

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Paula Topić**  
**DIPLOMSKI RAD**

**Zagreb, rujan 2017.**

Sveučilište u Zagrebu

**Građevinski fakultet**



**UTJECAJ PROMJENE HIGROTERMALNIH  
PARAMETARA MATERIJALA NUMERIČKOG  
MODELA NA TRANSPORT TOPLINE I VLAGE U  
VREMENU**

**Paula Topić**

Kolegij: Građevinska fizika

**Mentorica: prof.dr.sc. Ivana Banjad Pečur**

**Zagreb, rujan 2017.**

## **IZJAVA O IZVORNOSTI**

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

Zagreb, 08. rujna 2017.

Paula Topić, univ.bacc.ing.aedif.

---

## **ZAHVALE**

*Ovom prilikom zahvaljujem mentorici prof.dr.sc. Ivani Banjad Pečur na ukazanom povjerenju i prilici za rad na ovoj temi.*

*Posebne zahvale asistentici Marini Bagarić, mag.ing.aedif. na nesebičnoj pomoći, stručnim savjetima, ustupljenoj literaturi, idejama i konstruktivnim kritikama te na pruženom znanju i iskustvu.*

*Također, zahvaljujem gospodinu dr.sc. Danielu Zirkelbachu na izuzetnoj srdačnosti i pomoći te Fraunhofer Institutu za građevinsku fiziku u Njemačkoj na ustupljenoj studentskoj licenci za WUFI® Po 6.1 u kojem je napravljena numerička analiza u ovome radu.*

*Posebno hvala mojoj obitelji i bližnjima na neizmjernoj podršci tijekom studija.*

## **SAŽETAK**

**Paula Topić**

### **Utjecaj promjene higrotermalnih parametara materijala numeričkog modela na transport topline i vlage u vremenu**

Vlaga predstavlja veliki problem u mnogim zgradama te osim pojave građevinskih šteta može utjecati i na zdravlje ukućana. Kako bi se problem vlage sveo na minimum potrebno je vanjsku ovojnicu projektirati i izvesti na pravilan način. Higrotermalno ponašanja vanjske ovojnice uključuje kombinirani prijenos topline, zraka i vlage pri različitim temperaturnim uvjetima i različitim uvjetima relativne vlažnosti zraka vanjskog i unutarnjeg okoliša. Prije korištenja novih vrsta materijala potrebno je provesti eksperimentalna ispitivanja kako bi se utvrdili higrotermalni parametri pomoću kojih bi računalni program mogao razviti numerički model transporta mase i topline kroz vanjsku ovojnicu izvedenu od promatranog materijala. Glavni parametar koji opisuje transport vlage kroz materijal, a u standardnim metodama proračuna vlage se zanemaruje su sorpcijske krivulje.

U sklopu ovoga rada prikazano je eksperimentalno određivanje sorpcijskih krivulja dviju vrsta betona s recikliranim agregatom: beton s recikliranim betonom te beton s recikliranom opekom kao agregatom. U obje vrste betona je 50% prirodnog agregata zamijenjeno s recikliranim. Također, kako bi se analizirao utjecaj parametara materijala na higrotermalno ponašanje promatranog sustava vanjske ovojnice, odnosno transport topline i vlage u vremenu kroz takav sustav, istražena je mogućnost korisničkog unosa parametara materijala u programski paket WUFI®. Potom je provedena parametarska analiza na ukupno sedam slučajeva koji uključuju jednostavne numeričke modele zida te složenije numeričke modele ventiliranih i neventiliranih panela.

Dobiveni rezultati pokazuju kako postoje vidljive razlike u higrotermalnim ponašanjima ukoliko se korisnički unesu stvarne eksperimentalno dobivene vrijednosti parametara novih materijala u odnosu na korištenje parametara “najsrodnijih” materijala iz dostupne baze programskog paketa. Dodatno, uočen je doprinos ventiliranog sloja zraka na poboljšanje higrotermalnog ponašanja ventiliranog sendvič panela, i to prvenstveno u pogledu isušivanja,

u odnosu na neventilirani. Zbog toga je zaključak ovog diplomskog rada taj da bi se za svaki novi materijal trebala provesti eksperimentalna ispitivanja higrotermalnih parametara kako bi se mogle popuniti postojeće baze materijala programskih paketa te time uspostaviti numerički modeli koji vjerodostojno previđaju higrotermalno ponašanje vanjskih ovojnica izvedenih od tih novih materijala.

**KLJUČNE RIJEČI:** vlaga, higrotermalni parametri, sorpcijske krivulje, vanjska ovojnica, higrotermalno ponašanje, WUFI®

## **SUMMARY**

**Paula Topić**

### **Numerical analysis of hygrothermal material properties on dynamic heat and moisture transport**

Moisture is a key issue in many buildings and, besides causing construction damage, it can also affect the health of inhabitants. In order to prevent the moisture problem, building envelopes should be designed and constructed correctly. Hygrothermal behaviour of building envelope implies combined heat, air and moisture transfer due to various temperature and relative humidity conditions of the outdoor and indoor environment. Prior to using new types of materials, it is necessary to carry out experimental investigation to determine the hygrothermal parameters by which the computer program can develop a numerical model of mass and heat transport through the building envelope made from observed material. The main parameter describing moisture transport through the material is sorption curve, and in standard moisture calculation methods this parameter is neglected.

In this thesis, experimental determination of sorption curves of two types of concrete with recycled aggregate was conducted: concrete with recycled concrete and concrete with recycled brick as aggregate. In both types of concrete, 50% of the natural aggregate is replaced with recycled one. Also, with aim to analyze the influence of material parameters on the hygrothermal behavior of the observed system of building envelope, i.e. dynamic transport of heat and moisture through such a system, the possibility of user input of material parameters in the WUFI® software package was investigated. Parametric analysis was then carried out on a total of seven cases involving simple numerical wall models and more complex numerical models of ventilated and unventilated sandwich panels.

The results obtained show that there are visible differences in hygrothermal behavior of envelopes if user itself enters the real, i.e. experimentally obtained, values of new material parameters in comparison when the parameters of the "most common" materials from the available database of the software package are used. Moreover, the contribution of the ventilated air layer to the improvement of the hygrothermal behaviour of the ventilated sandwich panel was observed, especially in terms of drying, compared to unventilated panel.

Therefore, the overall conclusion of this thesis is that for each new material the experimental investigation of hygrothermal parameters should be carried out, so that existing material databases of software package could be complemented and thus numerical models that trustworthy predict the hygrothermal behaviour of building envelopes made from new materials could be defined.

KEY WORDS: moisture, hygrothermal parameters, sorption curves, building envelope, hygrothermal behaviour, WUFI®

# SADRŽAJ

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>                                                                        | <b>1</b>  |
| <b>2. OSNOVNI POJMOVI .....</b>                                                             | <b>4</b>  |
| <b>3. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA .....</b>                                              | <b>7</b>  |
| <b>4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA .....</b>                                            | <b>9</b>  |
| <b>5. ECO-SANDWICH® .....</b>                                                               | <b>11</b> |
| 5.1. Ventilirane fasade .....                                                               | 12        |
| <b>6. TRANSPORT VLAGE .....</b>                                                             | <b>13</b> |
| 6.1. Sorpcijske krivulje .....                                                              | 18        |
| 6.2. Eksperimentalno određivanje sorpcijskih izoterma betona s recikliranim agregatom ..... | 22        |
| <b>7. TRANSPORT TOPLINE .....</b>                                                           | <b>28</b> |
| 7.1. Radijacija .....                                                                       | 29        |
| 7.2. Kondukcija .....                                                                       | 29        |
| 7.3. Konvekcija .....                                                                       | 30        |
| <b>8. HAM MODELI .....</b>                                                                  | <b>32</b> |
| <b>9. WUFI® .....</b>                                                                       | <b>35</b> |
| 9.1. WUFI® Pro .....                                                                        | 37        |
| <b>10. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>                                                        | <b>39</b> |
| 10.1. Korisnički unos novog materijala u WUFI® .....                                        | 39        |
| 10.1.1. Osnovni parametri betona s recikliranim agregatom .....                             | 42        |
| 10.1.2. Higrotermalni parametri betona s recikliranim agregatom .....                       | 44        |
| 10.2. Model zida .....                                                                      | 46        |
| 10.3. Model panela .....                                                                    | 52        |
| 10.3.1. Neventilirani sendvič paneli .....                                                  | 53        |

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 10.3.2. Ventilirani sendvič paneli .....        | 56        |
| 10.4. Stabilnost numeričkih simulacija .....    | 58        |
| <b>11. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA.....</b> | <b>59</b> |
| <b>12. ZAKLJUČAK.....</b>                       | <b>77</b> |
| <b>13. LITERATURA .....</b>                     | <b>81</b> |
| <b>POPIS TABLICA.....</b>                       | <b>83</b> |
| <b>POPIS SLIKA .....</b>                        | <b>84</b> |

## 1. UVOD

Kontrola vlage temelj je za pravilno funkcioniranje bilo koje građevine. Važna je za zaštitu ukućana od štetnog utjecaja na zdravlje te zaštitu zgrade i njenih sadržaja od oštećenja. Ipak, problemi s vlagom toliko su česti u zgradama da ih mnogi smatraju neizbježnim. Dugotrajna vlaga može dovesti do gljivica i plijesni, kemijske reakcije s građevinskim materijalom mogu uzrokovati oštećenja u vidu korozije kod metala, bubrenja i truleži kod drvenih komponenti, oštećenja boja i lakova, također kod betona i cigli može doći do taloženja soli na površini. Uz sve navedene degradacije dugotrajna vlaga uzrokuje i smanjenje toplinsko izolacijskumoc građevnih elemenata što također utječe na kvalitetu života u unutarnjim prostorijama. Studije pokazuju da je kod problema sa zgradama, u 70% slučajeva direktni ili indirektni uzročnik vlaga [1].

Zbog svega navedenog od izuzetne je važnosti vanjsku ovojnicu zgrade projektirati i izvesti na adekvatan način kako ne bi došlo do pojačane kondenzacije vodene pare i kapilarnog upijanja. Odnosno, vanjsku ovojnicu zgrade je potrebno projektirati na način da se u slučaju kondenzacije vodene pare ona može nesmetano osušiti u odgovarajućem vremenskom period. Vanjska ovojnica predstavlja fizičku granicu između vanjskog i unutarnjeg prostora i kao takva ključna je njena uloga u fizikalno ispravnom prijenosu vlage. Glavni izvori vlage za ovojnicu zgrade mogu se grupirati u četiri skupine: kišu nošenu vjetrom, vodu iz tla, vodenu paru u zraku i ugrađenu vlagu u materijalu [2]. Osim pravilne izvedbe i redovitog održavanja, potrebno je i pravilno proračunati njezino stvarno ponašanje tijekom uporabe u realnim uvjetima korištenja, tzv. higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade. Odnosno, tek se proračunom higrotermalnog ponašanja može uvidjeti koji materijal i koji građevni proizvod je primjeren za koju namjenu i koju klimu. U Hrvatskoj su i dalje u uporabi standardne stacionarne metode proračuna koje ne daju sliku stvarnog higrotermalnog ponašanja vanjskih građevnih dijelova. Kod njih se prijenos topline, zraka i vlage promatra odvojeno, a pojedini važni učinci neopravdano su zanemareni. Za realniji prikaz ponašanja u vremenu razvijeni su numerički dinamički nestacionarni modeli proračuna. U njima se izračun bazira na integriranom utjecaju topline, zraka i vlage, a uključuju interakcije raznih građevinskih

materijala, zraka u prostoriji te utjecaja korisnika i sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije.

Higrotermalno ponašanje naročito je važno predvidjeti za nove, inovativne građevne materijale i proizvode čije ponašanje nije iskustveno poznato. Navedeno dodatno dobiva na težini kada je riječ o projektiranju zgrada niske potrošnje energije, kao što su primjerice niskoenergetske zgrade, pasivne zgrade, zgrade gotovo nulte energije i slično. Vanjske ovojnice takvih zgrada znatno su osjetljivije na vlagu od standardnih zgrada, odnosno jače je izražen utjecaj na energetska ponašanje takvih zgrada.

Primjer inovativnog građevinskog proizvoda je ECO-SANDWICH® - održivi, predgotovljeni zidni panelni sustav od recikliranog agregata pogodan za izgradnju niskoenergetskih zgrada. ECO-SANDWICH® je rezultat opsežnih znanstvenih istraživanja koja su provedena na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Dva globalna problema potaknula su provedbu istraživanja: prevelika potrošnja energija i problema građevinskog otpada i otpada od rušenja.

Činjenica je da je sve veća emisija stakleničkih plinova tijekom prošlog stoljeća glavni uzročnik klimatskim promjenama. Veliki dio emisija stakleničkih plinova dolazi iz uporabe fosilnih goriva za proizvodnju energije, od čega je sektor zgradarstva jedan od najvećih potrošača energije. Zgrade širom Europe odgovorne su za oko 40% ukupne potrošnje energije i 32% emisije CO<sub>2</sub> [3]. Kao posljedica toga tijekom posljednjih 30 godina razvijaju se energetska propisi za nove i postojeće zgrade. Osim energetske učinkovitosti samih zgrada veliki problem današnjice je i reciklaža građevinskog otpada. Europska komisija donijela je Okvirnu direktivu o otpadu (eng. *Waste Framework Directive–WFD*) kojom se od zemalja članica Europske unije zahtijeva da poduzmu odgovarajuće mjere kako bi se do 2020. godine količina recikliranog građevinskog otpada povećala na najmanje 70% [4]. Istraživanja pokazuju da se u Republici Hrvatskoj godišnje proizvede 2,5 mil. tona građevinskog otpada, od čega se tek 7% reciklira [5].

Može se reći kako je ECO-SANDWICH® jedan od primjera kako u građevinarstvu pomiriti problem energetske učinkovitosti u zgradarstvu i recikliranja građevinskog otpada i otpada od rušenja.

Numerički nestacionarni modeli higrotermalnog ponašanja imaju već ugrađene svoje baze materijala s poznatim karakteristikama. Problem se javlja u slučaju novih,

inovativnih materijala koji nisu obuhvaćeni bazama. Kako što točnije procijeniti njihovo ponašanje? Da li aproksimacija njihovih karakteristika nekim defaultnim ‘‘najsrodnijim’’ materijalom pruža zadovoljavajuću aproksimaciju? Kakva je razlika u ponašanju predgotovljenog panela istih geometrijskih karakteristika ali različitih materijalnih karakteristika – defaultne vrijednosti ‘‘najsrodnijih’’ materijala u usporedbi s točnim, eksperimentalno ispitanim karakteristikama promatranih materijala?

Za reciklirane betone od kojih se proizvodi spomenuti panelni sustav potrebno je provesti niz eksperimentalnih ispitivanja svojstava materijala koja utječu na higrotermalno ponašanje vanjske ovojnice zgrade izvedene ovakvim panelima. U sklopu ovog rada provesti će se numerička simulacija higrotermalnog ponašanja predmetnog panela te procijeniti utjecaj promjene karakteristika materijala na njegovo sveukupno higrotermalno ponašanje. Ciljevi rada će biti detaljnije prikazani u poglavlju 3. *‘‘Opći i specifični ciljevi rada’’*.

## 2. OSNOVNI POJMOVI

*Napomena: u sklopu ovog poglavlja opisani su pojmovi koji se spominju u radu ali unutar samog rada nisu detaljnije objašnjeni. Svi pojmovi koji su detaljnije objašnjeni unutar rada, nisu navedeni u ovom dijelu. Također, pojmovi su navedeni po abecednom redu.*

APSOLUTNA VLAGA je količina vode u jedinici volumena zraka [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] [2].

ENTALPIJA (eng. *Enthalpy*) – u ovisnosti o temperaturi (potrebno samo za PCM materijale) je termodinamička funkcija stanja ravnoteže sustava, koja je zbroj unutrašnje energije  $U$  i umnoška tlaka  $p$  i volumena  $V$  sustava [2].

$$H=U/pV$$

( $H$ -entalpija [J],  $U$ -unutarnja energija [J],  $p$ -tlak[PA],  $V$ -volumen [ $\text{m}^3$ ])

FICKOV ZAKON (1885.) A. Fick je eksperimentalno utvrdio zakon difuzije koji kaže da je brzina difuzije (količina tvari koja u vrlo kratkom vremenu prođe kroz presjek) proporcionalna gradijentu koncentracije [6].

GUSTOĆA [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] (eng. *True density*) je omjer mase suhog materijala i volumena čvrste tvari (bez pora i šupljina) [2].

$$\rho_{\text{true}}=m/(V_{\text{tot}}-V_{\text{pores}})=m/V_{\text{true}}$$

( $V_{\text{tot}}$ – ukupni volumen [ $\text{m}^3$ ],  $V_{\text{pores}}$ – volume pora [ $\text{m}^3$ ],  $V_{\text{true}}$  – stvarni volumen [ $\text{m}^3$ ],  $m$  – masa[kg])

KOEFICIJENT OTPORA DIFUZIJI VODENE PARE  $\mu[-]$  (eng. *Water Vapour Diffusion Resistance Factor*) pokazuje koliko je puta veći otpor difuzijskom prolazu vodene pare kroz promatrani građevinski materijal nego kroz sloj mirnog zraka jednake debljine i jednake temperature [6].

KOEFICIJENT PROLASKA TOPLINE  $U$  je količina topline koju građevni element gubi u 1 sekundi po  $\text{m}^2$  površine, kod razlike temperature od 1K, izraženo u  $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$  [6].

NASIPNA GUSTOĆA [ $\text{kg/m}^3$ ] (eng. *Bulk density*) je omjer mase suhog materijala i volumena materijala s porama i šupljinama [2].

$$\rho_{\text{bulk}} = m/V_{\text{tot}}$$

( $V_{\text{tot}}$  – ukupni volumen [ $\text{m}^3$ ],  $m$  – masa [ $\text{kg}$ ])

PLOŠNI KOEFICIJENT PRELASKA TOPLINE STRUJANJEM,  $h_c$  [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ], ima značenje gustoće toplinskog toka koju jedinična ploština elementa preda ili primi od okolnog zraka kada je razlika temperature površine elementa okolnog zraka 1K [7].

RAVNOTEŽNA VLAGA- Svaki porozni građevinski materijal poprими neku ravnotežnu vlagu ovisno o relativnoj vlažnosti okolnog zraka, bilo otpuštanjem ili primanjem vlage [2].

RELATIVNI OTPOR DIFUZIJI VODENE PARE  $s_d$  [m] pojedinog građevinskog elementa je umnožak debljine sloja elementa i koeficijenta otpora difuziji vodene pare [6].

RELATIVNA VLAŽNOST ZRAKA odnos je između količine vodene pare koja stvarno postoji u zraku određene temperature, u danom trenutku i maksimalne količine koju bi taj zrak pri toj temperaturi mogao primiti da bi bio zasićen, tj. može se izraziti kao odnos stvarnog i ravnotežnog tlaka vodene pare [2].

ROSIŠTE je najniža temperatura do koje se zrak, uza stalan tlak, može ohladiti a da u njemu ne dođe do kondenzacije vodene pare [2].

SADRŽAJ VODE [ $\text{kg/m}^3$ ] (eng. *Water Content*) ili sadržaj vlage (eng. *Moisture Content*) je količina vode sadržana u materijalu, kao što je tlo (pod nazivom vlaga tla), beton, keramika ili drvo. Sadržaj vode koristi se u širokom rasponu znanstvenih i tehničkih područja, a izražava se kao omjer koji može biti od 0 (potpuno suhi) do vrijednosti 1 (potpuno zasićen) [2].

SPECIFIČNI TOPLINSKI KAPACITET [ $\text{J/kgK}$ ] (eng. *Specific Heat capacity*) je količina topline u [ $\text{J/kgK}$ ] koja je potrebna da se jediničnoj masi nekog tijela povisi temperatura za jedinicu ovisno o temperaturi pri kojoj je izmjeren, raste se porastom temperature [8].

STUPANJ ZASIĆENOSTI ZRAKA PAROM predstavlja udio vlage u porama materijala. Ako je udio vlage 100%, a udio zraka 0% materijal je potpuno zasićen te ne može upiti više vlage. U obrnutom slučaju materijal bi bio u potpunosti suh [2].

TOČKASTI TOPLINSKI MOSTOVI su vrste toplinskih mostova koji imaju manji otpor prolasku topline na mjestimičnim područjima prodora kroz ovojnicu zgrade [6].

TOPLINSKA PROVODLJIVOST  $\lambda$ [W/mK] (eng. *Thermal Conductivity*) je svojstvo građevinskih materijala da u manjoj ili većoj mjeri provode toplinu. Kao mjera toplinske provodljivost nekog materijala služi koeficijent toplinske provodljivosti tog materijala [9].

TOPLINSKI MOSTOVI su dijelovi vanjskog građevinskog elementa koji imaju manji otpor prolasku topline nego tipični presjek elementa [6].

UGRAĐENA VLAGA [kg/m<sup>3</sup>] (eng. *Typical Built-in Moisture*) je vlažnost koja je teoretski sadržana u svježe izgrađenoj konstrukciji, uzimajući u obzir vodu za miješanje materijala kao npr. kod betona. Za ostale materijale kod kojih se ugradnja vrši bez dodatne vode (kamen, drvo) ravnomjerna je vlaga na 80% [2].

UKUPNA POROZNOST [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] (eng. *Porosity*) pokazuje udio pora u materijalu te se koristi za određivanje maksimalnog sadržaja vode  $W_{\max}$  [2].

$$\text{poroznost} = 1 - \rho_{\text{bulk}} / \rho_{\text{true}}$$

$$(\rho_{\text{bulk}} - \text{nasipna gustoća}, \rho_{\text{true}} - \text{gustoća})$$

VANJSKA OVOJNICA ZGRADE čine građevni dijelovi koji odvajaju unutrašnjost zgrade od vanjskog okoliša i negrijanog prostora zgrade. Vanjska ovojnica kao element arhitekture zatvara prostor određene namjene i rješava estetski izgled konstrukcije, a kao element konstrukcije se odupire vanjskim utjecajima i omogućava održavanje mikroklimе i toplinske stabilnosti prostora kojeg zatvara [1].

### 3. OPĆI I SPECIFIČNI CILJEVI RADA

Opći cilj ovog rada je podizanje svijesti u pogledu racionalnije potrošnje energije u zgradarstvu, recikliranju građevinskog otpada te posljedično smanjenju emisije stakleničkih plinova. Cilj je također ukazati na problem vlage koji je prilikom projektiranja često nepravedno zapostavljeni ne uzima se kao jedan od glavnih kriterija za energetske učinkovite, trajne i zdrave zgrade. A upravo je vlaga nakon izgradnje tj. tijekom same uporabe građevine često ključni problem za udobnost življenja u istoj.

Specifični cilj ovog rada temelji se na numeričkoj simulaciji nestacionarnog (dinamičkog) higrotermalnog ponašanja vanjskih ovojnica zgrada izvedenih od prethodno prikazanih predgotovljenih panela. Kroz rad će se provesti sljedeće:

- 1) Utvrditi koja svojstva materijala utječu na higrotermalno ponašanje elemenata
- 2) Istražiti mogućnosti korisničkog unosa svojstva materijala u jedan od postojećih numeričkih nestacionarnih modela proračuna higrotermalnog ponašanja
- 3) Provesti numeričku analizu pojednostavljenog zidnog elementa od betona s recikliranim agregatom i zidnog elementa s karakteristikama materijala iz programske baze, kako bi se usporedila potencijalna razlika u ponašanju.

Provesti numeričku analizu promatranog ECO-SANDWICH® panelnog sustava s korisnički unesenim točnim (eksperimentalno određenim) karakteristikama materijala i panelnog sustava istih geometrijskih karakteristika, ali karakteristika materijala preuzetih iz dostupne programske baze.

Za slučajeve proračuna s karakteristikama materijala iz programske baze, nastojat će se odabrati karakteristike materijala “najsrodnijih” materijalima ECO-SANDWICH® panelnog sustava.

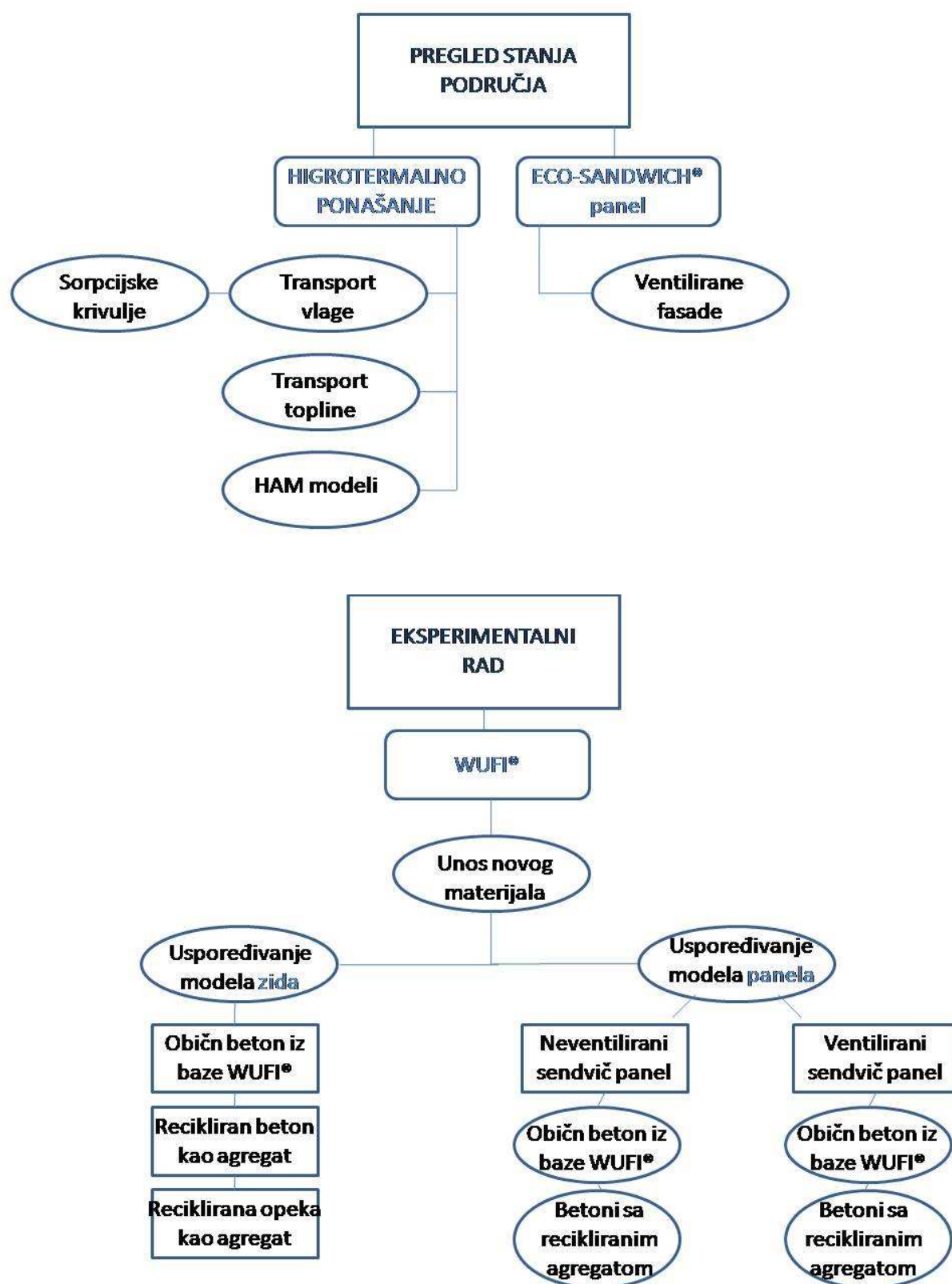
U Tablici 1. prikazani su svi slučajevi za numeričku analizu. Prva tri slučajeva odnose se na usporedbu modela zida, a ostala četiri slučajeva odnose se na usporedbu modela panela.

**Tablica 1. Prikaz svih slučajeva korištenih u numeričkoj analizi**

| Model | Model | Opis                                                                      |
|-------|-------|---------------------------------------------------------------------------|
| ZID   | 1     | zid od običnog betona (iz baze WUFI®),                                    |
|       | 2     | zid od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom,       |
|       | 3     | zid od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom         |
| PANEL | 4     | neventilirani sendvič panel iz baze materijala                            |
|       | 5     | neventilirani sendvič panel izgrađenih od betona s recikliranim agregatom |
|       | 6     | ventilirani sendvič panel iz baze materijala                              |
|       | 7     | ventilirani sendvič panel izgrađenih od betona s recikliranim agregatom   |

#### 4. METODOLOGIJA I PLAN ISTRAŽIVANJA

Kao što je u prethodnom poglavlju navedeno, u ovom će seradu provesti numerički proračun i simulacija ponašanja predgotovljenih fasadnih panela na higrotermalna djelovanja iz okoliša. Naglasak će biti na usporedbu ponašanja, tj. utjecaj stvarnih veličina karakteristika materijala (korisnički unesenih) u odnosu na pretpostavljane vrijednosti iz programske baze. Za provedbu proračuna odabran je WUFI® programski paket razvijen od strane Fraunhofer Instituta za građevinsku fiziku. Kako bi se dobio uvid u stvarno ponašanje nekog materijala, a samim time i građevnog elementa proizvedenog od promatranog materijala, potrebno je poznavati vrijednosti njegovih higrotermalnih svojstava. WUFI® nudi svoju bazu materijala za koja su već ranije eksperimentalno ispitana higrotermalna svojstva, no u ovom radu jedan od ciljeva je usporediti novi materijal za koji su eksperimentalno provedena ispitivanja u laboratoriju i materijala kojeg WUFI® nudi u svojoj bazi. Na taj način vidjet će se koliko se razlikuju rezultati proračuna te da li je u neimanju vlastitih rezultata ispitivanja donekle dovoljno pouzdano koristiti najsličniji (“najsrodniji”) materijal iz WUFI® baze. Zato je za analizu odabrano sedam slučajeva; tri pojednostavljena slučaja analize zida (obični beton iz WUFI® baze, beton s agregatom od recikliranog betona, beton s agregatom od reciklirane opeke) te četiri složenija slučaja panela; dva ventilirana panela od kojih je jedan s materijalima iz WUFI® baze te jedan od materijala čija svojstva su ispitana u laboratoriju Zavoda za materijale, i dva neventilirana panela od kojih je jedan, kao u slučaju ventiliranih panela, s materijalima iz WUFI® baze te drugi od materijala čija svojstva su ispitana u laboratoriju. Metodologija i plan istraživanja prikazani su shematski na Slici 1. Istraživanje stanja područja detaljno je prikazano u narednim poglavljima.



Slika 1. Metodologija i plan istraživanja

## 5. ECO-SANDWICH®

U vrijeme kada smo suočeni sa sve većim problemom nekontroliranog zbrinjavanja građevinskog otpada i sve većom potrebom za racionalnijom potrošnjom energije na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu kao rezultat opsežnih znanstvenih istraživanja nastao je ECO-SANDWICH®-održivi, predgotovljeni zidni panelni sustav od recikliranog agregata. ECO-SANDWICH® zidni paneli dobre su trajnosti, omogućuju brzu gradnju te su izuzetno energetske učinkoviti, a nakon svog uporabnog vijeka mogu se u potpunosti ponovo reciklirati čime im se cjeloživotni vijek dodatno produžuje i zatvara. Paneli su sastavljeni od vanjskog fasadnog sloja debljine 6 cm izrađenog od betona u kojem je 50% prirodnog agregata zamijenjeno s agregatom od reciklirane opeke, ventiliranog sloja zraka debljine 4 cm, mineralne vune proizvedene održivom Ecosse® tehnologijom debljine 20 cm, te unutarnjeg (samonosivog) betona debljine 12 cm u kojem je 50% prirodnog agregata zamijenjeno s agregatom od recikliranog betona [10]. Slojevi panela prikazani su na Slici 2. Zbog sloja zraka kojem mora biti omogućeno strujanje, ECO-SANDWICH® zidni paneli pripadaju kategoriji ventiliranih vanjskih ovojnica.



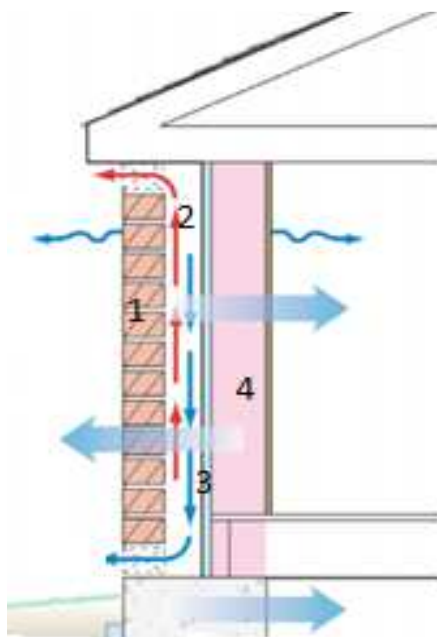
**Slika 2. Presjek ECO-SANDWICH® zidnog panela [10]**

ECO-SANDWICH® zidni paneli osim što su izgrađeni od recikliranih materijala građevinskog otpada i otpada od rušenja, također zbog smanjene energije pri proizvodnji te poboljšanjem energetske učinkovitosti u zgradama utječu na sveukupno smanjenje emisije stakleničkih plinova. Prilikom proizvodnje mineralne vune posebna se pažnja usmjerila i na smanjenjekorištenja regularnih kemikalija kao što su fenoli i formaldehidi te se koriste prirodne smole kao vezivo. Toplinska provodljivost betona s recikliranim

betonom kao agregatom je 36%, a betona s recikliranom opekom 45% manja u odnosu na beton izrađen s prirodnim agregatom. Koeficijent prolaska topline cijelog panela manji je od  $0,20\text{W/m}^2\text{K}$ ., što ga čini prikladnim za izgradnju niskoenergetskih zgrada. Dva sloja betona povezana su rešetkastim nosačima od nehrđajućeg čelika koji na svom vrhu i u podnožju imaju plastične obloge kako bi se smanjili gubici topline kroz točkaste toplinske mostove [10]. Ovakvi paneli se na gradilištu ugrađuju u nosivu skeletnu konstrukciju te međusobno povezani izabrtvljeni čine vanjsku ovojnicu zgrade. Izuzetno je bitno da projektant u fazi projektiranja predvidi i riješi sve detalje (spojevi panela s konstrukcijom, međusobni spojevi paneli) kako bi se osigurala zrakonepropusnost vanjske ovojnice i minimizirao utjecaj toplinskih mostova, a samim time spriječila (ili barem umanjila) mogućnost nastanka građevinske štete.

### 5.1.Ventilirane fasade

Ventilirane fasade zbog svoje mogućnosti da ispune sve arhitektonske zahtjeve u bilo kojoj klimi sve više se primjenjuju diljem svijeta. Princip je to dvostruke konstrukcije za vanjske zidove koji se temelji na ventiliranom zračnom prostoru između fasadne obloge i vanjskog zida zgrade, a pridonosi održavanju zdrave unutarnje klime. Ventilirana fasada zbog svoje sposobnosti da diše pomaže u kontroliranju vlage u svakoj klimi. Zbog svojih prednosti smatraju se jednim od najučinkovitijih sustava za istovremeno rješavanje problema toplinske izolacije, utjecaja toplinskih mostova te kondenzacije vodene pare [11,12].



**Slika 3. Dijelovi sustava ventilirane fasade**

Dijelovi sustava ventilirane fasade: (Slika 3.)

1. Fasadni panel (obloga)
2. Prostor za ventilaciju
3. Sloj toplinske izolacije
4. Nosivi zid

Mnogi znanstvenici i stručnjaci uz ventilaciju zraka navode i ostale prednosti ventiliranih fasada kao što su [13]:

- 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

## 6. TRANSPORT VLAGE

U konstrukciji se svakodnevno događa transport zraka, vode, vlage, vodene pare i njihovih sastojaka kroz građevne elemente. Njihovo djelovanje na konstrukciju uvelike utječe na samu funkcionalnost građevine i udobnost življenja u istoj. Istraživanja su pokazala da je u 70% slučajeva vlaga direktno ili indirektno uzrok narušene kvalitete zgrade i njezinih elemenata [1]. Upravo iz tog razloga važna uloga prilikom projektiranja

pripada kontroli vlage, jer osim nelagode uzrokovane viškom vlage, pojava plijesni i gljivica uvelike može utjecati na zdravlje stanara. Osim visoke vlažnosti problem se može razviti i zbog premale vlažnosti u prostoriji što rezultira suhoćom kože, grla i nosa te povećava alergijske reakcije. Osim zdravstvenih tegoba i smanjene ugodnosti boravka, neadekvatna vlažnost uzrokuje degradaciju materijala što dovodi do narušavanja izgleda zidova, stropova i ostalih građevnih elemenata te u dužem periodu može narušiti trajnost i dovesti u pitanje stabilnost same konstrukcije. Na Slici 4. prikazana su oštećenja uzrokovana djelovanjem vlage.

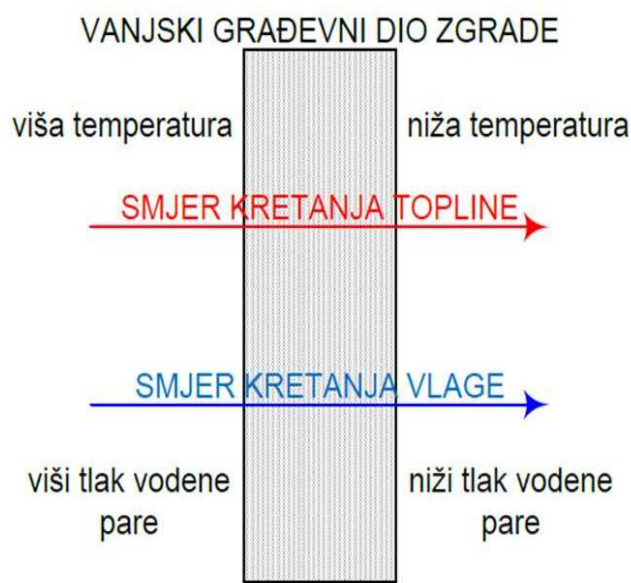


**Slika 4. Oštećenja uslijed djelovanja vlage [14]**

Uzrok transporta zraka je gradijent pritiska kojeg mogu izazvati vanjski utjecaji, voda koja se kreće kroz materijal, vjetar, razlike u temperaturi i sastavu zraka. Sam transport zraka može se promatrati kao prolazak kroz otvore vrata i prozora i kao prolazak kroz otvorene pore građevnih elemenata. Dok se vodena para najčešće prenosi difuzijom i samim tokom zraka, voda se kroz elemente širi pomoći kapilarnosti, gravitacije i pritiska. Prolazak topline, vlage i zraka kroz vanjsku ovojnicu zgrade karakterizira njezino higrotermalno ponašanje (eng. *hygrothermal performance/behaviour*).

Smjer kretanja topline i vlage jednak je u građevinskom elementu (Slika 5.) te do njega dolazi uslijed razlike parcijalnih tlakova i temperature u unutrašnjosti zgrade i u vanjskom okolišu. Do kretanja vodene pare dolazi procesom difuzije kroz vanjsku ovojnicu iz područja višeg parcijalnog tlaka vodene pare u područje nižeg parcijalnog tlaka, s težnjom da koncentracija vodene pare na svim mjestima bude jednaka. Što je veća razlika parcijalnih tlakova, to je i veća gustoća difuzijskog toka vlage kroz vanjsku ovojnicu. Svaki građevni element, u ovisnosti od strukture materijala, pruža određeni

otpor difuziji vodene pare. Samo kretanje vodene pare kroz građevni element, ako ne dolazi do njene kondenzacije, nema nikakve negativne posljedice po element, do opasnosti za oštećenje elementa i smanjenja njegove toplinsko-izolacijske sposobnosti dolazi jedino u slučaju kondenzacije vodene pare unutar elementa [7, 9]



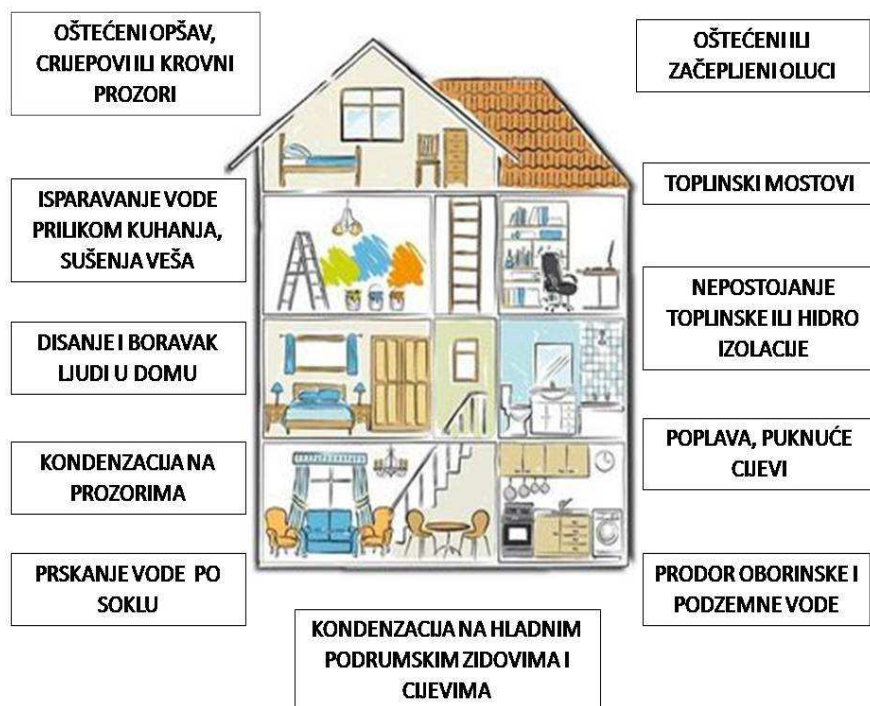
**Slika 5. Smjer kretanja topline i vlage [7]**

Zrak pri danoj temperaturi može sadržavati samo određenu količinu vodene pare te sa sve višom temperaturom zraka on može primiti veću količinu vlage. Zrak je zasićen vodenom parom kada je masa vodene pare sadržane u nekom volumenu zraka dosegla za tu temperature maksimalnu vrijednost. Naknadnim povećanjem vodene pare dolazi do pojave kondenzacije. Na povećanu vlažnost posebno su osjetljivi zidovi podruma koji su cijelom svojom dubinom izloženi djelovanju vode koja je obogaćena solima iz tla te ako nemaju propisanu hidroizolaciju može doći do ozbiljnih oštećenja. Soli koje nalazimo u tlu najčešće su nitrati iz fekalija, kloridi iz soli za posipanje i sulfati iz kiselih kiša. Kada voda ispari, soli se kristaliziraju te povećanjem njihovog volumena nastaje tlak znatne "eksplozivne snage". Pod tim utjecajem gotovo svaki materijal biva oštećen, a posljedice su puknuća i odlamanje pojedinih mjesta te kristalno cvjetanje koje narušava vanjski izgled fasade, Slika 6. [15]. Ako dođe do pojave građevinskih šteta, neophodne su sanacije i/ili rekonstrukcije čiji troškovi mogu iznositi više od same izgradnje.

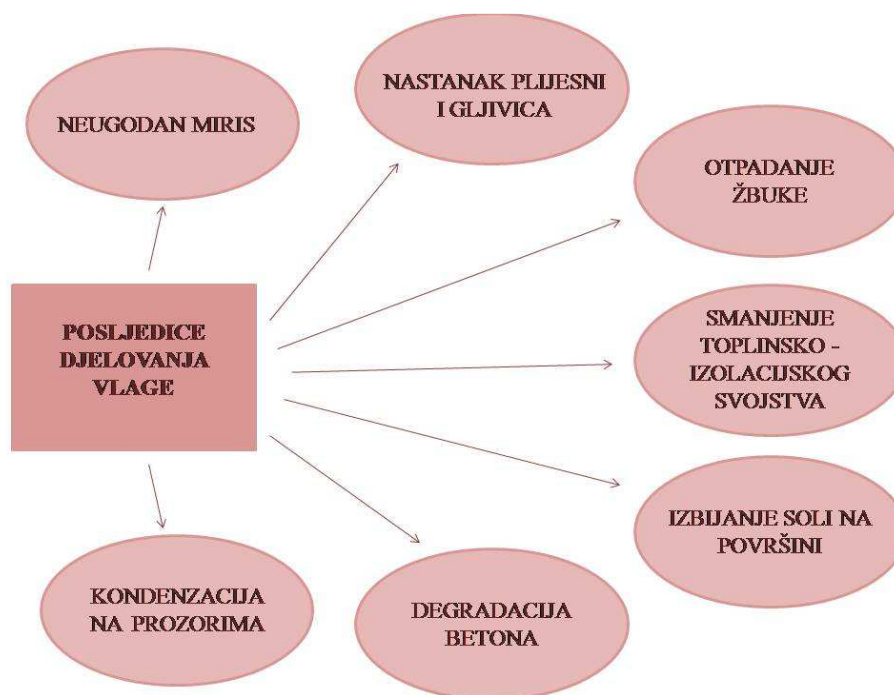


**Slika 6. Građevinska šteta na zidu zbog djelovanja vlage, kristalno cvjetanje na zidu [15]**

Izvori vlage u domu mogu biti raznoliki od oštećenja pojedinih dijelova vanjske ovojnice do prodora vode radi loše hidroizolacije. Vlaga je također uzrokovana boravkom ljudi u prostorijama pri čemu se prilikom disanja, kuhanja, sušenja rublja ispuštaju određene količine vodene pare. Ovi i drugi izvori prikazani su na Slici 7. Važno je napomenuti da će određene količine vlage uvijek biti, no potrebno je odrediti kada će taj udio postati kritičan i uzrokovati razne degradacije i poteškoće unutar elementa. Neke od posljedica djelovanja vlage prikazane su na Slici 8.



**Slika 7. Izvori vlage u kućanstvu**



**Slika 8. Posljedice djelovanja vlage**

Na prijenos vlage u materijalu utječu različiti mehanizmi, a uzrokuju vlaženje građevine na tri načina [16]:

- 1.) djelovanjem kapilarne vlage iz temeljnog tla uslijed kontakta s podzemnom vodom
- 2.) djelovanjem atmosferske i kondenzirane vlage
- 3.) djelovanjem difuzne vlage

Vlagu s obzirom na načine transporta možemo podijeliti na [7]

- Higroskopnu vlagu
- Likvidnu vlagu
- Ugradbenu vlagu
- Kondenziranu vlagu

Higroskopna vlaga nastaje kada soli koje su akumulirane u zidu zbog svoje higroskopnosti upijaju vodenu paru iz zraka

Likvidnu vlagu uzrokuje tekuća voda kao što je kiša, podzemne vode ili voda iz drugih izvora kao što je na primjer curenje vodovodnih cijevi.

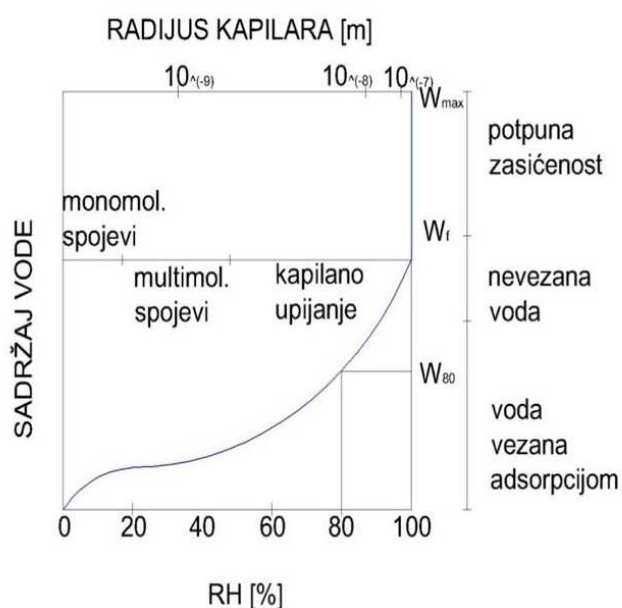
Ugradbena (ugrađena) vlaga je ona koja je nastala prilikom proizvodnje ili ugradnje te je ostala zarobljena u konstrukciji.

Kondenzirana vlaga nastaje kao posljedica dodira toplijeg zraka s hladnijom površinom i evidentira se u obliku rose.

Svojstva materijala koja najbolje opisuju transport vlage u materijalu i utječu na higrotermalno ponašanje su faktor otpora difuziji vodene pare  $\mu$ , koeficijent kapilarnog upijanja  $A_w$  te možda i najznačajnije svojstvo – sorpcijske krivulje.

### 6.1.Sorpcijske krivulje

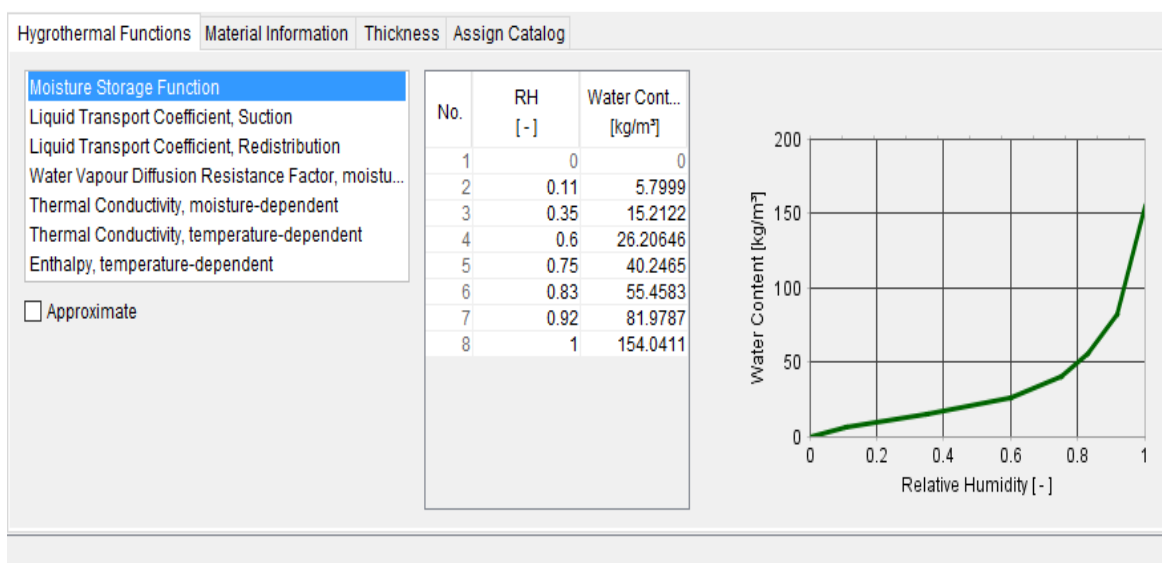
Sorpcijske krivulje daju sadržaj ravnotežne vlage koju materijal može pohraniti pri danoj relativnoj vlažnosti zraka (RH). Svaki porozni građevinski materijal na površini akumulira molekule vodene pare koje potom ulaze u pore i akumuliraju se sve do postizanja specifičnog sadržaja ravnoteže vlage koji odgovara vlažnosti zraka okoline. Materijal izložen određenoj relativnoj vlažnosti zraka pri danoj temperaturi zraka, nastoji procesom sorpcije "upiti" ili "otпустiti" onu količinu vlage koja je potreba da se postigne tzv. ravnotežna vlaga (eng. *dynamic equilibrium moisture*) u građevinskom materijalu za danu vlažnost okoliša u kojem se nalazi. To je ona količina vlage u materijalu pri kojoj materijal više ne može niti upiti niti otpustiti vlagu za dane termohigrometrijske uvjete okoliša. S povećanjem vlažnosti, pojedine molekule se skupljaju kako bi se formirale skupine molekula, zatim monomolekularni slojevi, i konačno multimolekularni filmovi koji se sastoje od nekoliko molekularnih slojeva. Zbog toga se ravnotežni sadržaj vlage povećava otprilike proporcionalno relativnoj vlažnosti, što je prikazano na Slici 9. Kod relativne vlažnosti od 0,6 do 0,8 (RH=60%-80%), smanjenje tlaka zasićene pare u manjim kapilarima uzrokuje dodatnu kondenzaciju vlage. Na tim razinama vlažnosti, pore sadrže ne samo vlagu vezanu adsorpcijom, nego i nevezanu tekuću vlagu (kapilarnu vodu). Kapilarna vlaga kondenzira se ili evaporira sve dok smanjen tlak zasićene pare iznad čvrsto zakrivljenih vodenih površina u malim porama ne bude u ravnoteži s relativnom vlagom zraka [2,9,17].



**Slika 9. Sorpcijske krivuljaj karakteristična područja [2]**

Broj adsorbiranih molekula određuje se apsolutnom vlagom zraka pora s jedne strane i temperaturom s druge. Budući da se ova dva čimbenika međusobno suprotstavljaju, rezultirajući ravnotežni sadržaj vlage određuje se njihovim omjerom. Funkcija skladištenja vlage materijala pokazuje kakav je sadržaj vlage materijal dosegao pri određenoj relativnoj vlazi. Budući da ova funkcija slabo ovisi o temperaturi, temperatura se može zanemariti te se može reći da funkcija skladištenja vlage ovisi samo o relativnoj vlažnosti kao jedinoj varijabli. Upravo iz tog razloga sorpcijska krivulja se najčešće ispituje pri samo jednoj konstantnoj temperaturi.

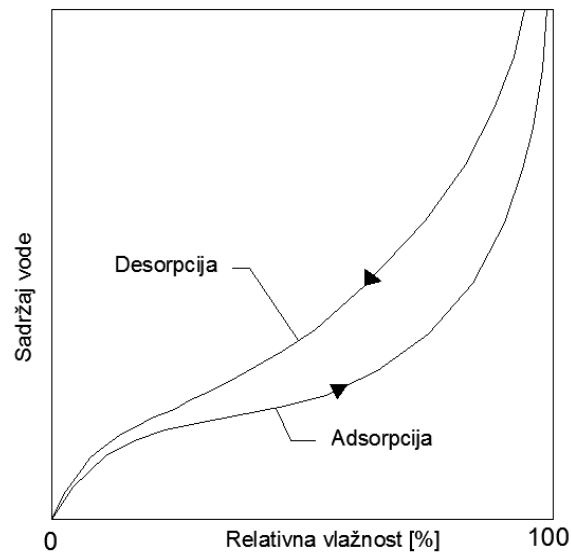
Pod utjecajem sila kapilarnosti materijal u dodiru s vodom će ju upijati sve dok se ne dostigne potpuno zasićenje  $w_f$ . Sadržaj vode odgovara funkciji skladištenja vlage pri relativnoj vlažnosti od 1 (RH= 100%). Zbog zračnih pora zarobljenih u strukturi potpuna zasićenost je manja od maksimalnog sadržaja vode  $w_{max}$ , što je određeno poroznošću. Potpuna zasićenost i zasićenost pri ravnotežnoj vlazi od RH=80% nalaze se među standardnim materijalnim podacima i poznata je za većinu materijala.



**Slika 10. Primjer korisničkog unosa sorpcijskih krivulja za beton od recikliranog betona**

Na Slici 10. je prikazan način korisničkog unosa sorpcijskih krivulja u WUFI®. Za unos je potrebno imati što više točaka za sadržaj vlage pri određenoj relativnoj vlažnosti zraka kako bi izračun bio što precizniji.

Veza između sadržaja ravnotežne vlage u građevinskom materijalu i relativne vlažnosti okoline pri konstantnoj temperaturi naziva se sorpcijska izoterma. Poznato je da većina higroskopnih materijala pokazuje histerezu u obliku adsorpcijske i desorpcijske krivulje. Ravnoteža uspostavljena tijekom sušenja (izlaganje vlažnog uzorka opadajućem nizu relativnih vlažnosti) daje desorpcijske krivulje, a ravnoteža uspostavljena tijekom vlaženja (izlaganje suhog uzorka rastućem redoslijedu relativnih vlažnosti) daje adsorpcijske krivulje. Područje između krivulje adsorpcije i desorpcije prikazuje petlju histereze, Slika 11. [17].



**Slika 11. Krivulje adsorpcije i desorpcije [17]**

Različite vrste materijala zbog svojih različitih struktura imaju različite sorpcijske krivulje. Drvo puno brže i puno više vode može upiti nego li primjerice beton. Zbog različitih higrotermalnih svojstava pojedinih materijala potrebno je za svaki posebno provesti ispitivanja kako bi im se točno utvrdila svojstva. Određivanje svojstava higroskopske sorpcije građevinskih materijala provodi se isključivo eksperimentalno i to prema normi HRN EN ISO 12571 [18].

## 6.2. Eksperimentalno određivanje sorpcijskih izotermi betona s recikliranim agregatom

Prema EN ISO 12571 postoje dva načina ispitivanja sorpcijskih krivulja

1. Metoda eksikatora (referentna metoda)
2. Metoda klimatske komore

Sorpcijske krivulje za dvije vrste betona s recikliranim agregatom koji čine vanjski fasadni i unutarnji (samonosivi) sloj ECO-SANDWICH®-a određene su metodom eksikatora, a u Tablicama 2 i 3. prikazani su rezultati ispitivanja. Detaljan opis samog ispitivanja opisan je u radu: Topić, P., Baričević, M.; *“Eksperimentalno određivanje parametara modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s recikliranim agregatom”* [19]. Valja samo naglasiti da je za svaku vrstu betona pripremljeno po 6 uzoraka (Slika 12.) nominalnih dimenzija  $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 20\text{mm}$  kako bi se njihove srednje vrijednosti koristile za što točniji prikaz sorpcijskih krivulja. Rezultati dobiveni ovim ispitivanjem korišteni su prilikom unosa novog materijala u WUFI® programski paket. U tablicama 2.,3. prikazane su mase uzoraka za dane relativne vlažnosti RH za svaku vrstu betona.



**Slika 12. Uzorci na kojima je provedeno ispitivanje sorpcijskih krivulja**

**Tablica 2. Mase uzoraka za dane relativne vlažnosti RH (beton od reciklirane opeke)**

| MASE UZORAKA [kg] (beton od reciklirane opeke) |             |             |             |             |             |             |              |
|------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| OZNAKA<br>UZORKA                               | RH =<br>11% | RH =<br>35% | RH =<br>60% | RH =<br>74% | RH =<br>83% | RH =<br>92% | RH =<br>100% |
| MA-009-1-vanj<br>1/6                           | 417.46      | 419.49      | 421.91      | 424.87      | 428.28      | 433.15      | 462.74       |
| MA-009-1-vanj<br>2/6                           | 388.65      | 390.51      | 392.71      | 395.5       | 398.65      | 402.76      | 429.92       |
| MA-009-1-vanj<br>3/6                           | 414.5       | 416.44      | 418.75      | 421.71      | 425.02      | 429.18      | 460.43       |
| MA-009-1-vanj<br>4/6                           | 403.61      | 405.56      | 407.87      | 410.82      | 414.1       | 418.26      | 448.32       |
| MA-009-1-vanj<br>5/6                           | 408.2       | 410.22      | 412.6       | 415.56      | 418.98      | 423.54      | 453.7        |
| MA-009-1-vanj<br>6/6                           | 412.02      | 414.06      | 416.49      | 419.46      | 422.89      | 427.78      | 456.15       |

**Tablica 3. Masa uzoraka za dane relative vlažnosti RH (beton od recikliranog betona)**

| MASA UZORAKA [kg] (beton od recikliranog betona) |             |             |             |             |             |             |              |
|--------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| OZNAKA<br>UZORKA                                 | RH =<br>11% | RH =<br>35% | RH =<br>60% | RH =<br>75% | RH =<br>83% | RH =<br>92% | RH =<br>100% |
| MA-009-1-unu<br>1/6                              | 455.6       | 457.59      | 459.9       | 462.87      | 466.05      | 473.76      | 487.81       |
| MA-009-1-unu<br>2/6                              | 452.27      | 454.2       | 456.43      | 459.28      | 462.4       | 466.75      | 482.63       |
| MA-009-1-unu<br>3/6                              | 471.83      | 473.74      | 475.99      | 478.85      | 481.97      | 486.21      | 502.94       |
| MA-009-1-unu<br>4/6                              | 447.86      | 449.71      | 451.87      | 454.65      | 457.68      | 461.74      | 477.97       |
| MA-009-1-unu<br>5/6                              | 471.39      | 473.38      | 475.7       | 478.67      | 481.93      | 488.56      | 504.34       |
| MA-009-1-unu<br>6/6                              | 449.53      | 451.56      | 453.95      | 456.98      | 460.18      | 466.22      | 482.25       |

Valja naglasiti da su uzorci na početku ispitivanja bili potpuno suhi. Sušili su se dvadeset dana, prvih pet dana uzorci su sušenina temperaturi od 60°, a preostalih petnaest dana na temperaturi od 70°. Nisu podvrgnuti višim temperaturama prilikom sušenja jer je prema istraživanjima Chi Fernga [20] ustanovljeno da pri povišenim temperaturama sušenja može doći do promjene u pornoj strukturi betona koje pri sušenju na 105°C mogu biti kritične i nepovratne te je stoga odlučeno da se proces sušenja odvija na nižim temperaturama unatoč značajnom produženju vremena sušenja.

**Tablica 4. Mase suhih uzoraka**

| Unutarnji sloj - beton s recikliranim betonom | Vanjski sloj - beton s recikliranom opekom |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| masa <sub>suho</sub> m <sub>d</sub> [g]       | masa <sub>suho</sub> m <sub>d</sub> [g]    |
| 454.35                                        | 416.07                                     |
| 451.12                                        | 387.35                                     |
| 470.66                                        | 413.14                                     |
| 446.73                                        | 402.23                                     |
| 470.18                                        | 406.81                                     |
| 448.23                                        | 410.57                                     |

Prilikom unosa sorpcijskih krivulja u WUFI® potrebno je znati ravnotežni sadržaj vlage za pojedine vlažnosti. Vrijednosti se računaju pomoću sljedećih formula [2]:

$$u(RH)=[m(RH)-m_d]/m_d$$

$$w(RH)=u(RH) * \rho_d$$

Gdje je:

$u$  - sadržaja vlage po masi pri datoj vlažnosti [kg/kg],

$m(RH)$  – masa pri datoj relativnoj vlažnosti [kg],

$m_d$  – masa suhog uzorka [kg],

$w(RH)$  - sadržaj vlage po volumenu pri datoj vlažnosti [kg/m<sup>3</sup>],

$\rho_d$  – gustoća suhog uzorka [kg/m<sup>3</sup>]

Nakon što su izračunate vrijednosti za svaki pojedini uzorak uzeta je srednja vrijednost za beton s recikliranom opekom po vlažnostima i srednja vrijednost za beton s recikliranim betonom po vlažnostima čije su vrijednosti prikazane u Tablici 5., te su iste korištene prilikom unosa u WUFI®.

**Tablica 5. Ravnotežni sadržaj vlage za pojedine vlažnosti (RH)**

| Unutarnji sloj - beton s recikliranim betonom |                                                      | Vanjski sloj - beton s recikliranom opekom |                                                      |
|-----------------------------------------------|------------------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| RH [-]                                        | Sadržaj vlage po volumenu w(RH) [kg/m <sup>3</sup> ] | RH [-]                                     | Sadržaj vlage po volumenu w(RH) [kg/m <sup>3</sup> ] |
| 0                                             | 0                                                    | 0                                          | 0                                                    |
| 0.11                                          | 5.7999                                               | 0.11                                       | 6.6143                                               |
| 0.35                                          | 15.2122                                              | 0.35                                       | 16.0829                                              |
| 0.6                                           | 26.2007                                              | 0.6                                        | 27.3184                                              |
| 0.75                                          | 40.2465                                              | 0.74                                       | 41.3864                                              |
| 0.83                                          | 55.4583                                              | 0.83                                       | 57.3807                                              |
| 0.92                                          | 81.9787                                              | 0.92                                       | 78.7667                                              |
| 1                                             | 154.0411                                             | 1                                          | 212.1645                                             |

Prilikom analize rezultata mjerenja sorpcijskih krivulja za reciklirani beton i opeku uočena je znatna razlika u prirastima masa uzoraka s vlažnosti RH=93% na RH=100% (Tablica 5.). Iz navedenog se može zaključiti kako oba tipa betona s recikliranim agregatom (i beton s recikliranim betonom i beton s recikliranom opekom) imaju slično ponašanje u okolišu raspona relativne vlažnosti od 0 – 92 % (tzv. higroskopno područje u kojem je dominantan transport vodene pare difuzijom), dok je u okolišu relativne vlažnosti iznad 92% (tzv. super-higroskopno područje u kojem je dominantan transport likvidne vlage) vidljiv značajno veći kapacitet vlage kod betona s recikliranom opekom.

Za RH=100% korištene su dvije metode, u prvoj RH=100% (kapilarno zasićenje) u kojoj su uzorci bili potopljani preko 28 dana u vodi te u drugoj RH=100% (potpuno zasićenje) u kojoj su uzorci bili u vakuumu i potopljeni u vodi. Laboratorijskim ispitivanjem utvrđeno je da je kod betona s recikliranom opekom porast mase RH=93% na RH=100% (kapilarno zasićenog) bio u prosjeku 27.805 g, a s RH=93% na RH=100% (potpuno zasićenog) bio u prosjeku 29.432 g. Na uzorcima s recikliranim betonom ta je razlika bila duplo manja pa je tako porast mase s RH=93% na RH=100% (kapilarno zasićenog) bio 14.923 g, a s RH=93% na RH=100%. (potpuno zasićenog) bio 15.783 g. Što je prikazano na tablicama 6. i 7.

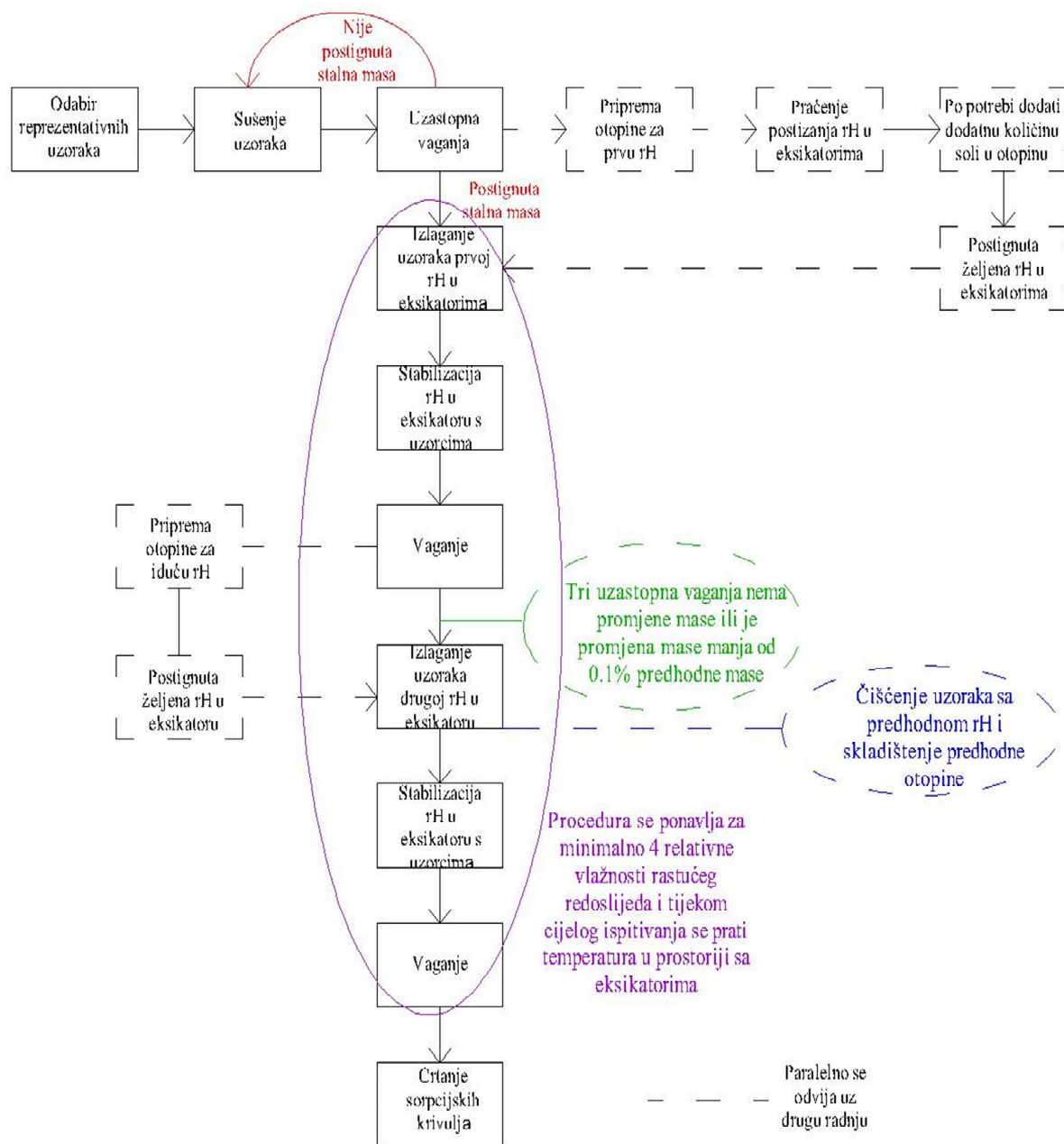
**Tablica 6. Razlika masa pri različitim vlažnostima (beton od reciklirane opeke)**

| Razlika masa pri različitim vlažnostima (beton od reciklirane opeke) |                                 |                                     |                 |                 |                 |                 |                 |
|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>OZNAKA<br/>UZORKA</b>                                             | RH100%<br>p <sub>t</sub> -RH92% | RH100%<br>k <sub>a</sub><br>p-RH92% | RH92%-<br>RH83% | RH83%-<br>RH74% | RH74%-<br>RH60% | RH60%-<br>RH35% | RH35%-<br>RH11% |
| MA-009-1-<br>vanj 1/6                                                | 29.59                           | 27.81                               | 4.87            | 3.41            | 2.96            | 2.42            | 2.03            |
| MA-009-1-<br>vanj 2/6                                                | 27.16                           | 25.83                               | 4.11            | 3.15            | 2.79            | 2.2             | 1.86            |
| MA-009-1-<br>vanj 3/6                                                | 31.25                           | 29.36                               | 4.16            | 3.31            | 2.96            | 2.31            | 1.94            |
| MA-009-1-<br>vanj 4/6                                                | 30.06                           | 28.24                               | 4.16            | 3.28            | 2.95            | 2.31            | 1.95            |
| MA-009-1-<br>vanj 5/6                                                | 30.16                           | 28.66                               | 4.56            | 3.42            | 2.96            | 2.38            | 2.02            |
| MA-009-1-<br>vanj 6/6                                                | 28.37                           | 26.93                               | 4.89            | 3.43            | 2.97            | 2.43            | 2.04            |
| Prosjeak                                                             | 29.432                          | 27.805                              | 4.458           | 3.333           | 2.932           | 2.342           | 1.973           |

**Tablica 7. Razlika masa pri različitim vlažnostima (beton od recikliranog betona)**

| Razlika masa pri različitim vlažnostima |                                 |                                     |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>OZNAKA<br/>UZORKA</b>                | RH100%<br>p <sub>t</sub> -RH92% | RH100%<br>k <sub>a</sub><br>p-RH92% | RH92%-<br>RH83% | RH83%-<br>RH75% | RH74%-<br>RH60% | RH60%-<br>RH35% | RH35%-<br>RH11% |
| MA-009-1-<br>unu 1/6                    | 14.05                           | 13.42                               | 7.71            | 3.18            | 2.97            | 2.31            | 1.99            |
| MA-009-1-<br>unu 2/6                    | 15.88                           | 15.22                               | 4.35            | 3.12            | 2.85            | 2.23            | 1.93            |
| MA-009-1-<br>unu 3/6                    | 16.73                           | 15.64                               | 4.24            | 3.12            | 2.86            | 2.25            | 1.91            |
| MA-009-1-<br>unu 4/6                    | 16.23                           | 15.46                               | 4.06            | 3.03            | 2.78            | 2.16            | 1.85            |
| MA-009-1-<br>unu 5/6                    | 15.78                           | 14.96                               | 6.63            | 3.26            | 2.97            | 2.32            | 1.99            |
| MA-009-1-<br>unu 6/6                    | 16.03                           | 14.84                               | 6.04            | 3.2             | 3.03            | 2.39            | 2.03            |
| Prosjeak                                | 15.783                          | 14.923                              | 5.505           | 3.152           | 2.910           | 2.277           | 1.950           |

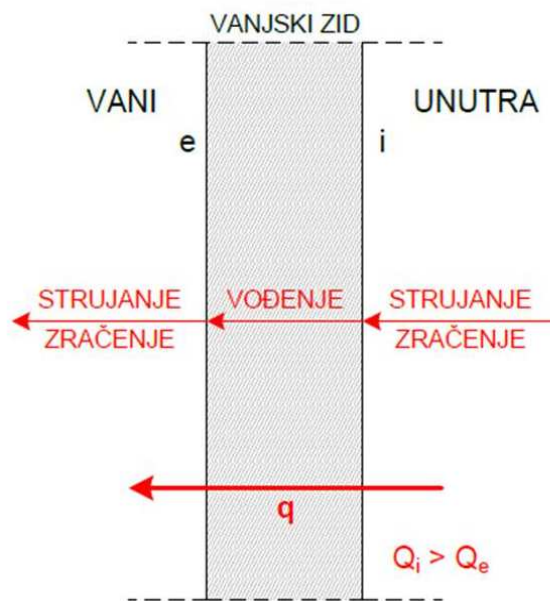
Na Slici 13. prikazanje detaljan postupak eksperimentalnog ispitivanja sorpcijskih krivulja pomoću metode s eksikatorom koji je korišten u već ranije spomenutom radu Topić, P. i Baričević, M.; “Eksperimentalno određivanje parametara modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s recikliranim agregatom”



Slika 13. Dijagram toka eksperimentalnog ispitivanja sorpcijskih krivulja [19]

## 7. TRANSPORT TOPLINE

Prijelaz topline je izmjena energije između dva sustava zbog razlike u njihovim temperaturama ili rasprostiranje toplinske energije u tvari. Priroda nastoji postići ravnotežu temperature tj. izjednačenu temperaturu u materijalima, što znači da će toplinska energija prelaziti iz područja više u područje niže temperature dok se one ne izjednače (Slika 14.). Postoje tri mehanizma prijenosa topline [14]:



Slika 14. Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid [9]

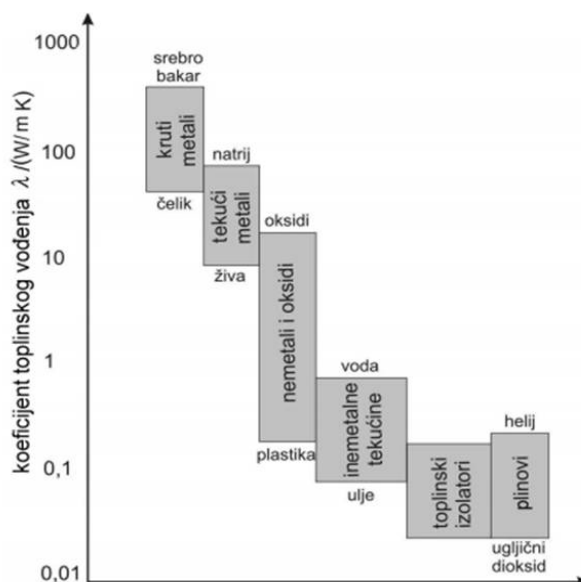
1. Kondukcija (vođenje)
2. Konvekcija (strujanje)
3. Radijacija (zračenje)

**7.1. Radijacija** ili zračenje (eng. Thermal Radiation) važna je za prijenos topline između tijela s velikom temperaturnom razlikom, a posebno je izraženo zračenje Sunca na Zemlju. Radijacija je prijenos topline emisijom elektromagnetskih valova koji odnose energiju od objekta koji ju emitiraju. Svako tijelo zrači u okoliš elektromagnetskim zračenjem male valne duljine (infracrvene zrake) čija energija i spektar ovise o temperaturi tijela. Za prijenos topline zračenjem nije potreban medij, a po trećem zakonu termodinamike na temperaturi iznad 0K sva tijela emitiraju elektromagnetsko zračenje. Osnovni mehanizmi prijenosa topline radijacijom su emisija i apsorpcija. Pri čemu atomi prelaskom u više energijsko stanje emitiraju toplinu, a prelaskom u niže energijsko stanje toplinu apsorbiraju [7,9,21].

**7.2. Kondukcija** ili vođenje (eng. Heat Conduction) prijenos je topline uzrokovan učestalim molekularnim sudaranjem. Kod materijala u krutom agregatnom stanju to je jedini način vođenja topline zbog jakih međumolekularnih sila. Kondukcija se javlja i u krutinama i u tekućinama i u plinovima, a od izuzetne je važnosti za građevinske materijale. U kondukciji prijenos toplinske energije nastaje djelovanjem temperaturnih razlika u tvari. Brzina gibanja molekula proporcionalna je temperaturi pa tako pri višoj temperaturi molekule se gibaju brže, a pri niskoj sporije. U skladu s drugim zakonom termodinamike molekule se gibaju iz područja više temperature u područje niže temperature. Fourier je na temelju tih spoznaja postavio zakon koji glasi:  $q_p = -\lambda(dT/dx)$

Pri čemu  $\lambda$  (toplinska provodljivost) ovisi o vrsti materijala kroz koji se provodi toplina, ali ovisi i o temperaturi. Izražava se u [W/mK], a predstavlja svojstvo građevinskih materijala da u manjoj ili većoj mjeri provode toplinu uslijed razlike temperature na dvije granične površine elementa. S fizikalnog aspekta predstavlja količinu toplinu u J, koja u jedinici vremena prođe kroz sloj materijala ploštine presjeka u  $m^2$  i debljine 1 m okomito na njegovu površinu pri razlici temperature od 1K. Taj se koeficijent mijenja u širokom rasponu materijala od onih koji dobro vode do onih koji slabo vode toplinu. Sama vrijednost toplinske provodljivosti ovisi o: gustoći, kemijskom sastavu materijala, vlažnosti samog materijala, temperaturi, homogenosti materijala te atmosferskom tlaku. Što je veći koeficijent toplinske provodljivosti to je materijal bolji vodič, a što je taj koeficijent manje vrijednosti materijal je bolji izolator. Na Slici 15. prikazani su koeficijenti toplinske vodljivosti za razne kategorije materijala [7,9,21].

Može se reći da je upravo toplinska provodljivost  $\lambda$  jedno od najvažnijih toplinskih karakteristika materijala koji utječu na higrotermalno ponašanje.



Slika 15. Koeficijenti toplinske vodljivosti za razne kategorije materijala[21]

**7.3. Konvekcija** ili strujanje (eng. *Convective Heat Transfer*) je prijenos topline kretanjem mase fluida kao što su npr. zrak ili voda. Za fluide je karakterističan prijenos topline istovremeno na makroskopskom (izmjenom mjesta i sudaranjem čestica fluida) i mikroskopskom nivou (sudaranjem molekula). Nastaje kada se zagrijani fluida giba od izvora topline i sa sobom nosi energiju, a primjer ovakvog gibanja je djelovanje radijatora. Fluid prima toplinu na jednom mjestu i odnosi je svojom strujom na neko drugo mjesto. Topliji zrak je lakši pa se diže u vis dok se hladniji koji je teži spušta prema tlu, na taj način dolazi do strujanja zraka prilikom čega se toplota raznosi po sobi. Postoje tri vrste konvekcije:

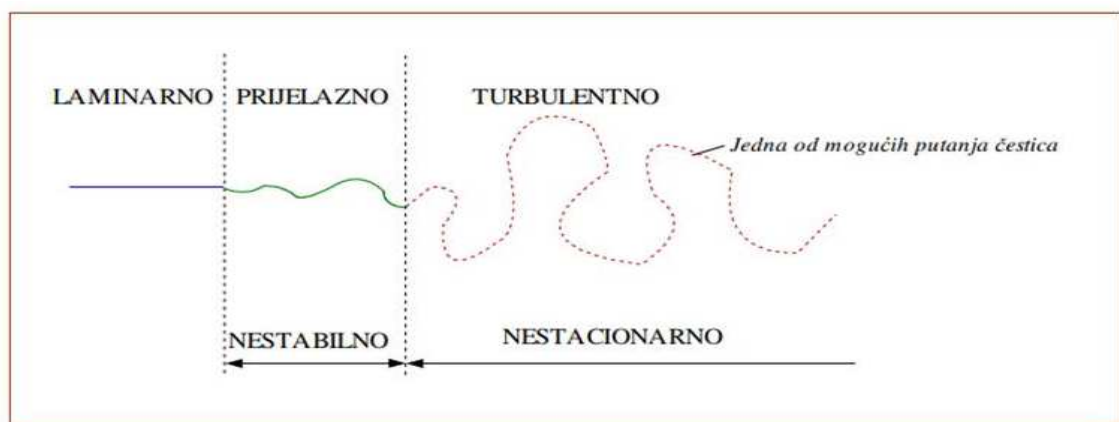
1. Prirodna (slobodna)
2. Prisilna
3. Mješovita

Prirodna ili slobodna konvekcija nastaje gibanjem fluida uzrokovane razlikom u gustoći zbog nejednolike temperature. Kako gibanje fluida nije izazvano nikakvom prisilom tj. mehaničkim utjecajem okoline takav se prijenos naziva slobodnom konvekcijom.

Prisilna konvekcija ostvaruje se djelovanjem nekog tehničkog uređaja: ventilatora, kompresora, pumpe idr. Pokretni dijelovi ovih uređaja (lopatice) potiskuju čestice fluida prema području nižeg tlaka.

Mješovita konvekcija nastaje pod približno jednakim utjecajem prisilne i prirodne konvekcije.

Za bolje razumijevanje kretanja fluida potrebno je definirati tri osnovna oblika strujanja: laminarno (nema preskakanja čestica iz jedne strujnice u drugu), prijelazno i turbulentno (gibanje čestica je nesređeno i slučajno) što je prikazano na Slici 16 [7].



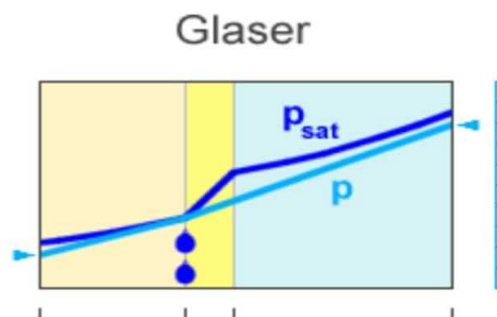
**Slika 16. Oblici strujanja fluida prema Reynoldsovom pokusu [21]**

## 8. HAM MODELI

U pogledu fizike zgrade općenito je prihvaćeno da su temperatura i vlaga te njihove varijacije u vremenu i prostoru ključni faktori u pogledu degradacije građevnih elemenata te kvalitete života u unutarnjim prostorima. Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća došlo je do razvoja proračuna i profesionalnih alata za simulaciju procesa transporta topline, vlage i zraka kroz građevinske materijale i građevne proizvode. Dva su temeljna pristupa ovom problemu.

Prvi pristup obuhvaća standardne stacionarne metode proračuna kod kojih je H. Glaser 1958. godine predložio relativno jednostavan grafičko – analitički postupak. Glaserova metoda temelji se na Fickovom zakonu i zasniva se na nizu pojednostavljenja. Još uvijek se široko primjenjuje u građevinarstvu za analizu rizika od pojave kondenzacije. U Republici Hrvatskoj važeći *“Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 1379”* [6] propisuje proračun difuzije vodene pare kroz građevne dijelove prema Glaserovoj metodi i ne uzima u obzir transport likvidne vlage i zraka. 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 veća od vrijednosti parcijalnog tlaka. Ukoliko su te dvije vrijednosti jednake (krivulje u grafičkom prikazu se sijeku), dolazi do pojave kondenzacije. Što je prikazano na Slici 17.

Uz sva ostala pojednostavljenja, potrebno je posebno naglasiti da ova metoda ne uzima u obzir poroznost građevinskih materijala, početnu ugrađenu vlagu materijala ni sposobnost apsorpcije vlage u materijalu, tj. ne koristi tzv. sorpcijske krivulje materijala [22]. Stoga treba napomenuti da Glaserova metoda nije simulacija stvarnosti, nego alat s nizom pojednostavljenja i pretpostavki za otkrivanje rizika od pojave kondenzacije te je njezina adekvatnost primjene za određene slučajeve proračuna upitna.



Slika 17. Grafički prikaz Glasserove metode [2]

Drugi je pristup zasnovan na numeričkim, dinamičkim, nestacionarnim modelima proračuna koji su uključeni u analizu topline, zraka i vlage. Takvi modeli nazivaju se HAM modeli (eng. *Heat, air and moisture transfer models*). U njima se teži ka izračunu kombiniranog utjecaja topline, zraka i vlage, a uključuju interakcije raznih građevinskih materijala, zraka u prostoriji te utjecaja korisnika i sustava grijanja, ventilacije i klimatizacije. Sustavi grijanja, ventilacije i klimatizacije nazivaju se HVAC sustavi (eng. *Heating, ventilation, and air conditioning*). Također, HAM modeli obuhvaćaju i transporte vlage koje Glaser ne uzima u obzir. HAM modeli u prvom redu ovise o rubnim uvjetima, tj. unutarnjoj i vanjskoj klimi. Za vanjske rubne uvjete bitan je odabir reprezentativnih meteoroloških podataka za određenu lokaciju zgrade, a unutarnji rubni uvjeti ovise o namjeni zgrade te navikama njenih korisnika.

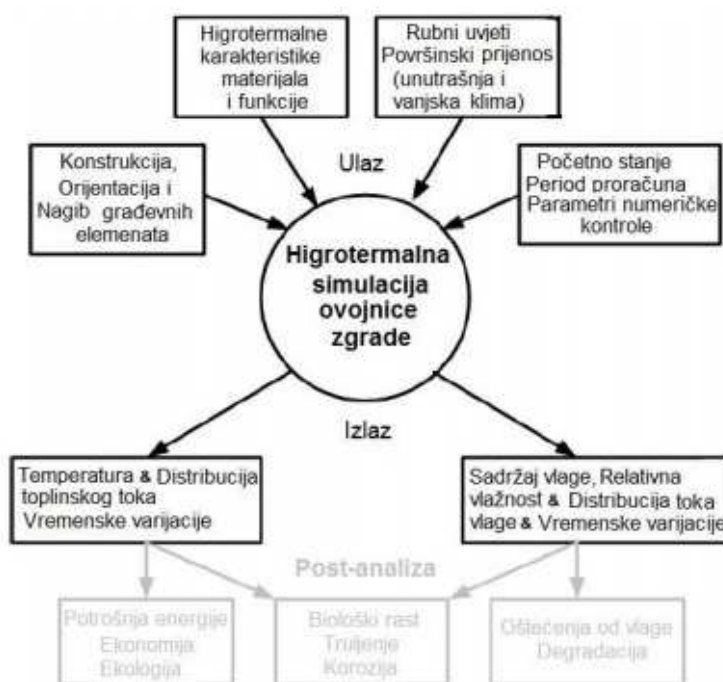
Za ulazne parametre simulacijski HAM modeli zahtijevaju (Slika 18.)[11]:

- 1) orijentaciju i nagib konstrukcijskih elemenata
- 2) **higrotermalne parametre materijala**
- 3) granične vrijednosti površinskog prijenosa topline, zraka i vlage između vanjskog i unutarnjeg prostora
- 4) rubne uvjete
- 5) vremenski period proračuna
- 6) numeričke parametre za kontrolu

Izlazni parametri modela su (Slika 18.)[11]:

- 1) temperatura i distribucija toplinskog toka te njihove varijacije u vremenu
- 2) sadržaj vlage te relativna vlažnost i distribucija toka vlage u vremenu

Osim navedenih izlaznih parametara HAM modeli omogućuju određivanje rizika formiranja algi i rasta plijesni na vanjskim i unutrašnjim površinama te utjecaj kiše na pojavu i intenzitet otjecanja vode na ciglenim fasadama te ovisno o svojstvima pojedinih softvera i druge karakteristike.



**Slika 18. Dijagram toka za provođenje dinamičkih higrotermalnih simulacija ovojnice zgrade [11]**

Numerički HAM modeli za higrotermalne simulacije građevnih elemenata temelje se na kombinaciji jednadžbi protoka energije i mase. Parcijalne diferencijalne jednadžbe prijenosa topline i mase mogu se riješiti numeričkim metodama, no za transport vlage korišteni su različiti pristupi. Neke od modela predložili su Krischer (1940), Philip (1957), Luikov (1975), Kiessel (1983), Pedersen (1990), Künzle (1994), Janssen (2002). Svaki od ovih modela ima različit pristup rješavanja problema vlage. Neki koriste sadržaj vlage, neki difuziju, gravitaciju, neki sorpciju ili kapilarnost; sve kako bi pobliže objasnili prijenos vlage kroz građevne elemente. Za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje opisuju prijenos topline i vlage primijenjene su numeričke metode kao što su metoda kontrolnih volumena i metoda konačnih elemenata. Neiss (1982) je predstavio model za izračunavanje prijenosa vlage u tlu kroz sustav jednadžbi temeljenih na metodi konačnih razlika. Program MATCH® kojeg je razvio Pedersen (1990) koristi implicitnu metodu

kontrolnog volumena za proračun kombiniranog prijenosa topline i vlage. U WUFI® modelu, kojeg je razvio Künzle (1994), te DELPHIN® kojeg je razvio Grunewald (1996) diferencijalne jednačbe diskretizirane su pomoću implicitne metode konačnog volumena[22].

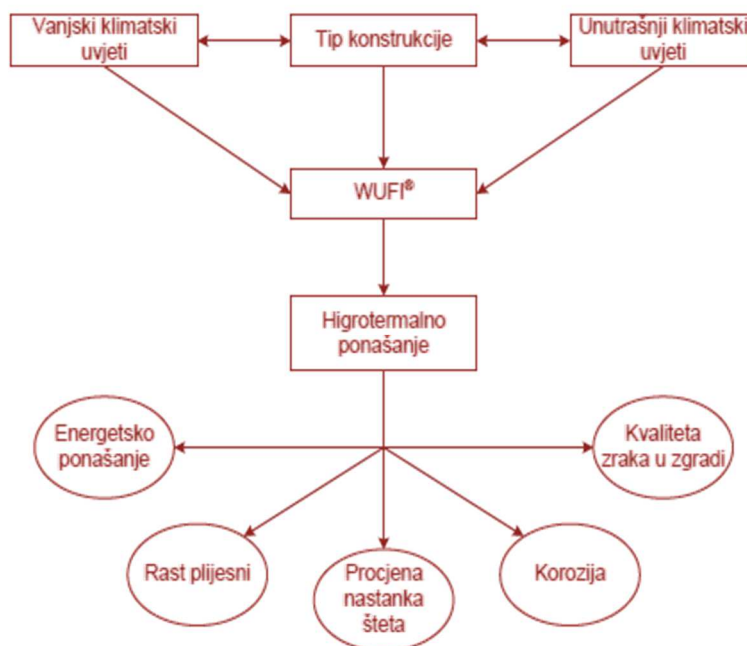
Upravo će u WUFI® programskom paketu biti napravljen numerički dio ovog diplomskog rada. WUFI® programski paket odabran je radisljedećih mogućnosti:

- simulacije, izračuna i analize toka topline i vlage kroz bilo koju vrstu konstrukcije
- određivanja sadržaja vlage u pojedinim slojevima elemenata i njihovim granicama
- procijene rizika od pojave plijesni i truleži u konstrukciji
- procjene učinka vanjskih parametara kao što su temperatura, vlažnost, kiša, sunce, orijentacija i smjer vjetrova

## 9. WUFI®

WUFI® (njem. Wärme Und Feuchte Instationär) računalni je program razvijen početkom 90-ih od strane Fraunhofer Instituta za građevinsku fiziku (IBP) u Njemačkoj. Najrašireniji je to program za analizu higrotermalnog ponašanja vanjske ovojnice koji daje rješenja u vidu istovremenog kombiniranog prijenosa topline i vlage za široki spektar građevinskih materijala i različitih klimatskih uvjeta te omogućuje procjenu šteta za različite tipove vanjskih ovojnica [23].

Pomoću WUFI® programa moguće je procijeniti vrijeme sušenja konstrukcija s određenom ugradbenom vlagom, proučavati opasnost od pojave unutarnje kondenzacije ili nepovoljnog djelovanja kiše na vanjskim dijelovima konstrukcije. Omogućena je također usporedba higrotermalnih karakteristika pojedinih krovnih ili zidnih sklopova u različitim podnebljima [2]. Programski paket je usklađen sa zahtjevima definiranim standardom "BS 15026 *Hygrothermal performance of building components and building elements – Assessment of moisture transfer by numerical simulation*" [24]. Na slici 18. prikazana je shema ulaznih i izlaznih parametara WUFI®-ja.



Slika 18. Shema ulaznih i izlaznih parametara WUFI®-ja

WUFI® se temelji na najnovijim spoznajama u pogledu difuzije vodene pare i prijenosa fluida u građevinskim materijalima. Sam programski paket zahtijeva standardna svojstva materijala i jednostavan je za određivanje mogućnosti skladištenja vlage te funkcija prijenosa fluida. Za rubne uvjete, mjere se vanjski uvjeti uključujući kišu nošenu vjetrom i sunčevo zračenje. Razne vrste modela omogućuju i analizu višeslojnih materijala, veza elemenata, pa čak i analizu višezonskih zgrada u realnim vremenskim uvjetima. Ovaj program također može pomoći razvoju i optimizaciji inovativnih građevinskih materijala [23].

WUFI® u svojoj bazi koristi građevinske materijale različitih renomiranih proizvođača, konzultanata, projektanata, stručnjaka i znanstvenika u području higrotermalnih analiza. Ovisno o potrebnoj razini primjeni moguće je koristiti jedan od sljedećih programa:

- 1) WUFI® Pro
- 2) WUFI® 2D
- 3) WUFI® Plus

WUFI® Pro [23] standardizirani je program za ocjenu stanja vlage u vanjskoj ovojnici zgrade. Od svih ponuđenih WUFI® softvera WUFI® Pro je najjednostavniji za korištenje. Provodi jednodimenzionalne higrotermalne proračune kroz presjeke elemenata zgrade. Prilikom proračuna u obzir uzima ugradbenu vlagu, kišu nošenu vjetrom, sunčevo zračenje, dugovalno zračenje, kapilarni transport i kondenzaciju.

WUFI® 2D [23] program je za dvodimenzionalnu analizu koji se najčešće koristi za geometrijski zahtjevnije slučajeve; prozori, temelji, spojevi s tlom, uglovi zgrada. Pogodan je za ocjenu rasta plijesni koja je u vezi s toplinskim mostovima. U odnosu na WUFI® Pro znatno je složeniji za uporabu.

WUFI® Plus [23] najkompletniji je od danih programskih alata za simulaciju kretanja topline i vlage u konstrukciji. Radi na principu trodimenzionalne dinamičke analize što mu omogućava uvid u higrotermalno ponašanje cijele zgrade te analizu zrakopropusnosti i analizu toplinskih mostova. Simulacija interakcije načina korištenja zgrade i tehnologije sustava omogućuje procjenu unutarnjih klimatskih uvjeta, kvalitete zraka, higijenskih uvjeta, oštećenja elemenata te proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje.

### 9.1. WUFI® Pro

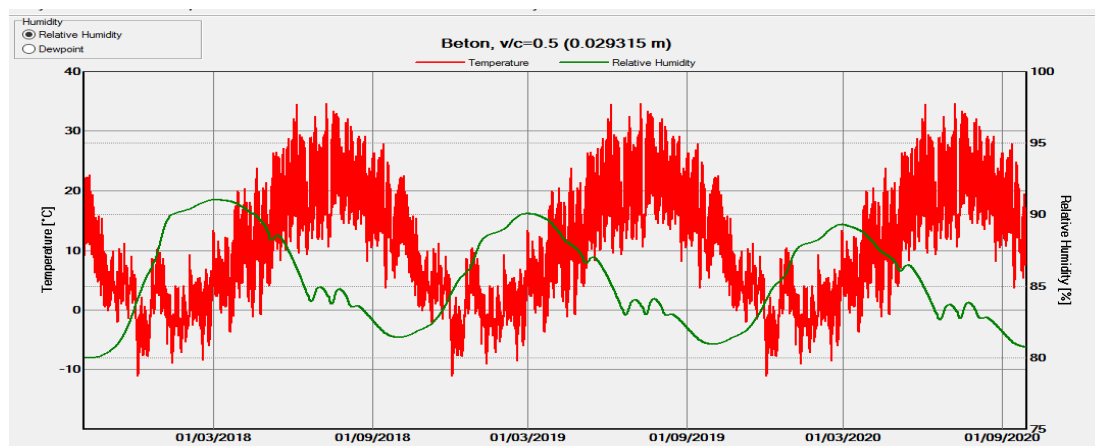
Postupak unosa ulaznih parametara i proračun u WUFI®-Pro programskom alatu:[25]

- |                                        |                               |
|----------------------------------------|-------------------------------|
| 1) Unos informacija o projektu         | 7) Početni uvjeti             |
| 2) Definiranje vrste konstrukcije,     | 8) Proračunski period         |
| 3) Definiranje slojeva i materijala    | 9) Klimatske karakteristike   |
| 4) Odabir pozicija motrišta            | 10) Provjera ulaznih podataka |
| 5) Orijentacija, nagib, visina objekta | 11) Proračun                  |
| 6) Koeficijenti zračenja na površini   | 12) Prikaz rezultata          |

Prikaz rezultata [2]:

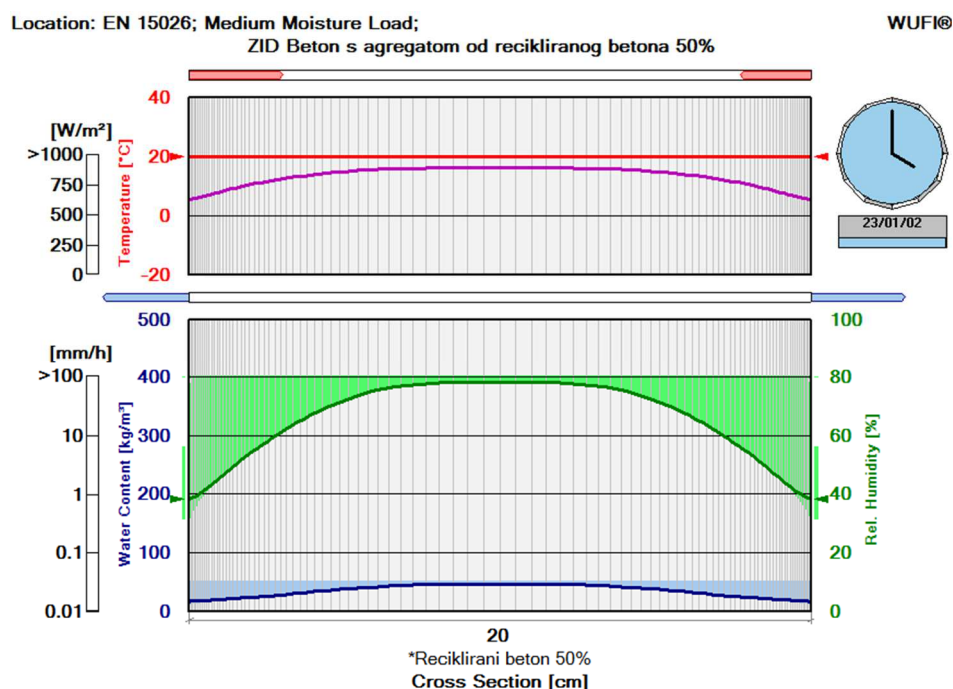
1. Vremenski i prostorni toplinski izračuni
  - Gustoća toplinskog toka kroz unutarnju i vanjsku površinu
  - Temperature i relativne vlažnosti na pozicijama motrišta (Slika 19.)

- Prosječni sadržaj vlage svakog sloja i ukupni sadržaj vlage cjelokupnog građevnog elementa



Slika 19. Prikaz temperature i relativne vlažnosti na pozicijama motrišta WUFI®

2. Profil vlage određene točke u vremenu, izračun vlažnosti u pojedinim slojevima (npr. procjenu rizika truleži), WUFI® automatski bilježi početna i završna stanja, a mogu se odrediti i dodatne točke u vremenu za željene profile.
3. Animacijak koja sadrži profile svih vremenskih koraka (Slika 20.)



Slika 20. Prikaz rezultata u obliku filma u WUFI®

## 10. EKSPERIMENTALNI DIO

### 10.1. Korisnički unos novog materijala u WUFI®

Za ispravno simuliranje i predviđanje higrotermalnog ponašanja materijala, tj. elemenata ovojnice zgrade neophodno je poznavanje osnovnih i higrotermalnih svojstava materijala. WUFI® programski paket prilikom odabira materijala nudi katalog proizvoda (baza materijala) s već definiranim parametrima potrebnim za daljnji proračun, no za proračune nekih novih, inovativnih materijala i građevnih proizvoda kao što je ECO-SANDWICH® potrebno je koristiti parameter eksperimentalno određene na baš tom materijalu, kako bi točno, precizno i realno procijenili ponašanje nekog elementa ovojnice izgrađenog od tog inovativnog materijala.

#### ❖ OSNOVNI PARAMETRI [2]:

Potrebno je unijeti sve osnovne parametre osim ugradbene vlage, koju u slučaju neimanja možemo izostaviti jer će ju softver naknadno sam izračunati. Bez ostalih osnovnih parametara nemoguće je kreirati novi materijal (Tablica 8.).

**Tablica 8. Osnovni parametri materijala**

| Osnovni parametar                           | Oznaka    | Mjerna jedinica                    |
|---------------------------------------------|-----------|------------------------------------|
| Gustoća                                     | $\rho$    | [kg/m <sup>3</sup> ]               |
| Ukupna poroznost                            | $p$       | [m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> ] |
| Specifični toplinski kapacitet              | $c$       | [J/kgK]                            |
| Toplinska provodljivost (suho stanje, 10°C) | $\lambda$ | [W/mK]                             |
| Koeficijent otpora difuziji vodene pare     | $\mu$     | [-]                                |

#### ❖ HIGROTERMALNI PARAMETRI [2]:

Higrotermalni parametri materijala potrebni za korisnički unos novog materijala su redom: funkcija skladištenja vlage, koeficijent tekućeg transporta, koeficijent otpora difuziji vodene pare, toplinska provodljivost u ovisnosti o temperaturi ili vlazi, entalpija. Svaki od navedenih higrotermalnih parametara materijala je u nastavku radom ukratko objašnjen.

Funkcija skladištenja vlage (eng. *Moisture Storage Function*)

- Relativna vlažnost  $RH[-]$
- Sadržaj vode  $[kg/m^3]$  (eng. *Water Content*)

Ovi parametri odnose se na sorpcijske krivulje, a unose se po točkama, te se za svaku pripadnu relativnu vlažnost unosi sadržaj vlage odnosno vode u materijalu. Ukoliko se nije provelo ispitivanje sorpcijski krivulja u više točaka rastućim redoslijedom relativnih vlažnosti, ova funkcija može se aproksimirati pomoću samo dvije poznate točke. Za aproksimaciju potrebno je unijeti samo praktični sadržaj vlage  $W_{80}(RH=80\%)$  određen pri relativnoj vlažnosti 80% i sadržaj vlage pri potpunom zasićenju  $W_f(RH=100\%)$ . Ove su vrijednosti poznate za mnoge materijale ili se mogu lako odrediti jednostavnim eksperimentima.

Koeficijent tekućeg transporta (eng. *Liquid Transport Coefficient Suction/Redistribution*)

- DWW  $[m^2/s]$  (eng. *Liquid Transport Coefficient for Redistribution*)
- DWS  $[m^2/s]$  (eng. *Liquid Transport Coefficient for Suction*)
- Sadržaj vode  $[kg/m^3]$  (eng. *Water Content*)

DWW – koeficijent koji se koristi za distribuciju vode kada kiše više nema, tj. opisuje širenje vode kada je vlaženje materijala završeno

DWS – koeficijent koji se koristi za distribuciju kiše na pročelju

Ovi parametri se unose po točkama, za svaki pripadni DWW ili DWS unosi se sadržaj vode u materijalu. Ukoliko ne raspolažemo ovim parametrima možemo aproksimirati ove vrijednosti s unosom vrijednosti sadržaj vode pri potpunoj zasićenosti, tj.  $RH=1$  (100%) (eng. *Reference Water Content*  $[kg/m^3]$ ) i pri vlažnosti od 80% RH. (eng. *Reference Water Content*  $[kg/m^3]$ ) i koeficijentom tekućeg transporta vode  $[kg/m^2\sqrt{s}]$  (eng. *Water Absorption Coefficient*).

Koeficijent otpora difuziji vodene pare (eng. *Water Vapour diffusion Resistance Factor, moisture*)

- RH[-]
- $\mu$ -vrijednost [-] (eng.  $\mu$ -Value)

U ovom dijelu nije potrebno unositi podatke,  $\mu$ -vrijednost (koeficijent otpora difuziji vodene pare) definiran je u osnovnim parametrima te ga programski paket automatski ubacuje za RH=0

Toplinska provodljivost(eng. *Thermal Conductivity*)

Programski paket nudi dvije mogućnosti unosa. Jedan je toplinska provodljivost u ovisnosti o temperaturi [ $^{\circ}\text{C}$ ] i drugi u ovisnosti o vlazi, no za niti jedan nije potrebno unositi nove parametre jer programski paket prepoznaje ranije unesenu toplinsku provodljivost (iz osnovnih parametara) za koju se preporučuje da bude ispitana u suhom stanju pri temperaturi od  $10^{\circ}\text{C}$  i preko nje računa. Naravno, ukoliko postoje detaljnija istraživanja u okviru toplinske provodljivosti pri određenim sadržajima vlage i temperature mogu se unijeti za još precizniji kasniji proračun.

Entalpija (eng. *Enthalpy*) – u ovisnosti o temperaturi

Za unos je potrebno za različite temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ] po točkama imati podatke za entalpiju [J/kg]. Međutim, ovaj parametar nije nužno unositi ukoliko nije poznat za dani materijal.

### 10.1.1. Osnovni parametri betona s recikliranim agregatom

U narednim tablicama prikazane su vrijednosti eksperimentalno određenih osnovnih parametara betona s recikliranim agregatom, potrebnih za unos novog materijala u bazu programskog paketa. U Tablici 9. je beton u kojemu je 50% agregata zamijenjeno recikliranom opekom, a u Tablici 10. je beton u kojemu je 50% agregata zamijenjeno recikliranim betonom. Sva su svojstva osim specifičnog toplinskog kapaciteta za te betone s recikliranim agregatom dobivena laboratorijskim ispitivanjem u laboratoriju Zavoda za materijale i u institutu IGH (toplinska provodljivost i faktor otpora difuziji vodene pare).

**Tablica 9. Osnovni parametri za beton s agregatom od reciklirane opeke**

| Beton s agregatom od reciklirane opeke                         |                                 |         |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------|
| Ispitano u laboratoriju Zavoda za materijale i u institutu IGH |                                 |         |
| Gustoća                                                        | kg/m <sup>3</sup>               | 1948.22 |
| Ukupna poroznost                                               | m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> | 0.213   |
| Toplinska provodljivost(suho stanje, 10°C)                     | W/mK                            | 0.745   |
| Koef. otpora difuziji vodene pare                              | -                               | 28      |
| Koef. tekućeg transporta                                       | kg/m <sup>2</sup> √s            | 0.018   |
| Preuzeto iz baze WUFI®                                         |                                 |         |
| Spec. toplinski kapacitet                                      | J/kgK                           | 900     |

**Tablica 10. Osnovni parametri za beton s agregatom od recikliranog betona**

| Beton s agregatom od recikliranog betona                       |                                 |         |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------|
| Ispitano u laboratoriju Zavoda za materijale i u institutu IGH |                                 |         |
| Gustoća                                                        | kg/m <sup>3</sup>               | 2204.96 |
| Ukupna poroznost                                               | m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> | 0.167   |
| Toplinska provodljivost (suho stanje, 10°C)                    | W/mK                            | 0.944   |
| Koef. otpora difuziji vodene pare                              | -                               | 41      |
| Koef. tekućeg transporta                                       | kg/m <sup>2</sup> √s            | 0.023   |
| Preuzeto iz baze WUFI®                                         |                                 |         |
| Spec. toplinski kapacitet                                      | J/kgK                           | 900     |

Također, u Tablici 11. prikazana su i svojstva odabranog betona iz WUFI® te u Tablici 12. svojstva odabrane mineralne vune iz WUFI® baze koji će se koristiti u analizama odabranih slučajeva.

**Tablica 11. Osnovni parametri za beton Beton iz baze materijala WUFI®**

| Beton iz baze materijala WUFI®    |                                 |       |
|-----------------------------------|---------------------------------|-------|
| Gustoća                           | kg/m <sup>3</sup>               | 2300  |
| Ukupna poroznost                  | m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> | 0.18  |
| Spec. toplinski kapacitet         | J/kgK                           | 850   |
| Toplinska provodljivost           | W/mK                            | 1.6   |
| Koef. otpora difuziji vodene pare | -                               | 180   |
| Koef. tekućeg transporta          | kg/m <sup>2</sup> √s            | 0.003 |

**Tablica 12. Osnovni parametri mineralnu vunu iz baze materijala WUFI®**

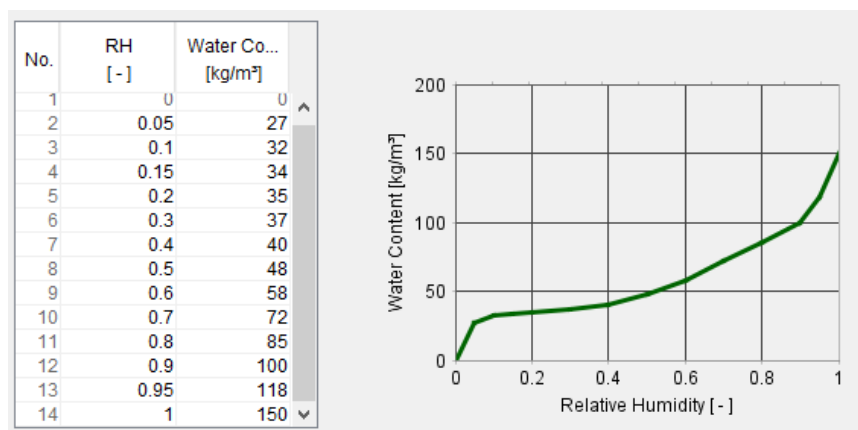
| Mineralna vuna iz baze materijala WUFI® |                                 |       |
|-----------------------------------------|---------------------------------|-------|
| Gustoća                                 | kg/m <sup>3</sup>               | 32.5  |
| Ukupna poroznost                        | m <sup>3</sup> / m <sup>3</sup> | 0.95  |
| Spec. toplinski kapacitet               | J/kgK                           | 840   |
| Toplinska provodljivost                 | W/mK                            | 0.032 |
| Koef. otpora difuziji vodene pare       | -                               | 1     |
| Koef. tekućeg transporta                | kg/m <sup>2</sup> √s            | -     |

### 10.1.2. Higrotermalni parametri betona s recikliranim agregatom

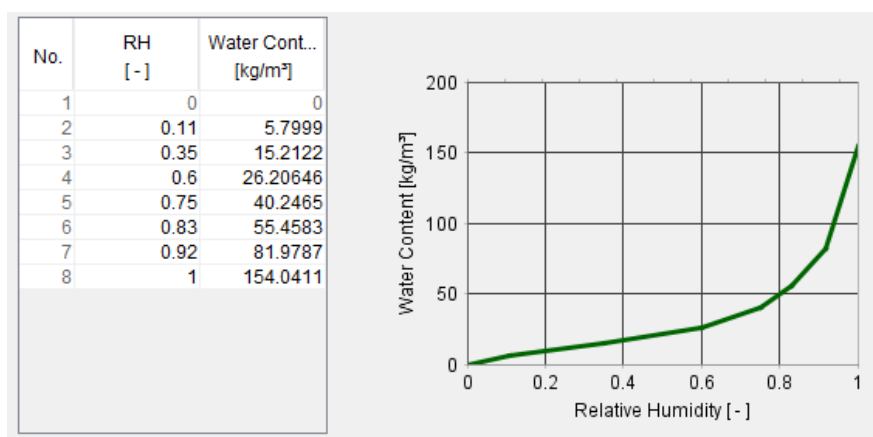
#### Funkcija skladištenja vlage (eng. *Moisture Storage Function*)

- RH[-]
- Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>] (eng. *Water Content*)

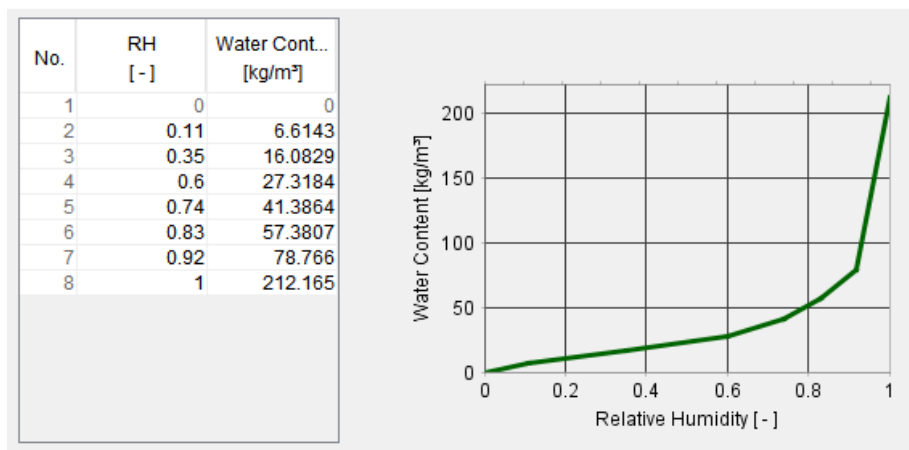
Na narednim slikama su prikazane sorpcijske krivulje za analizirane tipove betona. Za iscertavanje sorpcijske krivulje, kako je ranije u tekstu navedeno, potrebno je znati ravnotežni sadržaj vlage (vode) pri određenoj relativnoj vlazi zraka. Prva je sorpcijska krivulja uzeta iz baze WUFI<sup>®</sup> programskog paketa, dok su preostale sorpcijske krivulje dviju vrsta betona s recikliranim agregatom ispitane eksperimentalno (kako je prethodno u radu prikazano).



Slika 21. Sorpcijska krivulja za beton iz baze WUFI<sup>®</sup>

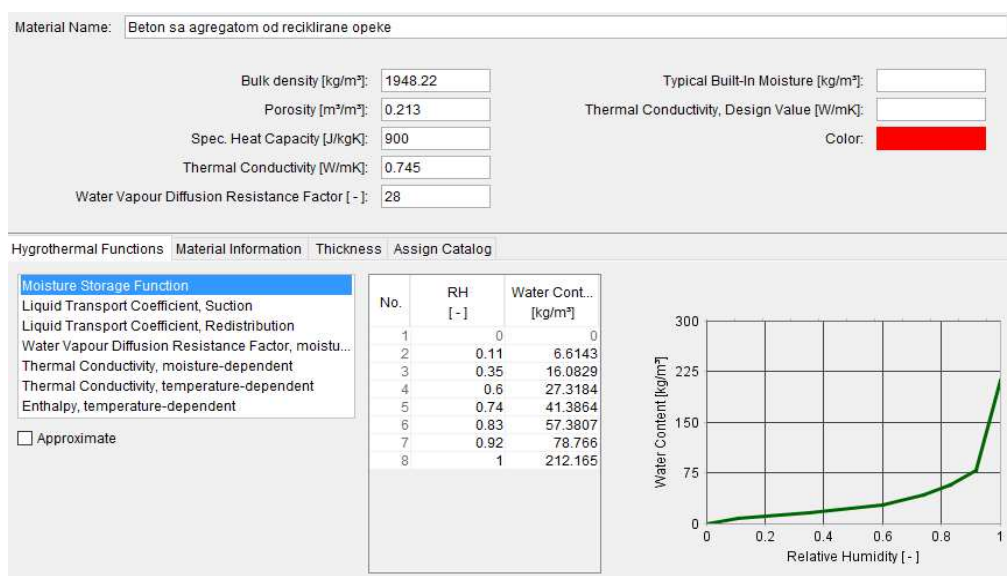


Slika 22. Sorpcijska krivulja za beton s agregatom od recikliranog betona



Slika 23. Sorpcijska krivulja za beton s agregatom od reciklirane opeke

Na Slici 24. prikazan je primjer sučelja za korisnički unos novog materijala u WUFI® programski paket. Na slici su vidljivi osnovni parametri te unos vrijednosti točaka sorpcijske krivulje, također su vidljivi i ostali parametri potrebni za potpuno definiranje novog materijala. Osim već navedenih stvari potrebno je napomenuti da programski paket prilikom kreiranja novog materijala od strane korisnika uzima iz baze iskaznicu već postojećeg materijala te se potom u toj iskaznici parametri postojećeg materijala korigiraju u novi materijal. Stoga je preporučljivo odabrati u bazi postojeći materijal što sličnijih karakteristika („najsrodniji“) kako bi ukoliko nisu ispitani i poznati svi potrebni parametri novog materijala, programski paket zadržao parametre što sličnijeg materijala te na taj način osigurao što bolju aproksimaciju i što manja odstupanja od stvarnog ponašanja materijala.



Slika 24. Sučelje za korisnički unos novog materijala u WUFI®

## 10.2. Model zida

Za ovaj dio eksperimentalnog rada provedena je detaljna parametarska analiza u kojoj su obuhvaćena tri jednostavna slučaja modela zida:

- 1.) zid od običnog betona (iz baze WUFI®),
- 2.) zid od betona gdje je dio agregata zamijenjen agregatom od recikliranog betona
- 3.) zid od betona gdje je dio agregata zamijenjen agregatom od reciklirane opeke

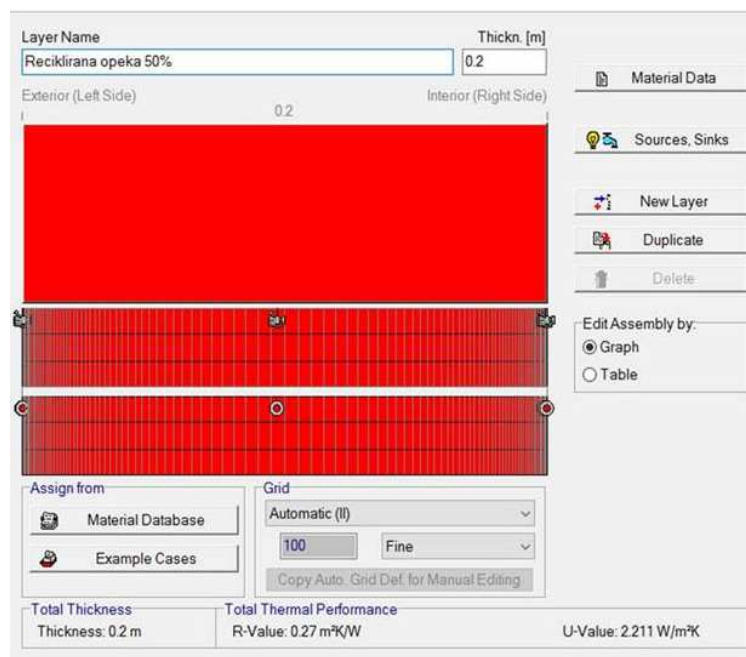
Ovi jednostavni slučajevi odabrani su kako bi se na njima uočio utjecaj razlike u samim materijalima prije nego li oni budu dio složenijeg elementa, konkretno panela. Kako bi se mogao uvidjeti utjecaj samo karakteristika materijala, svi ostali rubni i početni uvjeti (izuzev boje vanjske površine) te postavke proračuna u modelima su uzeti jednaki za sve slučajeve, a to su redom:

- Debljina zida
- Temperatura zida
- Vremenski period proračuna
- Klima
- Početni uvjeti
- Pozicije motrišta

Za daljnje razumijevanje potrebno je definirati sljedeće pojmove:

Koeficijent prolaska topline –  $U$  vrijednost (eng. *Thermal transmittance*) [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] karakterizira prenošenje topline iz jednog prostora, preko pregradnog građevnog dijela, u susjedni prostor, izražava količinu topline koju građevni element gubi u 1 sekundi po  $\text{m}^2$  površine pri razlici temperature od 1 K. Što je koeficijent prolaska topline manji to je toplinska zaštita zgrade bolja [6, 15].

Otpor prolasku topline –  $R$  vrijednost (eng. *Thermal resistance*) [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] izražava otpor materijala prolasku topline, a jednak je omjeru debljine i toplinske provodljivosti. Što je veći toplinski otpor to je materijal bolji izolator [6, 15].



**Slika 25. Podešavanje slojeva, debljina i pozicija monitoringa u WUFI®**

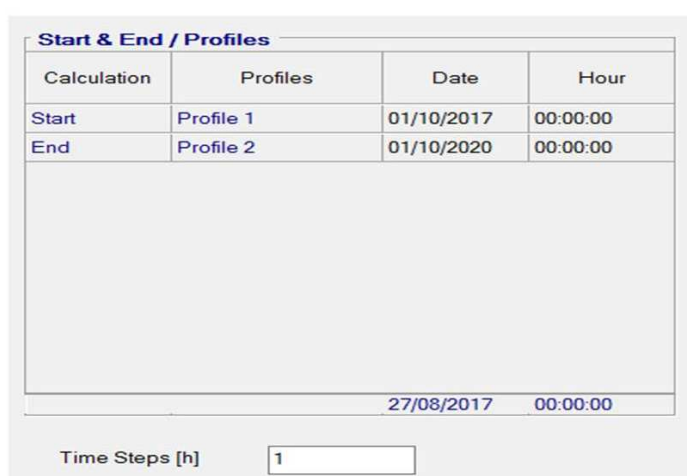
Za debljinu zida odabrana je dimenzija od 20 cm, a za pozicije motrišta odabrani su presjeci na početku, u sredini i na kraju promatranog zida za koje će se proračunom dobiti konkretne vrijednosti higrotermalnog ponašanja (Slika 25.). Prije postavljanja kamera potrebno je odrediti gustoću mreže elementa, WUFI® za većinu slučajeva preporuča srednju raspodjelu što direktno utječe na numerički proračun. Što je gušća mreža to je zahtjevniji i precizniji proračun, ali će rezultati i dalje biti prikazani samo za odabrane točke motrišta. Također je potrebno napomenuti da se kamera može postaviti samo unutar pripadnog elementa mreže, nemoguće ju je postaviti na spoju dva elementa mreže.

Prilikom unosa slojeva (sa vrijednostima osnovnih i higrotermalnih parametara koji su prethodno prikazani) program automatski računa  $U$  - vrijednost (Koeficijent prolaska topline) i  $R$  – vrijednost (Toplinski otpor), (Tablica 13.). Već na temelju ovih rezultata vidljivo je da betoni s recikliranim agregatom imaju bolju toplinsku zaštitu od običnih betona, tj.  $U$  – vrijednost im je manja.

**Tablica 13.  $U$  - vrijednost i  $R$  – vrijednost za modele zida**

| ZID                        | $U$ – vrijednost [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] | $R$ – vrijednost [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] |
|----------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Zid od običnog betona      | 3.568                                              | 0.1                                                |
| Zid od recikliranog betona | 2.527                                              | 0.21                                               |
| Zid od reciklirane opeke   | 2.211                                              | 0.27                                               |

Vremenski period za koji će se provoditi proračunje 3 godine, tj promatrat će se razdoblje od 01.10.2017. (0:00) do 01.10.2020. (0:00), te je za vremenski korak odabran period od jednog sata (Slika 26.). U pravilu kroz dvije godine postiže se stanje dinamičke ravnoteže, ali ovaj period odabran je na preporuku WUFI® programa. Prilikom zadavanja perioda jedini je kriterij da on ne bude kraći od dvije godine. Odabirom vremenskog koraka od jednog sata postiže se visoka preciznost proračuna. Ukupan broj sati u tri godine je 26.280, što znači da je numeričkom simulacijom za proizvoljnu točku panela stvoreno 26.280 zapisa higrotermalnih parametara.



| Calculation | Profiles  | Date       | Hour     |
|-------------|-----------|------------|----------|
| Start       | Profile 1 | 01/10/2017 | 00:00:00 |
| End         | Profile 2 | 01/10/2020 | 00:00:00 |

27/08/2017 00:00:00

Time Steps [h]

**Slika 26. Podešavanje vremenskog perioda i koraka WUFI®**

Za početnu temperaturu zida također je na preporuku WUFI®-ja odabrano 20°C konstantno duž presjeka, a za ugradbenu vlagu odabrana je karakteristična vrijednost ugradbene vlage za pripadni materijal (Slika27.), kako bi rezultati bili što sličniji stvarnim uvjetima tj. kako bi se dobio uvid u vrijeme koje je potrebno da se postigne dinamičko stanje ravnoteže.

Initial Moisture in Component

☐ Constant Across Component

☒ In each Layer

☐ Read from File

Assign Typical Built-In Moisture

Initial Temperature in Component

☒ Constant Across Component

☐ Read from File

Initial Temperature in Component [°C] 20

Initial Water Content in Different Layers

| No. | Material<br>Layer     | Thickn.<br>[m] | Water<br>Content<br>[kg/m³] |
|-----|-----------------------|----------------|-----------------------------|
| 1   | Reciklirana opeka 50% | 0.2            | 52.049                      |

**Slika 27. Podešavanje temperature i ugradbene vlage u WUFI®**

Početni uvjeti tj. unutarnji i vanjski plošni koeficijenti prijelaza topline postavljeni su u skladu s preporučenim vrijednostima programskog paketa (slučaj vanjskog vertikalnog zida), a koeficijenti upijanja kratkovalnog zračenja i emisije dugovalnog zračenja određeni su materijalom sloja izloženog vanjskom okolišu, tj. njegovom bojom. Odabrana je crvena boja za beton od reciklirane opeke, dok je za druga dva tipa betona odabrana površina od vapnenca jer su te boje bile najbližnije od ponuđenog za dane materijale. Za refleksiju kratkovalnog zračenja od tla uzeta je standardna vrijednost. Uz ove parametre na vanjskoj stani zida (lijeva strana) moguće je definirati plošni otpor prelaska topline, premaze, upijanje zračenja, emisiju i upijanje vode uslijed kiše nošene vjetrom dok je na unutarnjoj strani moguće definirati samoplošni otpor prelaska topline i premaze (ukoliko postoje). Na Slici 28. prikazan je način zadavanja parametara te prikaz pripadnih koeficijenata.

Exterior Surface (Left Side)

Heat Resistance [m²K/W] 0.0588 External Wall

includes long-wave radiation parts [W/m²K] 6.5

wind-dependent ☐

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 ☒ Note: This option takes radiative cooling due to long-wave emission into account. Sensitive cases may require sufficiently accurate counter-radiation data in the weather file.

Ground Short-Wave Reflectivity [-] 0.2 Standard value

Adhering Fraction of Rain [-] 0.7 Depending on inclination of component

Interior Surface (Right Side)

Heat Resistance [m²K/W] 0.125 (External Wall)

Sd-Value [m] --- No coating

Exterior Surface (Left Side)

Heat Resistance [m²K/W] 0.0588 External Wall

includes long-wave radiation parts [W/m²K] 6.5

wind-dependent ☐

Sd-Value [m] --- No coating

Note: This setting does not affect rain absorption

Short-Wave Radiation Absorptivity [-] 0.4 Limestone, bright

Long-Wave Radiation Emissivity [-] 0.9

Explicit Radiation Balance ☒ Note: This option takes radiative cooling due to long-wave emission into account. Sensitive cases may require sufficiently accurate counter-radiation data in the weather file.

Ground Short-Wave Reflectivity [-] 0.2 Standard value

Adhering Fraction of Rain [-] 0.7 Depending on inclination of component

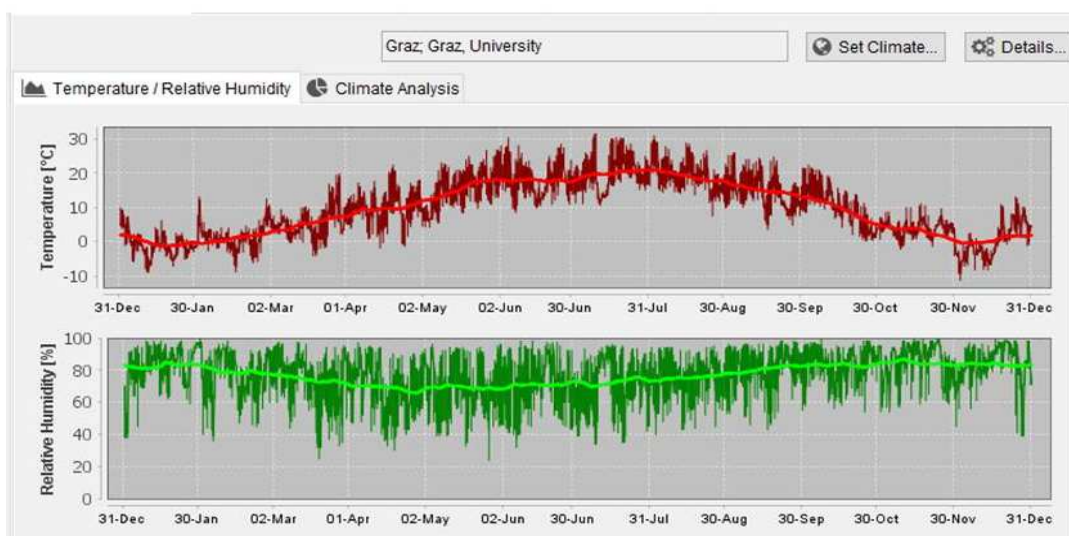
Interior Surface (Right Side)

Heat Resistance [m²K/W] 0.125 (External Wall)

Sd-Value [m] --- No coating

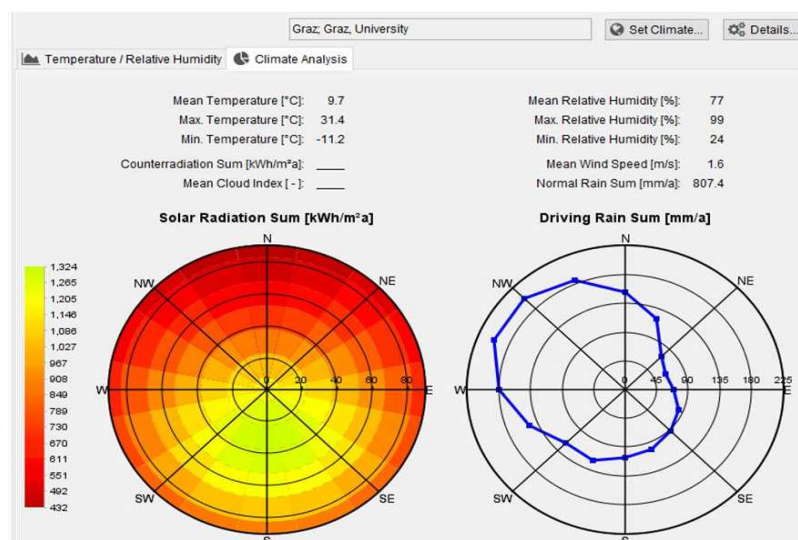
**Slika 28. Podešavanje početnih uvjeta: Lijevo - zid od reciklirane opeke; Desno – zid od recikliranog betona i zid od običnog betona (WUFI® baza)**

Prilikom odabira klimatskih karakteristika mogu se koristiti parametri dani u WUFI®-ju odabirom lokacije na pripadnoj mapi ili vlastite karakteristike u AGD formatu sa specificiranim geološkim koordinatama, nadmorskom visinom i vremenskom zonom. U ovom radu za klimatske podatke odabrana je lokacija Graz u Austriji jer je od ponuđenih lokacija iz WUFI® baze najbližnja i geografski najbliža Zagrebu. Odabirom lokacije prikazuju se dijagrami raspodjele temperature i relativne vlažnosti (Slika 29.) Tanke linije prikazuju satnu raspodjelu, a deblje linije prikazuju mjesečnu raspodjelu.



**Slika 29. Prikaz raspodjele temperature i relativne vlažnosti za odabranu lokaciju**

Na Slici 30. prikazano je ukupno godišnje sunčevo zračenje za različite orijentacije i nagibe elemenata. Tamno crvenom bojom prikazane su niske vrijednosti, žutom srednje, a svijetlo zelenom visoke vrijednosti zračenja. Prikazana je i ukupna godišnja kiša nošena vjetrom u ovisnosti o strani svijeta koja je omočila površinu.



**Slika 30. Prikaz ukupnog godišnjeg sunčevog zračenja i ukupne količine kiše u WUFI®**

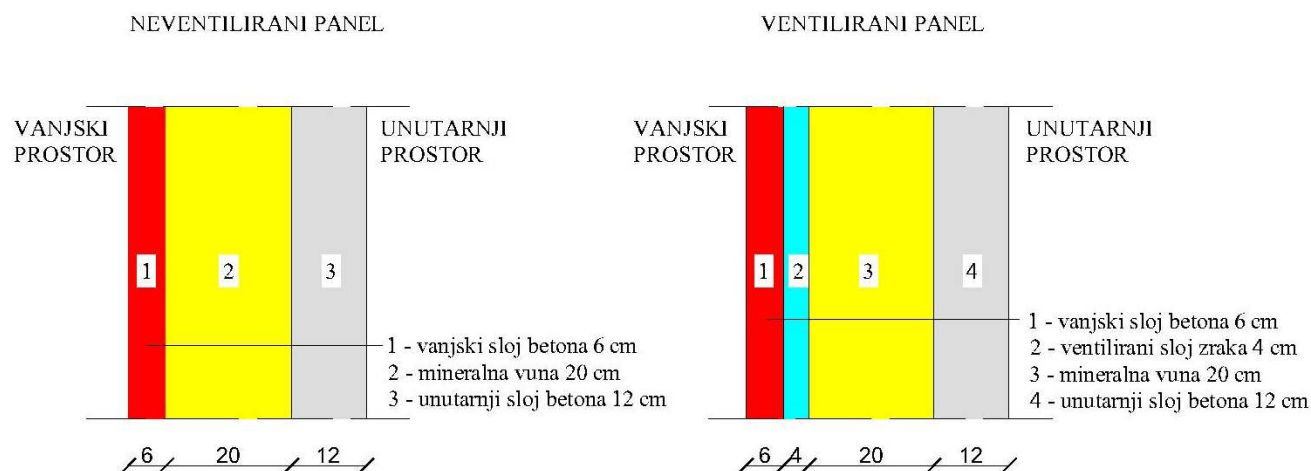
Za proračun klimatskih karakteristika dane su norme EN 15026:2007, ISO 13788 i ASHRAE 160, u ovom radu odabrana je norma EN 15026:2007. Dana norma pruža različite algoritme za izvođenje unutarnje klime iz vanjskih uvjeta, a u njoj unutarnja temperatura i vlažnost ovise o vanjskoj temperature, a ne vanjskoj vlažnosti. Poblježe, za vanjsku temperature ispod 10°C unutarnja se drži konstantnom na 20°C; za vanjsku temperature između 10°C i 20°C unutarnja temperatura mijenja se linearno u ovisnosti o vanjskoj, a za vanjsku temperature iznad 20°C unutarnja se temperature drži konstantnom na 25°C. Što se tiče unutarnje vlažnosti ona je izračunata pomoću sličnih funkcija. Postoje dva tipa izračuna, jedan za normalnu, a drugi za visoku vanjsku vlažnost. Pri normalnoj vanjskoj vlažnosti, unutarnja je 30% ako je vanjska temperature ispod 10°C, 60% ako je vanjska temperature iznad 20°C te naravno mijenja se linearno između vrijednosti ovih temperatura. Za visoku vanjsku vlažnost, sve unutarnje su za 10% više nego pri normalnoj vlažnosti te variraju od 40% u zimi do 70% ljeti [26]. Ove vrijednosti radi lakšeg razumijevanja prikazane su u Tablici 14.

**Tablica 14. Vrijednosti temperature i vlažnosti prema normi EN 15026:2007 [27]**

| Vanjska temperatura | Unutarnja temperatura | Unutarnja vlažnost pri normalnoj vanjskoj vlažnosti | Unutarnja vlažnost pri visokoj vanjskoj vlažnosti |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <10°C               | Konstantno 20°C       | 30%                                                 | 40%                                               |
| 10°C - 20°C         | Linearno 20°C-25°C    | Linearno 30%-60%                                    | Linearno 40%-70%                                  |
| >20°C               | Konstantno 25°C       | 60%                                                 | 70%                                               |

### 10.3. Model panela

U ovom dijelu eksperimentalnog rada provedena je detaljna parametarska analiza u kojoj su obuhvaćena dva tipa panela (neventilirani i ventilirani) te po dva podtipaza svaki od njih (s recikliranim betonima i s betonima iz baze WUFI®). Sheme promatranih panela prikazane su na Slici 31.



**Slika 31. Shema neventiliranog i ventiliranog panela**

Slučajevi koji su obrađeni su sljedeći:

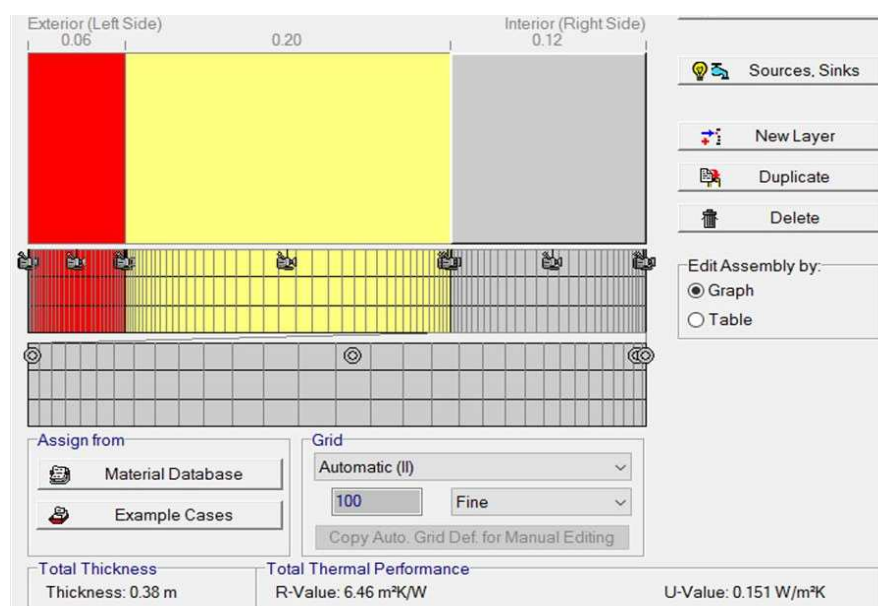
#### **Neventilirani sendvič panel:**

- 1) Betonski dijelovi od običnog betona (iz baze WUFI®),
- 2) Betonski dijelovi od recikliranog agregata (vanjski sloj od betona s recikliranom opekrom; unutarnji sloj od betona s recikliranim betonom)

#### **Ventilirani sendvič panel:**

- 3) Betonski dijelovi od običnog betona (iz baze WUFI®),
- 4) Betonski dijelovi od recikliranog agregata (vanjski sloj od betona s recikliranom opekrom; unutarnji sloj od betona s recikliranim betonom)

**10.3.1. Neventilirani sendvič paneli** sastavljeni su od vanjskog sloja betona debljine 6 cm, mineralne vune debljine 20 cm i unutarnjeg (samonosivog) betona debljine 12 cm. Ukupna debljina panela je 38 cm. Dva slučaja ovog tipa panela koja su se promatrala razlikuju se samo u vrsti betona koji je korišten. U prvom tipu korišten je obični beton iz WUFI® baze, a u drugom su korišteni betoni iz korisničkog unosa koji su ispitani u laboratoriju, tj. stvarno korišteni betoni za proizvodnju ECO-SANDWICH® panela. Drugi tip (s vlastitim unosom materijala) prikazan je na Slici 32.



**Slika 32. Podešavanje slojeva, debljina i pozicija motrišta u WUFI® za neventilirani sendvič panel sastavljen od betona s recikliranim agregatom**

Slojevi se unose s vanjske (lijeve) prema unutarnjoj (desnoj) strani. U ovom slučaju prvi vanjski sloj izrađen je od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranom opekrom, drugi je sloj od mineralne vune, a treći unutarnji sloj izrađen je od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom.

Nakon unosa slojeva programski paket automatski računa  $U$  - vrijednost (Koeficijent prolaska topline) i  $R$  - vrijednost (Toplinski otpor) za dani element (Tablica 15.).

**Tablica 15.  $U$  - vrijednost i  $R$  – vrijednost za model neventiliranog panela**

| NEVENTILIRANI PANEL             | $U$ – vrijednost [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] | $R$ – vrijednost [ $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ ] |
|---------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Dijelovi od običnog betona      | 0.153                                              | 6.34                                               |
| Dijelovi od recikliranog betona | 0.151                                              | 6.46                                               |

Ostale postavke podešene su isto kao i kod Modela zida ranije objašnjenog u poglavlju 10.2.

- Temperatura pojedinih slojeva panela
- Vremenski period proračuna
- Klima
- Početni uvjeti
- Numerička mreža elemenata

**Tablica 16. Postavke korištene prilikom unosa za sve modele panela u WUFI®-ju**

|                                           |                                                   |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Debljina panela                           | 38 cm                                             |
| Temperatura pojedinih slojeva panela      | 20°C                                              |
| Klima                                     | Graz (iz baze WUFI®)                              |
| Vremenski period                          | 3 godine od 01.10.2017. (0:00)-01.10.2020. (0:00) |
| Vremenski korak                           | 1 sat                                             |
| Vanjski plošni otpor prelaska topline     | 0.0588 m <sup>2</sup> K/W                         |
| Dugovalno zračenje vanjske strane         | 6.5 W/m <sup>2</sup> K                            |
| Upijanje kratkovalnog zračenja vanj. str. | 0.68 (crvena boja/boja cigle)                     |
| Emisija dugovalnog zračenja vanj. str.    | 0.9                                               |
| Refleksija kratkovalnog zračenja od tla   | 0.2 (standardna vrijednost)                       |
| Prianjajući dio kiše                      | 0.7                                               |
| Unutarnji plošni otpor prelaska topline   | 0.125 m <sup>2</sup> K/W                          |

Valja naglasiti da je za oba modela neventiliranih panela odabrana ista boja vanjske površine (crvena boja/boja opeke vidljivo iz Tablice 16.) kako bi modeli bili u potpunosti usporedivi, odnosno kako bi zaista svi početni i rubni uvjeti te postavke proračuna bili jednaki.

Zbog načina proizvodnje, skladištenja i procesa same gradnje, ugradbena vlaga u materijalu neizbježna je pojava. Stoga se u sklopu proračuna iskoristila mogućnost WUFI®-ja da se definira ugradbena vlaga u panelu. Odabrana je opcija da se svakom sloju pridruži karakteristična vrijednost ugradbene vlage kako bi se što bolje prikazali stvarni uvjeti. Udio ugradbene vlage na materijalima korištenim u ovom radu prikazani su u narednim slikama.

Na Slici 33. prikazane su ugradbene vlage za prvi tip neventiliranog sendvič panela s materijalima iz WUFI®, a na Slici 34. prikazane su ugradbene vlage za drugi tip neventiliranog sendvič panela s materijalima iz ECO-SANDWICH®-a. Na temelju dobivenih udjela vidljiv je veći udio ugradbene vlage u betonima iz baze materijala od onih ispitanih u laboratoriju na uzorcima ECO-SANDWICH®-a.

Assign Typical Built-In Moisture

Initial Temperature in Component [°C] 20

Initial Water Content in Different Layers

| No. | Material<br>Layer | Thickn.<br>[m] | Water<br>Content<br>[kg/m³] |
|-----|-------------------|----------------|-----------------------------|
| 1   | Beton v/c=0.5     | 0.06           | 85.000                      |
| 2   | Mineralna vuna    | 0.20           | 0.82                        |
| 3   | Beton v/c=0.5     | 0.12           | 85.000                      |

**Slika 33. Udio ugradbene vlage u pojedinim slojevima neventiliranog sendvič panela iz WUFI® baze**

Assign Typical Built-In Moisture

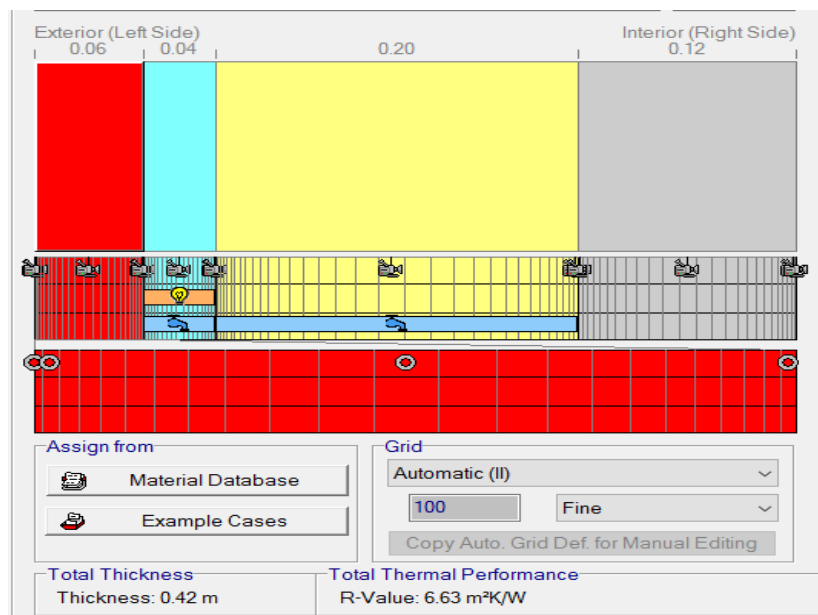
Initial Temperature in Component [°C] 20

Initial Water Content in Different Layers

| No. | Material<br>Layer                | Thickn.<br>[m] | Water<br>Content<br>[kg/m³] |
|-----|----------------------------------|----------------|-----------------------------|
| 1   | Beton od reciklirane opeke 50%   | 0.06           | 52.049                      |
| 2   | Mineralna vuna                   | 0.20           | 0.82                        |
| 3   | Beton od recikliranog betona 50% | 0.12           | 49.754                      |

**Slika 34. Udio ugradbene vlage u pojedinim slojevima neventiliranog sendvič panela iz ECO-SANDWICH®-a**

**10.3.2. Ventilirani sendvič paneli** sastavljeni su od vanjskog sloja betona debljine 6 cm, sloja zraka debljine 4 cm, mineralne vune debljine 20 cm i unutarnjeg (samonosivog) betona debljine 12 cm. Ukupna debljina panela je 42 cm. Dva slučaja ovog tipa panela koja su se promatrala razlikuju se samo u vrsti betona koji je korišten. U prvom tipu korišten je obični beton iz WUFI® baze, a u drugom su korišteni betoni iz korisničkog unosa koji su laboratorijski ispitani, tj. stvarno korišteni betoni za proizvodnju ECO-SANDWICH® panela. Drugi tip (s korisničkim unosom materijala) prikazan je na Slici 35. i u ovom slučaju (jednako kao i kod neventiliranog sendvič panela) prvi vanjski sloj izrađen je od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom, drugi je sloj zraka, treći je sloj mineralne vune, a četvrti unutarnji sloj izrađen je od betona u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom. U oba analizirana slučaja ventiliranog sendvič panela korištena je toplinska izolacija karakteristika istovjetnih onoj u prethodno analiziranim slučajevima neventiliranog sendvič panela. Svi ostali početni i rubni uvjeti te postavke proračuna, istovjetni su onima za neventilirane panele. Valja naglasiti da je za oba slučaja ventiliranih sendvič panela odabrana crvena boja/boja cigle za vanjsku površinu (jednako kao i kod neventiliranih panela) kako bi se osigurala usporedivost rezultata.



**Slika 35. Podešavanje slojeva, debljina i pozicija motrišta u WUFI® za ventilirani sendvič panel sastavljen od betona s recikliranim agregatom**

Za svaki pripadni sloj postoji mogućnost pridruživanja izvora ili ponora topline, vlage i izmjene zraka. Na preporuku Fraunhofer Instituta za građevinsku fiziku uzeta je minimalna vrijednost izmjena zraka  $n = 5$  [1/h] u zračnom sloju. Stvarnu vrijednost izmjene zraka teško je predvidjeti jer ona ovisi o meteorološkim uvjetima same lokacije, konkretnije mikrolokacije te o karakteristikama samog sendvič panela. Osim ventilacije, tj. izmjene zraka, pridodan je još i utjecaj kiše nošene vjetrom. Za svaki slučaj modeliranih ventiliranih panela uzeto je da 1 % kiše nošene vjetrom prodire u sloj toplinske izolacije i to kroz cijelu njegovu debljinu, Slika 35. 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“. Način zadavanja ovih parametara prikazana je na Slici 36.

The image shows two side-by-side screenshots of the WUFI software interface. The left screenshot is for a layer named 'Kiša nošena vjetrom'. It has 'Spread Area' set to 'Whole Layer' and 'Source Type' set to 'Fraction of Driving Rain'. The 'Fraction [%]' is set to 1. The right screenshot is for a layer named 'Ventilacija'. It has 'Spread Area' set to 'Whole Layer' and 'Source Type' set to 'Constant'. The 'Air Changes [1/h]' is set to 5. Both screenshots show various other options like 'Source Term Cut-Off' and 'mix with air from'.

**Slika 36. Podešavanje unosa ventilacije i kiše nošene vjetrom u WUFI®**

Nakon odabira slojeva program automatski računa  $U$  - vrijednost (Koeficijent prolaska topline) i  $R$  – vrijednost (Toplinski otpor), (Tablica 17.).

**Tablica 17.  $U$  - vrijednost i  $R$  – vrijednost za model ventiliranog panela**

| VENTILIRANI PANEL               | $U$ – vrijednost [W/m <sup>2</sup> K] | $R$ – vrijednost [m <sup>2</sup> K/W] |
|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Dijelovi od običnog betona      | 0.149                                 | 6.51                                  |
| Dijelovi od recikliranog betona | 0,147                                 | 6.63                                  |

Prilikom unosa ostalih karakteristika za ventilirani sendvič panel sve karakteristike; osim navedenih: sloja zraka, ventilacije, kiše nošene vjetrom; su jednake ranijim modelima neventiliranih panela.

#### 10.4. Stabilnost numeričkih simulacija

WUFI® koristi iterativnu metodu za rješavanje niza parcijalnih diferencijalnih jednačbi pomoću početnih i rubnih uvjeta. Ponekad je konvergencija vrlo spora i doseže maksimalni dopušteni broj iteracija bez rješenja koja ispunjavaju kriterij za prestanak. U tom slučaju iteracija je zaustavljena, WUFI® prihvaća rješenje bez obzira na ispunjenje kriterija, ali broj grešaka konvergencije povećava se za jedan. Pri završetku numeričkih simulacija u WUFI®-ju pojavljuje se ispis podataka o kvaliteti, tj. stabilnosti provedenog proračuna, (Slika 37.) 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 [2].

| Check for numerical quality            |         |              |
|----------------------------------------|---------|--------------|
| Integral of fluxes, left side (kl,dl)  | [kg/m²] | 49.41 -45.27 |
| Integral of fluxes, right side (kr,dr) | [kg/m²] | 0.0 1.16     |
| Balance 1                              | [kg/m²] | -2.5         |
| Balance 2                              | [kg/m²] | -2.52        |

**Slika 37. Prikaz provjere stabilnosti provedenog proračuna**

## 11. REZULTATI NUMERIČKIH SIMULACIJA

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

Z – zid

NV – neventilirani panel

V – ventilirani panel

W – beton iz WUFI® baze

O – betonu kojem je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom

B – betonu kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom

R – panel izgrađen od betona s recikliranim agregatom

Prije prikaza samih rezultata higrotermalnog ponašanja panela, još jednom će se sumarno prikazati slučajevi proračuna s pripadnim variranim parametrima modela u Tablici 18.

**Tablica 18. Prikaz slučajeva proračuna s pripadnim kraticama**

| Kratika    | Model | Opis                                                                    |
|------------|-------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>ZW</b>  | 1     | zid od običnog betona iz baze WUFI®                                     |
| <b>ZB</b>  | 2     | zid od betona u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom   |
| <b>ZO</b>  | 3     | zid od betona u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom    |
| <b>NVW</b> | 4     | neventilirani sendvič panel iz baze materijala WUFI®                    |
| <b>NVR</b> | 5     | neventilirani sendvič panel izgrađen od betona s recikliranim agregatom |
| <b>VW</b>  | 6     | ventilirani sendvič panel iz baze materijala WUFI®                      |
| <b>VR</b>  | 7     | ventilirani sendvič panel izgrađen od betona s recikliranim agregatom   |

Nakon pokretanja proračunate završetka analize program daje početno izvješće koji osim podataka o stabilnosti proračuna uključuje i sljedeće rezultate:

SADRŽAJ VODE [kg/m<sup>2</sup>] kojim se prikazuje početni, konačni te minimalni i maksimalni sadržaji vode u komponenti koji su se dogodili tijekom izračuna. To omogućuje brzu prvu procjenu ponašanja elementa tijekom proračunskog razdoblja (npr. Je li se voda osušila ili akumulirala) (Tablica 19.).

**Tablica 19. Prikaz rezultata sadržaja vode za sve slučajeve proračuna**

| SADRŽAJ VODE [kg/m <sup>2</sup> ] |       |         |       |       |       |
|-----------------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| Kratica                           | Model | Početak | Kraj  | Min.  | Max.  |
| <b>ZW</b>                         | 1     | 17.0    | 16.25 | 16.02 | 17.07 |
| <b>ZB</b>                         | 2     | 9.95    | 10.20 | 8.79  | 12.7  |
| <b>ZO</b>                         | 3     | 10.41   | 8.64  | 7.50  | 11.84 |
| <b>NVW</b>                        | 4     | 15.46   | 12.67 | 12.48 | 15.58 |
| <b>NVR</b>                        | 5     | 9.26    | 7.54  | 5.88  | 10.67 |
| <b>VW</b>                         | 6     | 15.54   | 11.8  | 11.43 | 15.54 |
| <b>VR</b>                         | 7     | 9.33    | 7.01  | 5.33  | 10.20 |

UKUPNI SADRŽAJ VODE [kg/m<sup>3</sup>] dobiva se množenjem odgovarajućih debljina slojeva sa sadržajem vode. U Tablici 20. Prikazani su rezultati za modele zida, a u Tablici 21. Prikazani su rezultati za modele panela. Pripadni dijagrami za sve modele prikazani su na slikama 49. - 50.

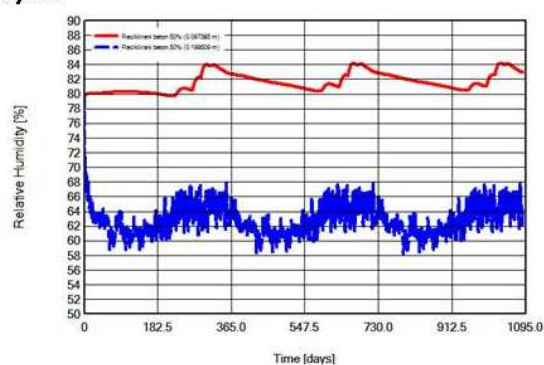
**Tablica 20.. Prikaz rezultata ukupnog sadržaja vode za model zida**

| UKUPNI SADRŽAJ VODE [kg/m <sup>3</sup> ] Modeli zida |       |         |       |       |       |
|------------------------------------------------------|-------|---------|-------|-------|-------|
| Kratica                                              | Model | Početak | Kraj  | Min.  | Max.  |
| <b>ZW</b>                                            | 1     | 85.00   | 81.24 | 80.08 | 85.33 |
| <b>ZB</b>                                            | 2     | 49.75   | 51.01 | 43.95 | 63.48 |
| <b>ZO</b>                                            | 3     | 52.05   | 43.20 | 37.48 | 59.22 |

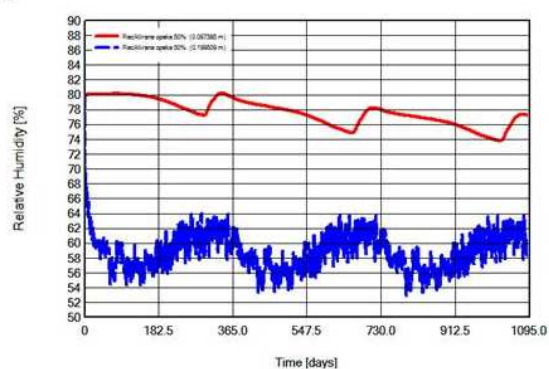
Prema podacima iz Tablice 20. zid ZW (zid iz baze WUFI®) ima veći ukupni sadržaj vode u odnosu na betone s recikliranim agregatom što je i očekivano jer ima i veću ugradbenu vlagu, no vidljivo je da tokom proračunskog period od 3 godine dolazi do isušivanja vlage. Jedino se u zidu s recikliranim betonom akumulira voda, ostali pokazuju tendenciju isušivanja za vrijeme proračunskog razdoblja. Vidljivo je da zid od

recikliranog betona ima veću količinu vode od betona s recikliranom opekom. Radi boljeg razumijevanja ovakvog ponašanja dviju vrsta betona s različitim recikliranim agregatom, na Slici 38. prikazani su dijagrami odnosa RH [%] u vremenu [dan] za modele zida ZB (zid od rec. betona) i ZO (zid od rec. opeke). Crvena linija prikazuje vrijednosti RH u vremenu za lijevu stranu zida orijentiranu prema van, a plava linija prikazuje vrijednosti RH u vremenu za desnu stranu zida orijentiranu prema unutra. Na dijagramima je vidljivo da se ZO isušuje tijekom proračunskog vremena ali u tri godine nije još uspostavljena dinamička ravnoteža jer se najveća vrijednost RH (vršna vrijednost) smanjuje iz godine u godinu, ali nije još postigao neku konstantnu vrijednost. Jasno se vidi obrazac ponašanja na godišnjoj razini, vršna vrijednost predstavlja najveće vlaženje, tj. akumulaciju vlage (jesen/zima) dok u proljeće/ljeto nastupa isušivanje (vidljivo iz nagiba krivulje). Dakle, za ZO vanjski sloj s početnih RH=80% pada na nešto manje od RH=78% (vršna vrijednost vlaženja na kraju proračunskog razdoblja), a najniža zabilježena vrijednost bila je RH=74% (zadnji period sušenja u proračunskom razdoblju). Vanjski sloj ZB kroz tri godine akumulirao je vodu te se s početnih RH=80% povisio na RH=84% (kada se promatra vršna vrijednost vlaženja), a najniža vrijednost u periodu sušenja iznosi između RH=80 – 81%. Za razliku od ZO, ZB je uspostavio dinamičku ravnotežu s vanjske strane jer je sa Slike 38. a) vidljivo kako vršne vrijednosti vlaženja i sušenja imaju iste vrijednosti kroz proračunski period. Također je jasno uočljiv obrazac ponašanja vlaženje/sušenje na razini jedne godine koji se ponavlja kroz cijelo proračunsko razdoblje. Na unutarnjim stranama oba zida pad s početnih RH=80% očekivano je bio izraženiji u odnosu na vanjske stranete je tako kod ZB zabilježena najniža vrijednost RH=58%, a kod ZO najniža vrijednost RH=53% (periodi sušenja) a najviše vrijednosti RH=68% kod ZB i RH=64% kod ZO (periodi vlaženja). Na unutarnjim stranama je postignuta dinamička ravnoteža u oba slučaja zida, što je i očekivano jer je unutarnja strana toplija te je manje izložena dodatnim izvorima likvidne vlage kao što su to vanjske strane (utjecaj kiše nošene vjetrom, itd.). Uvidom u ponašanje ovih modela vidljivo je da se model ZB ne stigne dovoljno isušiti prije ponovnog skoka vlažnosti, što kod slučaja modela ZO nije slučaj te se kod njega tokom godina zid sve više isušuje.

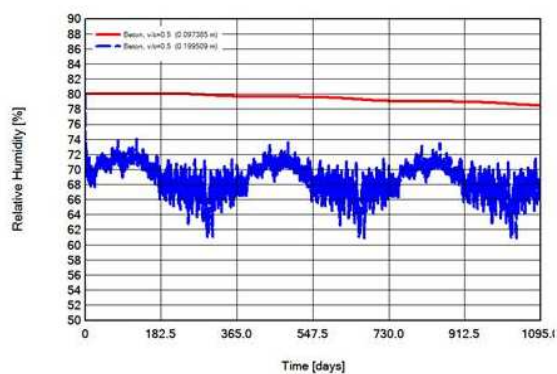
a) ZB



b) ZO



c) ZW



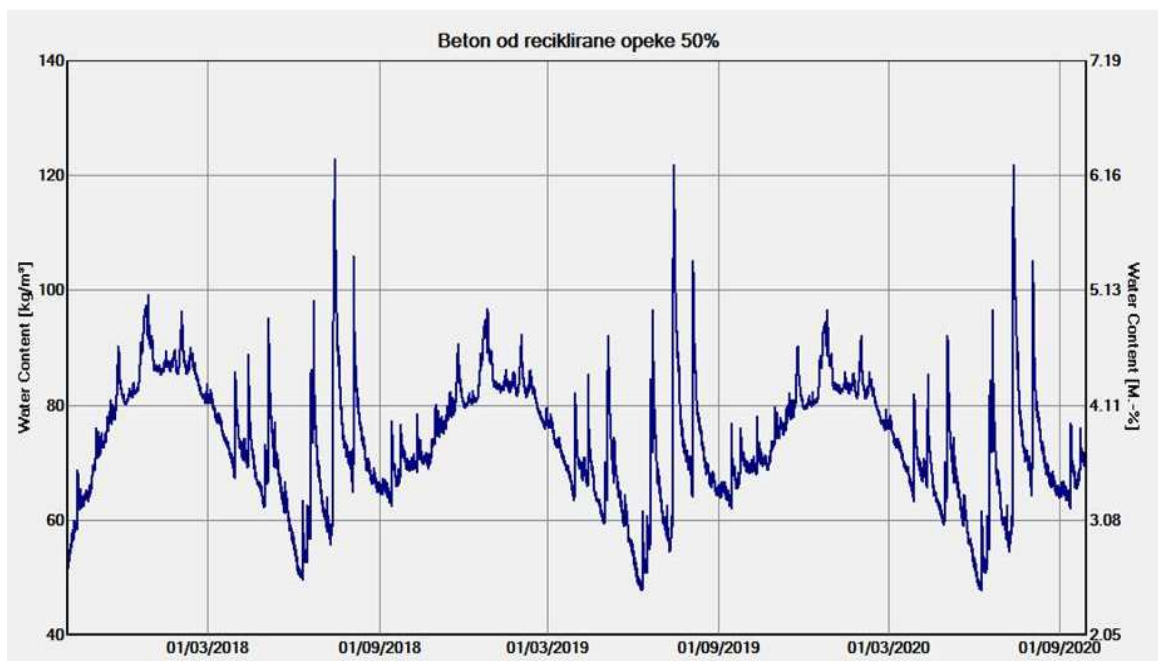
Slika 38. Prikaz odnosa RH[%] u vremenu[dan] za a) zid od recikliranog betona  
b) zid od reciklirane opeke c) zid iz WUFI® baze materijala

**Tablica 21. Prikaz rezultata ukupnog sadržaja vode za model panela**

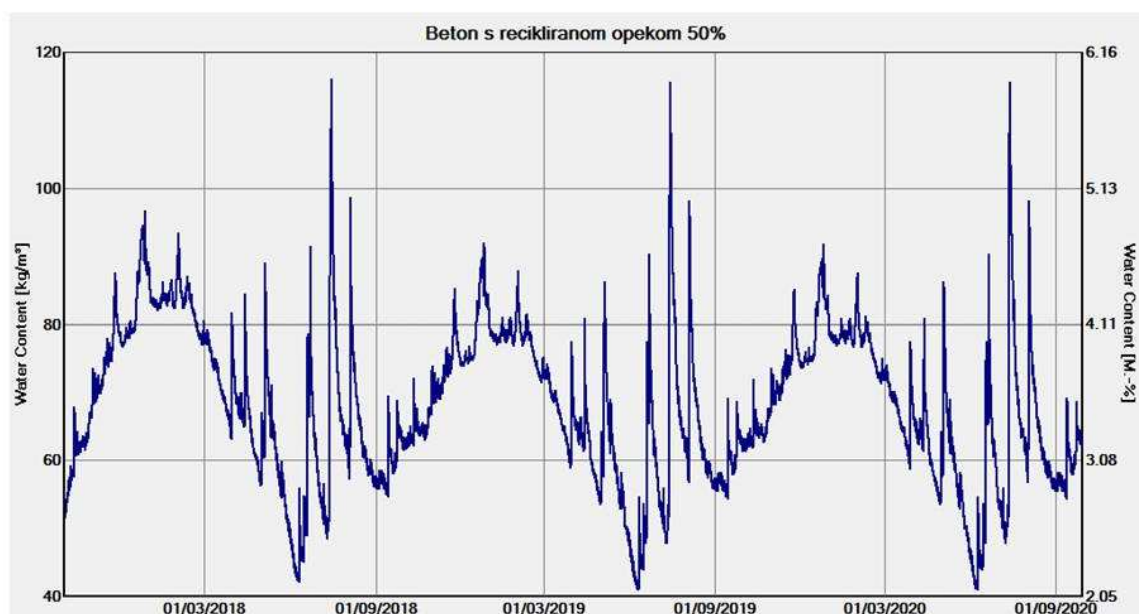
| UKUPNI SADRŽAJ VODE [kg/m <sup>3</sup> ] Modeli panela |          |         |       |       |        |
|--------------------------------------------------------|----------|---------|-------|-------|--------|
| Kratica                                                | Model    | Početak | Kraj  | Min.  | Max.   |
| <b>NVW</b>                                             | <b>4</b> |         |       |       |        |
| Beton iz WUFI®                                         |          | 85.00   | 94.28 | 84.82 | 111.58 |
| Mineralna vuna iz WUFI®                                |          | 0.82    | 0.76  | 0.52  | 0.89   |
| Beton iz WUFI®                                         |          | 85.00   | 57.16 | 53.37 | 85.00  |
| <b>NVR</b>                                             | <b>5</b> |         |       |       |        |
| Beton od rec. opeke                                    |          | 52.05   | 69.20 | 47.72 | 122.98 |
| Mineralna vuna iz WUFI®                                |          | 0.82    | 0.76  | 0.52  | 0.98   |
| Beton od rec. betona                                   |          | 49.75   | 26.93 | 16.77 | 49.75  |
| <b>VW</b>                                              | <b>6</b> |         |       |       |        |
| Beton iz WUFI®                                         |          | 85.00   | 86.65 | 82.67 | 107.84 |
| Sloj zraka iz WUFI®                                    |          | 1.88    | 1.82  | 0.56  | 5.60   |
| Mineralna vuna iz WUFI®                                |          | 0.82    | 0.67  | 0.47  | 0.95   |
| Beton iz WUFI®                                         |          | 85.00   | 53.27 | 50.98 | 85.00  |
| <b>VR</b>                                              | <b>7</b> |         |       |       |        |
| Beton od rec. opeke                                    |          | 52.05   | 62.14 | 40.94 | 116.15 |
| Sloj zraka iz WUFI®                                    |          | 1.88    | 2.39  | 0.83  | 5.38   |
| Mineralna vuna iz WUFI®                                |          | 0.82    | 0.71  | 0.51  | 1.06   |
| Beton od rec. betona                                   |          | 49.75   | 25.36 | 16.49 | 49.75  |

Kod sendvič panela u vanjskim se slojevima akumulira voda vrlo vjerojatno zbog kiše nošene vjetrom. Iz Tablice 21. vidljivo je da sloj zraka doprinosi manjoj količini vode u svim slojevima ventiliranih sendvič panela u usporedbi slojevima neventiliranih sendvič panela. Na idućim slikama prikazani su sadržaji vlage u vanjskim betonskim slojevima panela s recikliranim agregatom; na Slici 39. prikazan je dijagram za model NVR tj. neventiliranog panela od betona s recikliranim agregatom, a na Slici 40. prikazan je dijagram za model VR tj. ventiliranog panela od betona s recikliranim agregatom.

Promatrao se utjecaj ventiliranog sloja zraka na sadržaj vode u vanjskom sloju panela, tj. u sloju betona od reciklirane opeke. Vidljivo je da se u modelu VR s ventiliranim slojem zraka isušio veći udio vode (15% manji sadržaj vlage), nego li je to u slučaju NVR bez sloja zraka. Također, sloj zraka doprinosi da je najveća vršna vrijednost sadržaja vlage u periodu vlaženja otprilike 5% manja u slučaju VR panela u odnosu na NVR panel bez ventiliranog sloja zraka (kada se promatra vanjski betonski sloj).

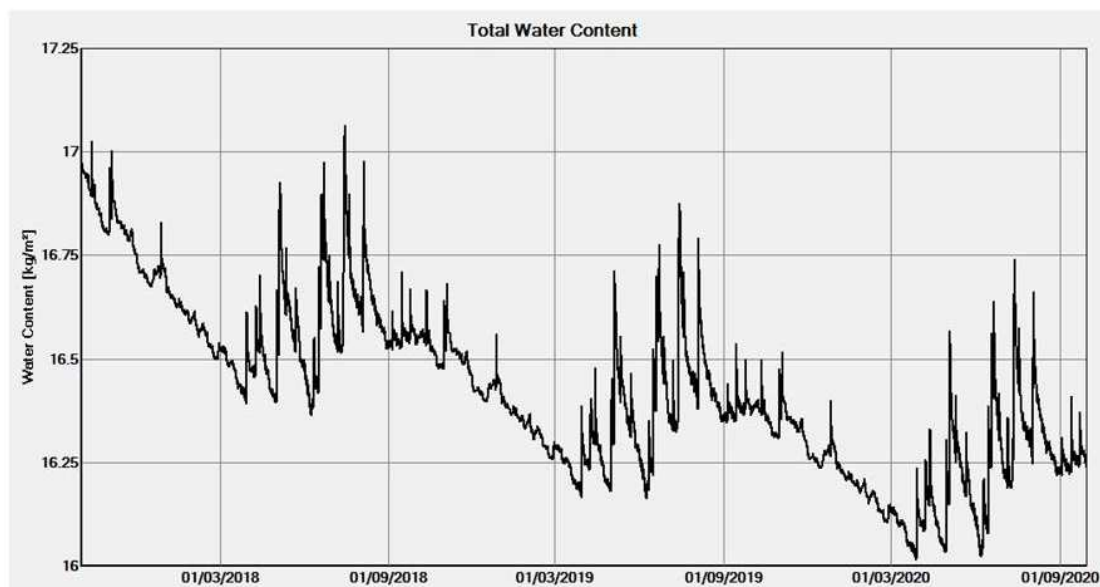


**Slika 39. Sadržaj vode u vanjskom betonskom sloju modela NVR (neventilirani panel od betona s recikliranim agregatom) tijekom proračunskog razdoblja**

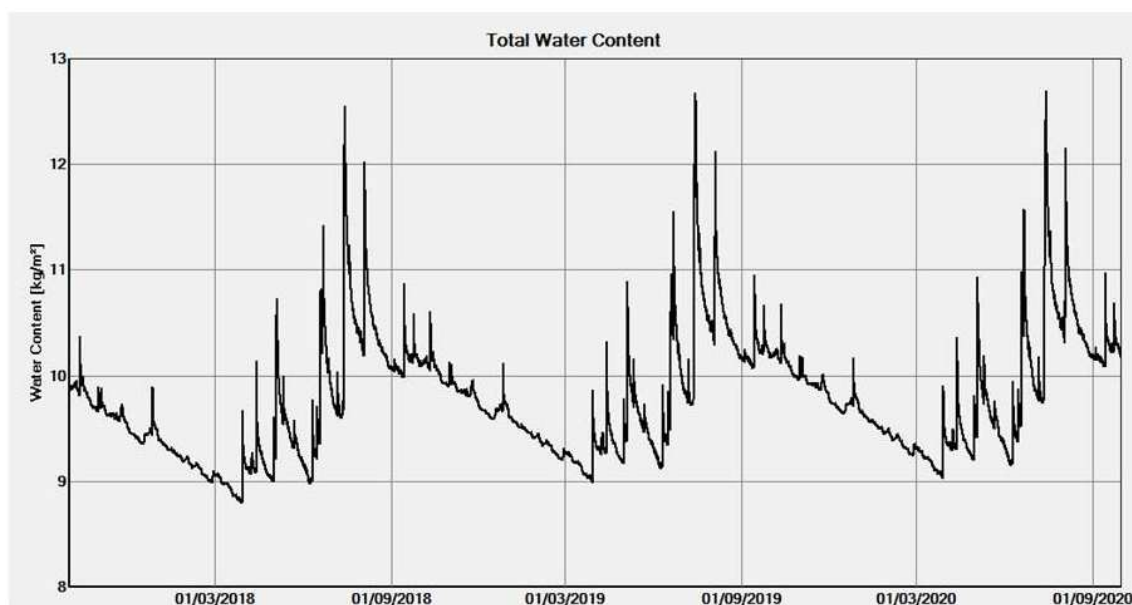


**Slika 40. Sadržaj vode u vanjskom betonskom sloju modela VR (ventilirani panel od betona s recikliranim agregatom) tijekom proračunskog razdoblja**

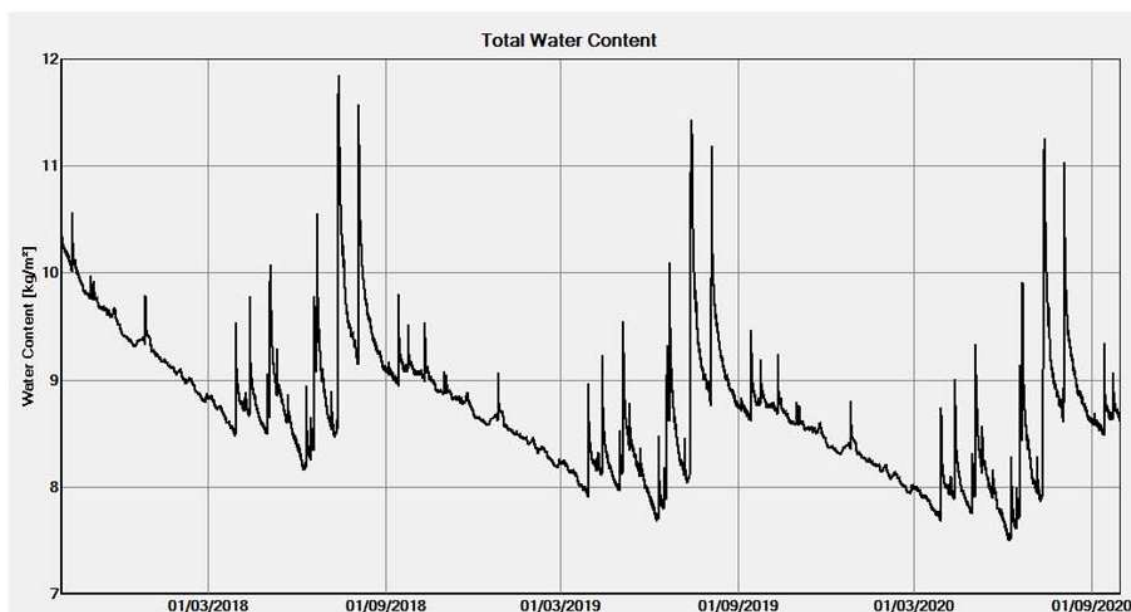
Na slikama 41 –47 prikazani su ukupni sadržaji vode u promatranim modelima (zidovi, neventilirani i ventilirani sendvič paneli). Ovi ukupni sadržaji vode predstavljaju sumu sadržaja vode svih pojedinačnih slojeva promatranih modela.



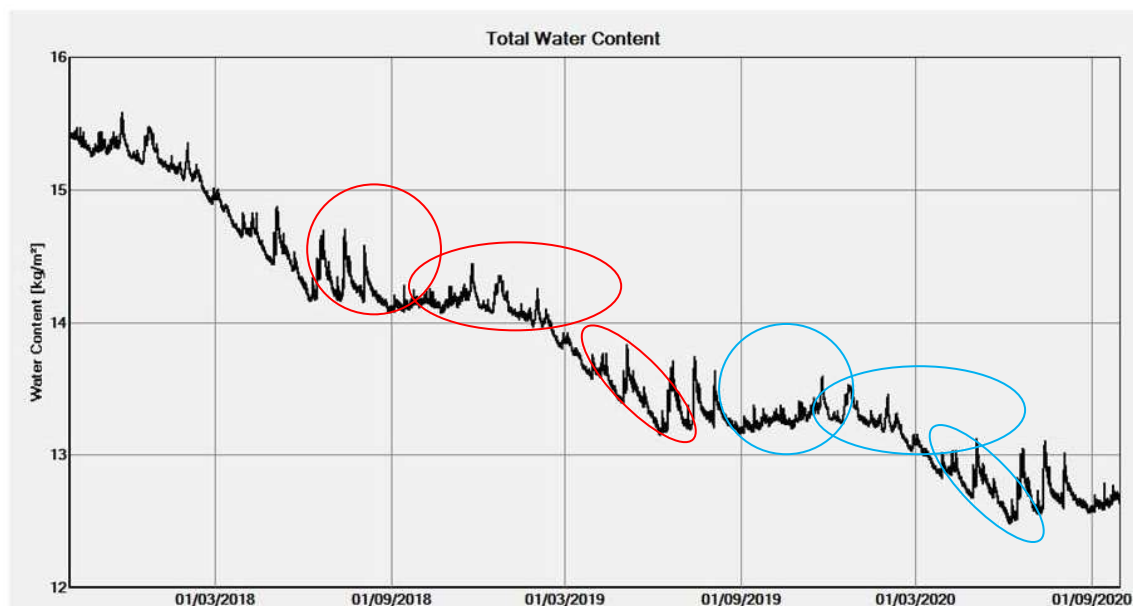
**Slika 41. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model zida ZW (zid iz baze WUFI®)**



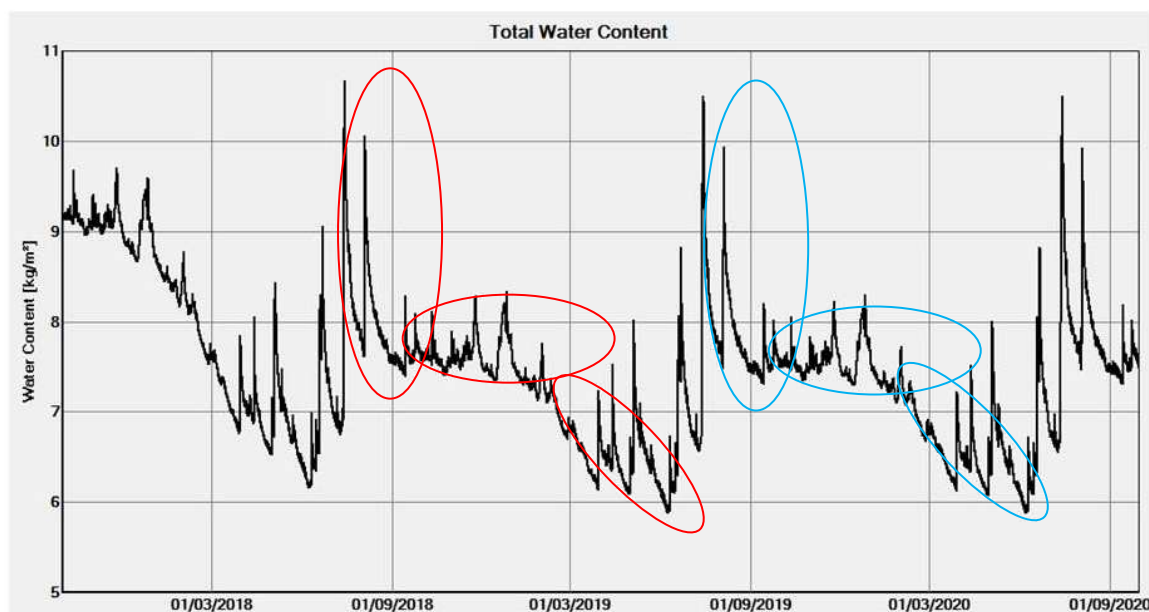
**Slika 42. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model zida ZB (zid od rec. betona)**



**Slika 43. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model zida ZO(zid od rec. opeke)**



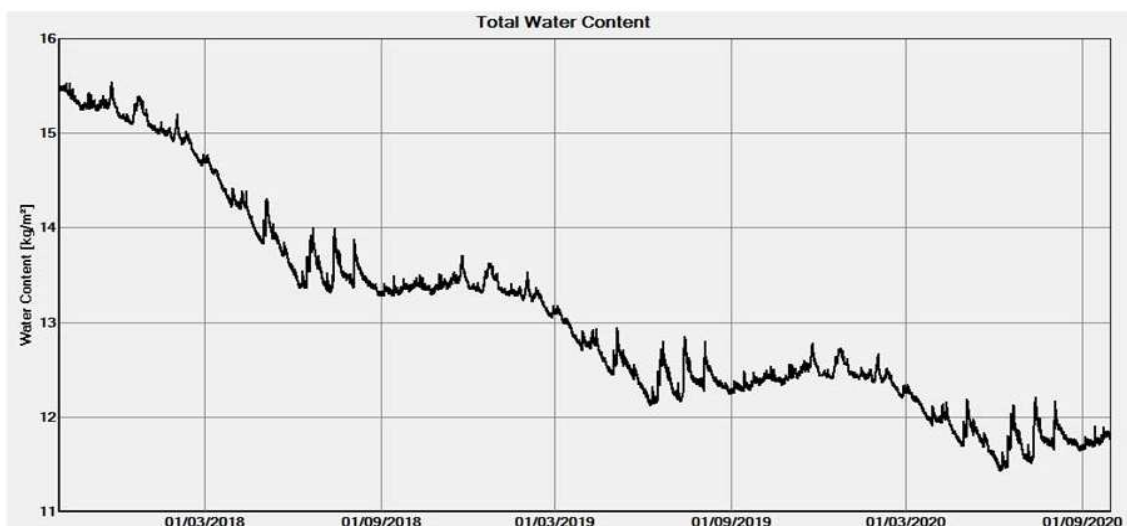
**Slika 44. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela NVW (neventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)**



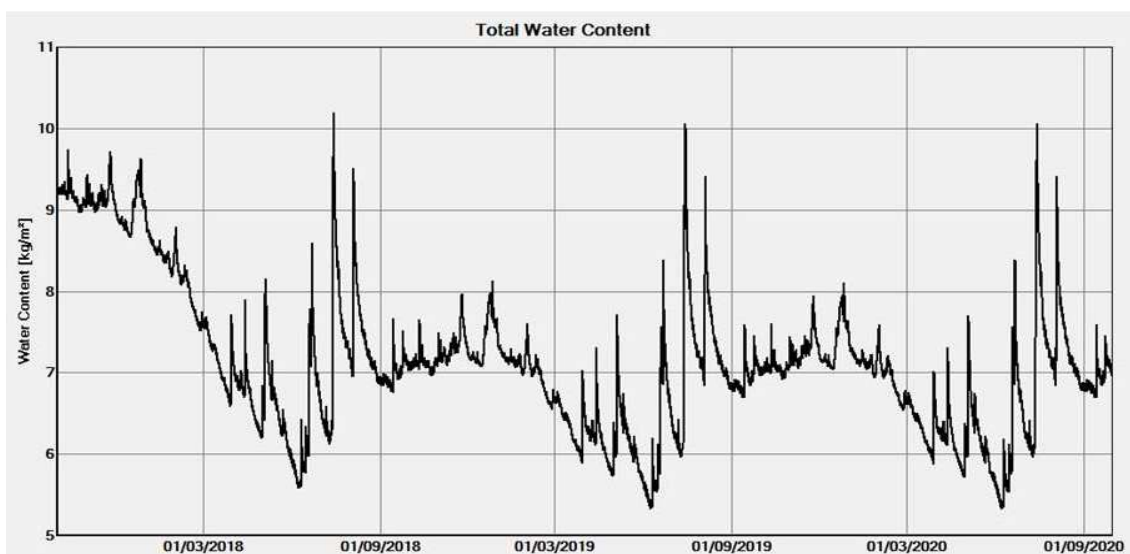
**Slika 45. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela NVR (neventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)**

Na prvi pogled međusobno različiti grafovi (slika 44 i slika 45), ali zapravo sa vrlo sličnim elementima/fazama ponašanja – vlaženje (porast sadržaja vlage), pa stagnacija i naposljetku sušenje (pad sadržaja vlage). Ti elementi/faze čine jedan ciklus koji odgovara ponašanju tijekom jedne godine (različita godišnja doba) koja predstavlja niz različitih uvjeta okoliša. Iz prikazanih grafova može se dati zaključak kako je u slučaju NVR

uspostavljena dinamička ravnoteža, dok NVW panel u proračunskom razdoblju od 3 godine nije uspostavio dinamičku ravnotežu i globalno pokazuje tendenciju isušivanja.



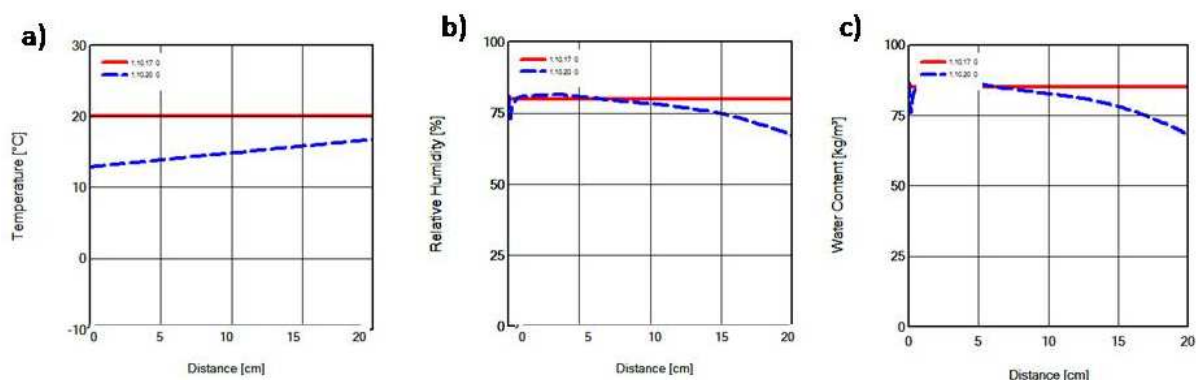
**Slika 46. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela VW (ventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)**



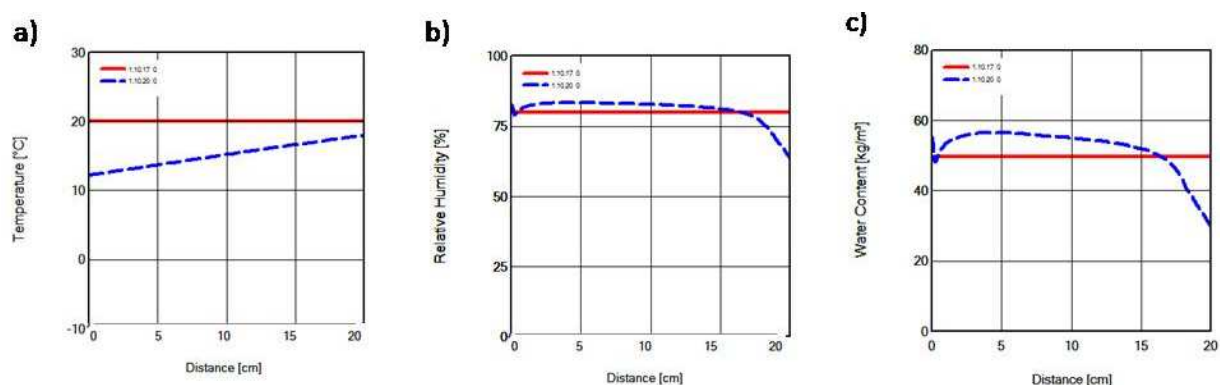
**Slika 47. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela VR (ventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)**

Modeli ventiliranih sendvič panela (slika 46 i slika 47), pokazuju iste elemente/faze ponašanja kao i odgovarajući modeli neventiliranih sendvič panela (slika 44 i slika 45) te iste obrasce ponašanja (dinamička ravnoteža uspostavljena kod VR, dok VW pokazuje globalni trend isušivanja koji nije završio u proračunskom razdoblju od 3 godine).

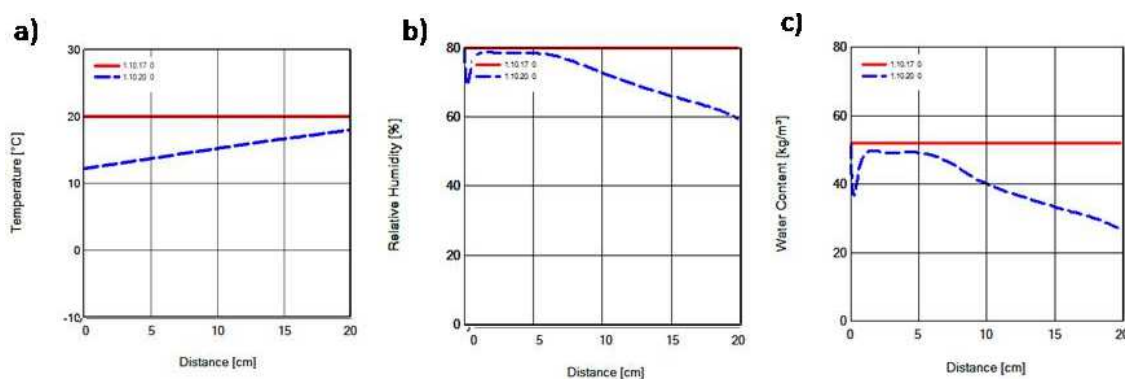
U narednim slikama prikazani su dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za model zida. Crvena linija prikazuje stanje na početku simulacije (1.10.2017.), a plava linija prikazuje stanje na kraju simulacije (1.10.2020.)



Slika 48. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za ZW (zid iz baze WUFI®)

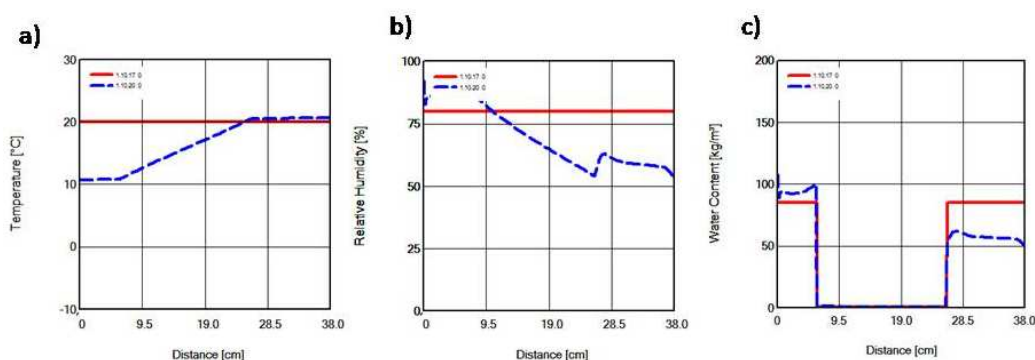


Slika 49. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>] -debljina uzorka za ZB (zid od rec. betona)

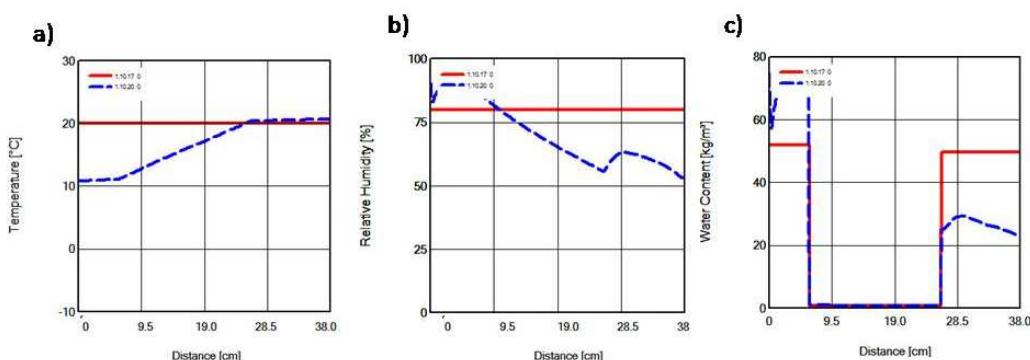


Slika 50. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>] -debljina uzorka za ZO (zid od rec. opeke)

U narednim slikama prikazani su dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za model neventiliranog sendvič panela. Crvena linija prikazuje stanje na početku simulacije (1.10.2017.), a plava linija prikazuje stanje na kraju simulacije (1.10.2020.)

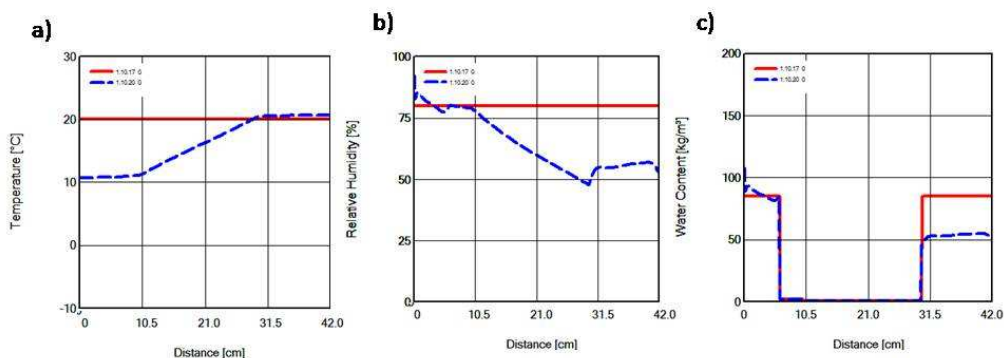


**Slika 51. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za NVW (neventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)**

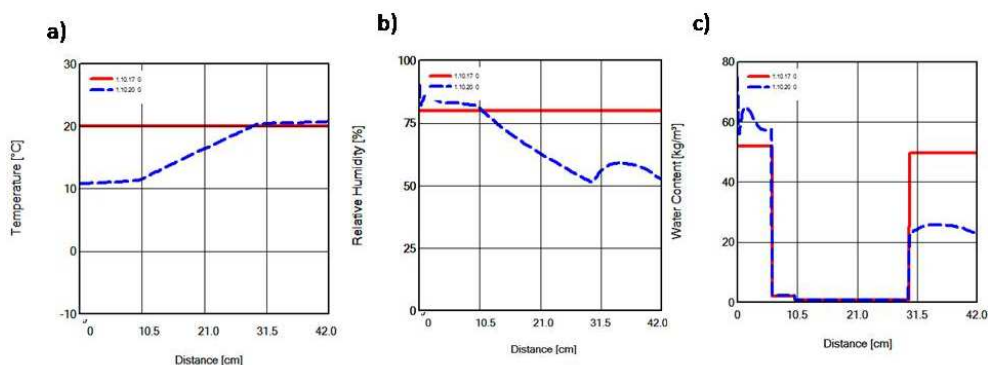


**Slika 52. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za NVR (neventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)**

U narednim slikama prikazani su dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za model ventiliranog sendvič panela. Crvena linija prikazuje stanje na početku simulacije (1.10.2017.), a plava linija prikazuje stanje na kraju simulacije (1.10.2020.)



**Slika53. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za VW (ventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)**



**Slika 54. Dijagrami: a) Temperatura[°C]-debljina uzorka, b) RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m<sup>3</sup>]-debljina uzorka za VW (ventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)**

## KOEFICIJENTI PROLASKA TOPLINE ZA MODELE ZIDA I PANELA U PROMATRANOM VREMENU:

WUFI® uspoređuje mjesečne vrijednosti za koeficijente prolaska topline promatranih modela s dvije referentne vrijednosti  $U_1$  i  $U_2$  te rezultate prikazuje svjetlosnim signalom “semaforom”. Varijacije mjesečnih vrijednosti za koeficijente prolaska topline zapravo ukazuju na ovisnost transporta topline o vlazi u građevinskim materijalima i elementima.

Zadane vrijednosti za  $U_1$  i  $U_2$ :

$$U_1 = 0.73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$U_2 = 1.39 \text{ W/m}^2\text{K}$$

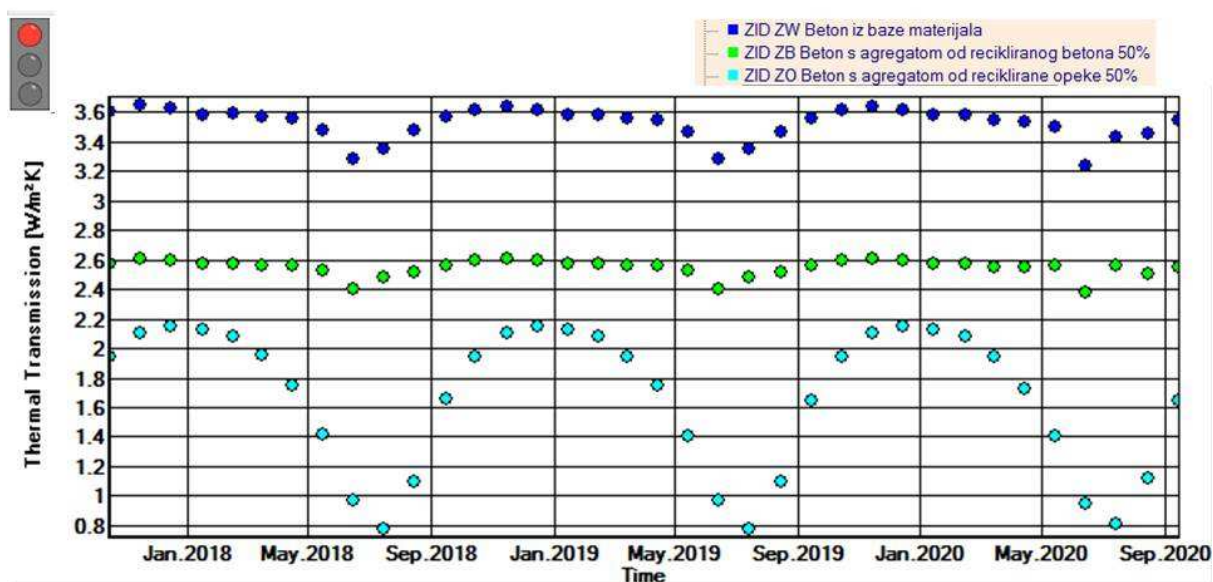
Ove zadane vrijednosti temelje se na minimalnom otporu prolasku topline  $R_1 = 1,2 \text{ m}^2\text{K/W}$ , prema zahtjevima njemačke norme DIN 4108-2 (2003) i  $R_2 = 0,55 \text{ m}^2\text{K/W}$ , prema zahtjevima njemačke norme DIN 4108-2 (1981). Ove minimalne R-vrijednosti pretvorene su u najveće dopuštene U-vrijednosti ( $U_1$  i  $U_2$ ) pomoću plošnog otpora prolasku topline od  $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$  na vanjskoj površini i  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$  na unutarnjoj površini [2].

**CRVENO SVJETLO:** najmanje jedan od proračunskih mjeseci ima koeficijent prolaska topline veći od  $U_2 = 1.39 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

**ŽUTO SVJETLO:** svi proračunski mjeseci imaju koeficijent prolaska topline manji od  $U_2 = 1.39 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

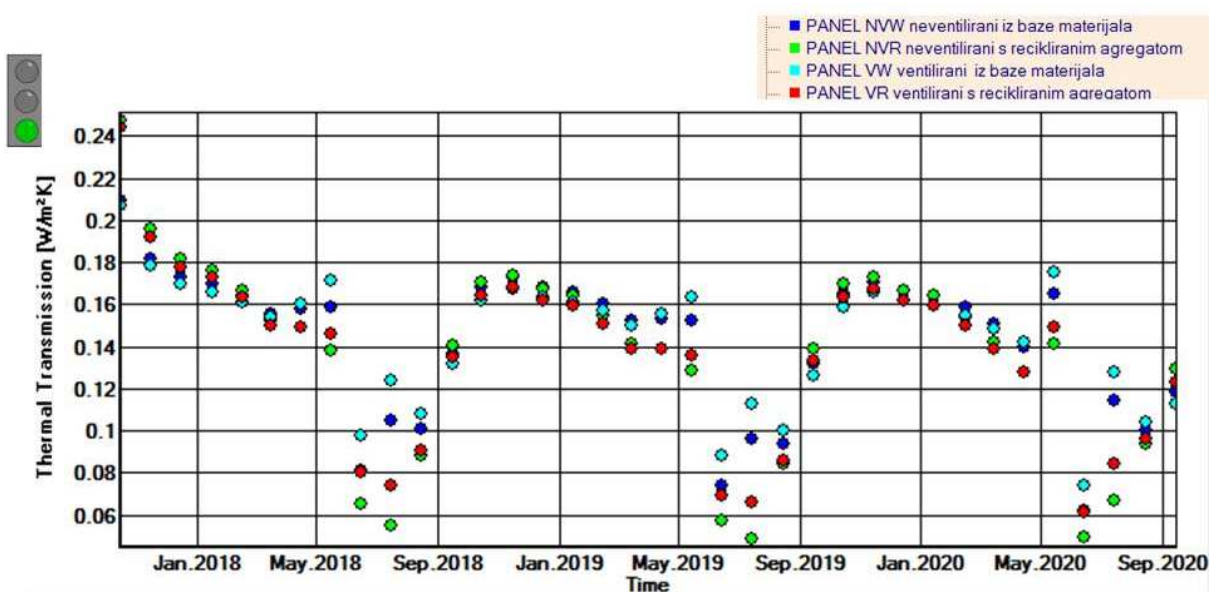
**ZELENO SVJETLO:** svi proračunski mjeseci imaju koeficijent prolaska topline manji od  $U_1 = 0.73 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Na narednim slikama (slika 55 i slika 56) prikazani su dijagrami s raspodjelom koeficijenata prolaska topline promatranih modela u proračunskom vremenu. Vidljiva su periodička ponavljanja kroz svaku promatranu godinu, odnosno ponovljivi obrasci ponašanja. Na Slici 55. prikazan je dijagram s pripadnim vrijednostima koeficijenta prolaska topline za modele zida te je na njima, kao što je i očekivano, vidljivo crveno svjetlo na semaforu što ukazuje na nezadovoljavanje uvjeta prema ranije navedenim normama. Iz dijagrama je vidljivo da vidno najgore rezultate ima model ZW tj. zid s betonom iz baze WUFI® materijala, a uspoređujući zidove od betona s recikliranim agregatom, najbolje rezultate pokazao je model ZO tj. beton u kojemu je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom.



Slika 55. Prikaz koeficijenta prolaska topline za modele zida

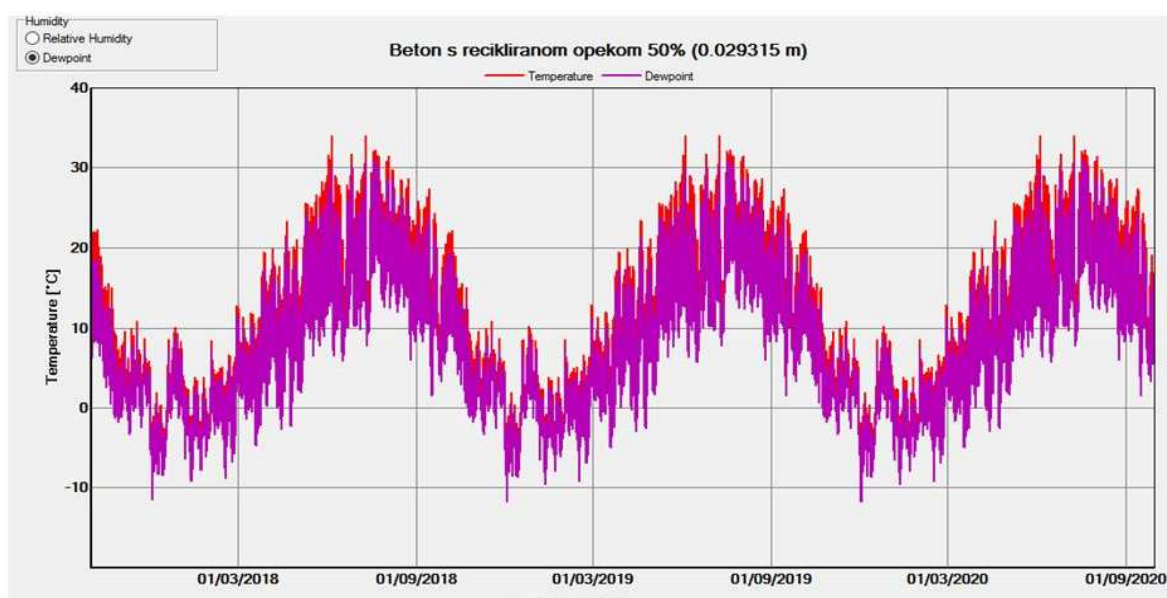
Na Slici 56. prikazan je dijagram s pripadnim vrijednostima koeficijenta prolaska topline za modele neventiliranih i ventiliranih panela te je na njima, kao što je i očekivano, vidljivo zeleno svjetlo na semaforu što ukazuje na ispunjavanje uvjeta prema ranije navedenim normama. Ispunjavanje uvjeta se može pripisati prvenstveno sloju toplinske izolacije debljine 20 cm. Same vrijednosti koeficijenta prolaska topline promatranih modela ne odskakuju previše jedna od druge, no ipak je vidljivo da se u hladnijim periodima prve proračunske godine (2018) nešto bolje ponašaju betoni iz WUFI® baze materijala i pritom je najbolje rezultate ostvario model VW tj. model ventiliranog panela s betonima iz baze programskog paketa, dok je u toplijem period prve proračunske godine (svibanj – rujan 2018.) najbolje rezultate pak postigao model NVR, tj. model neventiliranog panela od betona s recikliranim agregatom. U preostalim proračunskim godinama (2019. i 2020.), u hladnijim periodima najniže vrijednosti koeficijenta prolaska topline ostvario je model VR, tj. model ventiliranog panela od betona s recikliranim agregatom. Isti model (VR) postiže i najniže vrijednosti koeficijenta prolaska topline u toplijem periodu (svibanj – rujan) proračunskih godina 2019. i 2020.



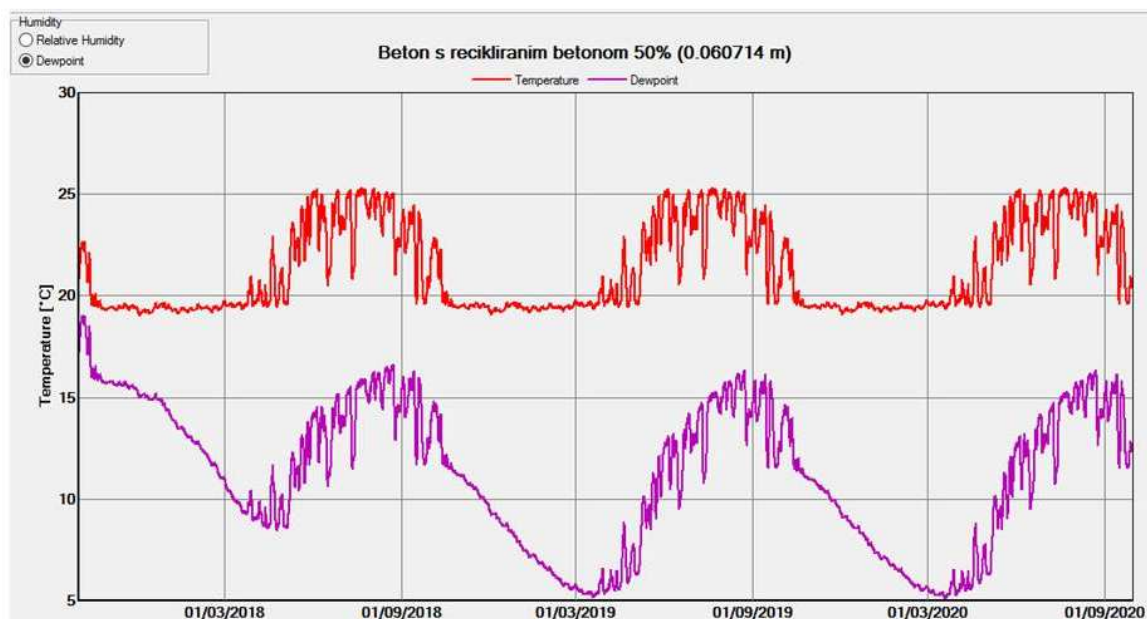
Slika 56. Prikaz koeficijenta prolaska topline za modele zida

#### POJAVA KONDENZACIJE:

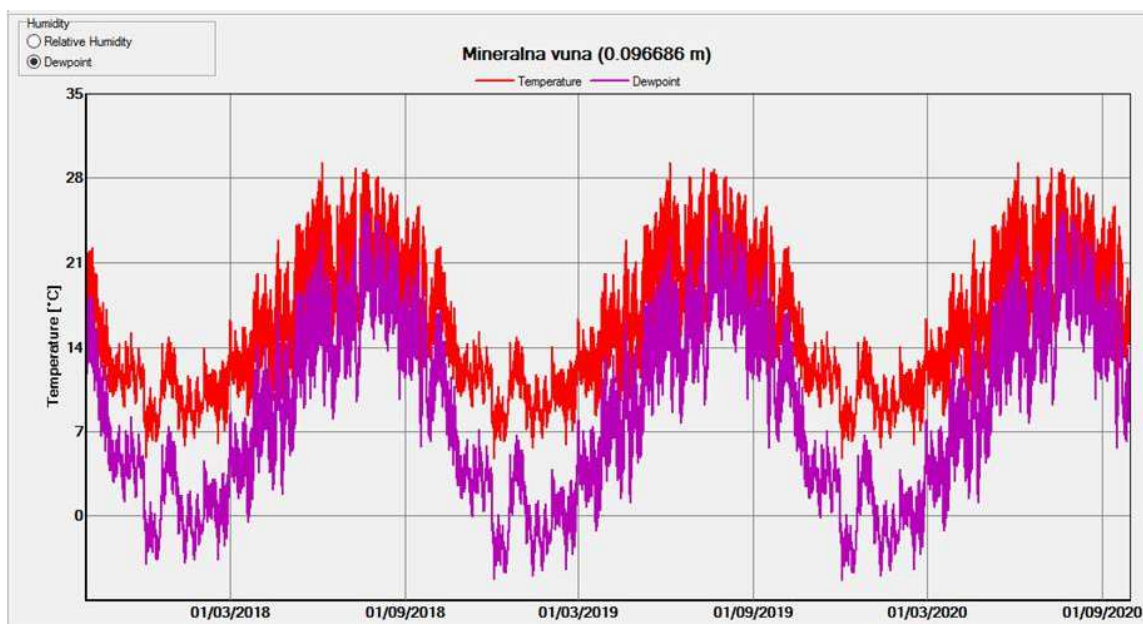
Na narednim slikama (Slika 57. – Slika 59.) prikazan je odnos temperature elementa te njegove pripadne temperature rosišta. Ukoliko je temperatura rosišta (na dijagramu krivulja ljubičaste boje) viša od pripadne temperature elementa (na dijagramu krivulja crvene boje) dolazi do kondenzacije i formiranja vlage u elementu, što potencijalno može uzrokovati degradaciju materijala. Za analizu potencijalne kondenzacije uzet je model VR tj ventilirani panel od betona s recikliranim agregatom jer je njegovo ponašanje najbližnije onomu kojeg očekujemo od ECO-SANDWICH® panela. Na Slici 57. prikazan je vanjski sloj panela, tj. beton s agregatom od reciklirane opeke, a na Slici 58. prikazan je unutarnji sloj panela, tj. beton s agregatom od recikliranog betona. Očekivano, na vanjskoj strani panela vrijednosti temperatura prilično su blizu, ali ni u jednom trenutku temperatura rosišta nije iznad temperature elementa što ukazuje da ne postoji opasnost od kondenzacije. Na unutarnjoj strani panela očekivano kod vrijednosti temperature rosišta i temperature panela dolazi do izraženijih razlika te također nema opasnosti od kondenzacije. Na unutarnjoj strani također su vidljive i manje oscilacije u temperaturi elementa jer temperatura u unutrašnjosti varira između 20°C i 25°C, dok vanjska temperatura ovisi o karakteristikama klime u kojoj se panel nalazi. Također važno je i da na sloju minerale vune ne dolazi do kondenzacije, što je prikazano na Slici 59.



**Slika 57. Prikaz temperature elementa i temperature rosišta za vanjski sloj panela VR (beton s agregatom od reciklirane opeke)**



**Slika 58. Prikaz temperature elementa i temperature rosišta za unutarnji sloj panela VR (beton s agregatom od recikliranog betona)**



**Slika 59. Prikaz temperature elementa i rosišta za sloj mineralne vune**

## 12. ZAKLJUČAK

Vanjska ovojnica zgrade predstavlja fizičku barijeru između vanjskog i unutarnjeg okoliša i kao takva od velikog je značaja za kvalitetu življenja u zatvorenim prostorima. Njeno higrotermalno ponašanje predstavlja kombinirani prijenos topline, zraka i vlage koji je prvenstveno potaknut različitim temperaturnim uvjetima i različitim uvjetima relativne vlažnosti zraka vanjskog i unutarnjeg okoliša. Za proračune higrotermalnog ponašanja vanjske ovojnice u Hrvatskoj su i dalje u uporabi standardne stacionarne metode proračuna koje ne pružaju sliku stvarnog higrotermalnog ponašanja vanjskih građevnih dijelova. Kod njih se prijenos topline, zraka i vlage promatra odvojeno, a pojedini važni učinci neopravdano su zanemareni. Glavni parametar koji opisuje transport vlage kroz materijal, a u standardnim metodama se zanemaruje su sorpcijske krivulje. Ovaj rad upućuje naveliku važnost koju sorpcijske krivulje imaju za pravilnu dinamičku higrotermalnu analizu kako samih materijala tako i sendvič panela sastavljenih od tih materijala. Sorpcijske krivulje imaju veliki utjecaj na količinu ugradbene vlage u materijalu što posljedično ima utjecaj na transport, akumulaciju i isušivanje vlage u samom materijalu te time na ponašanje materijala u vremenu. Kako bi se analizirao utjecaj parametara materijala na higrotermalno ponašanje promatranog sustava vanjske ovojnice, odnosno transport topline i vlage u vremenu kroz takav sustav, istražena je mogućnost korisničkog unosa parametara materijala u programski paket WUFI®. Potom je provedena numerička parametarska analiza na ukupno sedam slučajeva:

### MODEL ZIDA:

1. zid od običnog betona (iz baze WUFI®), ZW
2. zid od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranim betonom, ZB
3. zid od betona gdje je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom, ZO

### MODEL PANELA:

1. neventilirani sendvič panel iz WUFI® baze materijala, NVW
2. neventilirani sendvič panel izgrađenih od betona s recikliranim agregatom, NVR
3. ventilirani sendvič panel iz baze WUFI® materijala, VW
4. ventilirani sendvič panel izgrađenih od betona s recikliranim agregatom, VR

Tijekom analize rezultata numeričkih proračuna, promatrani su:

- Razlike u rezultatima između materijala iz baze WUFI® i vlastitog unosa
- Koeficijenti prolaska topline
- Ukupni sadržaj vode u modelima i u pojedinim slojevima modela
- Promjene temperature, relativne vlažnosti i sadržaja vode tijekom vremena
- Utjecaj ventiliranog sloja zraka na sadržaj vode u slojevima panela

**Osnovni zaključci** ovog rada su navedeni u daljnjem tekstu.

- Koeficijenti prolaska topline očekivano su manji i samim time povoljnije toplinsko ponašanje pokazali sumodeli zida od betona s recikliranim agregatom u odnosu na model zida s betonom iz WUFI® baze materijala. Zid od betona u kojem je dio agregata zamijenjen s recikliranom opekom pokazao je najbolje toplinsko ponašanje jer je u njemu koeficijent prolaska topline najmanji. Što se tiče neventiliranih panela razlike u rezultatima su manje, ali i dalje u korist betona s recikliranim agregatom. Najmanje koeficijente prolaska topline imaju ventilirani paneli i to model VR (ventilirani panel u kojem su betoni s recikliranim agregatom) tj. model koji opisuje ponašanje ECO-SANDWICH® panela. Smanjenje razlika u koeficijentima prolaska topline kod neventiliranih i ventiliranih sendvič panela može se pripisati prvenstveno postojanju sloja toplinske izolacije debljine 20 cm.
- Svi modeli pokazuju trend isušivanja u odnosu na početno stanje tijekom vremena, izuzev modela ZB (zid od betona s agregatom od recikliranog betona) u kojem je prisutna akumulacija vode u odnosu na početno stanje. Detaljnijim uvidom u ponašanje tog zida vidljivo je da se zid ne stigne dovoljno isušiti prije ponovnog skoka vlažnosti, što kod slučaja modela zida ZO (s agregatom od reciklirane opeke) nije zabilježeno te se kod njega tijekom godina zid sve više isušuje.
- Kod zidova ZW i ZO u proračunskom razdoblju od 3 godine jasno je vidljiv obrazac ponašanja u hladnijim periodima godine (vlaženje) i toplijim periodima godine (isušivanje), ali kroz svaku proračunsku godinu se smanjuju vršna vrijednost najveće količine vlage (period vlaženja) i najmanja količina vlage (period sušenja) što globalno upućuje na trend isušivanja. Stoga se može reći da kod zidova ZW i ZO nije postignuta

dinamička ravnoteža unutar 3 godine, te bi potencijalno trebalo produžiti period proračuna.

- Za razliku od zidova ZW i ZO, kod zida ZB uspostavljena je dinamička ravnoteža unutar 3 proračunske godine iako je došlo do akumulacije vlage u odnosu na početno stanje (što je i navedeno u prethodnom zaključku). Moguće je da je pretpostavljena početna ugradbena vlaga betona s recikliranim betonom kao agregatom bila nerealno niska pa kroz proračun materijal “pokušava” dosegnuti svoj realističniji sadržaj vode.
- Pretpostavlja se da je moguće da odabir boje vanjskog sloja, što direktno utječe na apsorpciju i emisivnost dugovalnog zračenja vanjske površine modela, određenim dijelom utječe na procese sušenja i vlaženja promatranih modela. Navedenu pretpostavku potrebno je provjeriti detaljnijim analizama.
- Analizom ukupnog sadržaja vode tijekom vremena potvrđeno je da ventilirani paneli imaju manji udio vode nakon proračunskog vremena u odnosu na neventilirane panela. Ta razlika varira ovisno da li je riječ o period vlaženja ili sušenja. U slučaju vlaženja, 5% je manja vršna vrijednost sadržaja vlage kod ventiliranog panela VR u odnosu na neventilirani NVR panel. Ta razlika nije značajna, ali valja naglasiti da je ipak prisutna. Kada je riječ o period sušenja, sadržaj vlage je 15% manji kod VR panela u usporedbi s NVR panelom. Ventilirani sloj zraka doprinio je manjem sadržaju vode u svakom sloju panela, a najveći doprinos isušivanju vidljiv je u vanjskom betonskom sloju, tj. betonu u kojem je dio agregata zamijenjen recikliranom opekom te u sloju toplinske izolacije od mineralne vune.
- Iako se sadržaji vlage u neventiliranim i ventiliranim panelima kvantitativno razlikuju zbog utjecaja zraka, kvalitativno gledajući i uspoređujući grafove, oni pokazuju isti obrazac i trend ponašanja.
- Kod neventiliranih NVW i ventiliranih VW panela s karakteristikama materijalima preuzetima iz WUFI® baze materijala, uočava se globalni trend isušivanja tokom sve tri proračunske godine, što upućuje da dinamička ravnoteža još nije postignuta. Za ovakve slučajeve vanjske ovojnice, potrebno je produžiti proračunski period.
- Neventilirani NVR i ventilirani VR paneli od dviju vrsta betona s recikliranim agregatom unutar tri godine proračunskog perioda postižu stanje dinamičke ravnoteže.
- Analizom sadržaja vode u panelima sa slojevima iz WUFI® baze materijala (NVW i VW) i onih u kojima su slojevi betona iz korisničkog unosa, tj. betona čija su svojstva dobivena ispitivanjem u laboratoriju te potom unesena u program (NVR i VR) vidljiva su

odstupanja u korist korisničkog unosa. Paneli s betonima iz korisničkog unosa imaju manju ugradbenu vlagu i to gotovo duplo manju te posljedično imaju i manji ukupni sadržaj vode na kraju proračunskog razdoblja. Udio ugradbene vlage direktno je povezan sa sorpcijskim krivuljama te je ovom analizom potvrđen značaj ispitivanja sorpcijskih krivulja za nove vrste betona, ali i općenito drugih novih inovativnih materijala, kako bi rezultati higrotermalnih proračuna bili što vjerodostojniji te kako rezultati proračuna ne bi previše odskakali od stvarnog ponašanja.

- Na modelu VR, modelu koji najvjernije opisuje ECO-SANDWICH® panel, nije došlo do kondenzacije niti u jednom njegovom sloju. Time je vidljivo da je za danu lokaciju opasnost od pojave kondenzne vlage u promatranom tipu vanjske ovojnice svedena na minimum.

### 13. LITERATURA

- [1] Milovanović, B.: Toplinska ovojnica zgrade – problemi i rješenja u praksi, Stručni Simpozij “Kvaliteta gradnje stambenih i javnih zgrada u RH od 1991. – 2011. godine”, Hrvatsko društvo sudskih vještaka, Zagreb, Hrvatska, pp. 37-43, 2012.
- [2] WUFI Pro 6.1 online help (pristup iz programskog paketa, 2017 godina.)
- [3] Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Milovanović, B., Sustav ECO–SANDWICH – održivi predgotovljeni zidni panelni sustav od recikliranog agregata, Zbornik radova Sabora hrvatskih graditelja 2012 “Graditeljstvo – poluga razvoja”, Zagreb; 2012
- [4] Štirmer, N., Bjegović, D., Gospodarenje građevinskim otpadom i mogućnosti upotrebe građevinskog otpada, 6. Hrvatski forum o održivoj gradnji, Zagreb, 2012.
- [5] Banjad Pečur, I., Štirmer, N., Primjena recikliranog agregata u betonu – iskustva u Hrvatskoj, Doseganje posebnih betonov z uporabo odpadlih materialov, pp. 51-62, 2012.
- [6] Soldo, V., Novak, S., Horvat, I.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 1379 0, Zagreb, 2017.
- [7] Prezentacije s predavanja iz kolegija Građevinska fizika, Građevinski fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2016., <http://www.grad.unizg.hr/predmet/grafiz> (pristupljeno u lipnju 2017. godine)
- [8] Zakon o zaštiti od požara, Članak 26. stavka 1. (»Narodne novine« br. 92/10)
- [9] Šimetin, V., Građevinska fizika, Građevinski institut-Fakultet građevinskih znanosti Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1983.
- [10] <http://www.eco-sandwich.hr/hr/> (pristupljeno u lipnju 2017. godine)
- [11] Alagušić, M., Banjad Pečur, I.: Analiza higrotermalnog ponašanja ovojnice zgrade od recikliranih betonskih elemenata, Simpozij doktorskog studija građevinarstva, Zagreb, Hrvatska, 2015.
- [12] <http://www.size-projekti.hr/ventilirane-fasade-p10> (pristupljeno u lipnju 2017. godine)
- [13] 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.

[14] <http://energy.gov/energysaver/moisture-control>, (preuzeto u lipnju 2017. godine)

[15] Separate sa vježbi iz kolegija Poznavanje materijala, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, ak god 2015/2016

[16] Gosele, K., Schule, W., Zvuk, toplota, vlaga; Biblioteka Neimar, Beograd, 1979.

[17] Hansen, K.K., SORPTION ISOTHERMS; Building Materials Laboratory; Tehnical University of Denmark, Tehnical report 162/86, 1986.

[18] HRN EN ISO 12571 Značajke građevnih materijala i proizvoda s obzirom na toplinu i vlagu -- Određivanje svojstava higroskopske sorpcije (ISO 12571:2013; EN ISO 12571:2013)

[19] Topić, P. i Baričević, M.; “Eksperimentalno određivanje parametara modela dinamičkog higrotermalnog ponašanja betona s recikliranim agregatom”, Rad za Rektorovu nagradu, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zagreb, Hrvatska, 2016.

[20] Feng C., Janssen, H., Wu, C., Feng, Y., Meng, Q., Validating various measures to accelerate the static gravimetric sorption isotherm determination, *Building and Environment*, vol. 69, pp.64-71, 2013.

[21] Prijelaz topline, [www.fer.unizg.hr](http://www.fer.unizg.hr), (preuzeto u lipnju 2017. godine)

[22] Künzeli, M.H., Moisture risk assessment of roof constructions by computer simulation in comparison to the standard Glaser method, International Building Physics Conference, Eindhoven., 2000.

[23] <https://wufi.de/en/> (pristupljeno u lipnju 2017. godine)

[24] Browne, D.: The SPAB Hygrothermal Modelling: Interim Report, The SPAB research report 3., 2012.

[25] D. Zirkelbach, Th. Schmidt, M. Kehrler, H.M. Kunzel: WUFI pro manual

[26] EN 15026:2007 Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation

## POPIS TABLICA

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Prikaz svih slučajeva korištenih u numeričkoj analizi.....                    | 8  |
| Tablica 2. Mase uzoraka za dane relativne vlažnosti RH (beton od reciklirane opeke)..... | 23 |
| Tablica 3. Masa uzoraka za dane relative vlažnosti RH(beton od recikliranog betona)..... | 23 |
| Tablica 4. Mase suhih uzoraka.....                                                       | 24 |
| Tablica 5. Ravnotežni sadržaj vlage za pojedine vlažnosti (RH) .....                     | 25 |
| Tablica 6. Razlika masa pri različitim vlažnostima (beton od reciklirane opeke).....     | 26 |
| Tablica 7. Razlika masa pri različitim vlažnostima (beton od recikliranog betona) .....  | 26 |
| Tablica 8. Osnovni parametri materijala.....                                             | 39 |
| Tablica 9. Osnovni parametri za beton s agregatom od reciklirane opeke .....             | 42 |
| Tablica 10. Osnovni parametri za beton s agregatom od recikliranog betona.....           | 42 |
| Tablica 11. Osnovni parametri za beton Beton iz baze materijala WUFI® .....              | 43 |
| Tablica 12. Osnovni parametri mineralnu vunu iz baze materijala WUFI® .....              | 43 |
| Tablica 13. U - vrijednost i R – vrijednost za modele zida.....                          | 47 |
| Tablica 14. Vrijednosti temperature i vlažnosti prema normi EN 15026:2007 [27] .....     | 51 |
| Tablica 15. U - vrijednost i R – vrijednost za model neventiliranog panela .....         | 53 |
| Tablica 16. Postavke korištene prilikom unosa za sve modele panela u WUFI®-ju.....       | 54 |
| Tablica 17. U - vrijednost i R – vrijednost za model ventiliranog panela .....           | 57 |
| Tablica 18. Prikaz slučajeva proračuna s pripadnim kraticama.....                        | 59 |
| Tablica 19. Prikaz rezultata sadržaja vode za sve slučajeve proračuna .....              | 60 |
| Tablica 20.. Prikaz rezultata ukupnog sadržaja vode za model zida.....                   | 60 |
| Tablica 21. Prikaz rezultata ukupnog sadržaja vode za model panela.....                  | 63 |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Metodologija i plan istraživanja .....                                                          | 10 |
| Slika 2. Presjek ECO-SANDWICH® zidnog panela [10].....                                                   | 11 |
| Slika 3. Dijelovi sustava ventilirane fasade .....                                                       | 13 |
| Slika 4. Oštećenja uslijed djelovanja vlage [14].....                                                    | 14 |
| Slika 5. Smjer kretanja topline i vlage [7] .....                                                        | 15 |
| Slika 6. Građevinska šteta na zidu zbog djelovanja vlage, kristalno cvjetanje na zidu [15]<br>.....      | 16 |
| Slika 7. Izvori vlage u kućanstvu .....                                                                  | 16 |
| Slika 8. Posljedice djelovanja vlage.....                                                                | 17 |
| Slika 9. Sorpcijske krivulje i karakteristična područja [2].....                                         | 19 |
| Slika 10. Primjer korisničkog unosa sorpcijskih krivulja za beton od recikliranog betona<br>.....        | 20 |
| Slika 11. Krivulje adsorpcije i desorpcije [17] .....                                                    | 21 |
| Slika 12. Uzorci na kojima je provedeno ispitivanje sorpcijskih krivulja .....                           | 22 |
| Slika 13. Dijagram toka eksperimentalnog ispitivanja sorpcijskih krivulja [19].....                      | 27 |
| Slika 14. Prijenos topline kroz jednostruki vanjski zid [9].....                                         | 28 |
| Slika 15. Koeficijenti toplinske vodljivosti za razne kategorije materijala[21].....                     | 30 |
| Slika 16. Oblici strujanja fluida prema Reynoldsovom pokusu [21].....                                    | 31 |
| Slika 17. Grafički prikaz Glasserove metode [2].....                                                     | 33 |
| Slika 18. Dijagram toka za provođenje dinamičkih higrotermalnih simulacija ovojnice<br>zgrade [11] ..... | 34 |
| Slika 19. Prikaz temperature i relativne vlažnosti na pozicijama motrišta WUFI® .....                    | 38 |
| Slika 20. Prikaz rezultata u obliku filma u WUFI® .....                                                  | 38 |
| Slika 21. Sorpcijska krivulja za beton iz baze WUFI® .....                                               | 44 |
| Slika 22. Sorpcijska krivulja za beton s agregatom od recikliranog betona .....                          | 44 |
| Slika 23. Sorpcijska krivulja za beton s agregatom od reciklirane opeke .....                            | 45 |
| Slika 24. Sučelje za korisnički unos novog materijala u WUFI® .....                                      | 45 |

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 25. Podešavanje slojeva, debljina i pozicija monitoringa u WUFI® .....                                                                              | 47 |
| Slika 26. Podešavanje vremenskog perioda i koraka WUFI® .....                                                                                             | 48 |
| Slika 27. Podešavanje temperature i ugradbene vlage u WUFI® .....                                                                                         | 49 |
| Slika 28. Podešavanje početnih uvjeta: Lijevo - zid od reciklirane opeke; Desno – zid od recikliranog betona i zid od običnog betona (WUFI® baza).....    | 49 |
| Slika 29. Prikaz raspodjele temperature i relativne vlažnosti za odabranu lokaciju.....                                                                   | 50 |
| Slika 30. Prikaz ukupnog godišnjeg sunčevog zračenja i ukupne količine kiše u WUFI® .....                                                                 | 51 |
| Slika 31. Shema neventiliranog i ventiliranog panela .....                                                                                                | 52 |
| Slika 32. Podešavanje slojeva, debljina i pozicija motrišta u WUFI® za neventilirani sendvič panel sastavljen od betona s recikliranim agregatom .....    | 53 |
| Slika 33. Udio ugradbene vlage u pojedinim slojevima neventiliranog sendvič panela iz WUFI® baze .....                                                    | 55 |
| Slika 34. Udio ugradbene vlage u pojedinim slojevima neventiliranog sendvič panela iz ECO-SANDWICH®-a .....                                               | 55 |
| Slika 35. Podešavanje slojeva, debljina i pozicija motrišta u WUFI® za ventilirani sendvič panel sastavljen od betona s recikliranim agregatom .....      | 56 |
| Slika 36. Podešavanje unosa ventilacije i kiše nošene vjetrom u WUFI® .....                                                                               | 57 |
| Slika 37. Prikaz provjere stabilnosti provedenog proračuna .....                                                                                          | 58 |
| Slika 38. Prikaz odnosa RH[%] u vremenu[dan] za a) zid od recikliranog betona b) zid od reciklirane opeke c) zid iz WUFI® baze materijala .....           | 62 |
| Slika 39. Sadržaj vode u vanjskom betonskom sloju modela NVR (neventilirani panel od betona s recikliranim agregatom) tijekom proračunskog razdoblja..... | 64 |
| Slika 40. Sadržaj vode u vanjskom betonskom sloju modela VR (ventilirani panel od betona s recikliranim agregatom) tijekom proračunskog razdoblja.....    | 64 |
| Slika 41. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model zida ZW (zid iz baze WUFI®) .....                                          | 65 |
| Slika 42. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model zida ZB (zid od rec. betona) .....                                         | 65 |
| Slika 43. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model zida ZO(zid od rec. opeke) .....                                           | 66 |
| Slika 44. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela NVW(neventilirani sendvič panel iz baze WUFI®) ..... | 67 |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 45. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela NVR(neventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)                                      | 67 |
| Slika 46. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela VW (ventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)                                                             | 68 |
| Slika 47. Prikaz ukupnog sadržaja vode tijekom proračunskog razdoblja za model neventiliranog panela VR (ventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)                                        | 68 |
| Slika 48. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ]-debljina uzorka za ZW (zid iz baze WUFI®)                                               | 69 |
| Slika 49. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ] -debljina uzorka za ZB (zid od rec. betona)                                             | 69 |
| Slika 50. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ] -debljina uzorka za ZO (zid od rec. opeke)                                              | 69 |
| Slika 51. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ]-debljina uzorka za NVW (neventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)                      | 70 |
| Slika 52. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ]-debljina uzorka za NVR (neventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom) | 70 |
| Slika 53. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ]-debljina uzorka za VW (ventilirani sendvič panel iz baze WUFI®)                         | 71 |
| Slika 54. Dijagrami: a)Temperatura[°C]-debljina uzorka, b)RH[%]-debljina uzorka, c) Sadržaj vode [kg/m <sup>3</sup> ]-debljina uzorka za VW (ventilirani sendvič panel od betona s recikliranim agregatom)    | 71 |
| Slika 55. Prikaz koeficijenta prolaska topline za modele zida                                                                                                                                                 | 73 |
| Slika 56. Prikaz koeficijenta prolaska topline za modele zida                                                                                                                                                 | 74 |
| Slika 57. Prikaz temperature elementa i temperature rosišta za vanjski sloj panela VR (beton s agregatom od reciklirane opeke)                                                                                | 75 |
| Slika 58. Prikaz temperature elementa i temperature rosišta za unutarnji sloj panela VR (beton s agregatom od recikliranog betona)                                                                            | 76 |
| Slika 59. Prikaz temperature elementa i rosišta za sloj mineralne vune                                                                                                                                        | 76 |