

Primljen / Received: 6.8.2022.

Ispravljen / Corrected: 22.11.2022.

Prihvaćen / Accepted: 30.1.2023.

Dostupno online / Available online: 10.4.2023.

Procjena toplinske učinkovitosti neprozirnih ventiliranih fasada za stambene zgrade u vrućim i vlažnim klimatskim područjima

Autori:

Dr.sc. **Fulva Gökşen**, dipl.ing.arh.

Sveučilište Gazi, Ankara, Turska

Odjel za arhitekturu

fulvagoksen@gazi.edu.tr

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **İdil Ayçam**, dipl.ing.arh.

Sveučilište Gazi, Ankara, Turska

Odjel za arhitekturu

iaycam@gazi.edu.tr

Prethodno priopćenje

Fulva Gökşen, İdil Ayçam

Procjena toplinske učinkovitosti neprozirnih ventiliranih fasada za stambene zgrade u vrućim i vlažnim klimatskim područjima

U ovom je radu pomoću računalne dinamike fluida (engl. *computational fluid dynamics* - CFD) ispitana toplinska učinkovitost neprozirnih ventiliranih fasada (engl. *opaque ventilated façades* - OVF) u mediteranskoj klimatskoj zoni u kojoj je pasivno hlađenje prioritet. Simulacije su provedene kako bi se analiziralo ponašanje komponenti OVF-a pod različitim geometrijskim konfiguracijama, primjenjujući vremenske podatke za tri grada u Turskoj koji predstavljaju klimatske uvjete regije prvog stupnja-dana. Ovi podaci uključuju debljinu zračne šupljine, veličinu odvoda i visinu zračne šupljine. Za razliku od dosadašnje literature, dvosmjerna odvodna ventilacija se u ovom istraživanju primjenjuje u analizi različitih fasadnih sustava za područje mediteranske klime te se utvrđuje njezina učinkovitost u smanjenju solarnog prinosa. Prema uzorcima ispitanim u okviru ovdje navedenih kriterija, utvrđeno je da se stopa prijenosa topline u zatvorenom prostoru kroz fasadu može smanjiti za 69 % do 75 %.

Ključne riječi:

neprozirna ventilirana fasada (OVF), računalna dinamika fluida (CFD), pasivno hlađenje, stambena zgrada

Research Paper

Fulva Gökşen, İdil Ayçam

Thermal performance assessment of opaque ventilated façades for residential buildings in hot humid climates

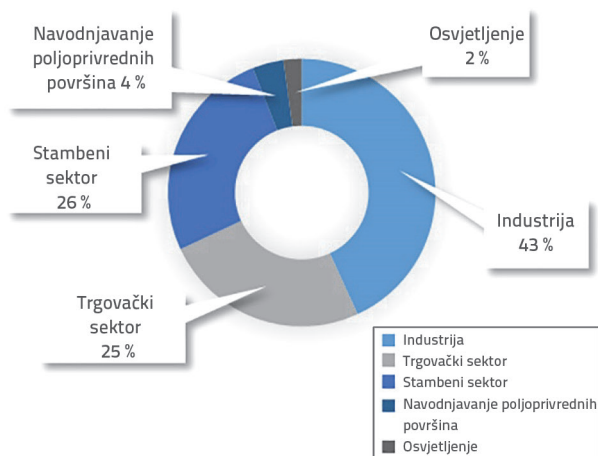
In this paper, the thermal performance of opaque ventilated façades (OVFs) in the Mediterranean climate zone, where passive cooling is a priority, was examined using computational fluid dynamics (CFD). Simulations were carried out to analyse the behaviour of OVF components under different geometric configurations, using weather data for three cities in Turkey that reflect the climatic conditions of a first-degree day region. These data include the air cavity thickness, outlet size, and air cavity height. Unlike in previous literature, two-way outlet ventilation is employed in this study in the analysis of different façade systems for the Mediterranean climate region, and its performance in reducing solar gain is determined. According to the samples examined within the scope of the criteria outlined herein, it was determined that the rate of heat transferred indoors through the façade can be reduced within the range of 69 % to 75 %.

Key words:

opaque ventilated façade (OVF), computational fluid dynamics (CFD), passive cooling, residential building

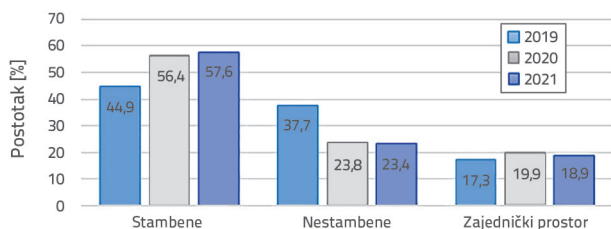
1. Uvod

Cijene energije u svijetu brzo rastu, a količina resursa se smanjuje. Uzimajući u obzir klimatske promjene i probleme zagađenja okoliša, nužno je smanjiti potrošnju energije u Turskoj jer se približno 70 % primarne energije dobiva iz vanjskih izvora. Slika 1. prikazuje stope potrošnje energije prema vrsti potrošača, pri čemu se može uočiti da se značajan udio energije troši u stambenim zgradama (26 %), [1].



Slika 1. Distribucija fakturirane potrošnje električne energije u Turskoj u 2020. na temelju vrste potrošača [1]

Ispitivanja su otkrila da Turska ima veliki fond stambenih zgrada. Kao što je prikazano na slici 2., stambeni se fond povećava svake godine [2].



Slika 2. Stopa povećanja fonda zgrada u Turskoj, 2019.-2021. [2]

Zbog različitih klimatskih zona u Turskoj, uloženi su veliki napor da se poboljša energetska učinkovitost stambenih zgrada prema Direktivi o energetske učinkovitosti zgrada (engl. *Energy performance of buildings directive* - EPBD) objavljenoj 2010. To je potkrijepljeno rezultatima pregleda postojećih znanstvenih radova u kojima su istraživanja o smanjenju toplinskih opterećenja učestalija od ostalih. Međutim, u Turskoj, koja ima pet klimatskih zona, vruća i vlažna zona čini 28 % [3], a trošak energije za hlađenje zgrada je veći. U stambenim zgradama u kojima su optimizacija troškova i performansi prioriteta, razvoj tehnika pasivnog hlađenja važan je za rješavanje problema povezanih s ovojnicama zgrada u vrućim zonama [4, 5]. Štoviše, kratko je istraživanje pokazalo da je potražnja za hlađenjem u vrućim područjima porasla za 8 % [6, 7].

Kada se radi o ovojnicama zgrade, za približno 35 % toplinskih gubitaka [8] odgovorni su zidni elementi; stoga je ovaj element posebno istaknut u okviru istraživanja. Postoje mnoge vrste strategija pasivnog hlađenja koje se mogu primijeniti na zidne elemente u vrućim klimama. Nedavno su predložene konstrukcijske metode koje primjenjuju ventilirane fasade, svijetle fasade i održive materijale.

U većini istraživanja na ovu temu primjenjivali su se pasivni solarni zidovi koji primjenjuju ventilaciju uzrokovanu Sunčevim zračenjem u svrhu poboljšanja unutarnje ventilacije i ugođe [9, 10], dvostruko ostakljene fasade koje omogućuju prirodnu ili mehaničku ventilaciju za odvod topline [11-14], fotonaponski paneli integrirani u zgradu [15-17] te ventilirane fasade koje imaju dodatni sloj zidnih panela izvan postojeće fasade kako bi se osigurala ventilacija i toplinsko rješenje [18-23].

Šuplji zid prvi je istražio B. Vos u Nizozemskoj 1963. godine [24, 25]. On je razvio sustav koji se trenutačno smatra središnjim, za stanje konstrukcije i za energetske učinkovitost. Osmišljen je za rješavanje problema u vezi s ventilacijom šupljine, odvozom kiše i kontrolom kondenzacijske vode u zemljama sjeverne Europe [26-29]. Nedavno je ovaj sustav također primijenjen u vrućim klimama kako bi se potvrdila njegova učinkovitost u smanjenju opterećenja hlađenja u tim regijama [18, 30, 31]. Sustavi šupljih zidova još uvijek su u upotrebi i redovito se ažuriraju različitim konstrukcijskim rješenjima u različitim klimatskim uvjetima na temelju različitih tehnoloških dostignuća. Zbog istraživanja provedenog u tom kontekstu, predloženi su sustavi ventiliranih fasadnih obloga.

Prema podacima Međunarodne agencije za energiju (engl. *International Energy Agency* - IEA), prva zgrada s ventiliranom fasadom izgrađena je na Sveučilištu Cambridge 1967. godine. Nakon toga su primjenjivane ventilirane fasade s neprozirnim vanjskim slojevima, koje se nazivaju "neprozirne ventilirane fasade" (engl. *Opaque Ventilated Façade* - OVF). One se sastoje od unutarnje i vanjske obloge koje su odvojene slojem zraka, tj. ventiliranim otvorom. Obloga štiti od vanjskih utjecaja poput Sunčevog zračenja, vode i mehaničkih opterećenja [5], a može se sastojati od različitih materijala poput kamena, keramike, gline, cigle, ploča na osnovi drva, predgotovljenih proizvoda, betona, metala, aluminijevih kompozita i plastike [32].

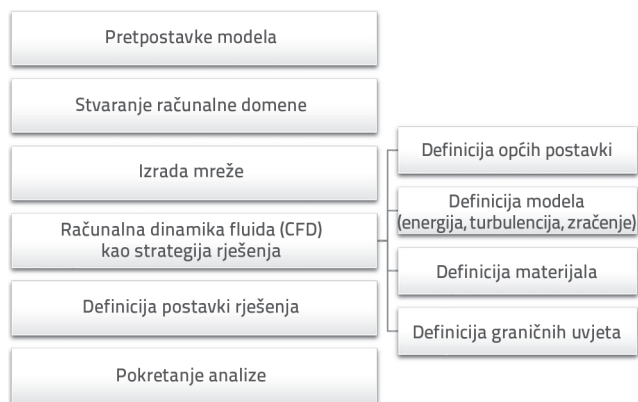
Također je istražena učinkovitost neprozirnih ventiliranih fasada u različitim klimatskim uvjetima. Provedena su istraživanja o hidrotermalnim svojstvima i otkriveno je da se ventilirane fasade brže suše od neventiliranih [26, 28, 33]. Ispitani su i ventilirani fasadni sustavi s otvorenim fugama [30, 31, 34, 35] te materijal vanjskog sloja fasade [36-38]. Ispitani su i utjecaj vjetrova [39-41] i utjecaji zimskih uvjeta na toplinsku učinkovitost fasadnih sustava, a o potonjem su dobiveni različiti rezultati. Pregled literature pokazuje da potražnja za potrošnjom energije za hlađenje u vrućim regijama raste iz dana u dan zbog globalnog zatopljenja, a građevinska bi industrija trebala odgovoriti usvajanjem strategija projektiranja zasnovanih na bioklimatici koje primjenjuju učinkovitu upotrebu energije. Neprozirne ventilirane fasade su sustavi koji smanjuju

opterećenje hlađenja zgrade upotrebom pasivnog hlađenja zahvaljujući efektu dimnjaka koji nastaje zbog razlike u gustoći zraka na ulazu i izlazu šupljine [18, 21, 22, 44, 45]. Iz tog razloga, takve fasade osiguravaju ventilaciju na različite načine kao što je održavanje pasivnog hlađenja djelujući kao solarni štiti, poboljšavajući unutarnje uvjete ugodne i smanjujući potrebu za klimatizacijom, posebno u područjima gdje je potražnja za hlađenjem visoka i tijekom vrućih ljetnih razdoblja. Nadalje, sustav djeluje kao zaštita protiv utjecaja sunca, vjetera i kiše; a zahvaljujući strujanju zraka između zidnog sloja i fasadne obloge spriječeno je prodiranje i stvaranje vlage na zidu te se može postaviti prozirni fasadni sustav. Na temelju toga, ovaj sustav je poželjan u vrućim vlažnim klimatskim područjima.

Doprinos neprozirnih ventiliranih fasada energetske učinkovitosti zgrada tijekom ljetnog razdoblja procijenjen je u raznim istraživanjima, a njegova učinkovitost varira ovisno o lokalnoj klimi (kao što su Sunčevo zračenje, brzina vjetera, smjer, temperatura) i građevinskim ograničenjima (kao što su geometrija, orijentacija, materijal). U ovom se istraživanju za oblikovanje neprozirnih ventiliranih fasada preporučuje dvosmjerna odvodna ventilacija. Zatim su analizirane razlike u pojedinostima i valjanosti jednosmjerne varijante sustava koja se upotrebljava u postojećoj literaturi za područje mediteranske klime, te su analizirane optimalne dimenzije ventilacijskih otvora za OVF sustav i njegov utjecaj na pasivno hlađenje u stambenim zgradama s visokom stopom potrošnje energije. Zbog toga su navedena tri grada (Adana, Hatay i Izmir) reprezentativna za klimatske uvjete prvog stupnja-dana u Turskoj, gdje je potreba za pasivnim hlađenjem velika. Kao posljedica toga dobiveni su paralelni i dosljedni rezultati analize za tri pilot-grada. Nadalje, pokrajina Adana imala je najveću prosječnu vrijednost među navedena tri grada; stoga su njezini klimatski podaci korišteni za analizu projekta.

2. Metodologija

U ovom se istraživanju performanse neprozirnih ventiliranih fasada ispitane pomoću sustava za analizu. Najpoželjniji programi u znanstvenim istraživanjima koja uključuju OVF sustave su Fluent modul računalnog programa računalne dinamike fluida (engl. *Computational fluid dynamics* - CFD) [21, 30, 34, 35, 40], Star CCM modul računalnog programa CFD [38], TRNFlow modul računalnog programa TRNSYS [43], COMSOL [42], i ESPr [46]. Među njima, ANSYS modul protoka računalnog programa CFD daje najrealnije rezultate. Usporedba eksperimentalnih i rezultata računalne dinamike fluida, koji su upotrijebljeni za rješavanje sličnih problema, sugerira da je prosječna stopa pogreške manja od 10 % prema eksperimentalnim podacima, osobito kada je prijenos topline kroz zračenje tla uključen u sustav u simulacijskom modelu [30, 40]. Stoga je, zbog svog složenog protoka zraka i moći rješavanja problema povezanih s prijenosom topline, koji su važni za istraživanje performansi OVF-a, odabran modul Ansys Fluent (verzija: 2019-R3) računalnog programa računalne dinamike fluida (CFD). Slika 3. prikazuje dijagram toka istraživanja.



Slika 3. Dijagram toka koji prikazuje Ansys Fluent-CFD analize primijenjene u ovom istraživanju

2.1. Pretpostavke modela

Slojevi neprozirne ventilirane fasade navode se u tablici 1. Prikazane su dimenzije i termofizikalna svojstva slojeva primijenjenih u fasadi.

Tablica 1. Dimenzije i termofizikalna svojstva materijala koji će se upotrebljavati u OVF-u [47]

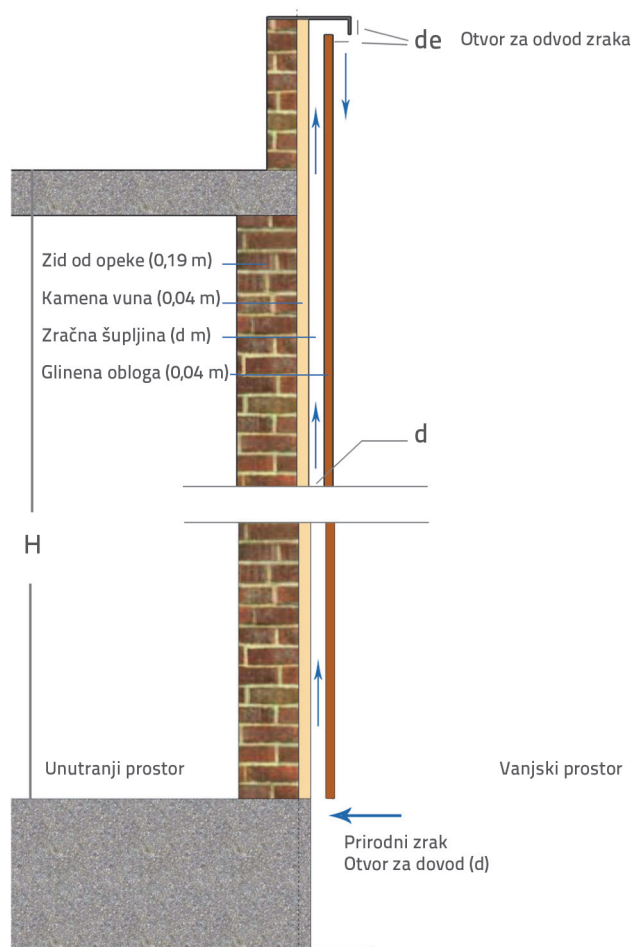
Fasadni sustavi F1 i F2				
Slojevi	Debljina [m]	Toplinski kapacitet C_p [J/(kg K)]	Gustoća ρ [kg/m ³]	Toplinska vodljivost λ [W/m K]
Šuplja opeka	0,190	781	700	0,36
Izolacija (kamenja vuna)	0,040	1030	100	0,038
Zračna šupljina	d		Nestlačivi idealni plin	
Obloga od gline	0,040	814	792	0,5

*Emisivnost, $\varepsilon = 0,9$ je obično prikladna za unutarnje i vanjske površine [48].

Predloženi sustav neprozirne ventilirane fasade prikazan je na slici 4., pri čemu je d vodoravna širina zračne šupljine neprozirne ventilirane fasade, d_e je veličina izlaznog otvora zračne šupljine tih fasada, a H je visina zračne šupljine.

U analizi je debljina zračne šupljine u rasponu od $d = 0,025$ m do 0,25 m prema zahtjevima izvedbe Tehnološkog centra za prozore i obloge, pri čemu je najmanji razmak zračnog procjepa u primjenama sustava neprozirne ventilirane fasade 0,025 m [49]. Iz tog je razloga u analizi odabrana navedena širina zračne šupljine d . Osim toga, prilikom testiranja dimenzija d i d_e odabrane su jednake i gotovo jednake veličine primjenjujući informacije dobivene iz literature [50]. U ovom je istraživanju za oblaganje fasada dana prednost materijalu na bazi gline jer je izrađen od prirodnih sirovina lokalnog porijekla te je prozračan i otporan na vanjske vremenske

uvjete. Osim toga, to je lako dostupan i ekonomičan materijal koji može održavati ugodne temperature zahvaljujući svojoj termalnoj masi.

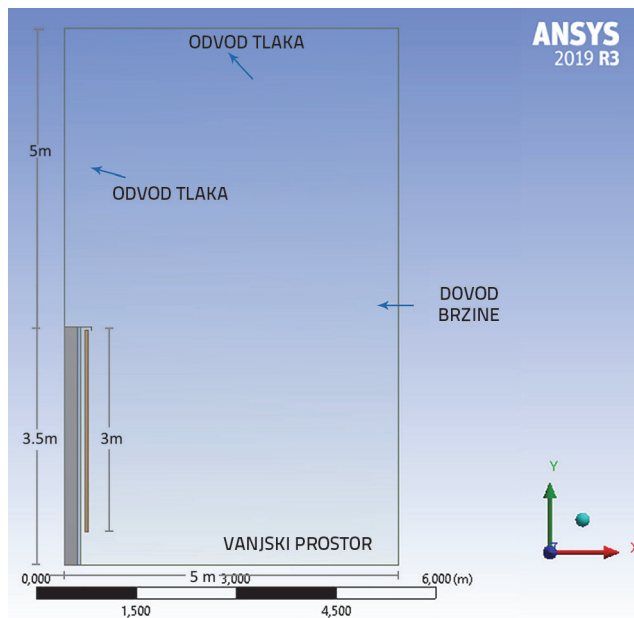


Slika 4. Poprečni presjek OVF-a

2.2. Računalna domena za neprozirne ventilirane fasade

Provedena je analiza kako bi se istražilo na koji način funkcioniraju različita svojstva sustava kao što su prijenos topline između slojeva i vertikalno kretanje zraka duž zračne šupljine neprozirne ventilirane fasade. Prva faza metode analize računalne dinamike fluida uključuje definiranje pojednostavljene geometrije u kojoj će se proučavati fenomen fluida. U tom kontekstu ispitani su primjeri modela u literaturi i razvijen je prijedlog prikladan za opseg ovog istraživanja [30, 40, 51, 52].

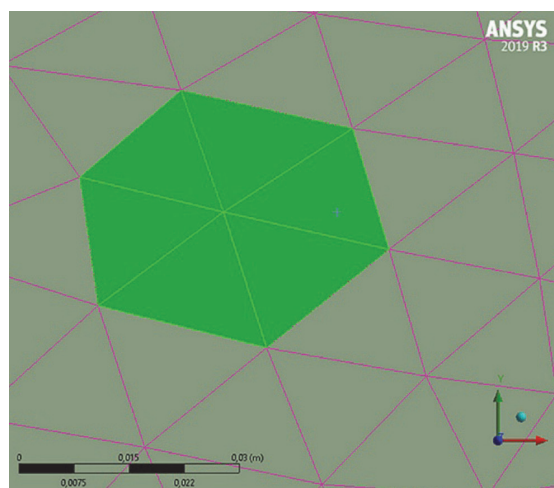
Model na slici 5., koji prikazuje presjek ventilirane fasade i područje koje obuhvaća njegovu neposrednu okolinu, simulira strujanje zraka ispred fasade, a prikazan je u 2D-u na XY koordinatnoj ravnini ANSYS programa za modeliranje dizajna. Neprozirna ventilirana fasada je postavljena u donji lijevi kut, a granice dovoda i odvoda zraka prikazane su na slici 5.



Slika 5. Računalna domena za OVF u softveru ANSYS Fluent

2.3. Izrada mreže

Rješavanje diferencijalnih jednadžbi numeričkim metodama zahtijeva računalne mreže (engl. *grid*), često jednostavno zvane mreže (engl. *mesh*). Računalna se mreža sastoji od dekompozicije problemske domene na osnovne površine [22]. U ovom je istraživanju stvorena mrežasta struktura u svrhu izvođenja numeričkih rješenja metodom konačnog volumena. Ovdje se opisuju svojstva odabranih računalnih mreža. Mreža u domeni proračuna čini trokutaste elemente zahvaljujući svojoj sposobnosti da proizvede geometrijske dimenzije (slika 6.). Stoga se mreže koje se sastoje od trokutastih elemenata trebaju definirati na temelju vrijednosti "asimetrije", koja bi trebala biti na nižim vrijednostima raspona od 0 do 1, a najveća asimetrija trebala bi biti < 0,8 [53].



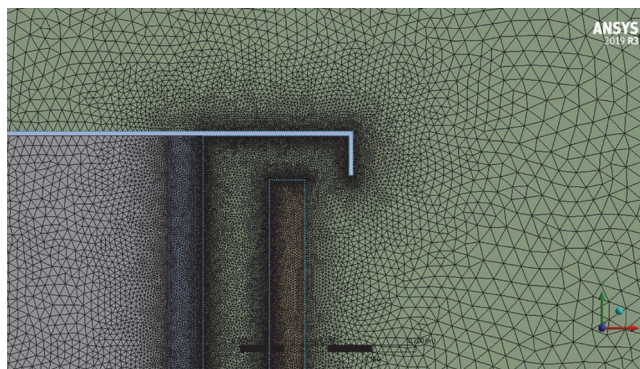
Slika 6. 2D trokutaste ćelije OVF-a u softveru ANSYS Fluent

Dimenzije elemenata odabrane su izvođenjem preliminarnog ispitivanja neovisnosti o mreži. Izrađeno je šest različitih numeričkih mreža, a na temelju dobivenih podataka testirana je ovisnost numeričke mreže. Uz pretpostavku da najbolja mrežasta struktura ima varijabilnost od 0,4 % ili manje, korištene su u slučajevima u kojima su se rezultati podudarali.

Kao posljedica toga, unesena mreža koja se sastoji od 536.997 ćelija generirana je u svrhu prikaza geometrije (slika 7.). Najprije su predviđena mjesta najvećih ili najnižih promjena svojstava fluida u momentu gibanja i toplinske relativnosti. Sukladno s time, najmanji elementi (0,001 m) korišteni su na granicama šupljine, a numerički mrežasti sustav oblikovan je kako bi se uzelo u obzir fizikalne promjene koje nastaju uslijed postupnog povećanja unutarnjeg zida, vanjske površine fasadne obloge, vanjske površine parapeta, kape (0,002 m), te preostalih površina volumena otopine (maksimalno 0,02 m).

Vrijednosti kvalitete za numerički mrežni sustav navedene su kako slijedi:

- broj ukupnih elemenata: 536,997
- maksimalna vrijednost asimetrije: 0,74481
- maksimalna kvaliteta elementa: 1,0000
- maksimalni razmjjer proporcija: 3.436.



Slika 7. Mrežasti model OVF-a

2.4. Strategija rješenja

Turbulencija je modelirana pomoću standardnog k-epsilon modela turbulencije s niskim Reynoldsovim brojem jer je prikladan za prirodne konveksijske protoke i preferira se u literaturi [21, 54-56]. Štoviše, budući da se nagle promjene brzine događaju u dijelovima graničnog sloja blizu zida, "poboljšana obrada zida" primijenjena je na sustav ventilirane fasade zbog potrebe za čestim povezivanjem i visokom preciznošću rezolucije na površinama zračnih šupljina i vanjskih slojeva. Osim toga, uzeta je u obzir i vrijednost Y-plus.

Za model zračenja, jedna od najvažnijih značajki koje treba uzeti u obzir pri simulaciji ventiliranih fasada je Sunčevo zračenje koje apsorbira fasada. U tom kontekstu, insolacija, koja je simulirana pomoću modela diskretnih ordinata (DO) iz prethodnih istraživanja, modelirana je kao unutarnji izvor topline na vanjskoj strani fasadne obloge. To je metoda koja se obično primjenjuje u istraživanjima u literaturi za predstavljanje

apsorbiranog Sunčevog zračenja [57]. Simulacijski model temeljio se na prethodnim istraživanjima koje su proveli Sanjuan i sur. [56-58]. Nadalje, model diskretnih ordinata zračenja omogućuje rješenja za probleme zračenja s površine na površinu (engl. *surface-to-surface radiation*) koji nastaju kod poluprozirnih zidova [59].

Vrsta rješenja odabrana je na temelju tlaka i korištena je za određivanje hoće li se jednadžbe rješavati skupno ili odvojeno. Ovaj je parametar poželjan ako u analitičkoj studiji gustoća nije odlučujuća [60]. Budući da je u istraživanju korišten nestlačivi idealni plin, očekivana je neznatna promjena gustoće. Stoga su analize provedene na temelju tlaka.

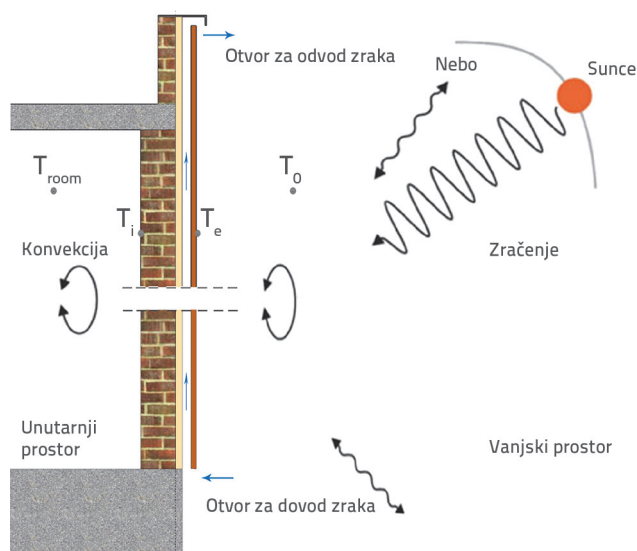
2.5. Granični uvjeti

U scenariju analize, prosječne mjesečne vrijednosti temperature, brzine vjetera i intenziteta Sunčevog zračenja za srpanj su fiksne i primijenjene na model ventilirane fasade, a analize su provedene u stabilnom stanju na temelju prethodnih istraživanja [21].

Za proračun su uzeti u obzir sljedeći fizikalni parametri: energetska model, nestlačivo optjecanje, atmosferski tlak (101325 Pa) i gravitacija ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Za opisivanje Sunčevog zračenja koji pada na vanjsku stranu fasadne obloge, fasadna obloga modelirana je kao unutarnji izvor topline, a ta je vrijednost korištena kao vrijednost apsorbiranog zračenja. Zračenje i konvekcija prema prostoriji razmatrana je samo na unutarnjem zidu, a koeficijent konvekcije topline bio je 8 W/m^2 [56].

Ostale informacije o graničnim uvjetima prikazane su u nastavku na slici 8, pri čemu T_o predstavlja vanjsku temperaturu zraka, T_e predstavlja temperaturu vanjske površine fasadne obloge, T_{room} predstavlja temperaturu unutarnjeg zraka u stambenim prostorima ($19 \text{ }^\circ\text{C}$) [47], T_i predstavlja temperaturu unutarnje površine zida od opeke, a P_{atm} predstavlja atmosferski tlak (101325 Pa).



Slika 8. Granični uvjeti za OVF

U ovom su istraživanju ispitane pokrajine u zoni prvog stupnja-dana vruće i vlažne klimatske regije Turske. Gotovi klimatski podaci dobiveni su korištenjem EPW-a (engl. *EnergyPlus Weather*) i temeljeni na proširenju tipične meteorološke godine (TMYx) koje primjenjuje EnergyPlus. Podaci dobiveni iz literature otkrivaju da su intenzitet Sunčevog zračenja i brzina vjetra odlučujući parametri u pasivnom hlađenju [18, 19, 22, 34, 61]. U tom kontekstu, vrijednosti brzine vjetra, temperature i Sunčevog zračenja odabrane su na temelju klimatskih podataka za srpanj, koje karakteriziraju razdoblje koje među pilot pokrajinama zahtijeva hlađenje. Pokrajine Izmir, Hatay i Adana odabrane su kao pokusne iz sljedećih razloga: Izmir ima najviše vrijednosti Sunčevog zračenja, brzine vjetra i temperature; Hatay ima niske vrijednosti Sunčevog zračenja i temperature, te veliku

brzinu vjetra; a Adana ima visoke vrijednosti Sunčevog zračenja i temperature. Analiza je provedena na temelju podataka za južnu fasadu, gdje su zahtjevi za hlađenjem visoki.

Tablica 2. Podaci o dnevnoj temperaturi, zračenju i brzini vjetra za gradove tijekom ljetnog razdoblja [62-64]

Referentna pokrajina (1. srpnja)	Solarno zračenje (solarno zračenje okomito na južno pročelje) [W/m ²]	Temperatura [°C]	Brzina vjetra [m/s]
Adana	495,80	34	2,8
Hatay	490,49	31	3,1
Izmir	504,89	36	3,6

Tablica 3. Scenariji i kombinacija svih parametara za analizu OVF-a

Istraživanje optimalne geometrijske dimenzije OVF-ova u područjima vruće i vlažne klime												
Scenarij 1 Utjecaj klimatskih podataka			Scenarij 2 Utjecaj veličine zračne šupljine d i de		Scenarij 3 Utjecaj visine zračne šupljine	Scenarij 4 Utjecaj smjera odvoda (dvosmjern)						
Pokrajine	d [m]	de [m] fiksno	d [m]	de [m]	H [m]	Ponovljeni 2. scenarij						
						d [m]	de [m]					
Izmir	0,025	0,05	0,025	0,025	3 6 9 12 15 18	0,025	0,025					
	0,05			0,05			0,05					
	0,075			0,075			0,075					
	0,10		0,05	0,05		0,10	0,05	0,10				
	0,15					0,025		0,025				
	0,20					0,05		0,05				
	0,25					0,075		0,075				
Adana	0,025	0,05	0,075	0,10	0,05	0,075	0,10					
	0,05			0,025			0,025					
	0,075			0,05			0,05					
	0,10		0,1	0,1		0,075	0,1	0,075				
	0,15					0,10		0,10				
	0,20					0,025		0,025				
	0,25					0,05		0,05				
Hatay	0,025	0,05	0,15	0,075	0,15	0,15	0,075					
	0,05			0,10			0,10					
	0,075			0,025			0,025					
	0,10		0,2	0,2		0,05	0,2	0,05				
	0,15					0,075		0,075				
	0,20					0,10		0,10				
	0,25					0,025		0,025				
			0,2	0,025	0,25	0,25	0,025					
				0,05			0,05	0,05				
				0,075			0,075	0,075				
							0,25	0,10	0,25	0,25	0,10	
								0,025			0,025	0,025
								0,05			0,05	0,05
								0,075			0,075	0,075

Naknadno je odabran reprezentativan slučaj kako bi se istaknula kvalitativna analiza toplinskih i fluidno-dinamičkih fenomena na fasadama [34, 61]. Uvjeti za ovaj slučaj odgovaraju ljetnim uvjetima, a Sunčevo zračenje je okomito na površinu s južnom orijentacijom u 12 sati. Klimatski podaci za domenu rješenja prikazani su u tablici 2.

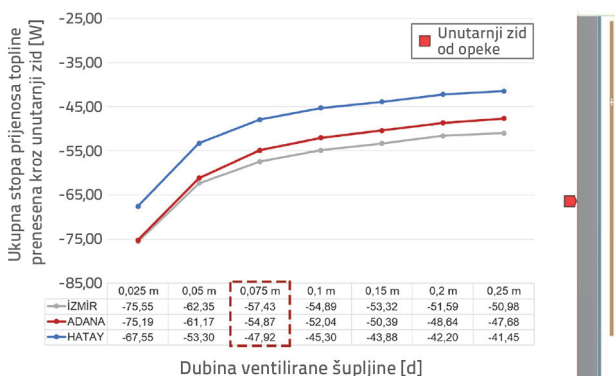
3. Rezultati CFD numeričke simulacije i rasprava

Kako bi se procijenila izvedba parametara koji utječu na neprozirne ventilirane fasade, provedeno je 88 analiza. Četiri glavne stavke o kojima se raspravljalo u evaluaciji sustava takvih fasada i kombinacije svih parametara za analizu prikazani su u tablici 3. Cilj analiza bio je dobiti optimalan oblik neprozirnih ventiliranih fasada i količinu energije potrebnu za pasivno hlađenje. Najvažniji kriterij u rezultatima je "ukupna stopa prijenosa topline (W)". Zbog toga su usporedbe posebno rađene na osnovi parametara i temperature u scenarijima.

3.1. Scenarij 1: Utjecaj klimatskih podataka

Ovdje se ispituju utjecaji klimatskih parametara kao što su temperatura, solarno zračenje i brzina vjetra na debljinu zračnog procjepa. Za analizu su korišteni klimatski podaci za pokrajine Adana, Izmir i Hatay (tablica 2.). Debljina zračnog procjepa u tim je analizama promijenjena, a rezultati su uspoređeni primjenom grafikona prijenosa topline i temperature.

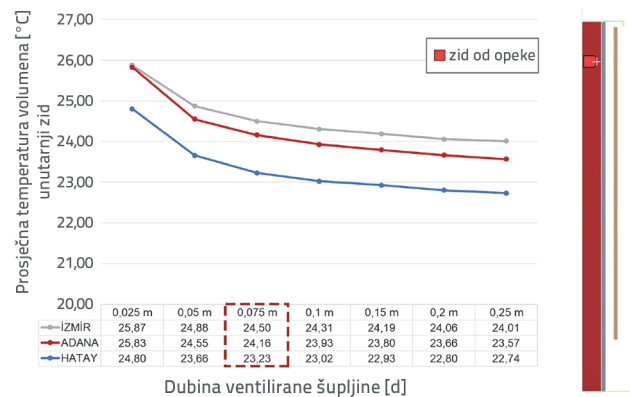
Slijedom toga, svojstva analizirane fasade i granični uvjeti prikazani su u tablici 1. i na slikama 4. i 8. Vjetar i Sunčevo zračenje okomiti su na južno pročelje, a pretpostavljena je visina i dubina od 3 m, odnosno 2 m. Stoga su ispitivanja provedena na ukupnoj površini od 6 m².



Slika 9. Grafikon prijenosa topline za pokrajine Adana, Izmir i Hatay

Prema klimatskim podacima u tablici 2., Izmir ima više vrijednosti Sunčevog zračenja (504,9 W/m), brzine vjetra (3,6 m/s) i temperature (35 °C) od ostalih pokrajina. Štoviše, iako su razlike u zračenju između Izmir-Adana i Adana-Hatay iste, rezultati prijenosa topline su različiti. Izmir je dosegao isti stupanj hlađenja kao Adana te je stupanj temperature smanjen na gotovo jednaku vrijednost zahvaljujući velikim brzinama

vjetra koje pružaju dodatno hlađenje. Međutim, budući da se širina procjepa povećava, brzina se smanjuje, a razlika počinje rasti (slike 9. i 10.).



Slika 10. Grafikon temperature za pokrajine Adana, Izmir i Hatay

Utjecaj povećane brzine u ventilacijskom otvoru očitiji je u pokrajina Izmir u odnosu na druge pokrajine. Zrak u šupljini se povećava jer apsorbira toplinu iz obloge i zida. Stoga se prijenos topline u unutrašnjost smanjuje proporcionalno vremenu čekanja zraka sa smanjenjem vremena čekanja u procjepu. Posljedično, velika brzina vjetra potiče protok zraka u šupljini što rezultira manjim prijenosom topline.

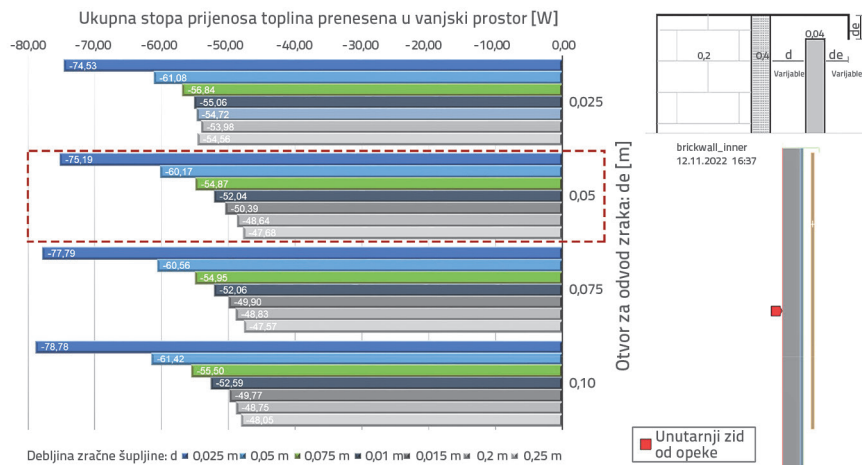
Grafikoni pokazuju da se rezultati za različite dimenzije procjepa u tri pilot pokrajine poklapaju i da su dosljedni. Iz tog razloga, klimatski podaci za pokrajina Adana korišteni su u analizi drugih scenarija jer, među trima pokrajinama, imaju vrijednost najbližu prosjeku.

3.2. Scenarij 2: Utjecaj veličine zračne šupljine d i de

Ovdje se ispituje utjecaj debljine procjepa d i otvor za odvod zraka de na neprozirnim ventiliranim fasadama. Sve kombinacije analizirane su u istim klimatskim uvjetima, debljina procjepa d je u rasponu od 0,025 m do 0,25 m, a otvor za odvod zraka u rasponu od 0,025 m do 0,10 m. Nakon toga, rezultati su uspoređeni na temelju prijenosa topline u unutarnju prostoriju i podataka o temperaturi.

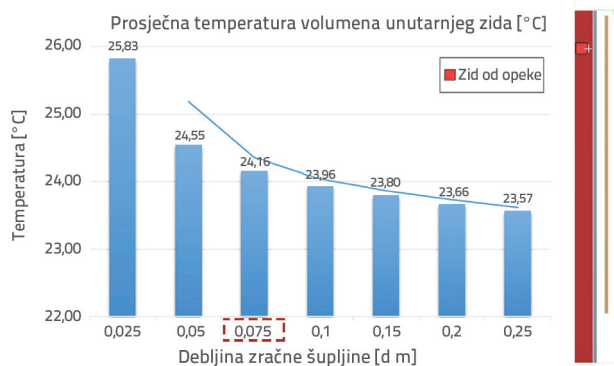
Svojstva analizirane fasade i granični uvjeti navedeni su u tablici 1 te na slikama 4 i 8. Pretpostavilo se da su visina i dubina 3 m, odnosno 2 m i stoga je ukupna ispitana površina 6 m². Vjetar i Sunčevo zračenje okomiti su na južno pročelje.

U ovom se scenariju najprije ispituje utjecaj debljine šupljine (d) na ukupni prijenos topline kroz unutarnju stijenku. Veličina d se uzima u rasponu od 0,025 m do 0,25 m, a na temelju grafikona (slika 11.) vidljivo je da su veličina i prijenos topline obrnuto proporcionalni. Nadalje, ispitan je utjecaj širine procjepa na temelju temperaturnog grafikona. Slika 12. pokazuje da postoji temperaturna razlika od 2 °C između početne vrijednosti i širine šupljine od 0,075 m, pri čemu se temperaturna razlika počinje stabilizirati.



Slika 11. Rezultati analize za različite geometrijske konfiguracije neprozirne ventilirane fasade korištenjem podataka prijensa topline

Ako u sustavu postoji temperaturni gradijent, energija teče iz područja s višom temperaturom u područje s nižom temperaturom. Obloga djelomično apsorbira solarno zračenje i povećava njezinu temperaturu, a dio pohranjene energije prenosi se kao toplinsko zračenje u vanjski okoliš i unutarnji zid. Štoviše, povećanje širine šupljine izravno utječe na složenost konstrukcije i trošak primjene, a promjena debljine zračnog procjepa izravno utječe na prijenos topline; stoga je d najvažniji parametar tijekom oblikovanja neprozirnih ventiliranih fasada. Analize su provedene pomoću de dimenzija u rasponu od 0,025 m do 0,10 m kako bi se ispitao utjecaj veličine otvora za odvod zraka. Na temelju rezultata, uža de dimenzija povećava brzinu zraka na izlaznom otvoru, čime potiče turbulenciju koja otežava odvod zraka u ovom području. Osim toga, toplina koja se prenosi u zatvorenom prostoru ima tendenciju povećanja za odvodne otvore zraka šire od 0,05 m (slika 11.). Debljina zračnog procjepa d od 0,075 m također je upotrijebljena, a istražena je dimenzija de . Na temelju analiziranih rezultata prijensa topline (slika 11.), najniži omjer javlja se pri $de = 0,05$ m jer u ovoj dimenziji procjepa zrak pravilnije izlazi iz ventilacijskog procjepa, što uzrokuje manji prijenos topline u zatvorene prostore. Zbog svih ovih razloga, $d = 0,075$ m i $de = 0,05$ m prihvaćene su kao optimalne dimenzije.

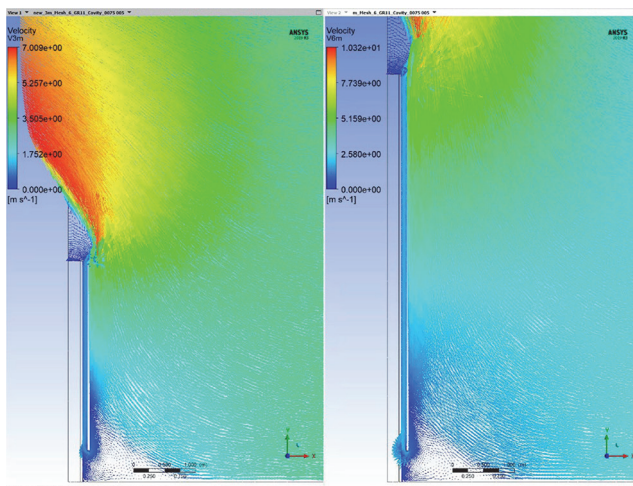


Slika 12. Utjecaj debljine zračne šupljine na temperaturu

3.3. Scenarij 3: Utjecaj visine (H) zračne šupljine

Ovdje su analizirane različite visine neprozirnih ventiliranih fasada: 3 m, 6 m, 9 m, 12 m, 15 m i 18 m. Visina je ograničena na 18 m jer su potrebni različiti konstrukcijski parametri kako bi se spriječilo vertikalno širenje požara nakon 18–20 m [49]. Osim toga, fasada se nalazi u istim klimatskim uvjetima i ima iste dimenzije procjepa kao u drugim scenarijima, dubinu od 2 m, a samo je visina uzeta kao varijabla. Svojstva analizirane fasade i granični uvjeti prikazani su u tablici 1. te na slikama 4. i 8., pri čemu je pretpostavljeno da su vjetar i solarno zračenje okomiti na južno pročelje.

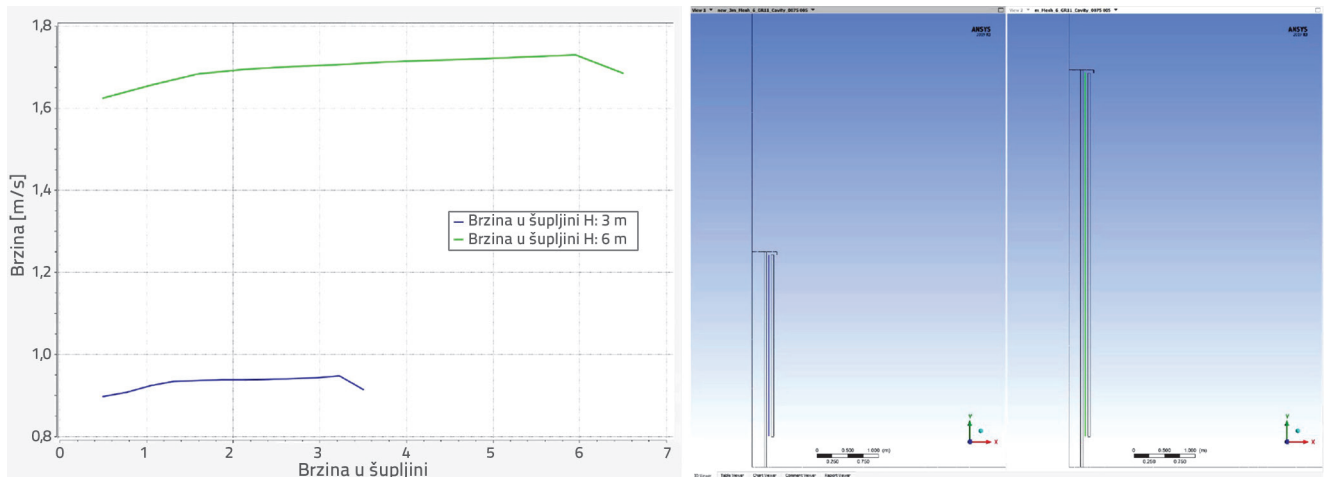
Kao što se može uočiti na slikama 13. i 14., s povećanjem visine fasade, i brzina vjetra i efekt dimnjaka utječu na ventilacijski procjep.



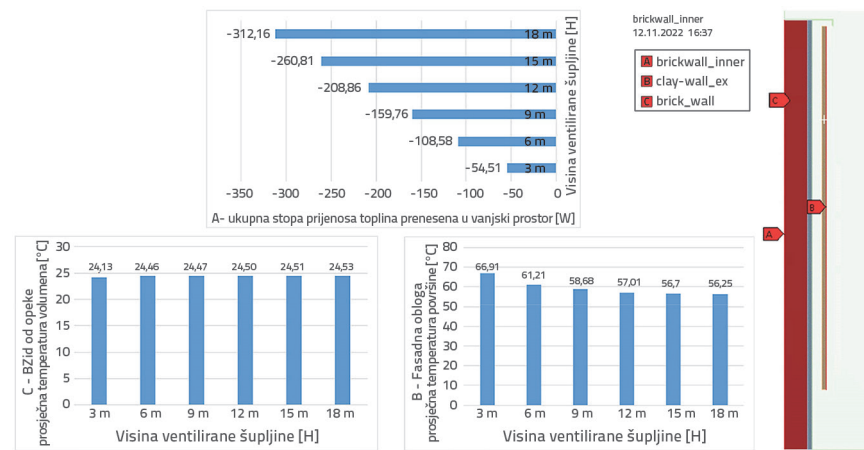
Slika 13. Odnos između visine fasade i gradijenta brzine ($H = 3$ m i 6 m)

Može se zaključiti da povećanje brzine vjetra u ventilacijskom procjepu izravno utječe na temperaturu i snižava prosječnu površinsku temperaturu obloge (slika 15.c). Nadalje, u unutarnjim slojevima fasade smanjuje se prijenos topline u unutrašnjost (slika 15.a). Međutim, prijenos topline po četvornom metru neznatno je smanjen s 0,01 na 0,001 %. Prosječna temperatura volumena zidova od opeke povećava se za 0,3 % na 0,01 °C (slika 15.b).

Kako zrak u procjepu prima toplinu s površina, njegova se gustoća smanjuje i raste, što pokazuje da povećanje udaljenosti dovoda i odvoda zraka na neprozirnoj ventiliranoj fasadi uzrokuje povećanje gradijenta temperature s povećanjem visine. Zbog toga su gornje komponente fasade toplije (slika 16.), što rezultira malim povećanjem površinskih temperatura i sličnim rezultatom umjesto smanjenja prijensa topline.

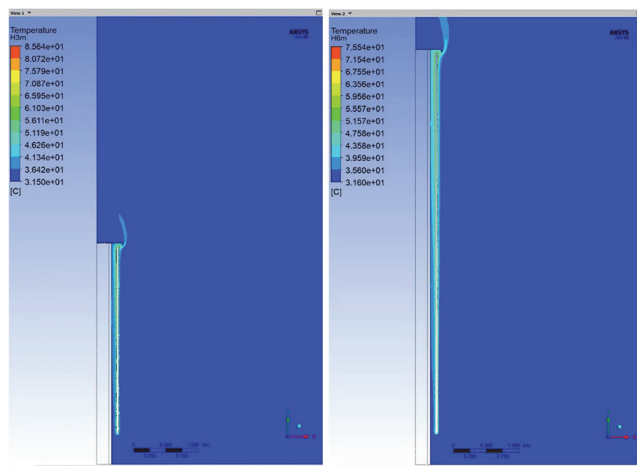


Slika 14. Odnos između visine fasade i brzine u šupljini (H = 3 m i 6 m)



Slika 15. Rezultati analize za visinu H zračne šupljine

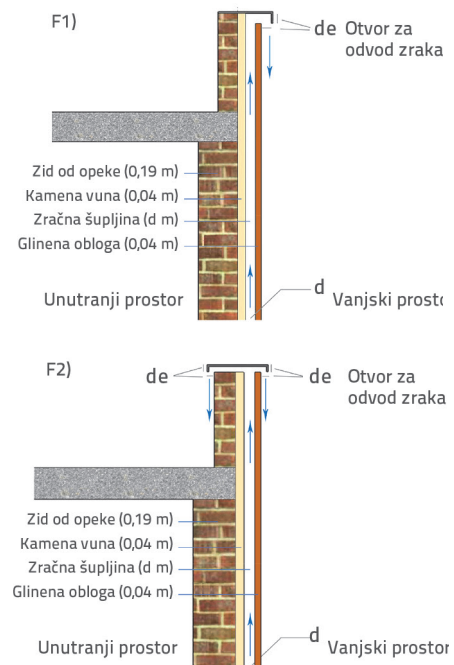
d i d_e za tu fasadu ponovno su ispitane pod istim klimatskim uvjetima, pri čemu su analizirane sve kombinacije F2 fasade, debljina procjepa d_e odabrana u rasponu od 0,025 m do 0,25 m, a otvori za odvod zraka su u rasponu od 0,025 m do 0,10 m. Rezultati su zatim uspoređeni na temelju prijenosa topline u zatvorenom prostoru i podataka o temperaturi. U tablici 1. i na slici 17. prikazana su svojstva analiziranih fasada i granični uvjeti. Pretpostavljena visina i dubina su 3 m, odnosno 2 m, što rezultira ukupnom površinom ispitivanja od 6 m².



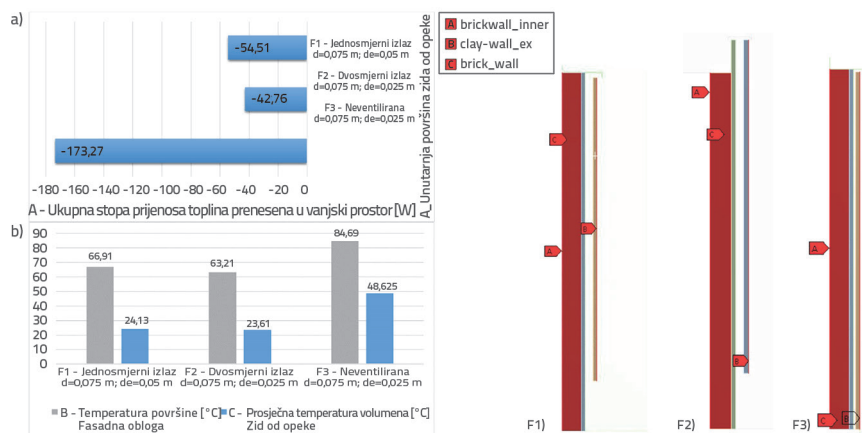
Slika 16. Odnos između visine fasade i gradijenta temperature (H = 3 m i 6 m)

3.4. Scenarij 4: Utjecaj smjera odvoda

Kao nova alternativa, predložena je neprozirna ventilirana fasada s dva odvoda za zrak. Optimalne vrijednosti dimenzija



Slika 17. Presjek fasada F1 i F2

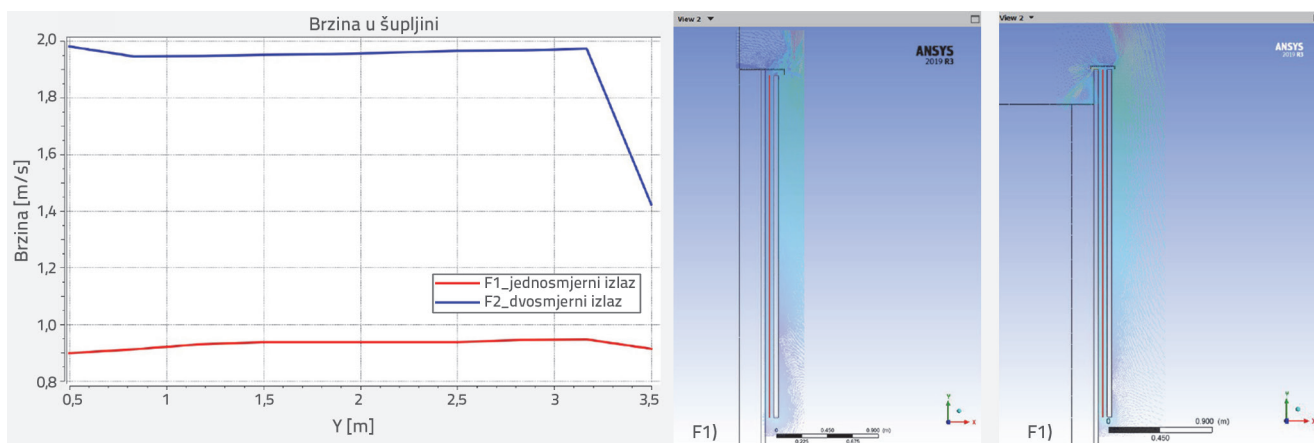


(UF) nakon čega slijedi usporedba rezultata jednosmjerne (F1), dvosmjerne (F2) i neventilirane (F3) fasade. Isti scenariji kao oni u slučaju fasade F1 primijenjeni su za određivanje optimalnih dimenzija procjepa fasada F2 i F3. Na temelju rezultata, debljina šupljine u predloženom F2 sustavu je 0,075 m, a otvori za odvod zraka imaju optimalnu veličinu procjepa od 0,025 m. Slika 18. prikazuje grafikone temeljene na podacima o prijenosu topline i temperaturi, a slika 20 prikazuje temperaturni gradijent. Iz analize fasadnih sustava F1, F2 i F3 s optimalnim dimenzijama izvedeni su sljedeći zaključci.

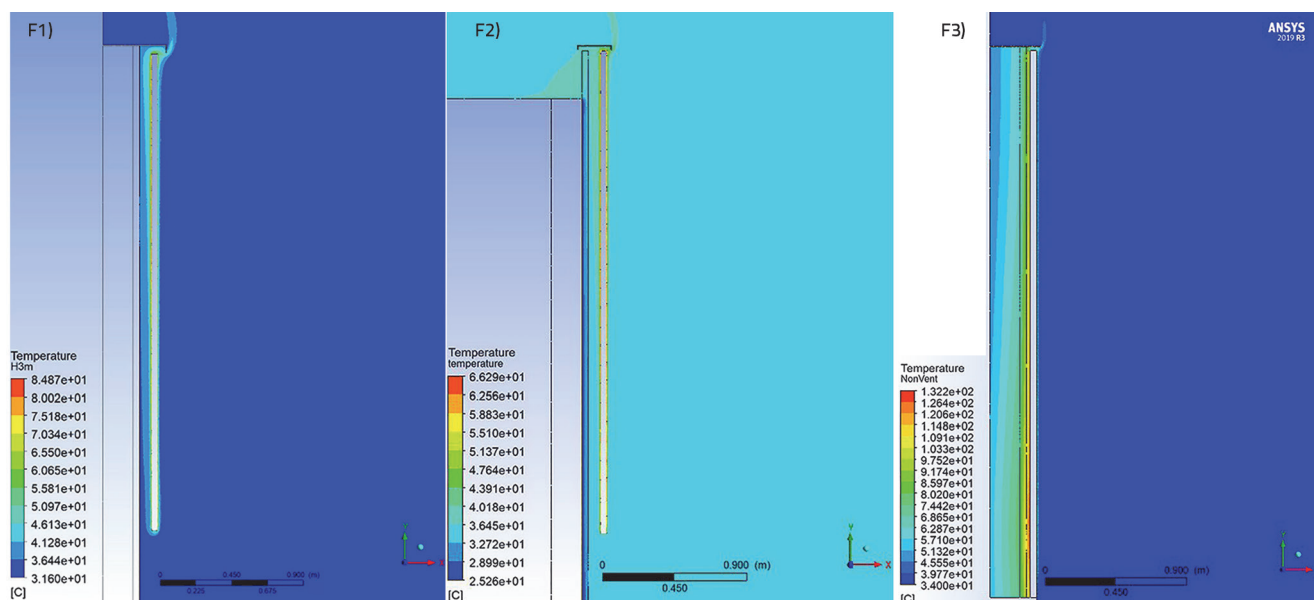
Slika 18. Rezultati analize za fasadne sustave F1, F2 i F3

Vjeter i Sunčevo zračenje okomiti su na južno pročelje. Ovdje se provode analize toplinske učinkovitosti neventilirane fasade

- Slika 18.a prikazuje brzinu prijenosa topline u unutarnje prostore kada se primjenjuju iste dimenzije sustava F1, F2



Slika 19. Grafikon brzine za šupljini i gradijent brzine fasada F1 i F2



Slika 20. Gradijent temperature za fasade F1, F2 i F3

- i F3 i iznose 54,51 W, 42,76 W i 173,27 W. U istim uvjetima, toplina koja se prenosi u unutrašnjost može se smanjiti za 69 % odnosno 75 % u slučaju neventilirane fasade. Štoviše, na temelju njihovih optimalnih vrijednosti, utvrđeno je da sustav F2 prenosi približno 22 % manje topline od sustava F1.
- Na temelju svojih optimalnih veličina, sustavi F1 i F2 imaju gotovo slične vrijednosti temperature unutarnjeg zida (slika 18.b). Međutim, na slici 18.b može se vidjeti da je površinska temperatura fasadne obloge mnogo niža u sustavu F2, jer je prosječna brzina u otvoru u sustavu F2 veća od one u sustavu F1.
 - Prema profilu brzine na slici 19., može se primijetiti da sustav F2 potiče efekt dimnjaka zahvaljujući dvosmjernom odvodu zraka, čime se osigurava brza izmjena zraka u šupljini. Svi su ovi rezultati dokaz da je fasadni sustav F2 učinkovitiji.

Kao što je prikazano na slici 20., temperature fasadnog sloja su vrlo visoke jer fasada pohranjuje toplinu Sunčevog zračenja i prenosi je u unutrašnjost kada nema strujanja zraka. Prema ovim rezultatima, osiguravanje kontroliranog protoka zraka unutar fasade zgrade doprinosi pružanju pasivnog hlađenja.

4. Zaključak

U ovom je radu provedeno istraživanje kojim se ispitala sposobnost neprozirnih ventiliranih fasada da smanji toplinska opterećenja hlađenja i optimalna veličina ventilacijskih otvora kako bi se osiguralo pasivno hlađenje u vrućoj i vlažnoj klimatskoj zoni u Turskoj. Analize su provedene na temelju računalne dinamike fluida (CFD) korištenjem softvera FLUENT.

Istražen je utjecaj klimatskih parametara kao što su temperatura, Sunčevo zračenje i brzina vjetera na neprozirne ventilirane fasade. Otkriveno je da je brzina vjetera značajan parametar koji utječe na toplinsku učinkovitost fasade.

Kada se radi o utjecaju geometrijskih konfiguracija, utvrđeno je da promjena debljine zračnog procjepa d izravno utječe na prijenos topline; stoga je to najvažniji parametar tijekom

oblikovanja neprozirnih ventiliranih fasada. Štoviše, povećanje širine šupljine izravno utječe i na složenost konstrukcije i na trošak primjene. Zbog svih ovih razloga, vrijednost od $d = 0,075$ m smatra se optimalnom debljinom.

Nadalje, uže dimenzije d povećavaju brzinu zraka na izlazu, čime se potiče turbulencija u ovom području i otežava odvod zraka u šupljini. Toplina koja se prenosi u unutrašnjost ima tendenciju povećanja za odvodne otvore zraka šire od 0,05 m. Međutim, promjena veličine ne utječe značajno na prijenos topline. Stoga to nije odlučujući konstrukcijski parametar za analizu.

Štoviše, visina fasade povećava protok zraka unutar zračne šupljine, što izravno utječe na temperaturu. Točnije, snižava prosječnu površinsku temperaturu obloge. Kako zrak u procjepu apsorbira toplinu s površina, njegova se gustoća smanjuje i raste. To znači da ako se povećaju udaljenosti dovoda i odvoda zraka neprozirnih ventiliranih fasada, temperaturni gradijent raste s visinom, a temperatura gornjih komponenti fasade se povećava. Stoga je uočen mali porast površinskih temperatura i dobiveni su približni rezultati umjesto smanjenja prijenosa topline.

Kada se radi o učinku smjera odvoda, utvrđeno je da sustav F2 potiče efekt dimnjaka zahvaljujući svom dvosmjernom odvodu zraka, koji olakšava brzu izmjenu zraka u šupljini. Iz tog razloga fasada F2 ima manju vrijednost prijenosa topline u unutarnji prostor u odnosu na fasadu F1 u istim uvjetima i s istim geometrijskim dimenzijama. Svi ovi rezultati dokaz su da je fasadni sustav F2 učinkovitiji od F1.

Rezultati ovog istraživanja pokazuju da se, u usporedbi s neventiliranom fasadom F3, toplina prenesena u unutarnji prostor u fasadi s jednosmjernim odvodom zraka F1 i dvosmjernim odvodom zraka F2 može smanjiti za 69 % odnosno 75 %.

Rezultati ovog istraživanja naglašavaju prednosti neprozirne ventilirane fasade u sprječavanju pregrijavanja tijekom ljetnog razdoblja. To je zato što se pasivno hlađenje može postići u područjima koja se nalaze u vrućim i vlažnim klimatskim zonama primjenjujući kontrolirani protok zraka pomoću fasada zgrada. U budućim istraživanjima također treba raspravljati o učinkovitosti fasada tijekom zime te o cijeni fasadnog sustava.

LITERATURA

- [1] EPDK: Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, 2021.
- [2] TÜİK: TÜİK Kurumsal, <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Yapi-Izin-Istatistikleri-Ocak-Eylul,-2021-37463,11/20/2021>.
- [3] Türk Coğrafya Kurumu: Bölgeler ve İller, Türk Coğrafya Kurumu, (2006)
- [4] Goldsmith, N.: Building skin, Fabric Architecture, 18 (2006) 3, pp. 14-15, https://doi.org/10.1007/978-3-7643-7729-8_1.
- [5] Knaack, U., Koenders, E.: Building Physics of the Envelope, De Gruyter, Berlin, 2018.
- [6] IEA: World Energy Statistics and Balances (database), www.iea.org/statistics, 07/12/2021.
- [7] Green Building Council: 2020 Global Status Report for Buildings and Construction, Nairobi, 2020.
- [8] McMullan, R.: Environmental Science in Building, The Macmillan Press Ltd, London, 1983.
- [9] Sakonidou, E.P., Karapantsios, T.D., Balouktsis, A.I., Chassapis, D.: Modeling of the optimum tilt of a solar chimney for maximum air flow, Solar Energy, 82 (2008) 1, pp. 80-94, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.03.001>.

- [10] Zamora, B., Kaiser, A.S.: Numerical study on mixed buoyancy-wind driving induced flow in a solar chimney for building ventilation, *Renewable Energy*, 35 (2010) 9, pp. 2080-2088, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.009>.
- [11] Chan, A.L.S., Chow, T.T., Fong, K.F., Lin, Z.: Investigation on energy performance of double skin façade in Hong Kong, *Energy and Buildings*, 41 (2009) 11, pp. 1135-1142, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.012>.
- [12] Faggembauu, D.: Heat transfer and fluid-dynamics in double and single skin facades, (2007) pp. 210,
- [13] Gratia, E., De Herde, A.: Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade, *Solar Energy*, 81 (2007) 4, pp. 435-448, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.08.006>.
- [14] Saelens, D., Roels, S., Hens, H.: Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades, *Building and Environment*, 43 (2008) 4, pp. 638-650, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.024>.
- [15] Cerón, I., Caamaño-Martín, E., Neila, F.J.: State-of-the-art of building integrated photovoltaic products, *Renewable Energy*, 58 (2013) pp. 127-133, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.02.013>.
- [16] Quesada, G., Rousse, D., Dutil, Y., Badache, M., Hallé, S.: A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (2012) 5, pp. 2643-2651, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.059>.
- [17] Zogou, O., Stapountzis, H.: Experimental validation of an improved concept of building integrated photovoltaic panels, *Renewable Energy*, 36 (2011) 12, pp. 3488-3498, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.034>.
- [18] Ciampi, M., Leccese, F., Tuoni, G.: Ventilated facades energy performance in summer cooling of buildings, *Solar Energy*, 75 (2003) 6, pp. 491-502, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.09.010>.
- [19] Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J.A., Martín-Gómez, C.: Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79 (2017) April 2016, pp. 180-191, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.059>.
- [20] Balocco, C.: A simple model to study ventilated facades energy performance, *Energy and Buildings*, 34 (2002) 5, pp. 469-475, [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(01\)00130-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(01)00130-X).
- [21] Patania, F., Gagliano, A., Nocera, F., Ferlito, A., Galesi, A.: Thermofluid-dynamic analysis of ventilated facades, *Energy and Buildings*, 42 (2010) 7, pp. 1148-1155, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.02.006>.
- [22] Gagliano, A., Patania, F., Ferlito, A., Nocera, F., Galesi, A.: Computational Fluid Dynamic Simulations of Natural Convection in Ventilated Facades (Chapter), *Evaporation, Condensation and Heat transfer*, Dr. Amimul Ahsan (Ed.), InTech, pp. 582, 2011.
- [23] Gagliano, A., Aneli, S.: Analysis of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade under winter and summer weather conditions, *Solar Energy*, 205 (2020) June, pp. 531-544, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.078>.
- [24] Vos, B.H.: Thermal and Hygric Properties of Cavity Walls(in Dutch), *Technisch-Wetenschappelijk Tijdschrift*, 32 (1963) 6,
- [25] Hens, H., Janssens, A., Depraetere, W., Carmeliet, J., Lecompte, J.: Brick cavity walls: A performance analysis based on measurements and simulations, *Journal of Building Physics*, 31 (2007) 2, pp. 95-124, <https://doi.org/10.1177/1744259107082685>.
- [26] Davidovic, D., Piñon, J., Burnett, E.F.P., Srebric, J.: Analytical procedures for estimating airflow rates in ventilated, screened wall systems (VSWS), *Building and Environment*, 47 (2012) 1, pp. 126-137, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.04.002>.
- [27] Falk, J., Molnár, M., Larsson, O.: Investigation of a simple approach to predict rainscreen wall ventilation rates for hygrothermal simulation purposes, *Building and Environment*, 73 (2014), pp. 88-96, <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2013.11.025>.
- [28] Falk, J., Sandin, K.: Ventilated rainscreen cladding: A study of the ventilation drying process, *Building and Environment*, 60 (2013), pp. 173-184, <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.11.015>.
- [29] Suresh Kumar, K.: Pressure equalization of rainscreen walls: A critical review, *Building and Environment*, 35 (2000) 2, pp. 161-179, [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00015-3).
- [30] Giancola, E., Sanjuan, C., Blanco, E., Heras, M.R.: Experimental assessment and modelling of the performance of an open joint ventilated façade during actual operating conditions in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 54 (2012), pp. 363-375, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.07.035>.
- [31] Marinosci, C., Semprini, G., Morini, G.L.: Experimental analysis of the summer thermal performances of a naturally ventilated rainscreen façade building, *Energy and Buildings*, 72 (2014), pp. 280-287, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.044>.
- [32] Romalia, C.: General principles for the design and construction of ventilated facades, *Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași Tomul LIX (LXIII)*, 10 (2013) 3, pp. 161-169,
- [33] Davidovic, D., Srebric, J., Burnett, E.F.P.: Modeling convective drying of ventilated wall chambers in building enclosures, *International Journal of Thermal Sciences*, 45 (2006) 2, pp. 180-189, <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2005.06.002>.
- [34] Suárez, M.J., Sanjuan, C., Gutiérrez, A.J., Pistono, J., Blanco, E.: Energy evaluation of an horizontal open joint ventilated faade, *Applied Thermal Engineering*, 37 (2012), pp. 302-313, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.034>.
- [35] Sanjuan, C., Sánchez, M.N., Heras, M. del R., Blanco, E.: Experimental analysis of natural convection in open joint ventilated façades with 2D PIV, *Building and Environment*, 46 (2011) 11, pp. 2314-2325, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.014>.
- [36] Stazi, F., Vegliò, A., Di Perna, C.: Experimental assessment of a zinc-titanium ventilated façade in a Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 69 (2014), pp. 525-534, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.043>.
- [37] Stazi, F., Tomassoni, F., Vegliò, A., Di Perna, C.: Experimental evaluation of ventilated walls with an external clay cladding, *Renewable Energy*, 36 (2011) 12, pp. 3373-3385, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.016>.
- [38] Labat, M., Woloszyn, M., Garnier, G., Rusaouen, G., Roux, J.J.: Impact of direct solar irradiance on heat transfer behind an open-jointed ventilated cladding: Experimental and numerical investigations, *Solar Energy*, 86 (2012) 9, pp. 2549-2560, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.05.030>.
- [39] Mora-Pérez, M., López-Patiño, G., Amparo López-Jiménez, P.: Quantification of Ventilated Façade Effect Due to Convection in Buildings Buoyancy and Wind Driven Effect, *Researches and Applications in Mechanical Engineering*, 3 (2014)
- [40] Gagliano, A., Nocera, F., Aneli, S.: Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period, *Energy and Buildings*, 122 (2016), pp. 131-139, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.035>.

- [41] Naboni, E., Tarantino, S.: The Climate Based Design of Opaque Ventilated Façades, *Energy Forum Bressanone*, (2014) Naboni, pp. 1023-1030,
- [42] Guillén, I., Gómez-Lozano, V., Fran, J.M., López-Jiménez, P.A.: Thermal behavior analysis of different multilayer façade: Numerical model versus experimental prototype, *Energy and Buildings*, 79 (2014), pp. 184-190, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.006>.
- [43] Aparicio-Fernández, C., Vivancos, J.L., Ferrer-Gisbert, P., Royo-Pastor, R.: Energy performance of a ventilated façade by simulation with experimental validation, *Applied Thermal Engineering*, 66 (2014) 1-2, pp. 563-570, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.041>.
- [44] Gregório-Atem, C., Aparicio-Fernández, C., Coch, H., Vivancos, J.L.: Opaque ventilated façade (OVF) thermal performance simulation for office buildings in Brazil, *Sustainability (Switzerland)*, 12 (2020) 18, <https://doi.org/10.3390/su12187635>.
- [45] Looman, R.: Climate-responsive design: A framework for an energy concept design-decision support tool for architects using principles of climate-responsive design, *A+BE Architecture and the Built Environment*, 1 (2017), pp. 1-282,
- [46] Marinosci, C., Strachan, P.A., Semprini, G., Morini, G.L.: Empirical validation and modelling of a naturally ventilated rainscreen façade building, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 4, pp. 853-863, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.005>.
- [47] TS 825: Binalarda Isi Yalıtım Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2013.
- [48] EN ISO 6946:2017: Building components and building elements - Thermal resistance and thermal transmittance - Calculation methods, Dublin, Ireland, 2017.
- [49] CWCT: Centre for Window & Cladding Technology, <https://www.cwct.co.uk/pages/facets#!articles/1222-9011-0204-drained-and-ventilate>, 10/17/2021.
- [50] Šagát, E., Matějka, L., Pěnčík, J.: Experimental Assessment of the Influence of Outlet Geometry on the Airflow and Temperatures in the Ventilated Façade Cavity, *Applied Mechanics and Materials*, 824 (2016), pp. 641-648, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.824.641>.
- [51] Nghana, B., Tariku, F., Bitsuamlak, G.: Assessing ventilation cavity design impact on the energy performance of rainscreen wall assemblies: A CFD study, *Building and Environment*, 196 (2021) March, pp. 107789, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107789>.
- [52] Lerma, C., Mas, Á., Gil, E., Vercher, J.: Hygrothermal Behaviour of Continuous Air Chambers on Stone Panels Façades through CFD and IRT, *Applied Sciences*, 9 (2019) 15, pp. 3001, <https://doi.org/10.3390/app9153001>.
- [53] ANSYS: ANSYS FLUENT 12.0 User's Guide - 6.2.2 Mesh Quality, <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>, 10/18/2021.
- [54] Chen, Q.: Comparison of different $k-\epsilon$ models for indoor air flow computations, *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 28 (1995) 3, pp. 353-369, <https://doi.org/10.1080/10407799508928838>.
- [55] Xamán, J., Álvarez, G., Lira, L., Estrada, C.: Numerical study of heat transfer by laminar and turbulent natural convection in tall cavities of façade elements, *Energy and Buildings*, 37 (2005) 7, pp. 787-794, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.11.001>.
- [56] Sanjuan, C., Suárez, M. J., González, M., Pistono, J., Blanco, E.: Energy performance of an open-joint ventilated façade compared with a conventional sealed cavity façade, *Solar Energy*, 85 (2011) 9, pp. 1851-1863, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.028>.
- [57] Sanjuan, C., Suárez, M.J., Blanco, E., Heras, M.D.R.: Development and experimental validation of a simulation model for open joint ventilated façades, *Energy and Buildings*, 43 (2011) 12, pp. 3446-3456, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.005>.
- [58] Sanjuan, C.: Análisis Del Comportamiento Térmico Y Fluido-Dinámico De Las Fachadas Ventiladas De Junta Abierta, Universidad de Oviedo, Madrid.
- [59] FLUENT, A.: 12.0 Theory Guide, 2009.
- [60] ANSYS FLUENT 13 User's Guide: Ansys Fluent Theory Guide, 2013.
- [61] Santa Cruz Astorqui, J., Porras-Amores, C.: Ventilated Façade with double chamber and flow control device, *Energy and Buildings*, 149 (2017), pp. 471-482, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.063>.
- [62] NOAA: Solar Calculator Links, <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/sollinks.html>, 01/18/2022.
- [63] EPW: Climatewebsite\WMO_Region_6_Europe\TUR_Turkey, https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/TUR_Turkey/index.html, 01/12/2022.
- [64] European Commission: JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP, 04/05/2022.