

II DIO

Numerička simulacija
prostornog širenja vlage unutar
postojećih stambenih jedinica
uslijed životnih navika stanara

Uvod

Život u stambenim prostorima novijeg datuma gradnje sve češće iskazuje jedan problem, povećanje vlage unutar stana. Posljedično tome, u stambenim prostorima dolazi do narušavanja zdravlja stanara. Često se postavlja pitanje odakle taj problem proizlazi, a probat ćemo ga obraditi i razjasniti u ovom elaboratu. Praktično gledano problem može sagledati dva bitna čimbenika, neograničenu količinu energije/tople vode te premalo izmjena zraka unutar stambenog prostora.

Raznolikost tempa života pojedinca nudi niz mogućih „stilova“ življenja unutar jednakog prostora, no zajednička je karakteristika da se generira više vlage no ikad, poradi velike dostupnosti prvenstveno tuširanja i kupanja, a potom kuhanja i sušenja odjeće. Uz praktični savršeno zabrtvljene stambene prostore, koji ne dopuštaju adekvatne izmjene zraka bez čovjekova utjecaja, dolazimo u stanja kada stambeni prostor postaje zasićen vodenom parom u zraku. Ona mora otići negdje i odlazi, to jest kondenzira se na hladnim stijenkama zidova, čime pospješuje rast čovjeku nepoželjnih kultura i uzrokuje zdravstvene probleme.

Odrađeno je eksperimentalno istraživanje u četiri stambene jedinice, gdje su postavljeni mjerači („loggeri“) stanja zraka unutar prostora, i to sa zapisom relativne vlažnosti i temperature svake minute. Mjerači su postavljeni na lokacije koje su određene podobnim za daljnje analize i donošenje zaključaka. Sakupljanje uzoraka trajalo je punih 6 tjedana, nakon čega se pristupilo obradi podataka. Obrađeni su i procijenjena stanja svake stambene jedinice zasebno, a potom su izvršene i usporedbe svih jedinica, indirektno dajući za rezultat navike stanara koji borave u prostoru.

Također, po obradi podataka odabran je specifičan događaj unutar jedne stambene jedinice koji će biti prikazan matematičkim modelom koji će u dovoljnoj točnosti reprezentirati događaj. Događaj će zapravo prikazati primjer generiranja pare unutar prostorije, i što se s tom parom to jest vlagom, kasnije događa. Kalibracija modela biti će obavljena pomoću podataka sa mjerača. Odabrani je događaj protumačen kao kraće kuhanje u jednoj stambenoj jedinici te je dan detaljan vremenski presjek simulacije i zaključci.

Ovim elaboratom pokazuje se kako upotrebom matematičkih modela možemo projektiranje zgrada uz razuman trošak podići na viši nivo, uz poboljšanje u segmentima termotehničkih instalacija, građevinskih radova, ekonomskog aspekta te najbitnije, čovjekova zdravlja i ugone.



Problematika novogradnji – usporedba sa starijom gradnjom

Danas su čovjeku dostupne neograničene količine tople vode za tuširanje, shodno tome tuširanja su dulja i učestalija, neograničeno pranje odjeće (posljedično sušenje) te neograničena energija za kuhanje. Svi navedeni procesi proizvode (generiraju) određene količine vodene pare koja ovlažuje prostor u kojem se boravi. Pretjerano ovlaživanje nije problem ukoliko postoje izmjene unutarnjeg zraka sa svježim (vanjskim) zrakom. Ukoliko te izmjene nisu dostatne, doći će do rošenja na hladnijim stijenkama.

Nameće se pitanje kako to da se ponovno javljaju problemi koji su relativno nedavno učinkovito riješeni. Najprije treba razjasniti kako do kondenzacije vodene pare iz zraka uopće dolazi. Vlažni zrak smjesa je suštog zraka i vodene pare. Ovisno o temperaturi, suhi zrak može primiti određene apsolutne (!) količine vlage, izraženo u gramima vode po kilogramu vlažnog zraka. Što je zrak topliji, to može apsolutno primiti više vlage. Apsolutnu i relativnu vlažnost zraka ne smije se poistovjećivati. Relativna je vlažnost po definiciji omjer parcijalnog tlaka vodene pare i tlaka zasićenja vodene pare. Pojednostavljeno, to je omjer udjela vodene pare u zraku i one maksimalne količine koju zrak može poprimiti prije nego dođe do magle/orošavanja. Primjera radi, zrak temperature 30°C i relativne vlažnosti 30% sadrži apsolutno (g/kg) više vlage nego zrak temperature 20°C relativne vlažnosti 50%. Temperatura na kojoj mora biti kruta stijenska da bi na njoj došlo do kondenzacije ovisi o temperaturi i relativnoj vlažnosti. Što je relativna vlažnost veća, to je i temperatura rošenja viša, to jest bliža temperaturi okoline, čime se izlažemo većem riziku da dođe do orošavanja po zidovima ili sličnom. Taj problem može se riješiti povećanjem temperature u prostoru, čime povećavamo kapacitet zraka da poprimi vlagu, to jest smanjujemo relativnu vlažnost, i na taj način se više udaljavamo od točke rosišta. Sva ova stanja opisana su u Molliere-ovom hx dijagramu, jednom od osnovnih dijagrama projektiranih termotehničkih sustava.

U počecima moderne građevine vanjska izolacija bila je minimalna (sustavi grijanja mnogostruko snažniji od današnjih) dok je stolarija bila drvena. Loša izolacija dopuštala je da se stijenke unutarnjih zidova spuštaju na niže temperature no što je to danas, jer koliko god unutar prostorije zagrijavali, toplina se neminovno gubi preko relativno loše izolirajućih cigli, drva i žbuka. To je dovodilo do tih nižih temperatura unutarnjih stijenki što je predstavljalo rizik da se i uz relativno malu vlažnost, temperatura stijenke spusti ispod temperature rošenja i dovede do kondenzacije na stijenci. S druge strane, drvena stolarija, koliko god dobro bila napravljena, ona nikad nije potpuno dobro brtvila, to jest uvijek je u prostoriji postojala neka izmjena zraka. Ta izmjena zraka značila je da postoji izmjena i topline i vlage, to jest prostor se hladio, no istovremeno i odvlaživao time što taj hladan zrak nema sposobnost prenositi te količine apsolutne količine vlage, to jest unutar samog stambenog prostora. Na taj način, u nekom prijelazno razdoblju kada se izolacija ipak počela koristiti, problem vlage mnogostruko se smanjio, a sada se ponovno pojavljuje.

Danas se pokušava što manje energije gubiti u zgradi te se zbog toga vanjska ovojnica zgrada prekriva visokoizolirajućim materijalima te se radi na implementaciji rješenja toplinskih mostova, mjesta iznimno intenzivnih gubitaka topline u okolinu. Shodno tome, drvena stolarija zamijenila se PVC ili aluminijskom. Ta stolarija brtvi gotovo idealno, ne dopuštajući pritom izmjene toplog vlažnog unutarnjeg zraka sa svježim vanjskim. Samim time, ukoliko ne postoji umjetni odstranjivač vlage ili prirodno zračenje (otvoreni prozori i/ili vrata) u stanu će biti previše vlage i neminovno će doći do kondenzacije na hladnim stijenkama zidova.

Odabir parametara simulacije

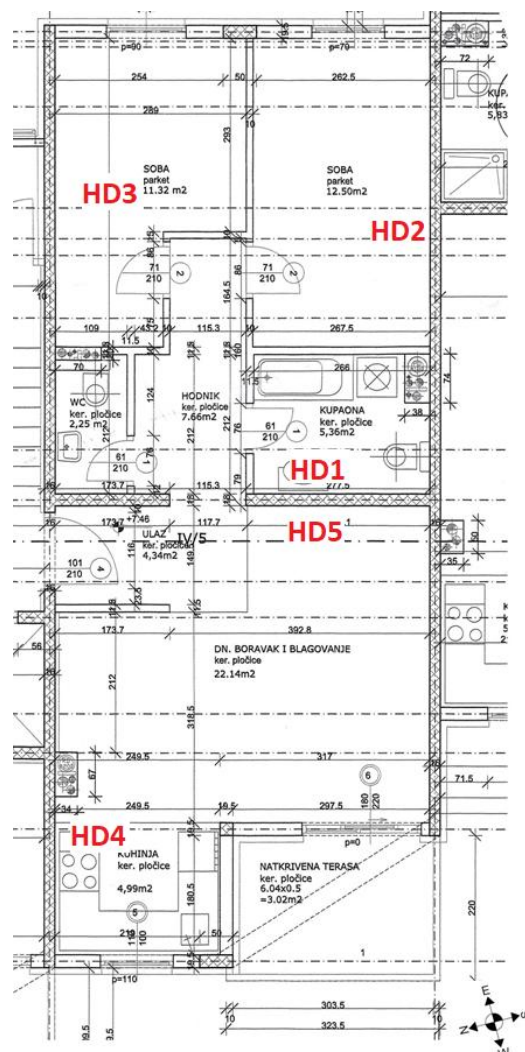
Eksperimentalno istraživanje

Kako je navedeno, prije pristupa numeričkom modeliranju pojedinog događaja, sakupljena su bila stanja unutarnjeg zraka u promatrana četiri stana. Promatrani stanovi bili su opremljeni sa po pet mjerača smještenih na procjenom odabrane podobne lokacije. Podobne lokacije predstavljale su kompromis između podobnosti mjesta sa termotehničkog stajališta, mogućnosti koje uopće pruža sama stambena jedinica te jasno što diskretniji smještaj (iako veoma malih dimenzija) mjerača kako ne bi ometalo uobičajen život stanara. Sve lokacije provjerene su i termovizijskom kamerom kako bi se smanjila mogućnost nepovoljnog smještanja mjerača pored neke temperaturne anomalije (snažnog izvora ili ponora topline). Period u kojem su podaci sakupljeni protezao se kroz šest uzastopnih tjedana, sa intervalom mjerenja od jedne minute. Mjerači su prikupljali podatke o trenutnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti, računajući pritom i temperaturu točke rošnja.

Nakon prikupa i obrade podataka zaključeno je kako 4 stana imaju posve drugačiji životni stil, što je svakako bilo primjećeno i u razgovoru sa stanarima. Poradi diskrecije stanara, podaci o njima te načinu života i ostalim privatnim informacija, ostati će skriveni.

Promatrani događaj

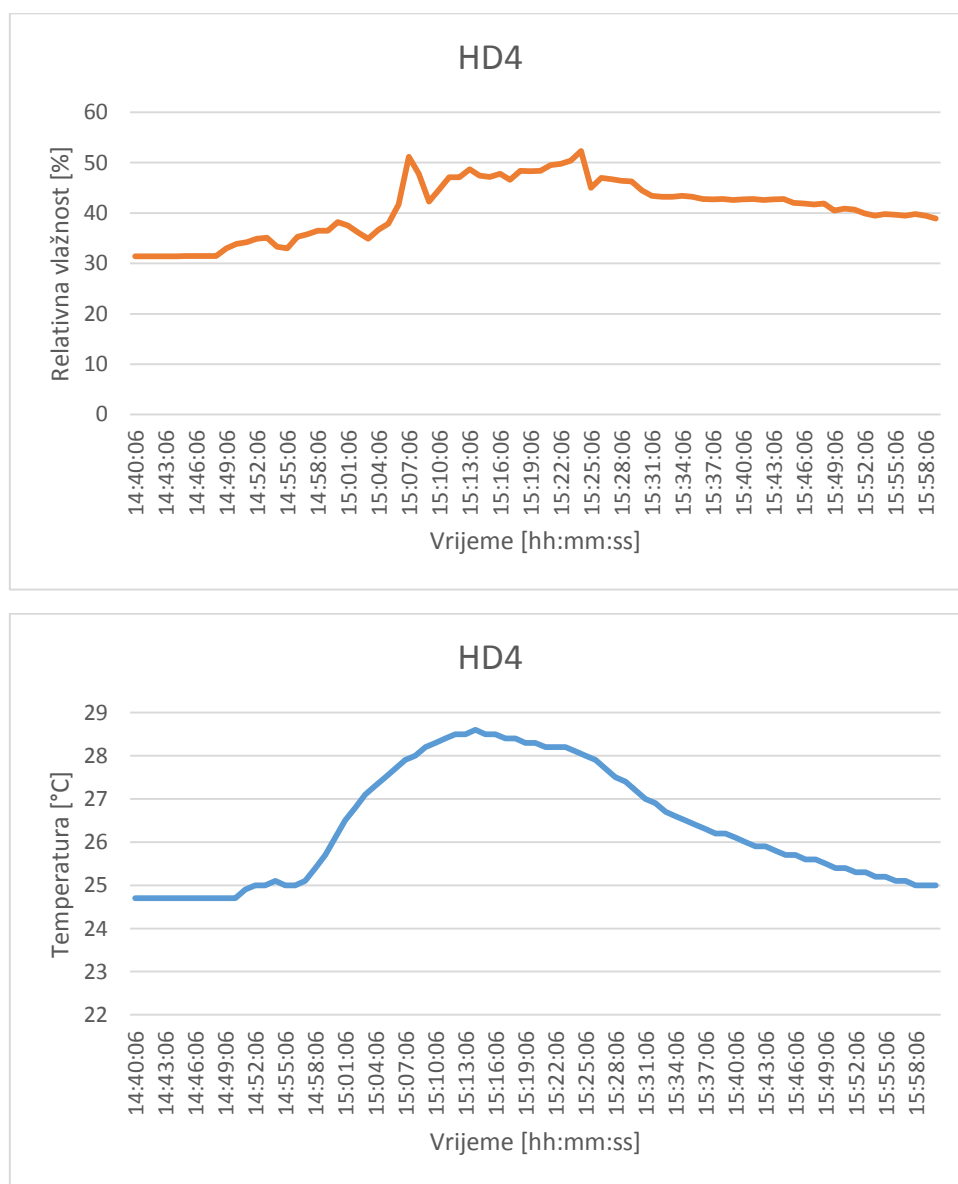
Iz svih obrađenih podataka, naglasak za prikaz numeričkog modeliranja stavljen je na samo jedan stan te na pronalazak specifičnog događaja. Promatrani stan bio je najtopliji i relativno najvlažniji, odvijalo se najviše kuhanja, tuširanja su bila dulja i zbog broja stanara učestalija, dok su provjetravanja bila relativno slabija (no ipak posotjeća). Odjeća je bila sušena na pripadajućem balkonu. Tlocrt stana prikazan je na slici 1. Događaj koji je odabran za analizu prema podacima sa mjerača podsjećao je na proces kraćeg prokuhavanja, primjerice suhomesnatog proizvoda, a grafovi na kojima se temelji odabir prikazani su na slikama 2 i 3, u vremenskom intervalu malo prije i poslije događaja. Na slici 2 prikazan je mjerac HD4 smješten u kuhinji na ormariću nedaleko od štednjaka, izvora topline i vlage u ovom primjeru. Mjerac HD5 prikazan je na slici 3 i prikazuje stanje u dnevnom boravku koji je kako je vidljivo na slici 2 povezan preko blagovaonice sa kuhinjom, dok je na drugu stranu povezan sa hodnikom koji vodi do spavaćih soba i kupaonice. On je služio kao kalibracijski mjerac u primjeru po kojem će ostatak stana biti zanemaren, to jest biti prikazan prema mjeracu, realnom stanju, potencijalno izbjegavajući nesavršenosti modela cijelog stana.



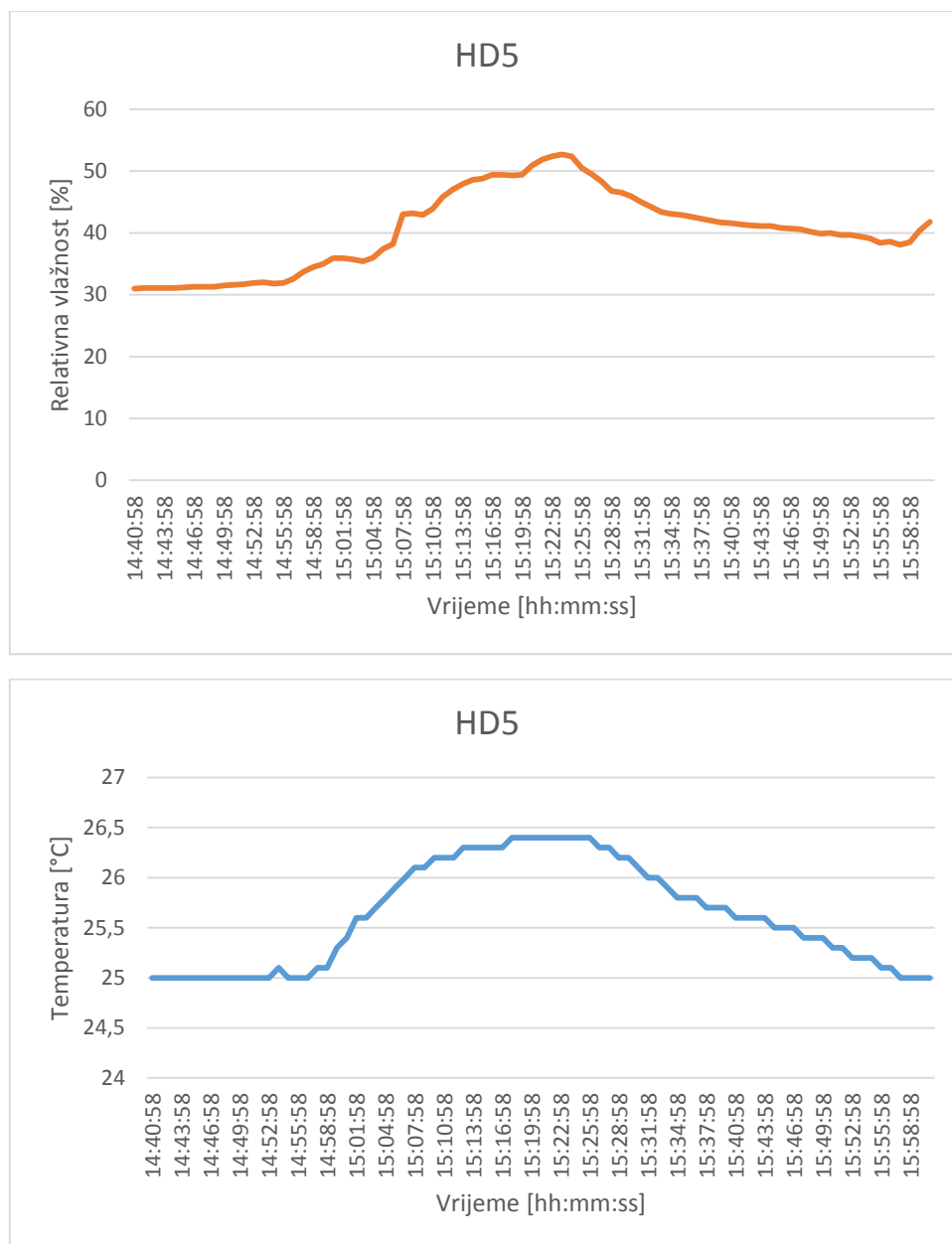
Slika 1: Tlocrt promatranog stana

Na slikama 2 i 3 vidljiva su očitavanja mjerača te je primjena jednaka pojava kod oba i to je porast vlage nakon procesa prokuhavanja za cca 10%, vlage koja očigledno ostaje zatočena unutar stambenog prostora. Temperatura kao zakva ne podiže se značajno, u kuhinji nešto topline zaostaje (mjerač HD4), dok se u dnevnom boravku temperatura vraća na onu sa početka promatranog perioda, zbog relativno velikog prostora koji je spojen sa svim prostorijama te se na taj način teže utječe na njegovo temperaturno stanje.

Zanimljiva je i pojava na slici 3 kod prikaza relativne vlažnosti, na kraju prikazanih podataka vidimo kako relativna vlažnost kreće u ponovni rast. Valja napomenuti kako je uzrok tome vrlo vjerojatno peglanje u stanu, jer se daska za peglanje nalazi točno ispod mjerača. To je događaj koji također generira vlagu u stan, a primjećen je u prikupljenim podacima sa mjerača HD5 svakodnevno.



Slika 2: Podaci sa mjerača "HD4" za promatrani period



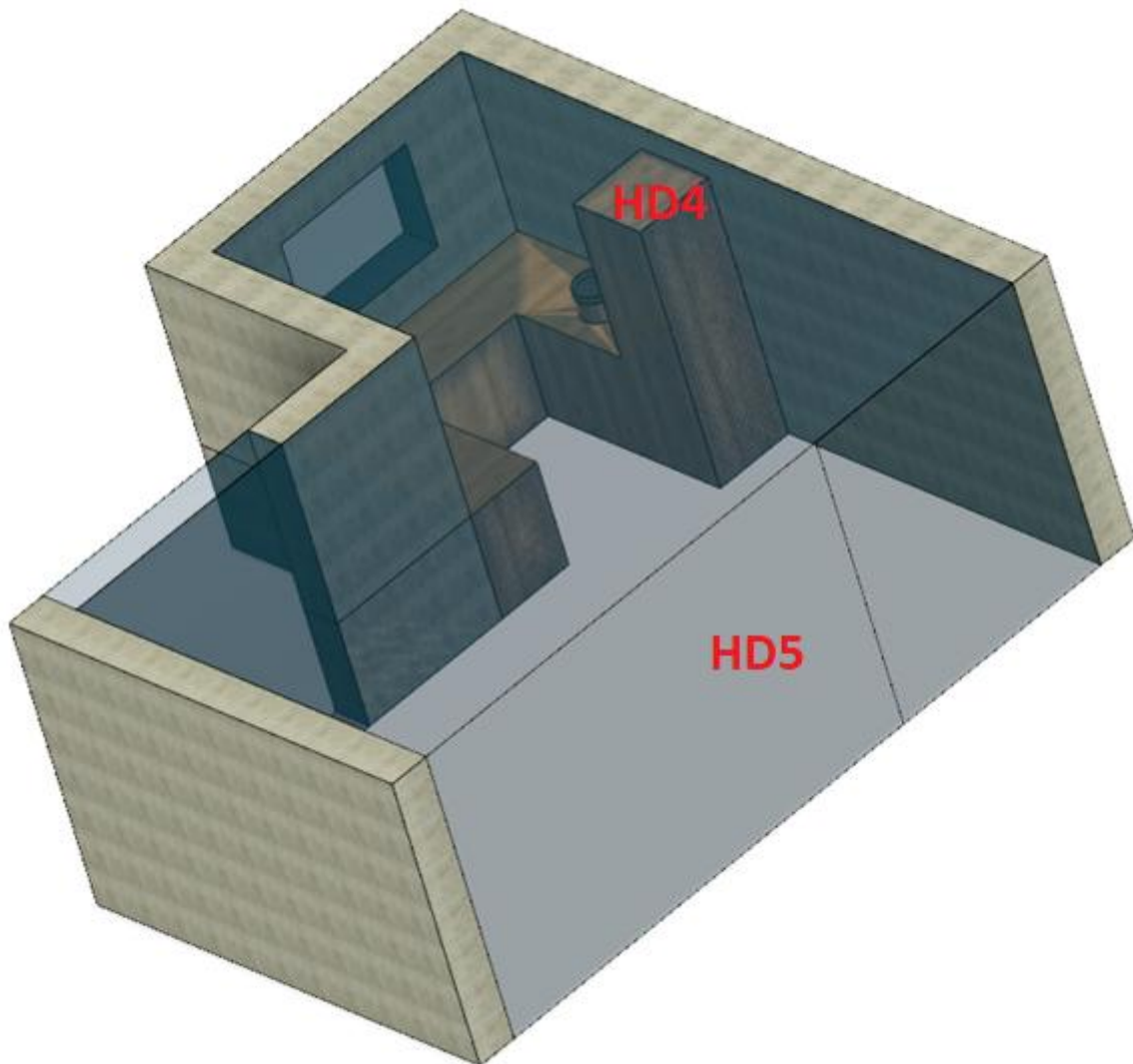
Slika 3: Podaci sa mjerača "HD5" za promatrani period

Numerički model

Kako je navedeno, numeričkim će se modelom prikazati odabrani događaj kako bi se prikazala mogućnost implementacije numeričkih simulacija u poboljšanje projekata i života stanara. Numeričkim bi se simulacijama bi se mogli predviđati specifični događaji to jest mogli bi se prikazati utjecaji budućih stanara unutar stambenih jedinica, sve do razine prilagodbe stana specifičnim potrebama budućih stanara.

Model stana koji je korišten za prikaz metode prikazan je na slici 4. Kako je prethodno navedeno, simulacija je uključivala samo dio stana čiji je rub bio kalibriran mjeračem HD5. Taj dio stana uključivao je kuhinju, blagovaonicu te veći dio dnevnog boravka, zajedno sa svim osnovnim građevnim elementima. Također, valja napomenuti kako su paralelno uz prikupljanje podataka o stanju zraka unutar prostora prikupljeni i vanjski uvjeti (u petominutnom zapisu), temperatura i relativna vlažnost. Podatak o temperaturi korišten je kao rubni uvjet u modelu, dok podatak o vlažnosti ne utječe na proračun jer u model nije bila implementirana izmjena zraka sa okolinom, koje

praktično i nema dok se ne otvore prozori ili vrata. Temperature hodnika, susjednih zgrada, stropa te poda date su iskustveno.



Slika 4: Model dijela stana koji obuhvaća kuhinju te dio blagovaonice i dnevnog boravka sa označenim mjeračima

Tlocrtne dimenzije modela odgovaraju stvarnom stanju stambenog prostora dok su debljine i karakteristike vanjske ovojnice pretpostavljene sukladno praksi. Model je ograničenih dimenzija zbog jednostavnosti proračuna i mogućnosti dobre kalibracije ruba prostorije, bez detaljnog uključivanja cijelog stambenog prostora u proračun. Mjerač „HD5“ time nam služi kao podatak na rubu čime eliminiramo neznanja detalja za predviđanje ponašanja ostalih prostorija.

Simulacija događaja

Promatrani slučaj biti će simuliran za vremensko razdoblje duljine 40 minuta, od 14:50 do 15:30 dana 19/03/2018. Slučaj opisujemo kao jedno od niza kuhanja taj dan, nešto kraće no intenzivnije, trajanje maksimalnog intenziteta kuhanja cca 18 minuta. To kuhanje samo je jedno od nekoliko generiranja vlage i topline iz kuhinje taj dan te ćemo rezultate simulacije pokušati primjeniti na tok cijelog dana unutar stambene jedinice.

Simulacija će biti podijeljena i opisana u četiri dijela, radi lakšeg snalaženja i prikaza karakterističnih situacija. Prvi dio prikazivati će početno stanje, stanje u kojem se prostor nalazi na početku simulacije, u 14:50. Stanje za taj trenutak biti će određeno stacionarnim proračunom. Sljedeća je faza „uključivanje štednjaka“, to jest početak procesa kuhanja. On će biti simuliran na način da se posuda u prvih 10 minuta postepeno zagrijava, generirajući pritom sve više i više vlage. Treća faza je faza u kojoj je posuda progrijana te je generiranje pare konstantno pa je to stanje u kojem zapravo nema promjene na samoj posudi, to jest štednjaku. Ta faza traje 16 minuta. Posljednja faza simulira fazu kada štednjak isključujemo te se posuda hladi, a generacija pare smanjuje. Proces je također napravljen da se postepeno posuda hladi i traje do kraja simulacije, to jest 14 minuta.

Sve faze biti će detaljnije opisane u nastavku redom kojim se odvijaju u simulaciji:

- Početno stanje – vrijeme proračuna $t = 0$ s
- Faza zagrijavanja – vrijeme proračuna $t = 0$ do 10 min
- Faza intenzivnog kuhanja – vrijeme proračuna $t = 10$ do 26 min
- Faza hlađenja – vrijeme proračuna $t = 26$ do 40 min

Tok simulacije

Početno stanje ($t = 0$ s)

Simulaciju započinjemo proračunom stacionarnog stanja prostorije, uz određene rubne uvjete i pretpostavke. Stacionarno stanje znači da proračun dobivamo bez vremenske komponente, a sve to kako bi postavili stanja unutar modela čim bliže onim stanjima modela koji odgovaraju realnim uvjetima preuzetim sa mjerača, za odabrani početni trenutak ($t=0$). Korišteni su sljedeći parametri pri postavljanju simulacije u početno stanje:

- vanjska temperatura (preuzeta sa meteorološke stanice) – 4°C
- temperatura hodnika – 18°C
- temperatura zidova na grijane prostorije – 22°C
- temperatura stropa i poda – 20°C

Bitno je napomenuti kako je utjecaj ljudi te uređaja unutar stambenog prostora (hladnjak, televizija, igraća konzola itd.) implementiran izvorom topline po čitavoj domeni zraka u iznosu od 12 W/m^3 . Vлага je postavljena prema mjeraču HD5, bez izvora po domeni (tokom proračuna izvor će biti posuda s vodom).

Valja još jednom napomenuti kako je ovime dobivano početno stanje proračuna, dakle prvi korak u simulaciji koji predstavlja vrijeme 14:50 proračuna ili nultu minutu.

Zanimljivo je primjetiti kako ovaj dio stambene jedinice ima relativno male gubitke topline prema okolini, što zbog dobre izolacije, što zbog male izloženosti hladnom vanjskom zraku (nalazi se između dvije susjedne zgrade).

Drugi dio – faza zagrijavanja ($t=0$ do 10 min)

Proces kuhanja biti će simuliran kao generiranje toplog i vlažnog zraka iz tople posude koja se nalazi na realnoj lokaciji štednjaka u stambenoj jedinici. Dio zagrijavanja i početka isparavanja obuhvaća proces uključivanja štednjaka, to jest generaciju topline u posudi i pokretanje procesa isparavanja vode. Progrijavanje posude do potpuno zagrijane, time dovođenje generiranja vlage na najvišu razinu, prema pretpostavci uz referencijiranje na mjerač HD4 trajalo je 10 minuta. Sam tok temperatura i generiranja pare dan je u tablici 1.

Tablica 1 Parametri procesa kuhanja pri zagrijavanju

Vrijeme od: [sek]	Vrijeme do: [sek]	Temperatura posude [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura generirane vlage [$^{\circ}\text{C}$]	Brzina izlaza iz posude [m/s]
0	60	35	35	0
60	120	45	45	0
120	240	55	55	0,004
240	360	65	65	0,008
360	480	70	70	0,01
480	600	78	78	0,016

U tablici 1 vidimo kako je u relativno jednakim intervalima povećavana temperatura, a pri temperaturi od 55°C započeto je polagano isparavanje vode, koja dostiže svoj maksimum pri temperaturi od 78°C i brzini od $0,016 \text{ m/s}$.

Temperatura od 78°C odabrana je kao temperatura koja će uključiti činjenicu da se isparena voda miješa sa zasigurno nešto hladnijim zrakom izvan posude. Ta aproksimacija potrebna je obzirom da

proračun ne uključuje promjene agregatnih stanja, već se na izlazu iz posude generira veoma vlažni i topao zrak. Slična aproksimacija provedena je za posudu, koja zbog neke svoje debljine pada sa temperature 100°C unutar posude na neku manju, ovdje određenu jednaku temperaturi vlažnog i toplog zraka iz posude.

Zanimljivo je proučiti kako stanje na mjerачу HD5, smještenom u dnevnom boravku, praktično nije došlo do nikakve promjene čitavih 10 minuta koliko je proces zagrijavanja posude trajao, što je vidljivo iz tablice 2.

Tablica 2 Kretanje stanja zraka mjerача HD5 u drugoj fazi

Vrijeme od: [sek]	Vrijeme do: [sek]	Temperatura mjerача HD5 [°C]	Relativna vlažnost mjerача HD5 [°C]
0	60	25	31,5
60	120	25	31,5
120	240	25	31,9
240	360	25	31,9
360	480	25	32,6
480	600	25,1	34,5

Kako je prethodno navedeno, početno stanje (trenutak $t = 0$ s) računan je stacionarnim proračunom, bez promjene kroz vrijeme, kako bi se dobilo to početno stanje prostorije. Ovaj i svi sljedeći djelovi proračuna nestacionarni su, to jest na svaki vremenski trenutak utjecaj ima onaj prethodni trenutak. Na taj način izrađene su potpune animacije čiji će sažetak biti dan na kraju ovog poglavlja.

Treći dio – faza intenzivnog kuhanja

Nakon faze zagrijavanja, slijedila je relativno stabilna faza generacije topline i vlage sljedećih 16 minuta, gdje su i brzine generiranja pare i temperature bile konstantne vrijednosti, dakle kuhalo je ujednačeno. Jedinu promjenu u modelu unosio je kalibracijski mjerач, korigirajući promatrani model prema ostatku stambene jedinice, to jest prema realnom stanju na tom mjestu. Zbog sada već formiranog strujanja u modelu, dio zraka napuštao je prostor, a zbog zakona fizike, ukoliko neka količina tvari napusti prostor, jednaka se količina mora vratiti. Stoga sve što je napuštalo prostor kroz dnevni boravak, u prostor se i vraćalo, s time da je sav zrak koji se vratio bio kalibriran na vrijednosti mjerача HD5, koje su prikazane u tablici 3. Vrijednosti u tablici odgovaraju vrijednostima sa slike 3, prethodnog poglavlja.

Tablica 3 Kretanje stanja zraka mjerача HD5 u trećoj fazi

Vrijeme od: [sek]	Vrijeme do: [sek]	Temperatura HD5 [°C]	Relativna vlažnost HD [%]	Apsolutna vlažnost [kg _{vode} /kg _{zraka}]
600	720	25,4	35,9	0,007228
720	840	25,6	36	0,007336
840	960	25,8	36	0,007425
960	1080	26	38,2	0,00798
1080	1200	26,1	43,2	0,009094
1200	1320	26,2	44	0,00932
1320	1440	26,3	47	0,010026
1440	1560	26,3	48,5	0,010351

Četvrti dio – faza hlađenja

Posljednja je faza uključivala polagano hlađenje posude te smanjenje generiranja vodene pare (posljedica hlađenja). Prema podacima mjerača taj događaj krenuo se dešavati nakon 26 minuta od početka proračuna te je procjenom trajao sve do 40 minute, nakon toga uslijedilo je izuzetno sporo hlađenje posude. Prikaz toka hlađenja posude te smanjenja generacije pare i topline dan je u tablici 4.

Tablica 4 Tok hlađenja posude i generacije pare tokom faze hlađenja

Vrijeme od: [sek]	Vrijeme do: [sek]	Temperatura posude [°C]	Temperatura generirane vlage [°C]	Brzina izlaza iz posude [m/s]
1560	1680	78	78	0,016
1680	1800	75	75	0,016
1800	1920	70	70	0,014
1920	2040	60	60	0,008
2040	2160	55	55	0,004
2160	2280	50	50	0
2280	2400	45	45	0
2400	2640	40	40	0

Također, podaci kalibracijskog mjerača HD5 dani su u tablici 5.

Tablica 5 Podaci kalibracijskog mjerača HD5 tokom četvrte faze

Vrijeme od: [sek]	Vrijeme do: [sek]	Temperatura HD5 [°C]	Relativna vlažnost HD5 [%]	Apsolutna vlažnost HD5 [kg _{vode} /kg _{zraka}]
1560	1680	26,3	49,4	0,010546
1680	1800	26,4	49,3	0,010588
1800	1920	26,4	50,9	0,010938
1920	2040	26,4	52,4	0,011266
2040	2160	26,4	52,4	0,011266
2160	2280	26,3	49,5	0,010568
2280	2400	26,2	46,8	0,009923
2400	2640	26,1	45,9	0,009671

Analiza dobivenih rezultata

Dobiveni rezultati simulacije biti će prikazani na slikama za karakteristične trenutke, početak/kraj svake od četiri faze te za neke karakteristične trenutke tokom faza, kako bi se detaljno mogla analizirati simulacija. Također, rezultati će biti dani u obliku prikaza raspodjela temperatura i relativne vlažnosti za čitavu domenu, kao i za dva presjeka.

Analiza temperatura

Analizu možemo započeti od početnog trenutka, $t = 0$. Taj trenutak dobiven je stacionarnim proračunom, rješavanjem problema neovisnog o vremenu kako bi postigli parametre domene zraka koji odgovaraju podacima sa mjerača. HD5 i HD4. Primjetno je prema prikazima slika 5, 12 i 19 kako je temperatura po čitavoj domeni ujendačena, nešto niža u blizini poda i stropa te jasno u blizini prozora i vrata gdje je još niža, no zbog visokog stupnja izolacije moderne stolarije to je samo nekoliko stupnjeva. Temperatura koja vlada u prostoru jest pretežito oko 25.5°C do 26°C .

Sljedeći trenutak koji je prikazan, na slikama 6, 13 i 20, prikazuje trenutak 5 minute, na polovici zagrijavanja posude. Vidljivo je kako je posuda dosta intenzivan izvor topline te kako se polako pri vrhu prostorije širi topli zrak što ga generira posuda. Ta fronta koja se širi postiže temperature i do 30°C , što je posebno dobro vidljivo u presjeku 2 na slici 20.

Na kraju faze zagrijavanja, nakon 10 minuta, vidimo prema slikama 7,14 i 21 intenzivnije širenje te iste tople fronte, sa još većim intenzitetom generiranja topline u kuhinji, te frontom koja prelazi i temperature od 35°C . Na slikama treba obratiti posebnu pažnju na skalu, jer zbog različitosti skala na prikazima za 5 i 10 minuta, može djelovati kako je intenzitet s vremenom smanjen, iako je to netočno, samo je veća količina prosotra progrijana.

Sada je započela faza konstantnog kuhanja te proučavamo trenutak nakon 6 (od početka 16) minuta te faze kuhanja. Prikaz je dan na slikama 8, 15 i 22. Temperature fronte koja se širi zrakom iznad dostigla je već izrazito visoku temperaturu i širi se prostorom, ne samo promatranim već i čitavom stambenom jedinicom. Prema slikama 9, 16, 23 možemo primjetiti da vlada gotovo isto stanje i sljedećih 10 minuta, mali temperaturni rast (manje od 1°C) zabilježen je na mjeraču, te ne možemo očekivati neke veće promjene u tom pogledu niti u simulaciji, pogotovo zato što topli zrak koji je lakši od hladnog se praktično „zalijepio“ za strop i teško se širi čitavom domenom, to jest prema tlu. Također, zbog relativno intenzivne generacije pare, ona „prolazi“ kroz prostor šireći se pritom čitavom stambenom jedinicom, no zaostaje na jednom mjestu, na zidu pored ulaznih vrata, što ovdje nije posebno značajno (možda nekoliko stupnjeva viša temperatura u kutu) no biti će kod proučavanja vlage.

Sljedeće slike, 10, 17 i 24 prikazuju polovinu faze hlađenja, to jest 32 minutu same simulacije. Vidljivo je smanjenje intenziteta izvora topline i pare, a time i bolje progrijavanje stana, uz smanjenje temperature i brzine strujanja te glavne fronte.

Posljednje slike simulacije 11, 18 i 25 prikazuju kako se stambena jedinica „oporavlja“ od intenzivno predane topline od posude, koja se sada širi čitavom domenom podižući temperaturu unutar jedinice ukupno za nešto više od 1°C što je velik utjecaj od samo jednog kuhanja. Tako nakon procesa kuhanja, sa aspekta temperature, imamo nešto topliju čitavu stambenu jedinicu, dovoljno da sa više ovakvih procesa u danu čak i rasteretimo termotehnički sustav.

Analiza vlage

Stanje vlage u početnom trenutku prikazano je na slikama 26, 33 i 40. Iako odaje dojam velike raznoslikosti u relativnoj vlažnosti po domeni, zapravo je skala relativno uska, što čini razlike naizgled mnogo većima. Prostorija je relativne vlažnosti cca 30%.

Pregledavanjem slika 27, 34 i 41 koje odražavaju stanje nakon 5 minuta od početka simulacije, dakle na pola vremena potrebnog za zagrijavanje posude. Vidljivo je kako proširivanjem raspona skale, boje po prosotriji dolaze na ujednačeniju razinu. Valja primjetiti na slici 6 kako kod izvora, posude, relativna vlažnost nije izrazito visoka. Taj će se „fenomen“ provlačiti kroz cijeli proračun zbog načina generiranja pare, ne kao pare već kao zrak sa velikim udjelom vlage, koji je ujedno i visoke temperature što mu obara relativnu vlažnost, no čim se taj zrak krene mješati situacija u dovoljnoj mjeri odgovara procesu isparavanja, stvaranja magle te ponovnog isparavanja koje se inače odvija pri kuhanju. Primjetiti također treba kako, obzirom na relativno visoki intenzitet istrujavanja iz posude, u dva, od što će se kasnije pokazati tri, kritična mjesta već nešto viša razina vlage, iznad 40%. Ta dva mjesta su rubni dio kuhinje, izložen hladnoći vanjskog zraka, te rubni dio blagovaone, koja je zidom odvojena od ulaznih vrata, te je tamo i hladnije i mjesto gdje zrak, a pogotovo vlaga teže cirkuliraju pa se stoga zadržavaju na tom mjestu.

Slike 28, 35 i 42 prikazuju 10 minuta proračuna, kada je intenzitet kuhanja već visok. Najbitnija pojava sada je pojava trećeg specifičnog mjesta gdje se javlja povišena vlaga, na rubu gdje se nalaze balkonska vrata. Iznosi se na tim kritičnim mjestima penju i na više od 60%, a pri tome ne treba s uma skinuti činjenicu da je ovaj stan izrazito pregrijan (projektne temperature iznose 22°C, ovaj stan dostiže temperature veće od 26°C u normalnim situacijama). Također, temperatura zraka kod balkonskih vrata nego u kutu blagovaone, što znači da je u blagovaoni uz jednaku relativnu vlažnost, zapravo više vlage i postoji veća opasnost od rošenja. Kuhinja je također dobro progrijana, pa ni ondje situacija nije idealna.

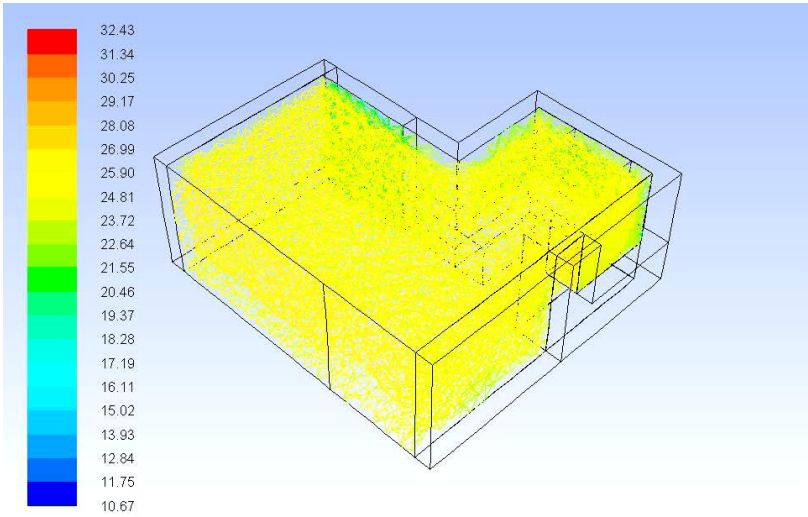
Slike 29, 36 i 43 pokazuju trenutak 16 minute, gdje se svi prije spomenuti efekti i dalje manifestiraju. Pažljivim pregledom skale, vidimo da je relativna vlažnost u samom stanu narasla, kao i u rubnim, problematičnim djelovima.

Nakon 26 minuta, to jest kraja faze gdje se jednolično, no intenzivno kuha, svi efekti i dalje se pojačavaju, pa se tako dosežu vrijednosti i do 90% relativne vlažnosti, što gotovo da garantira rošenje po vratima balkona (manji problem, voda ne djeluje na staklo ni PVC), no u kutu blagovaone jako se lako javi problem. U nešto manjem intenzitetu taj je problem postojeći i u kuhinji, iznad prozora. Prikazano na slikama 30, 37, 44

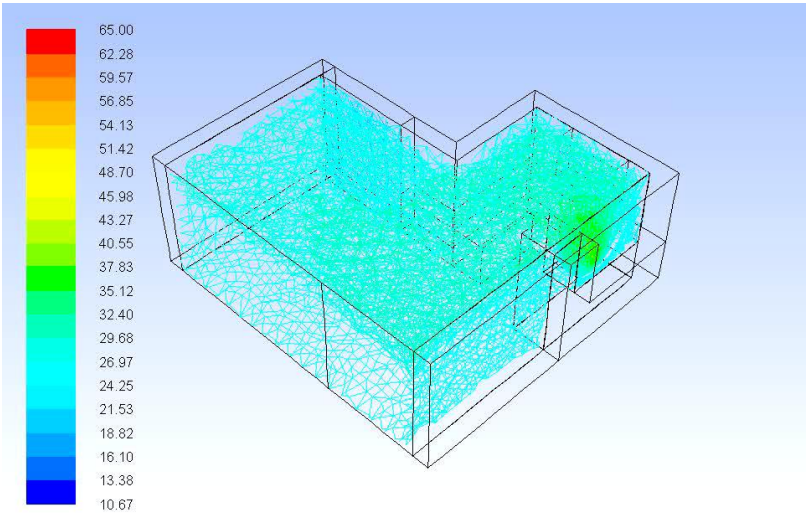
Kuhanje je prestalo, a 6 minuta nakon toga (32 minuta proračuna) prema slikama 31, 38 i 45 vidi se smanjenje generacije vlage. Blagovaona širi vlagu prema van, dok je uz balkonska vrata i dalje na visokoj razini. Također, smanjenjem intenziteta širenja vlage i topline, ona može slobodno ostajati u kuhinji te se javljaju pojačane zone vlage na svim zidovima izloženima vanjskom zraku (vani je i dalje 4°C).

U posljednjem setu slika 32, 39 i 46 vidimo kako se situacija smiruje, no mora biti primjećeno kako je vlaga oko vioskih 50% u cijelom promatranom prostoru, što je uz povećanje temperature prostorije još značajnije, a relativan je porast 20%, što bez daljnje sanacije može postati problem.

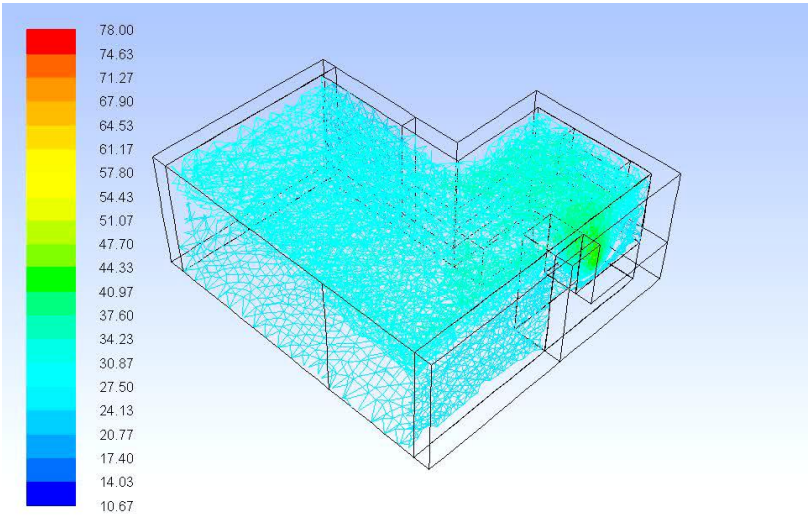
Raspodjela temperatura po čitavoj domeni:



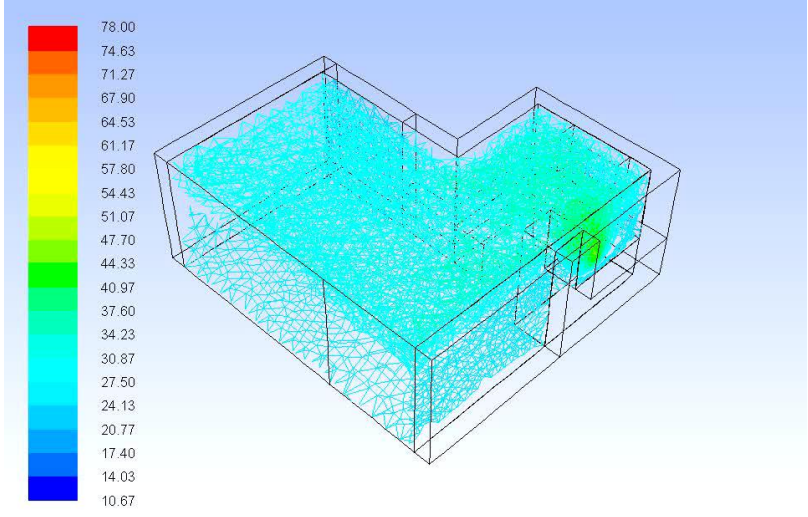
Slika 1 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 0$ s



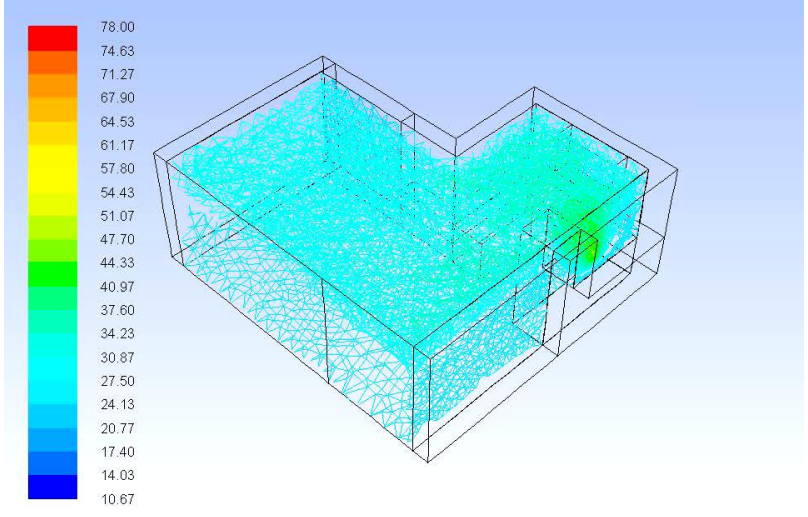
Slika 2 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 300$ s



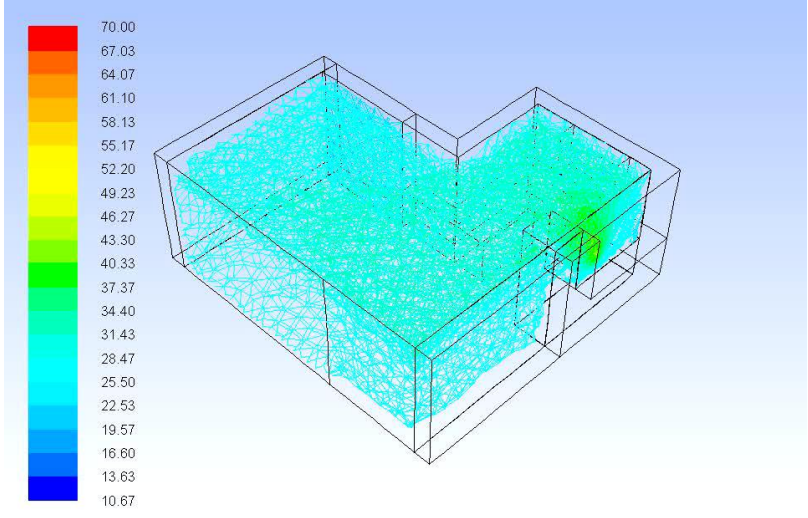
Slika 3 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 600$ s



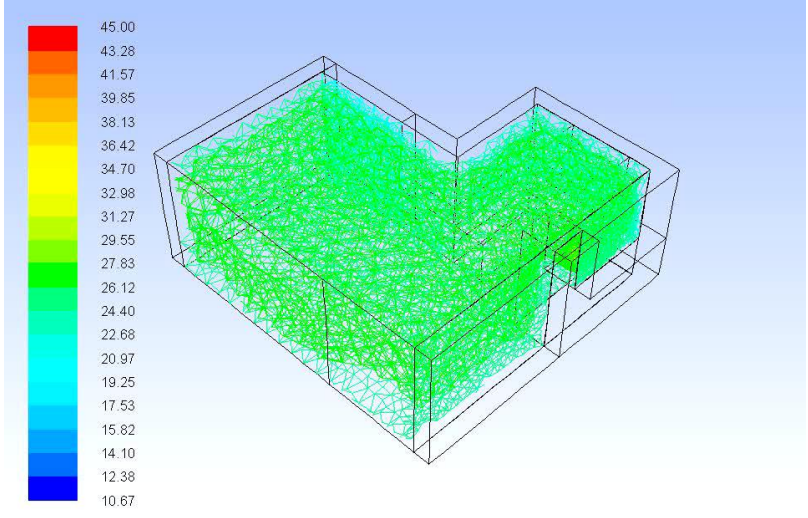
Slika 4 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 960$ s



Slika 5 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 1560$ s



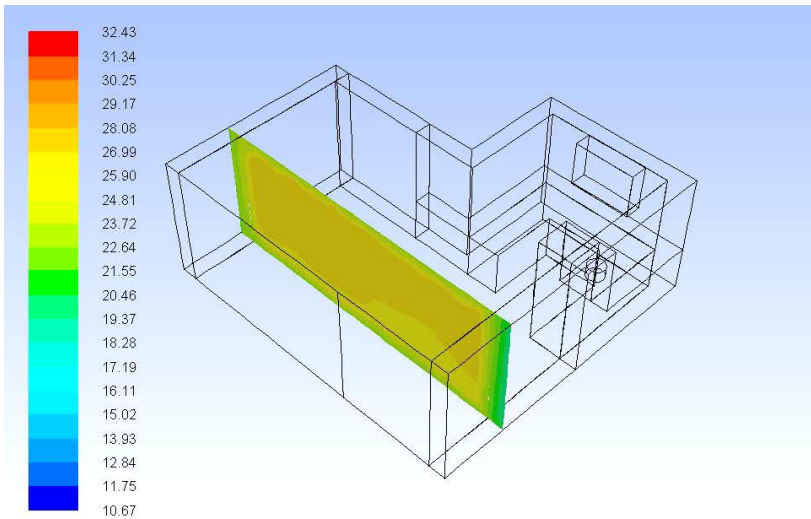
Slika 6 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 1920$ s



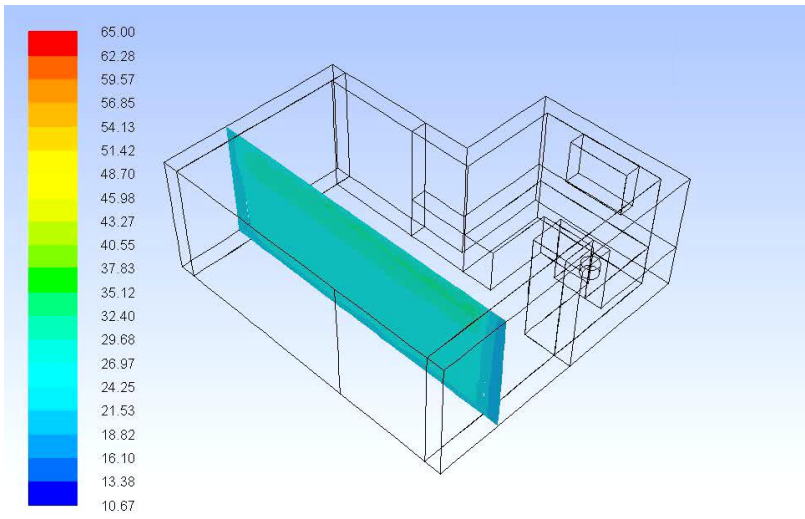
Slika 7 *Raspodjela* temperatura u čitavoj domeni u trenutku $t = 2400$ s

Napomena: za proučavanje svih prikaza obavezno je referiranje na priloženu skalu, koja je zbog složenosti proračuna i bolje reprezentacije podataka postavljena na automatski raspon

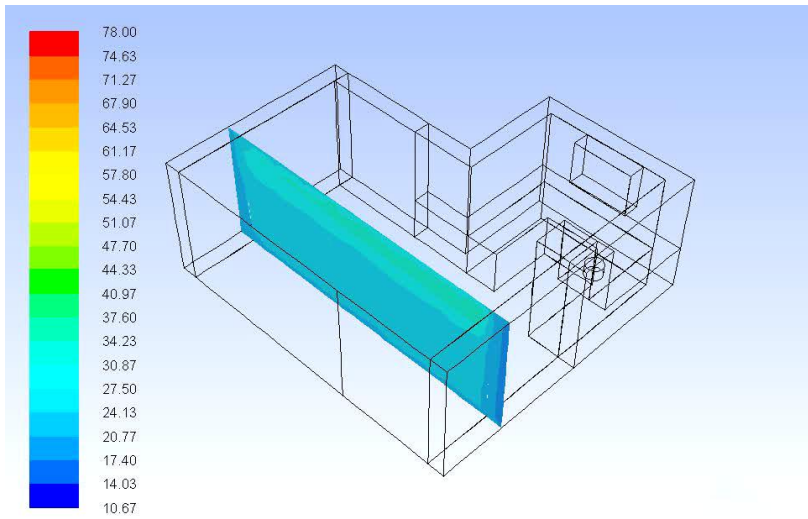
Raspodjela temperatura na presjeku 1:



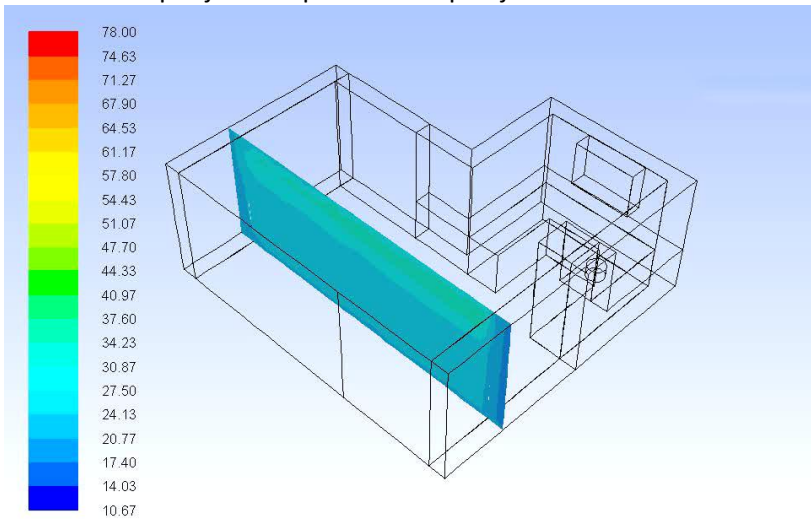
Slika 8 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 0$ s



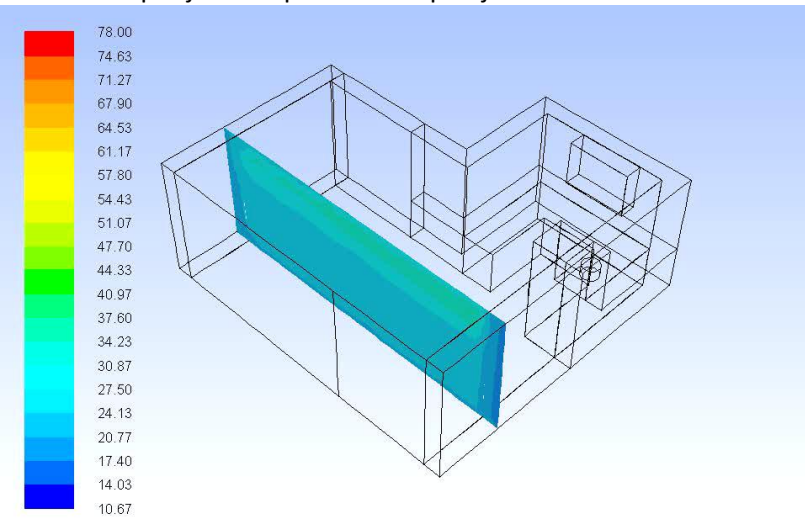
Slika 9 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 300$ s



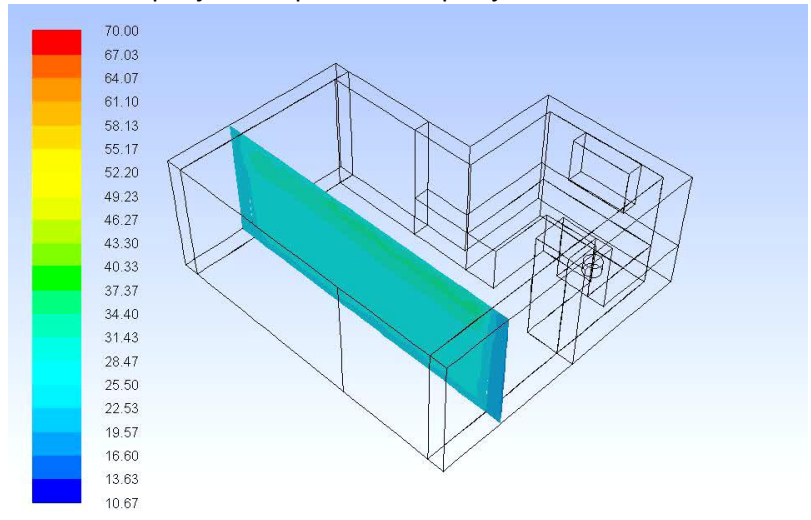
Slika 10 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 600$ s



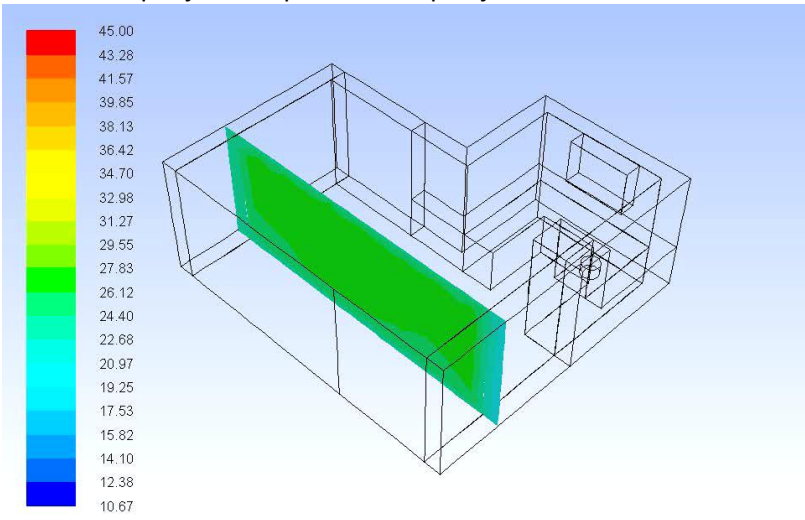
Slika 11 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 960$ s



Slika 12 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 1560$ s



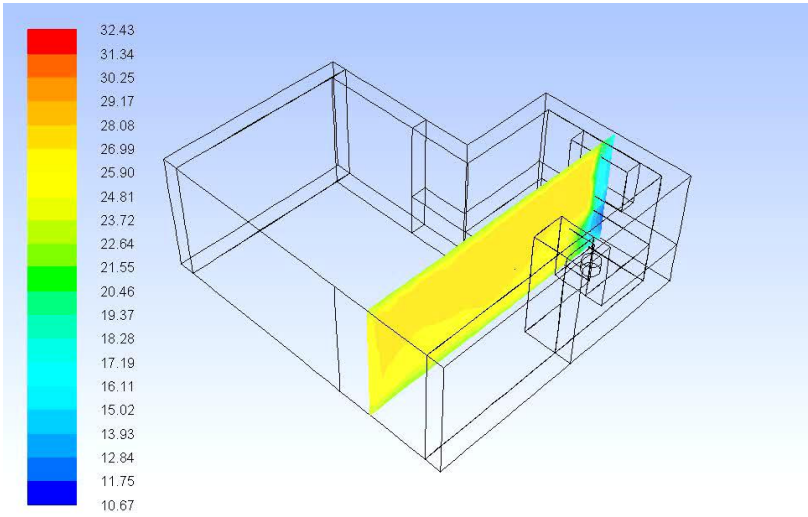
Slika 13 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 1920$ s



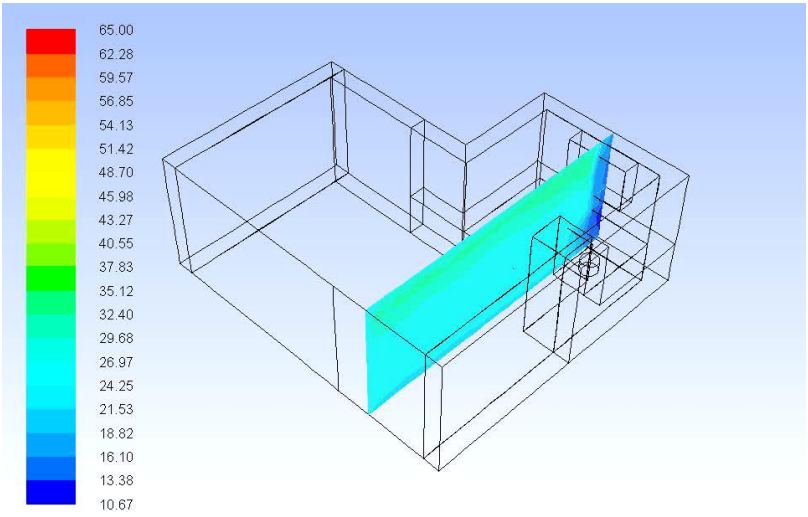
Slika 14 Raspodjela temperatura na presjeku 1 u trenutku $t = 2400$ s

Napomena: za proučavanje svih prikaza obavezno je referiranje na priloženu skalu, koja je zbog složenosti proračuna i bolje reprezentacije podataka postavljena na automatski raspon

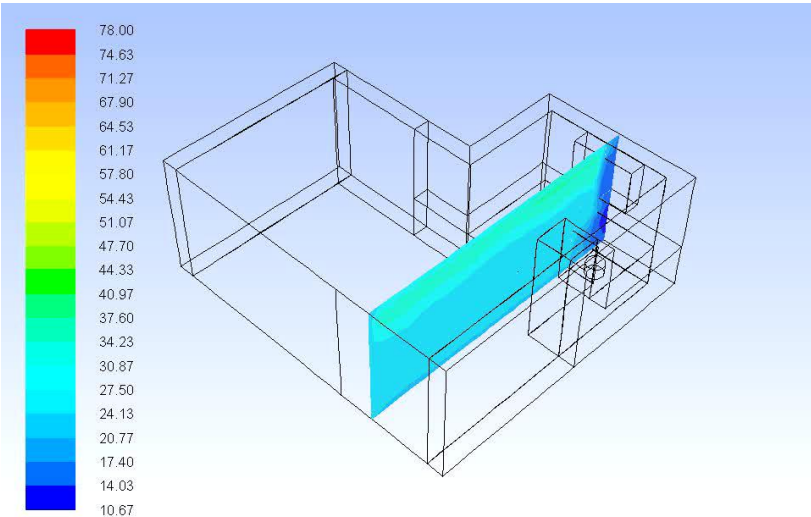
Raspodjela temperatura na presjeku 2:



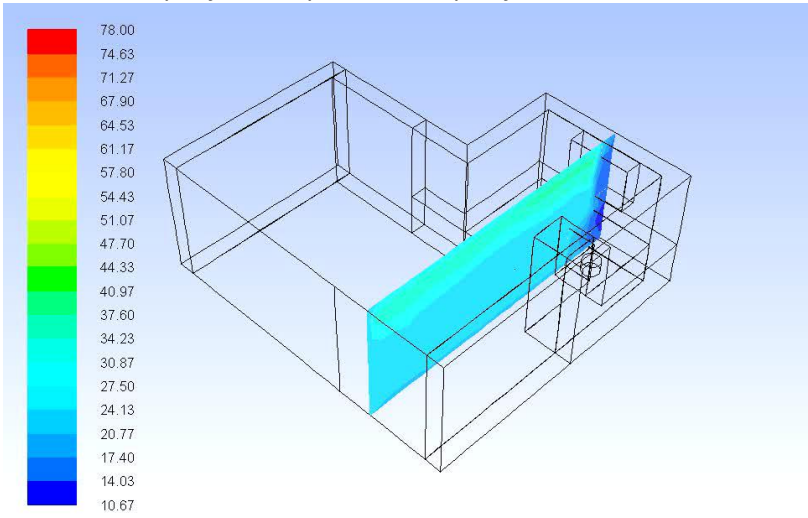
Slika 15 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 0$ s



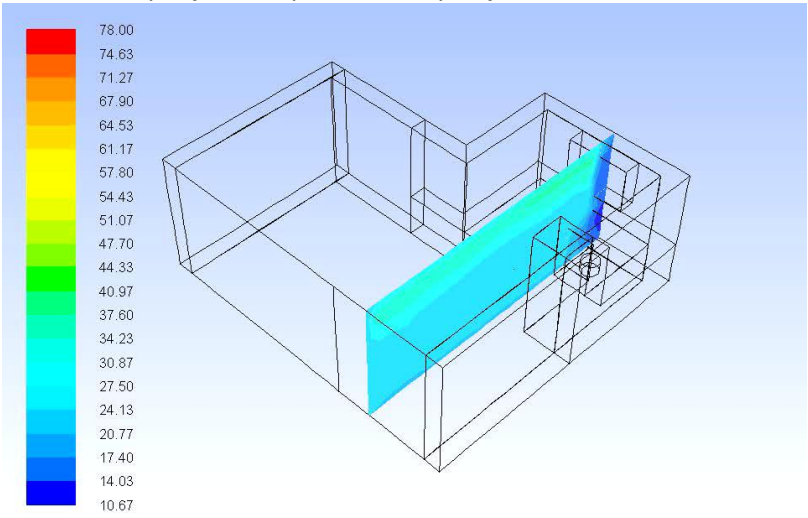
Slika 16 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 300$ s



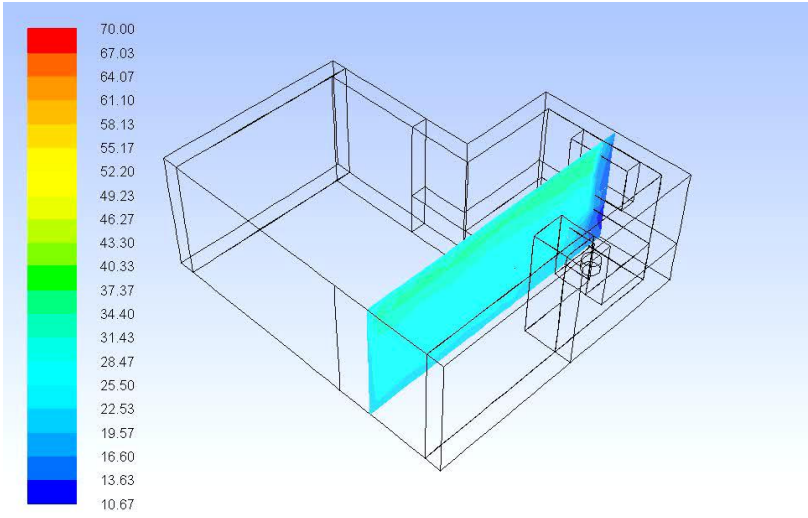
Slika 17 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 600$ s



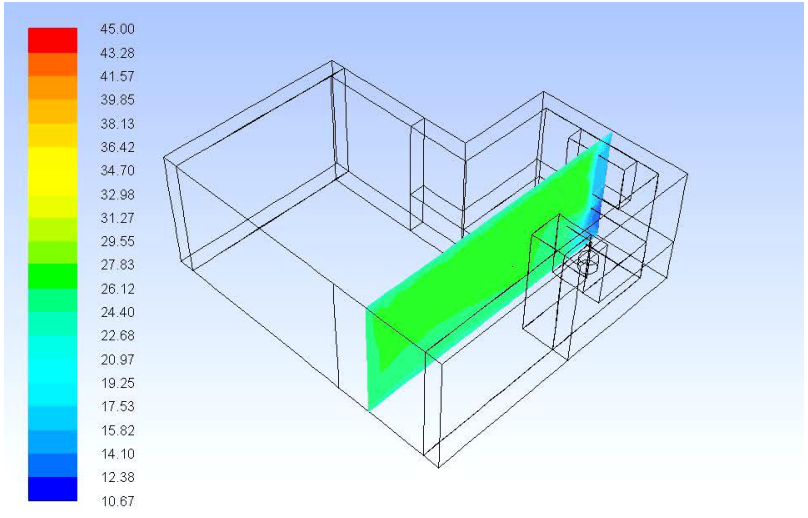
Slika 18 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 960$ s



Slika 19 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 1560$ s



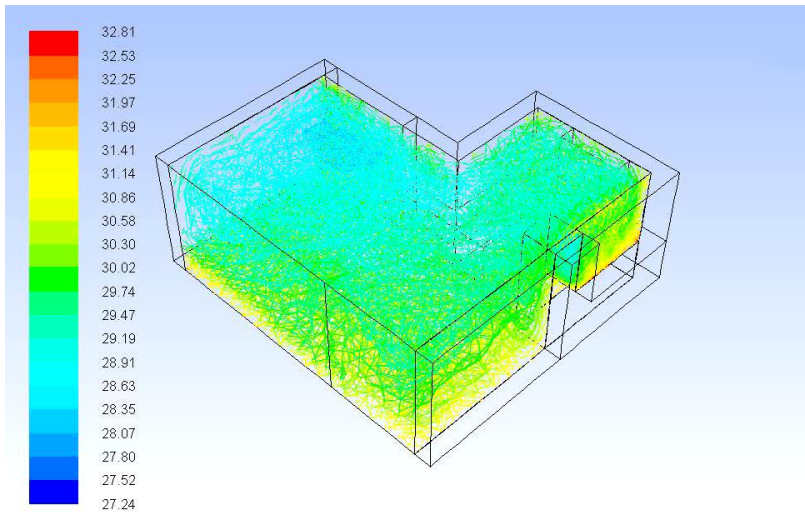
Slika 20 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 1920$ s



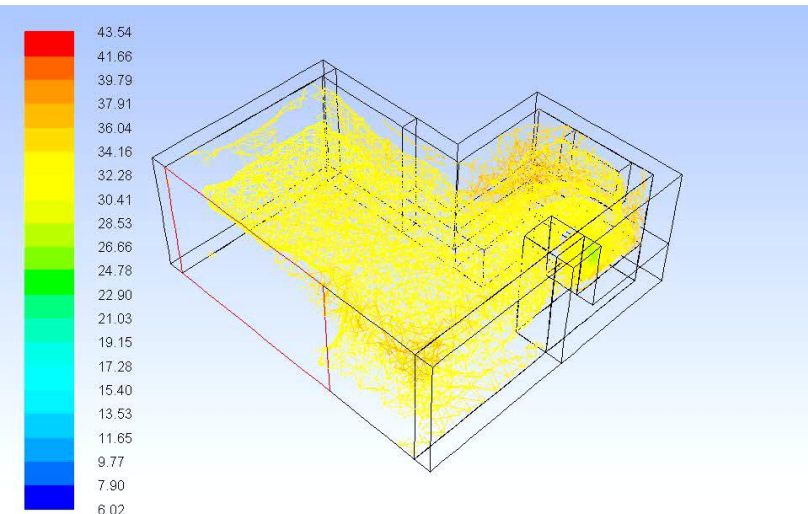
Slika 21 Raspodjela temperatura na presjeku 2 u trenutku $t = 2400$ s

Napomena: za proučavanje svih prikaza obavezno je referiranje na priloženu skalu, koja je zbog složenosti proračuna i bolje reprezentacije podataka postavljena na automatski raspon

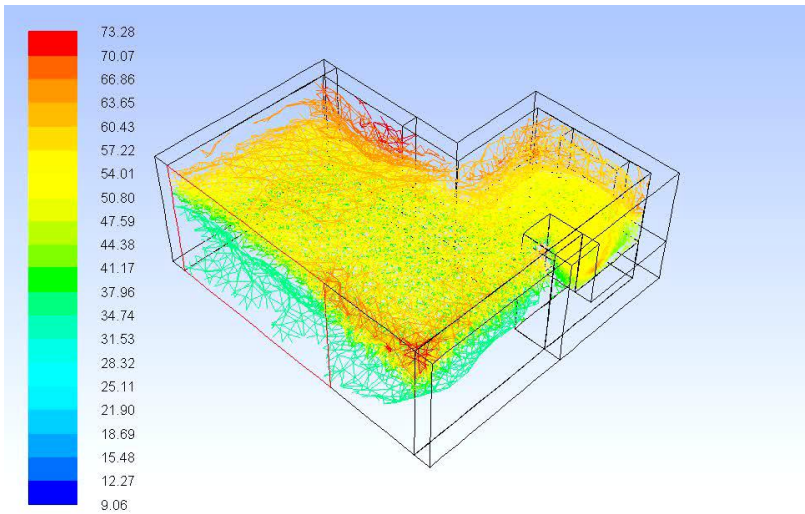
Raspodjela relativne vlažnosti po čitavoj domeni:



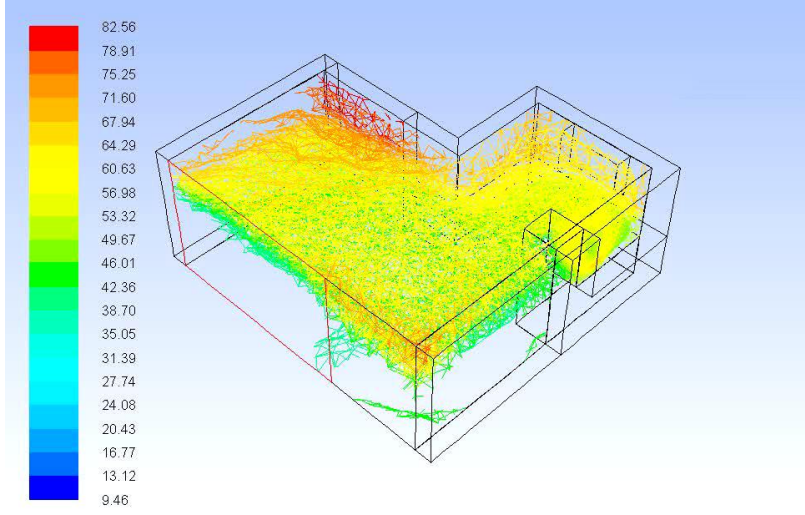
Slika 22 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 0$ s



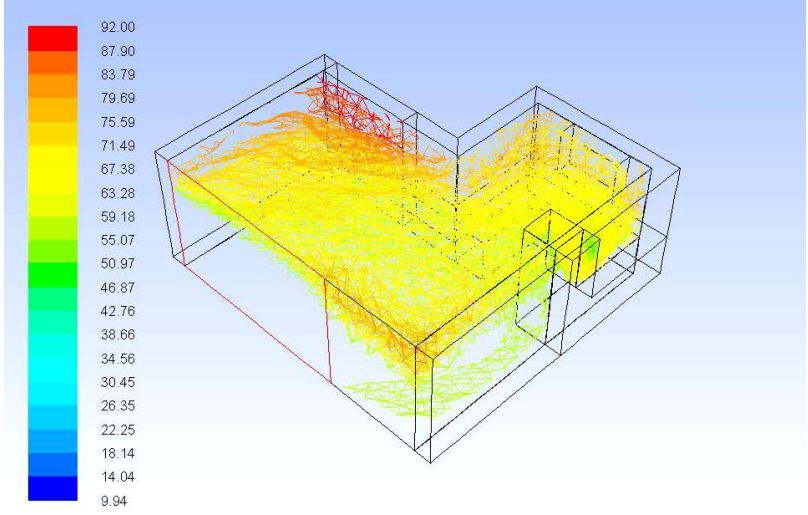
Slika 23 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 300$ s



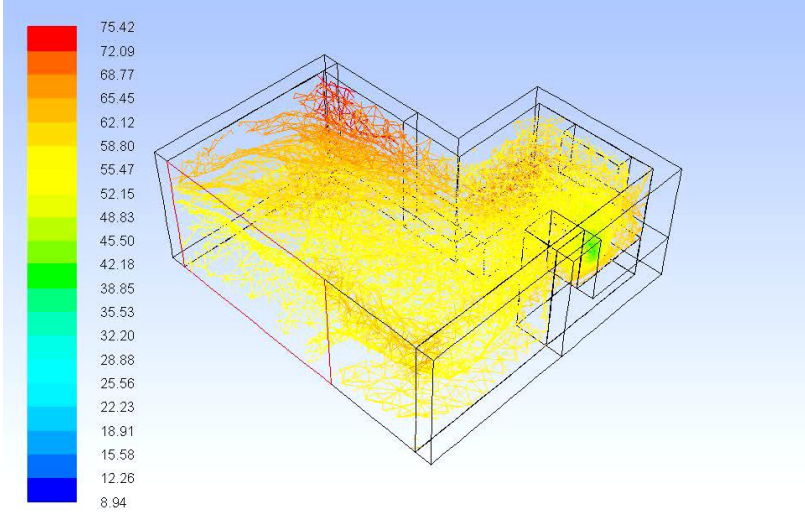
Slika 24 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 600$ s



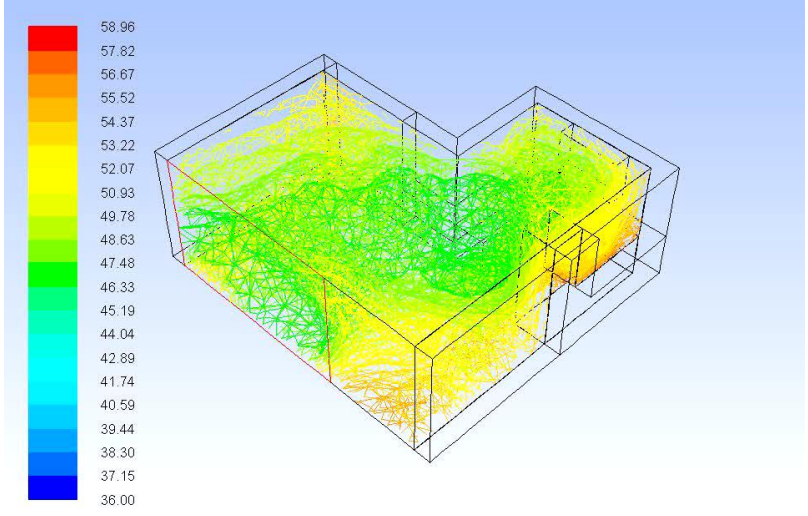
Slika 25 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 960$ s



Slika 26 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 1560$ s



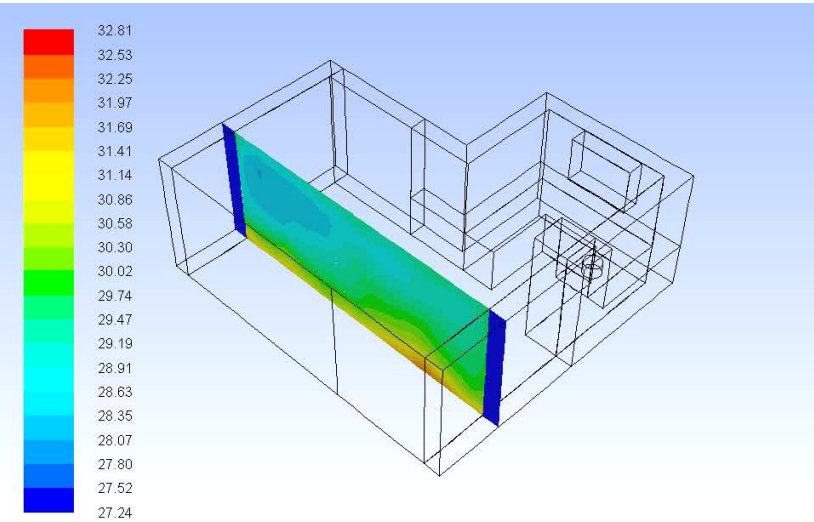
Slika 27 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 1920$ s



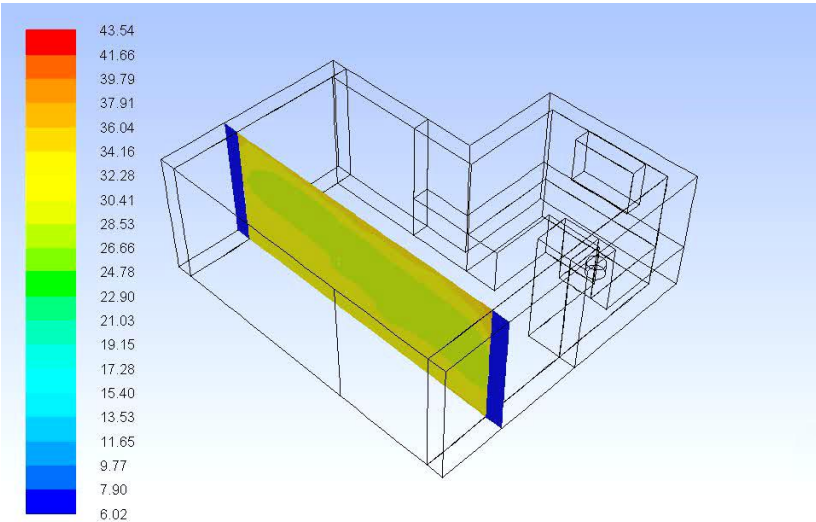
Slika 28 Raspodjela relativne vlažnosti čitavoj domeni u trenutku $t = 2400$ s

Napomena: za proučavanje svih prikaza obavezno je referiranje na priloženu skalu, koja je zbog složenosti proračuna i bolje reprezentacije podataka postavljena na automatski raspon

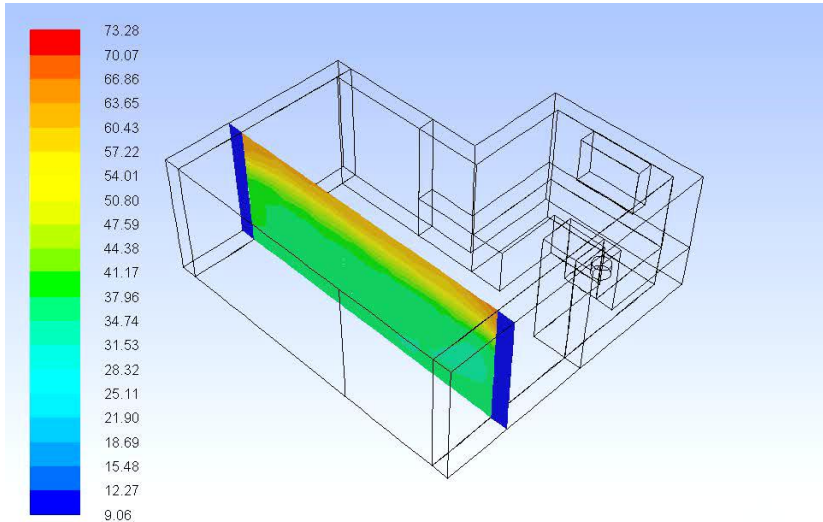
Raspodjela relativne lažnosti na presjeku 1:



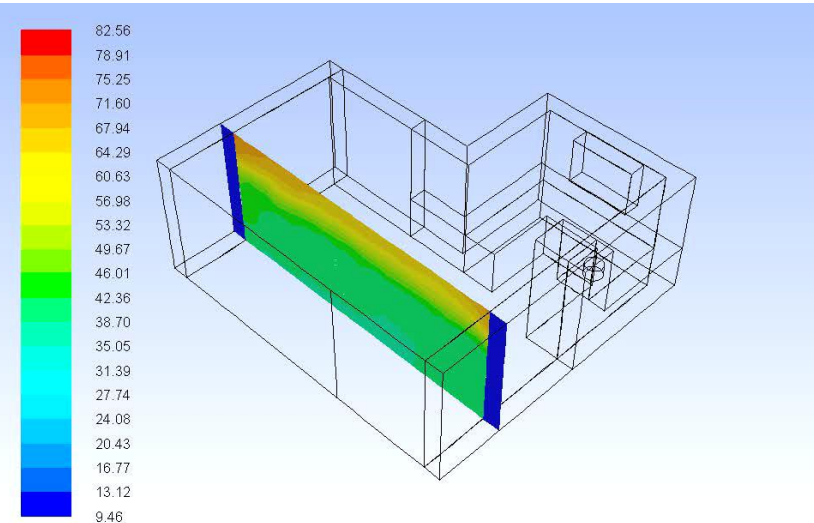
Slika 29 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 0$ s



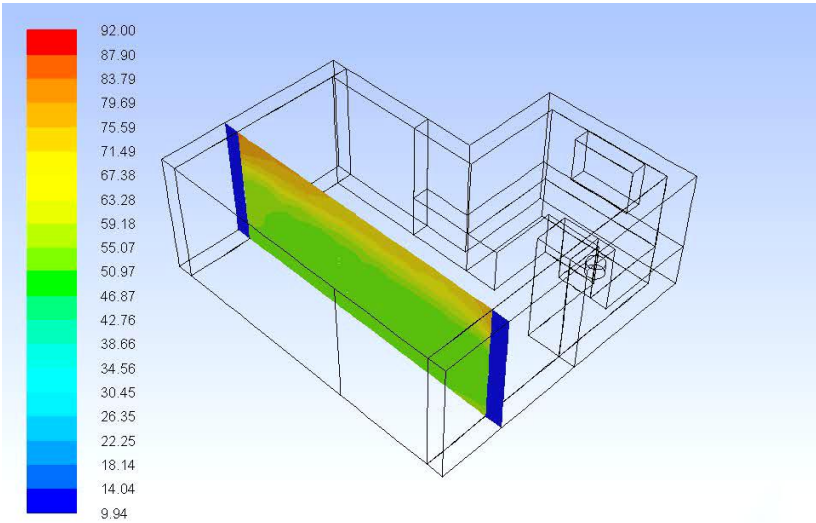
Slika 30 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 300$ s



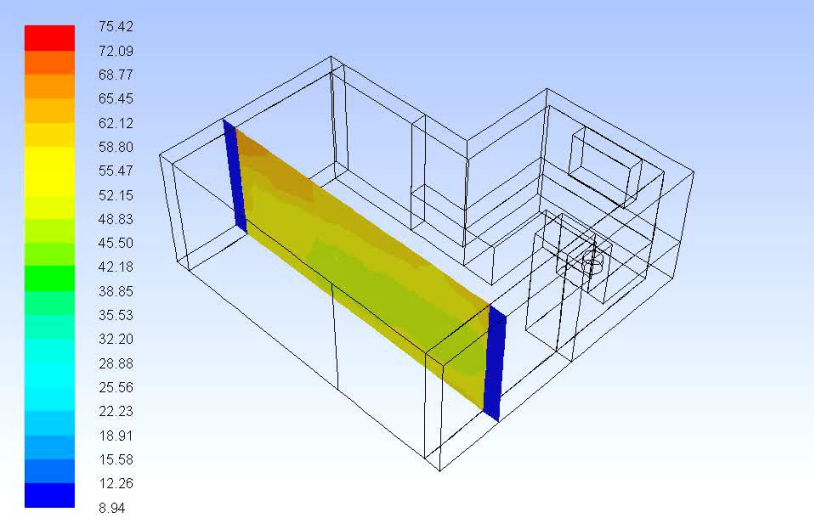
Slika 31 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 600$ s



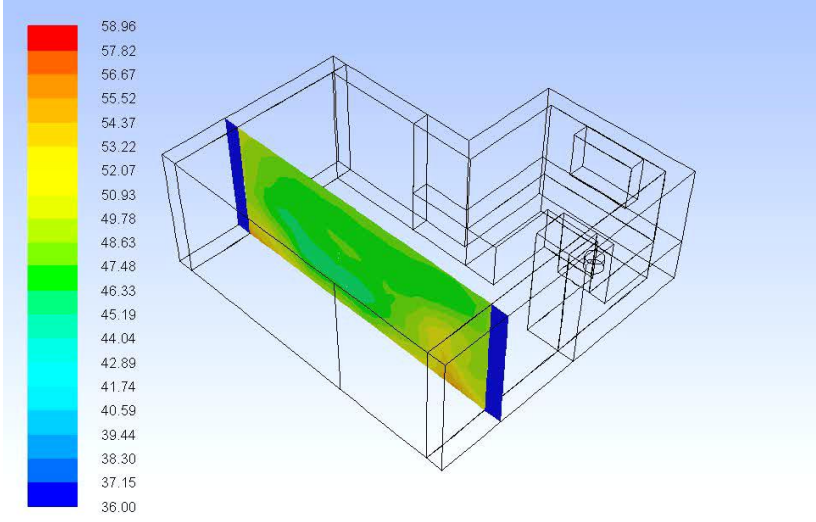
Slika 32 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 960$ s



Slika 33 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 1560$ s



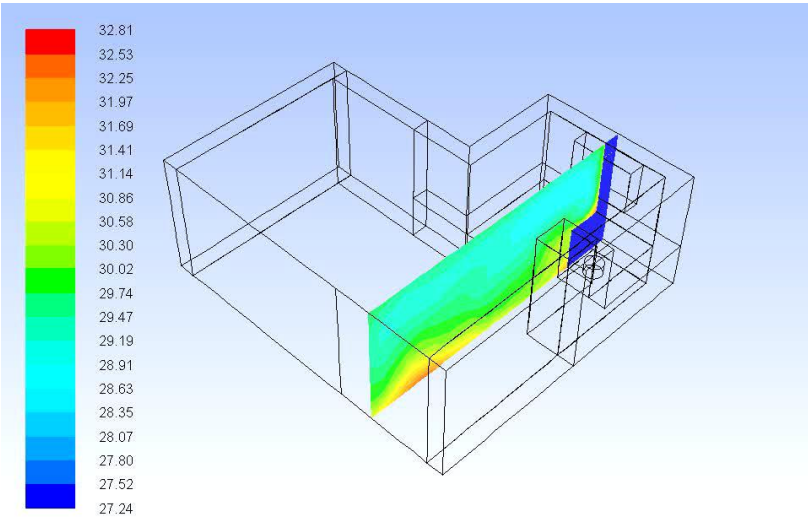
Slika 34 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 1920$ s



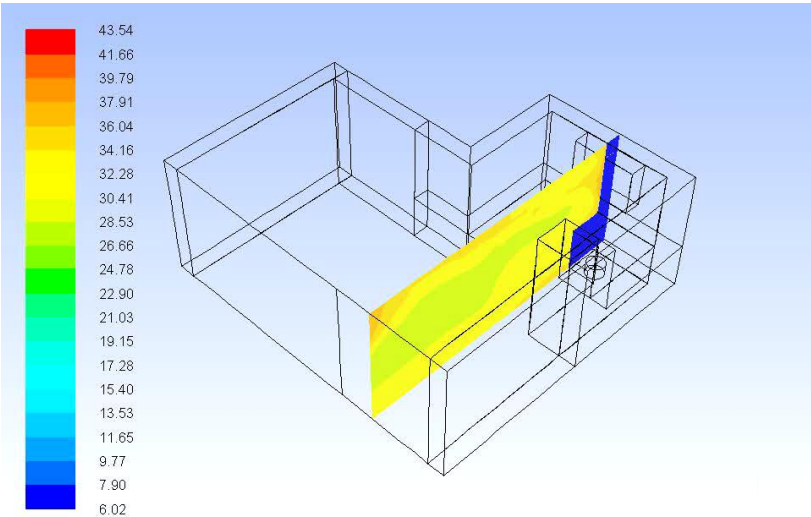
Slika 35 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 1 u trenutku $t = 2400$ s

Napomena: za proučavanje svih prikaza obavezno je referiranje na priloženu skalu, koja je zbog složenosti proračuna i bolje reprezentacije podataka postavljena na automatski raspon

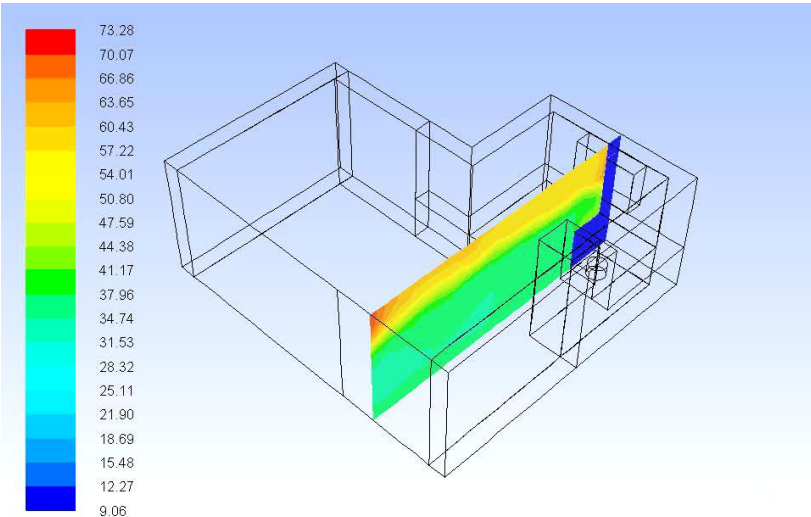
Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2:



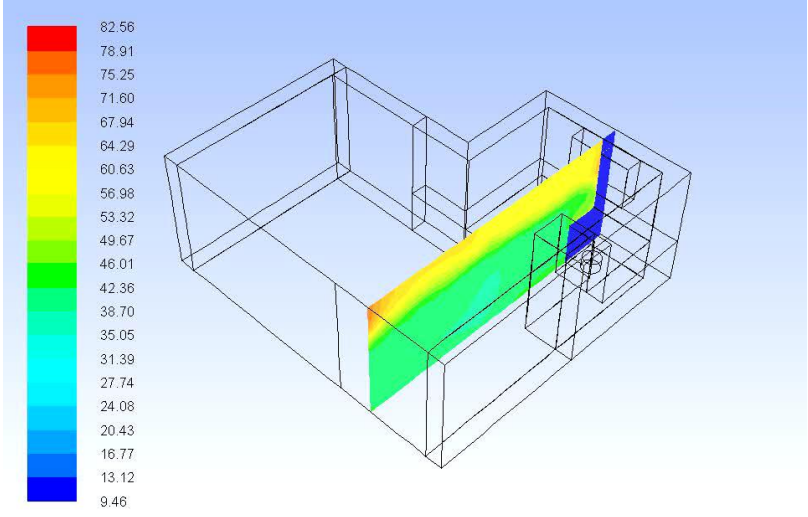
Slika 36 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2 u trenutku $t = 0$ s



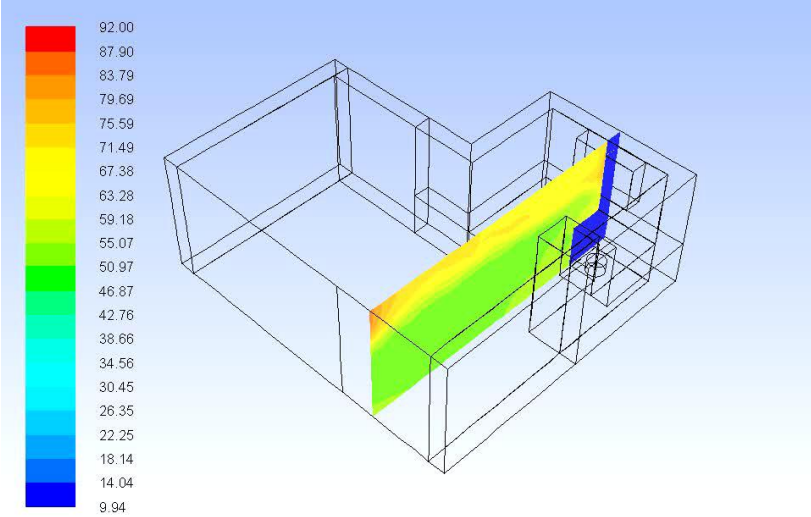
Slika 37 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2 u trenutku $t = 300$ s



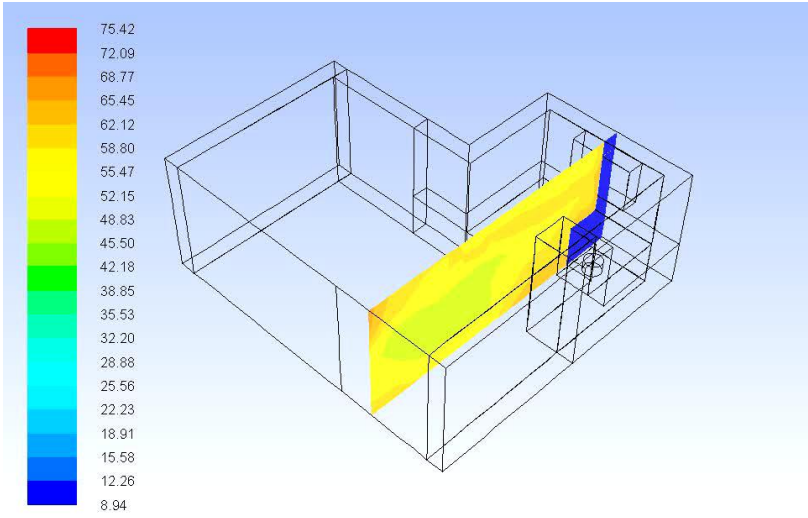
Slika 38 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2 u trenutku $t = 600$ s



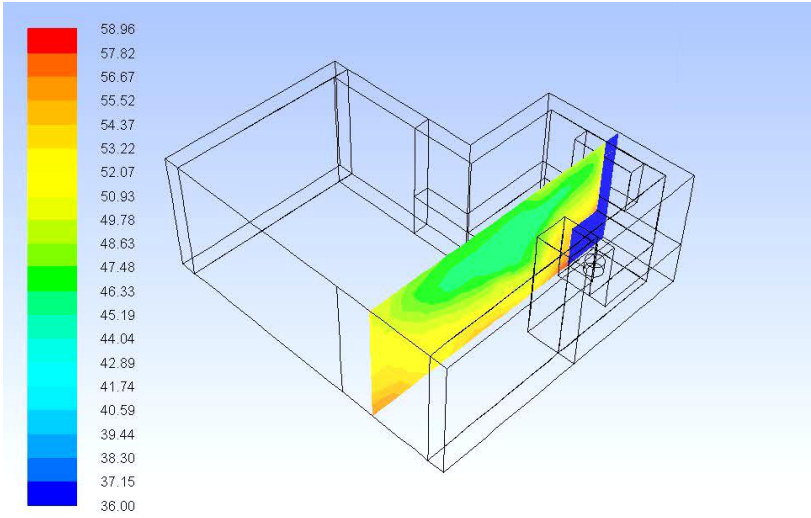
Slika 39 Raspodjela tlakova na presjeku 2 u trenutku $t = 960$ s



Slika 40 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2 u trenutku $t = 1560$ s



Slika 41 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2 u trenutku $t = 1920$ s



Slika 42 Raspodjela relativne vlažnosti na presjeku 2 u trenutku $t = 2400$ s

Napomena: za proučavanje svih prikaza obavezno je referiranje na priloženu skalu, koja je zbog složenosti proračuna i bolje reprezentacije podataka postavljena na automatski raspon

Konačna analiza i prijedlog rješenja

Nakon cijele simulacije, zaključak koji treba donijeti uključuje kako regulirati količinu vlage, shodno tome i grijanje te potencijalno provjetravanje i ventilaciju koji nisu na optimalnim razinama u promatranoj stambenoj jedinici. Vлага koja se generirala, nješto je manje od 1 kg, što i nije neka količina, a značajno naruši stanje atmosfere unutar stambenog objekta. Vidimo kako su i relativne vlažnosti i temperatura na kraju simulacije viši, izlažući se riziku orošavanja po zidovima stambenog prosotra. Stan je pregrijan te u konkretnom slučaju kuhanja ne bi došlo do orošavanja, no da se stan pothladi na temperature za koje je projektiran (sa 26°C na 22°C) orošavanje bi bilo neizbježno i učestalo, sudeći po podacima sa preuzetih mjerača i prema ovoj simulaciji. Ta razlika u temperaturi predstavlja značajan trošak u ekonomsko-energetskom smislu.

Količina vlage ovisi o navikama stanara, temperaturi prostorije te izmjenama zraka u njoj. Kako čovjek sa nizom svojih svakodnevnih radnji generira vlagu, ona negdje mora i otići. Logično rješenje za to jest ventilacija prostora, bilo prirodna u obliku provjetravanja ili prisilna, pomoću dovoda i odvoda zraka (potonje je rijetko korišteno u stambenim zgradama). To provjetravanje efikasna je i potrebna metoda, no često nosi niz problema. Ukoliko je vani vlažno, male se količine vlage zapravo mogu izbaciti, ukoliko su vani padaline prozori se ne mogu prikladno otvoriti za provjetravanje i nepotrebno se gubi više topline, ukoliko je vanjska temperatura niska, javlja se neugoda i veliki gubici topline te možda najbitnije, sve to narušava čovjekov komfor. Rješenje izmjena zraka pomoću provjetravanja kao takvo jest jednosatno i troši samo onoliko koliko izbaciti topline te se tome ne može proturiječiti, no odgovara li to tempu života koji se čovjeku nameće?

Kao prikladno i ekonomski prihvatljivo rješenje ovom problemu nameću se odvlaživači zraka. Oni unutarnji zrak drže na prihvatljivim razinama, mogu raditi automatski te čovjek, osim povremenih čišćenja uređaja nema brige. To jest još jedan uređaj u kući o kojem se ponovno treba brinuti, a zauzima i određenu količinu mjesta. No otvara nove mogućnost, razine komfora i najbitnijeg, zdravlja. Javlja se čak i mogućnosti sušenja odjeće unutar prostorije što je izrazito zanimljivo u zimskim mjesecima, kada jednostavno nema drugog načina.

I simulacija i realno stanje na terenu pokazuju kako unatoč visokim temperaturama prostora (cca 25°C) ova vлага u konkretnom stanu ne predstavlja problem, to jest na granici je problema, ali istovremeno visoka temperatura za sobom nosi veće troškove grijanja. Odvlaživač u tom smislu može pružiti dobru alternativu za lagodniji i u konačnici, jeftiniji život, a sve to bez puno rada stanara na tom uređaju.

Važno je još spomenuti kako i gradnja mora odgovarati projektnim zahtjevima (posebice toplinski mostovi to jest sprečavanje istih) kako ne bi dolazilo do izrazito hladnih zona, koje su u primjeru simulacije na rubu kuhinje, na kutu blagovaonice te pored balkonskih vrata, i bilo kakvo narušavanje sanacije tih toplinskih mostova dovelo bi do garantirane kondenzacije na tim područjima u ovom promatranom simulacijskom modelu.

Zaključak

Numeričkim modeliranjem stanja zraka unutar zatvorenih stambenih prostora može se projektiranje novih zgrada više prilagoditi čovjeku i njegovim aktivnostima. Čovjek u svom stambenom prostoru kuha, tušira se te nerijetko suši odjeću. Sve su to izvori vlage koji u nepovoljnim okolnostima mogu dovesti do narušavanja zdravlja stanara. Vлага se može pojaviti iz razloga nepovoljnih toplinskih uvjeta unutar prostora ili uslijed niskih temperatura okoline u kombinaciji sa lošim odlikama gradnje.

Problem vlage može se svesti na čovjeka ili na projektanta i izvođača. Sav napredak tehnologija i materijala gradnje doveo je do ovog problema, ponajprije zbog rijetke ventilacije samih stambenih prostora, no i zbog ponekad izbjegavanja kompliciranijih i manje ekonomičnih rješenja građevinskih ili termotehničkih problema. Numeričko modeliranje u tom pogledu može pomoći u predviđanjima života unutar budućeg objekta, na način da predvidi nekoliko ekstremnijih situacija u kojima bi se problemi mogli intenzivno pojaviti kao i pregleda uobičajenog načina života stanara, te kako se zgrada ponaša u datim situacijama. Na taj način mogli bi projektanti odlučiti da li treba raditi prilagodbe na termotehničkom ili građevinskom projektu, pazeći pritom na krucijalne faktore, čovjekovu ugodnost i zdravlje, te ekonski aspekt projekta.

Termotehnički projekt mogao bi uključiti sustave odvlaživača, napa (za ovu upotrebu nisu podobne recirkulirajuće), ili sustave ventilacija.

Građevinski projekti uključivali bi metode rješavanja toplinskih mostova te implementaciju svih termotehničkih rješenja na adekvatan način.

Treća strana, čovjek, također može sudjelovati u povećanju svoje ugone promjenom nekoliko svojih navika, primarna bi bila ona da prilagodi količinu prirodne ventilacije (prozori i vrata), a od ostalih se nameće pažnja pri izvođenju radnji koje generiraju veće količine vlage, to jest, ponašanje shodno tim radnjama, to jest stanju atmosfere unutar i izvan stambenog prostora.

Implementacija promjena čovjekovih navika polagano bi trebala biti implementirana u proces projektiranja te bi stoga, bar zasad fokus trebao biti usmjeren na optimizacije projekata i buđenje svijesti stanara kako u tim „novim“ zgradama bolje živjeti, u konačnici i zdravije živjeti.

Numerička bi modeliranja pomogla svima uključenima u projekt izrade zgrade, kako bi u konačnosti objekt bio ekonomičniji, a stanar sretniji, i to na način da bi pomoglo u prikazu dinamike buduće zgrade i optimizacije cijele zgrade prema tim podacima.

Valja napomenuti kako bi se u realnom projektu sa svim poznatim parametrima zgrade, točnost ovakvih simulacija bila na razini dovoljnoj za upotrebu u cilju optimizacije projekta stana, etaže ili cijelih zgrada.