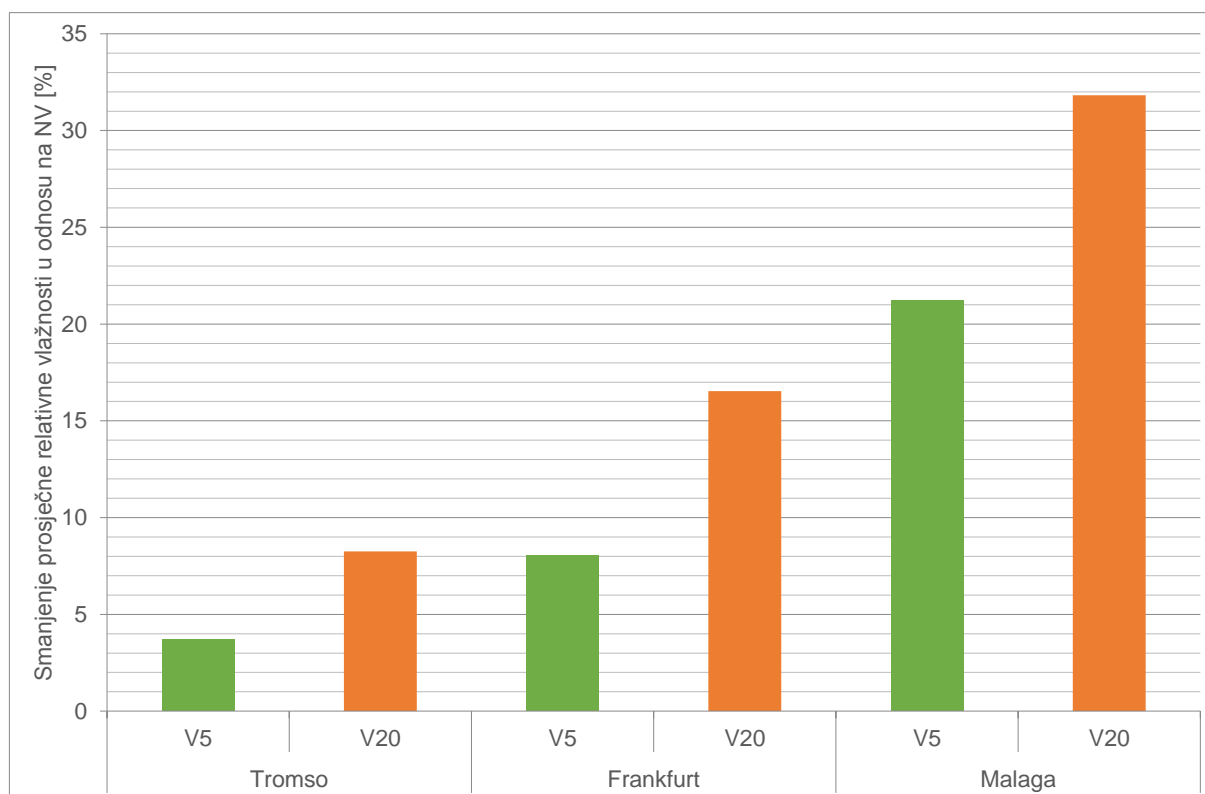
Također, iz slike 59. vidljivo je da paneli s većom ventilacijom (V20) pokazuju povoljnija higrotermalna ponašanja u odnosu na panele s manjom ventilacijom (V5). V20 u Tromsou je 4,23 % učinkovitiji glede smanjenja ukupne količine vlage od V5, dok je u Frankfurtu V20 učinkovitiji 5,01 % u odnosu na V5. U Malagi je panel V20 za 5,88 % učinkovitiji glede smanjenja ukupne količine vlage od V5.

## **8.2. Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune**

U Tromsou postotak relativne vlažnosti tijekom zimskih mjeseci je gotovo identičan za sve panele, slika 46., a do većih odstupanja dolazi u ljetnim mjesecima. V20 ljeti poprima mnogo manji postotak relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune od NV, dok V5 posjeduje svojstva otprilike između NV i V20.

Paneli se u Frankfurtu ponašaju slično kao u Tromsou, slika 47., no s nešto većom razlikom u relativnoj vlažnosti ljeti.

Ventilacija i u slučaju smanjenja relativne vlažnosti u sloju mineralne vune pokazuje najveću učinkovitost u Malagi. Tijekom cijelog proračunskog razdoblja V5 i V20 poprimaju manje postotke relativne vlažnosti u odnosu na NV. U pojedinim dijelovima godine ta je razlika gotovo i dvostruka, slika 48.



**Slika 60.** Učinkovitost ventiliranih panela u odnosu na neventilirani panel u pogledu smanjenja prosječne relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune po pojedinim klimama

U hladnoj klimi, u Tromsøu, V5 smanjuje prosječnu relativnu vlažnost u sredini sloja mineralne vune za 3,69 %, a V20 za 8,25 %, u odnosu na NV. U kontinentalnoj klimi, u Frankfurtu, V5 i V20 su dvostruko učinkovitiji. V5 je učinkovitiji za 8,06 % od NV, a V20 za 16,53 % u odnosu na NV. U Malagi, tj. u sredozemnoj klimi, ventilacija daje najbolje rezultate. 21,23 % je manja vrijednost prosječne relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune kod V5, a čak 31,82 % kod V20, u odnosu na NV, slika 60.

### 8.3. Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka

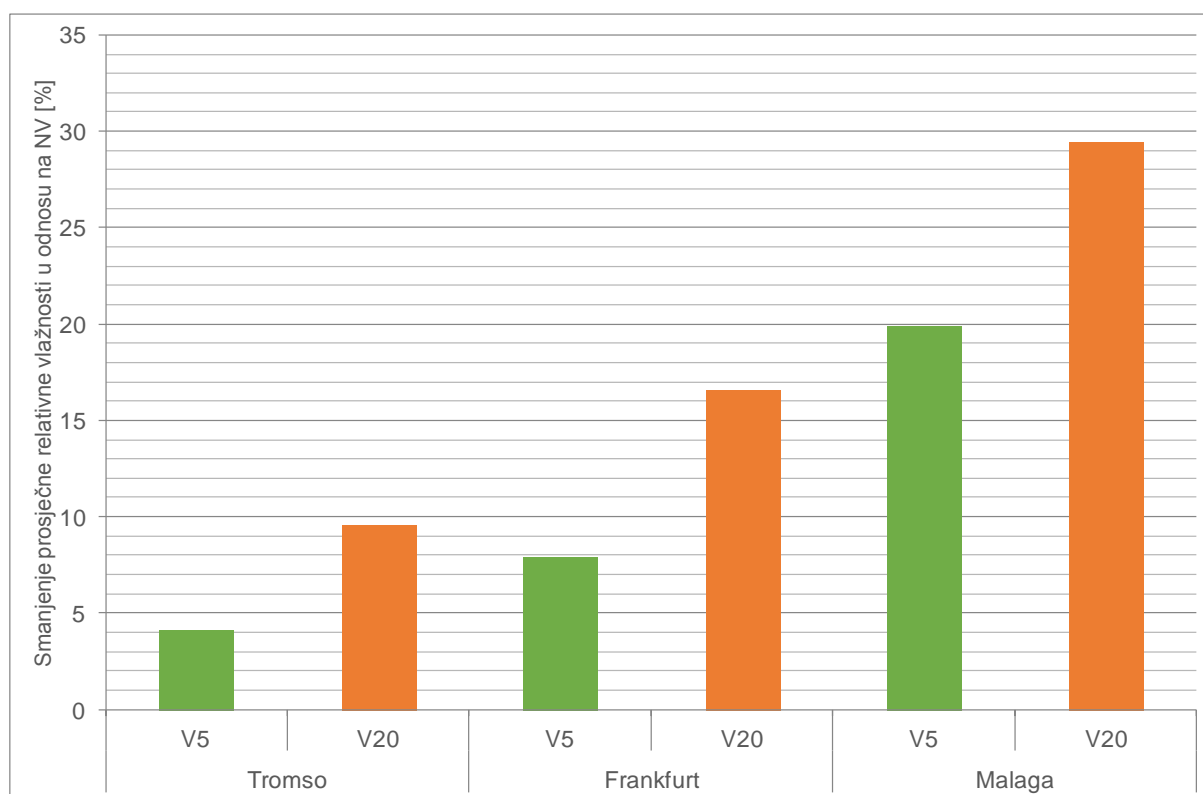
Na slikama 49. – 57. prikazana je raspodjela relativne vlažnosti i temperature u presjeku neposredno nakon granice sloja zraka i sloja mineralne vune u proračunskom razdoblju. Temperatura u navedenom presjeku u svim panelima (NV, V5, V20) ostaje u istim granicama za pripadne klime, dok granice relativne vlažnosti za pripadne klime značajno variraju ovisno je li riječ o NV, V5 ili V20 panelu. Na slikama 49. – 57. vidljivo je da su točke raspršenije u vertikalnom smjeru, odnosno donja granica relativne vlažnosti je niža što je

ventilacija jača. Povoljnije je što su točke raspršenije, i što je najniža i prosječna vrijednost relativne vlažnosti manja. U tablici 5. sistematično su prikazane vrijednosti najniže i prosječne relativne vlažnosti panela te granične temperature za različite jačine ventilacije i različite klime.

**Tablica 5.** Pregled vrijednosti relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka

Lokacija / Klima	Panel	Najniža relativna vlažnost [%]	Prosječna relativna vlažnost [%]	Prosječni raspon temperatura [°C]
Tromso	NV	80,00	95,76	(-12,35) - (+38,43)
	V5	44,08	91,68	
	V20	29,97	86,17	
Frankfurt	NV	67,65	93,96	(-10,30) - (+46,96)
	V5	40,35	86,04	
	V20	25,87	77,40	
Malaga	NV	42,61	81,89	(+2,40) - (+50,90)
	V5	25,08	61,98	
	V20	15,70	52,45	

Najniže vrijednosti relativne vlažnosti pojavljuju se kod panela V20 za sve tri klime. U Tromsou V5 ima manju prosječnu relativnu vlažnost za 4,08 %, a V20 za 9,59 % u odnosu na NV. V5 u Frankfurtu smanjuje vlagu za 7,92 %, a V20 za 16,56 % u odnosu na NV. Najveću učinkovitost i u ovom pogledu pokazuju ventilirani paneli u Malagi, gdje je kod V5 prosječna relativna vlažnost manja 19,91 %, a kod V20 čak 29,44 % od NV, slika 61.



**Slika 61.** Učinkovitost ventiliranih panela u odnosu na neventilirani panel u pogledu smanjenja prosječne relativne vlažnosti u sloju mineralne vune neposredno poslije granice sa slojem zraka po pojedinim klimama

#### 8.4. Promjena koeficijenta prolaska topline

Na slici 58. je vidljivo da koeficijent prolaska topline pokazuje poprilično različite vrijednosti tokom proračunskog razdoblja od dvije godine. Vrijednost koeficijenta prolaska topline prema *Algoritmu* za modelirani panel iznosi  $0,16273 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , dok je prosječna vrijednost  $0,13067 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  iz čega se može zaključiti da je vrijednost propisana prema *Algoritmu* precijenjena. Na početku proračunskog razdoblja vrijednost koeficijenta prolaska topline iznosi  $0,73377 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  što je oko 5 puta više od prosječne vrijednosti i vrijednosti propisane *Algoritmom*. Visoka vrijednost posljedica je ugradbene vlage. Veća početna vlažnost povlači za sobom višu vrijednost toplinske provodljivosti, odnosno višu vrijednost koeficijenta prolaska topline. Također, vidljivo je da u ljetnim mjesecima u slučaju NV toplinski tok ima suprotan smjer, dok kod ventiliranih panela toplinski tok ima uobičajen smjer ili suprotan smjer slabog intenziteta. Iz toga se može zaključiti da ventilirani paneli pružaju bolju zaštitu od pregrijavanja unutarnjeg prostora ljeti.

## 9. ZAKLJUČAK

Najveći utjecaj na kvalitetu zgrade u smislu potrošnje energije za grijanje i hlađenje te trajnosti ima vanjska ovojnica zgrade. Higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade podrazumijeva kombinirani prijenos topline, zraka i vlage kroz vanjsku ovojnicu koji je prvenstveno potaknut različitim temperaturnim uvjetima i različitim uvjetima relativne vlažnosti zraka vanjskog okoliša i unutarnjeg okoliša. Prijenos topline, zraka i vlage je međusobno isprepleten i nikako se ne može i ne smije promatrati odvojeno.

Standardne stacionarne metode proračuna koje se koriste u građevinskoj praksi u Hrvatskoj nisu ogledalo stvarnog stanja i higrotermalnog ponašanja vanjske ovojnice. Stoga, u ovom je radu proveden numerički dinamički nestacionarni model proračuna programskim paketom WUFI<sup>®</sup> Pro 5.2 koji uzima u obzir parametre koji su kod standardnih stacionarnih metoda proračuna (Glaserova metoda) zanemareni zbog pretpostavki koje su uvedene (kako je opisano u poglavlju 4.1.) i time daje kompletnu sliku higrotermalnog ponašanja panela. Numerički proračun je proveden na ukupno devet slučajeva, tj. na tri različita panela (jedan neventilirani i dva ventilirana s različitim intenzitetom ventilacije) u trima potpuno različitim klimama u vremenskom razdoblju od dvije godine kako bi se dobio uvid u ponašanje panela u različitim klimatskim uvjetima i u učinkovitost ventilacije u različitim klimama. Tijekom analize rezultata numeričkih proračuna, promatrani su:

- Ukupna količina vode u panelima
- Promjena relativne vlažnosti u sredini sloja mineralne vune
- Promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju mineralne vune neposredno nakon granice sa slojem zraka
- Promjena koeficijenta prolaska topline.

Kako je detaljnije opisano u poglavlju 8., svi rezultati numeričkih proračuna pokazali su da ventilirani sloj zraka ima značajan utjecaj na higrotermalno ponašanje panela. Osnovni zaključci rada mogu se sumirati kako slijedi:

- Ventilacijom panela znatno se smanjuje relativna vlažnost u sloju toplinske izolacije.
- Što je jača ventilacija, to je ukupna količina vlage u svim slojevima panela manja.
  - Boljom ventilacijom panela (V20) može se postići smanjenje prosječne relativne vlažnosti u panelu do 10 % (u odnosu na V5).
- Što je klima toplija, to je učinkovitost ventiliranog sloja zraka veća.

- U hladnoj klimi (Tromso) najmanja je učinkovitost te smanjenje prosječne relativne vlažnosti u panelu iznosi do 10 % u odnosu na NV.
- Najbolja učinkovitost kod ventiliranih panela (V5 i V20) pokazana je u sredozemnoj klimi (Malaga), gdje je V20 pokazao smanjenje relativne vlažnosti u sloju toplinske izolacije za preko 30 %.
- Konstantna vrijednost prosječnog koeficijenta prolaska topline propisana *Algoritmom* je precijenjena.
  - Ventilirani paneli pružaju volju zaštitu od pregrijavanja unutarnjeg prostora ljeti.

Općenito se može zaključiti da ventilirani sloj bolje isušuje panel i time doprinosi trajnosti i kvaliteti vanjske ovojnice zgrade, što je potvrđeno za sve analizirane klimatske uvjete te su utvrđene zakonitosti ponašanja ovisno o intenzitetu ventilacije panela te klimatskim uvjetima. Ovime su zadovoljeni postavljeni ciljevi rada, kako je prikazano u poglavlju 2.

**Iznesenom analizom rezultata numeričkih simulacija (poglavlje 8.) mogu se potvrditi obje postavljene hipoteze rada, kako slijedi: Ventilirani sloj zraka u presjeku građevnog dijela zgrade doprinosi smanjenju sadržaja vlage u materijalima u odnosu na neventilirani panel. Ventilirani sloj zraka ima različiti utjecaj na smanjenje sadržaja vlage u materijalima ovisno o klimatskim uvjetima u kojima se predmetni građevni dio zgrade nalazi.**

Iako su tijekom istraživanja provedenog u ovom radu unaprijeđena znanja o numeričkom modeliranju higrotermalnih procesa koji se odvijaju uslijed utjecaja iz okoliša u presjeku vanjskih građevnih dijelova zgrada, preporuča se u budućnosti provesti dodatna eksperimentalna ispitivanja na terenu u obliku monitoringa, odnosno praćenja i zapisivanja parametara higrotermalnog ponašanja panela u vremenu i tako dobivene rezultate usporediti s rezultatima dobivenim numeričkim simulacijama u ovom radu.



## LITERATURA

- [1] Milovanović, B.: Toplinska ovojnica zgrade – problemi i rješenja u praksi, Kvaliteta gradnje stambenih i javnih zgrada u RH od 1991. – 2011. godine, Hrvatsko društvo sudskih vještaka, Zagreb, Hrvatska, 2012.
- [2] Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskoj zaštiti u zgradama, Narodne novine 153/2013, Zagreb, Hrvatska, 2013.
- [3] [http://naturalgasefficiency.org/for-industrial-facilities/products/energy\\_audits-buildingenvelope](http://naturalgasefficiency.org/for-industrial-facilities/products/energy_audits-buildingenvelope) Pristupljeno - 15.4.2016.
- [4] Alagušić, M., Banjad Pečur, I.: Analiza higrotermalnog ponašanja ovojnice zgrade od recikliranih betonskih elemenata, Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, Hrvatska, 2015.
- [5] Künzle, H. M., Sedlbauer, K., Zirkelbach, D.: Predicting Indoor Temperature and Humidity Conditions Including Hygrothermal Interactions with the Building Envelope, 1<sup>st</sup> International Conference on Sustainable Energy and Green Architecture, Building Scientific Research Center (BSRC), King Mongkut's University Thonburi, Bangkok, Tajland, 2003.
- [6] Prezentacije s predavanja iz kolegija Građevinska fizika, Građevinski fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2016., <http://www.grad.unizg.hr/predmet/grafiz> Pristupljeno - 19.3.2016.
- [7] Šimetin, V.: Građevinska fizika, Građevinski institut, Fakultet građevinskih znanosti, Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska, 1983.
- [8] <http://sustainabilityworkshop.autodesk.com/buildings/heat-energy-flows-buildings> Pristupljeno - 5.4.2016.
- [9] Hens, H.: Building Physics – Heat, Air and Moisture: Fundamentals and Engineering Methods with Examples and Exercises, Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- [10] Hens, H.: Applied Building Physics: Boundary Conditions, Building Performance and Material Properties, Ernst & Sohn, Berlin, 2011.

- [11] [http://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/buildings/building\\_fabric/properties/conductivity.html](http://www.new-learn.info/packages/clear/thermal/buildings/building_fabric/properties/conductivity.html)  
Pristupljeno - 5.4.2016.
- [12] Horvat, I., Novak, S., Soldo, V.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, Hrvatska, 2014.
- [13] European Parliament, Council of the European Union: Directive 2010/31/eu of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast), Official Journal of the European Union (2010), L 153/13
- [14] <http://www.rockwool.com/sustainable+buildings/environment/climate+change+and+energy+consumption#> Pristupljeno - 13.4.2016.
- [15] <http://www.webgradnja.hr/clanci/horizontalne-barijere-za-prekid-kapilarne-vlage-u-zidu/1099/> Pristupljeno - 17.4.2016.
- [16] <http://www.arizersolovaporizer.com/how-does-diffusion-work/> Pristupljeno - 21.4.2016.
- [17] Pešut, H.: Zahtjevi i metode ispitivanja zrakopropusnosti: Zrakopropusnost omotača zgrade, Građevinar, 7/2012, Zagreb, Hrvatska, 2012.
- [18] Milovanović, B., Banjad Pečur, I., Štirmer, N.: Quality assurance of an energy performance of buildings – air tightness testing, Četvrti internacionalni naučno-stručni skup GRAĐEVINARSTVO - Nauka i praksa, Žabljak, Crna Gora, 2012.
- [19] Trechsel, H.R.: Moisture control in buildings, ASTM Manual series, MNL 18, Philadelphia, SAD, 1994.
- [20] Künzel, M. H., Holm, H. A.: Moisture Control and Problem Analysis of Heritage Constructions, PATORREB, Porto, Portugal, pp. 85-102, 2009.
- [21] <http://www.ashireporter.org/HomeInspection/Articles/Fogged-Up-Clearing-the-Air-About-Window-Condensation/2269> Pristupljeno - 20.4.2014.
- [22] Künzel, H. M.: Moisture Risk Assessment of Roof construction by Computer Simulation in comparison to the Standar Glase-Method, International Building Physics Conference, Eindhoven, Nizozemska, 2000.

- [23] HRN EN ISO 13788: 2002. Hygrothermal performance of building components and building elements. Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation, Calculating methods
- [24] Geving, S.: A systematic method for hygrothermal analysis of building constructions using models, Department of Building and Construction Engineering, The Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norveška
- [25] Milovanović, B., Mikulić, D.: Assessment Method for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Building Components, Energy Management in Cultural Heritage, Dubrovnik, Hrvatska, 2011.
- [26] Browne, D.: The SPAB Hygrothermal Modelling: Interim Report, The SPAB research report 3., 2012.
- [27] <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/> Pristupljeno - 14.4.2016.
- [28] <https://wufi.de/en/software/wufi-2d/> Pristupljeno - 14.4.2016
- [29] <https://wufi.de/en/software/wufi-plus/> Pristupljeno - 14.4.2016
- [30] Milovanović, B.: Ventilirane i staklene fasade, Neobjavljeni rukopis, Zagreb, Hrvatska
- [31] Suarez, J. M., Sanjuan, C., Gutierrez, J. A., Pistono, J., Blanco, E.: Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated facade, Applied Thermal Engineering 37 (2012), pp. 302-313, 2012.
- [32] Salonvarra, M., Karagiozis, A .N., Pazera, M., Miller W. A.: Air Cavities Behind Claddings-What Have We Learned?, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings X, proceedings of ASHRAE THERM X, Clearwater, FL, 2007.
- [33] Van Belleghem, M., Steeman, M., Janssens, A., De Paepe, M.: Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls, Journal of Building Physics 38 (2015) 4, pp. 317-349, 2015.
- [34] <http://www.size-projekti.hr/ventilirane-fasade-p10> Pristupljeno - 1.4.2016.
- [35] Popp, W., Mayer, E., Kunzel, H.: Untersuchungen über die Belüftung des Luftraumes hinter vorgesetzten Fassadenbekleidung aus kleinformatischen elementen. Forschungsbericht B Ho 22/80. Fraunhofer Institut für Bauphysik, Holzkirchen, Germany, 1980.

- [36] Mayer, E., Künzeli, H. Untersuchungen über die notwendige Hinterlüftung an Außenwandbekleidung aus großformatigen Bauteilen. Forschungsbericht B Ho 1/83. Fraunhofer Institut für Bauphysik, 1983.
- [37] Straube, J., Burnett, E.: Vents, Ventilation, and Pressure Moderation. University of Waterloo Building Engineering Group Report for Canada Mortgage and Housing Corporation, Ottawa, Kanada, 1995.
- [38] Straube, J.F.: Moisture Control and Enclosure Wall Systems, Ph.D. dissertation, University of Waterloo, 1998.
- [39] Finch, G., Straube, J., Hubbs, B.: Hygrothermal Performance and Drying Potential of Wood Frame Rainscreen Walls in Vancouver's Coastal Climate, 11th Canadian Conference on Building Science and Technology, Banff, Alberta, 2007.
- [40] Straube, J., Finch, G.: Ventilated Wall Claddings: Review, Field Performance, and Hygrothermal Modeling. Research Report #0906. Building Science Press, 2009.
- [41] Hens, H., Janssens, A., Depraetere, W., Carmeliet, J., Lecompte, J.: Brick Cavity Walls – A Performance Analysis Based on Measurements and Simulations, Journal of Building Physics 31 (2007) 2, pp. 95-124, 2007.
- [42] Künzeli, H. M., Karagiozis, A. N., Kehrer, M.: Assessing the benefits of cavity ventilation by hygrothermal simulation, Proceedings Building Physics Symposium in honour of Prof. Hugo Hens, Leuven, pp. 17-20, 2008.
- [43] Banjad Pečur, I., Milovanović, B., Carević, I., Alagušić, M.: Precast sandwich panel – Innovative way of construction – Proceedings of 10th Central European Congress on Concrete Engineering – Concrete Offers for Period of Economic Recovery, Liberec, 2014.
- [44] Bjegović, D., Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Carević, I., Alagušić, M.: Ventilirani predgotovljeni fasadni panel ECO-SANDWICH®, XXVI Kongres i međunarodni simpozijum o istraživanjima i primeni savremenih dostignuća u građevinarstvu u oblasti materijala i konstrukcija, Vrnjačka Banja, 2014.
- [45] Alagušić, A., Milovanović, B., Banjad Pečur, I.: Recycled aggregate concrete – sustainable use of construction and demolition waste and reduction of energy consumption, Advances in Cement and Concrete Technology in Africa, Proceedings 2<sup>nd</sup> International Conference Dar es Salaam, Wolfram Schmidt, Nsesheye Susan

Msinjili, eds, Dar es Salaam, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Tanzania, January 27 -29, 2016.

- [46] Al-Neshawy, F.: Computerised prediction of the deterioration of concrete building facade caused by moisture and changes in temperature, Doctoral dissertation 96/2013, Aalto University, School of Engineering, Department of Civil and Structural Engineering, Espoo, Finska, 2013.
- [47] <http://buildingscience.com/documents/building-science-insights/bsi-089-wufi%E2%80%94barking-wrong-tree> Pristupljeno - 22.4.2016.

## SAŽETAK

Antonio Črešnar

### **Utvrđivanje utjecaja ventiliranog sloja zraka na higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade korištenjem numeričkih simulacija**

Provedene su numeričke simulacije higrotermalnog ponašanja predgotovljenih zidnih sandwich panela. Modelirane su tri vrste panela koje se međusobno razlikuju u sloju zraka. U jednom modelu panela je sloj zraka definiran kao neventilirani, u drugom kao ventilirani s 5 izmjena volumena zraka u satu, a u trećem kao ventilirani sloj zraka s 20 izmjena volumena zraka u satu. Sva tri panela modelirana su u tri različita klimama u vremenskom razdoblju od dvije godine kako bi se dobio uvid u ponašanje panela i u učinkovitost ventilacije u različitim klimatskim uvjetima. Dakle, ukupno je promatrano 9 različitih slučajeva proračuna. Tijekom analize rezultata proračuna promatrane su promjena ukupne količine vode u panelima, promjena relativne vlažnosti i temperature u sloju toplinske izolacije te promjena koeficijenta prolaska topline. Rezultati istraživanja prikazani u ovom radu pokazuju da ventilirani sloj zraka u presjeku građevnog dijela zgrade doprinosi smanjenju sadržaja vlage u materijalima u odnosu na neventilirani panel. Također, ventilirani sloj zraka ima različiti utjecaj na smanjenje sadržaja vlage u materijalima ovisno o klimatskim uvjetima u kojima se predmetni građevni dio zgrade nalazi.

**Ključne riječi:** *numerički model, higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade, ventilirani predgotovljeni zidni sandwich panel, WUFI<sup>®</sup>, relativna vlažnost*

## SUMMARY

Antonio Črešnar

### **Assessing the influence of cavity ventilation on the hygrothermal behaviour of building envelope using numerical simulations**

Numerical simulations of hygrothermal behaviour of prefabricated wall sandwich panels have been carried out. Three types of panels have been modeled, each differencing in a type of air layer. In the first panel model air layer is defined as unventilated, in the second as ventilated with 5 air changes in an hour and in the third as ventilated with 20 air changes in an hour. All three panels have been modeled in three different climate conditions in the time span of two years in order to get insight on panel behaviour and ventilation effectiveness in different climate conditions. There were in total 9 different calculations. During analysis of calculation results there have been assessed changes of total amount of water in the panels, changes of relative humidity and temperature in layer of thermal isolation and change of thermal transmission. Results of this research show that ventilated air layer in the section of building construction contribute in reduction of moisture in materials compared to unventilated panels. Also, ventilated air layer has different influence on the level of moisture in materials depending on climate conditions of location of building element.

**Key words:** *numerical model, hygrothermal behaviour od building envelope, ventilated prefabricated wall sandwich panel, WUFI<sup>®</sup>, relative humidity*

## ZAHVALE

Mentorici prof. dr. sc. Ivani Banjad Pečur, dipl. ing. građ. što mi je omogućila izradu ovog rada.

Dr. sc. Bojanu Milovanoviću, dipl. ing. građ. na ustupljenoj literaturi, vrijednim savjetima, idejama i pokazanoj zainteresiranosti.

Marini Alagušić, mag. ing. aedif. na ustupljenoj literaturi i računalnoj opremi, vrijednim savjetima, idejama, ljubaznosti i trudu.



## ŽIVOTOPIS

Rođen sam 18.2.1993. u Zagrebu. 2011. godine završavam III. gimnaziju u Zagrebu. Iste godine upisujem preddiplomski studij na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Preddiplomski studij završavam u roku s vrlo dobrim uspjehom. Diplomski studij, smjer Teorija i modeliranje konstrukcija, upisujem 2014. godine. Prvu godinu diplomskog studija završavam s odličnim uspjehom. Trenutno pohađam drugu godinu diplomskog studija. Tijekom studija demonstrator sam na sljedećim kolegijima: „Otpornost materijala 1“, „Otpornost materijala 2“, „Numeričko modeliranje konstrukcija“ i „Metalne konstrukcije“. 2016. godine u peteročlanom timu sudjelujem na međunarodnom natjecanju u projektiranju, izradi i sastavljanju čeličnog montažnog mosta „BRICO 2016“ u Tallinnu, u Estoniji. Govorim engleski jezik i trenutno učim njemački jezik u školi stranih jezika.