

Primljen / Received: 16.2.2017.

Ispravljen / Corrected: 20.6.2018.

Prihvaćen / Accepted: 3.7.2018.

Dostupno online / Available online: 10.12.2018.

Modeliranje toplinskih gubitaka višekratne dvoslojne fasade s ciljem kvalifikacije energetski djelotvorne strategije upravljanja

Autori:



Zdravko Eškinja, dipl.ing.elekt.
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
zdravko.eskinja@gmail.com



Dr.sc. **Stanko Ružić**, dipl.ing.brod.
Brodarski Institut, Zagreb
stanislav.ruzic@gmail.com



Dr.sc. **Ognjen Kuljača**, dipl.ing.elekt.

Prethodno priopćenje

Zdravko Eškinja, Stanko Ružić, Ognjen Kuljača

Modeliranje toplinskih gubitaka višekratne dvoslojne fasade s ciljem kvalifikacije energetski djelotvorne strategije upravljanja

U radu je predstavljena alternativna strategija poboljšanja energetske učinkovitosti primjenom novih tehničkih rješenja u sustavima dvoslojnih fasada (eng. Double Skin Façade, DSF). Istraživanje je fokusirano na model s ciljem kvalifikacije djelotvorne strategije upravljanja koja koristi sustav neuronskih mreža (ANN) i podešavanje prilagođenom Lyapunovom metodom. Rezultati provedenih istraživanja su opravdali upotrebu jednostavnih diferencijalnih jednadžbi u daljnjem istraživanju upravljanja dinamikom DSF-a.

Ključne riječi:

višekratna dvoslojna fasada, dinamičko modeliranje, numeričke simulacije, automatsko upravljanje

Preliminary note

Zdravko Eškinja, Stanko Ružić, Ognjen Kuljača

Modelling heat loss through multi storey double skin façade as preliminaries for an energy efficient control strategy

The paper introduces a novel strategy to improve energy consumption by applying new technical solution in Double Skin Façade (DSF) systems. The strategy is based on equalizing thermal loss through all elements of the envelope, but without direct action on interior zone. The focus of this study is in modelling as preliminary action before designing an efficient control strategy through Artificial Neural Network (ANN) based on Lyapunov-like tuning. Results of other experiments will justify the usage of this simplified differential description in further control study of DSF dynamics.

Ključne riječi:

multi storey double skin façade, dynamic modelling, numerical simulation, automatic control

Vorherige Mitteilung

Zdravko Eškinja, Stanko Ružić, Ognjen Kuljača

Modellierung thermischer Verluste bei mehrstöckigen Doppelfassaden mit dem Ziel der Qualifizierung einer energieeffizienten Managementstrategie

In der Abhandlung wird eine alternative Strategie der Verbesserung der Energieeffizienz durch Anwendung neuer technischer Lösungen bei Doppelfassadensystemen vorgestellt (engl. Double Skin Façade, DSF). Die Untersuchung fokussiert sich auf das Modell mit dem Ziel, eine wirksame Managementstrategie zu qualifizieren, die das System neuronaler Netzwerke (ANN) sowie die Einstellung mithilfe der angepassten Lyapunov-Methode anwendet. Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen rechtfertigen die Anwendung einfacher Differenzialgleichungen bei der weiteren Untersuchung des Dynamikmanagements des DSF.

Schlüsselwörter:

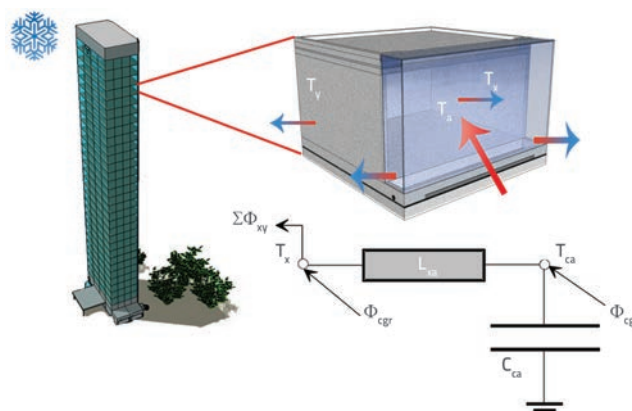
mehrstöckige Doppelfassade, DSF, dynamische Modellierung, numerische Simulation, automatisches Management

1. Uvod

Dvoslojna fasada (eng. *Double Skin Façade* - DSF) uobičajan je tip ovojnice za uredske zgrade. Učinkovitost ovog elementa česta je tema znanstvenih istraživanja zbog čega je dinamika u sustavima DSF-a vrlo dobro poznata, što je i vidljivo iz rezultata prikazanih u radovima [1-4]. Ipak, projektiranje aktivnog automatiziranog sustava DSF-a je priličan izazov zbog slabe osmotrivosti, a uz to, složeni proces identifikacije, visoka nelinearnost i izrazita interdisciplinarnost dodatno otežavaju rad. U ovom radu je obrađen samo mali detalj problematike, pa je i sustav DSF-a pojednostavljen u tom smjeru. Predstavljena je alternativna strategija upravljanja. Za razliku od ostalih rješenja koja su uglavnom usmjerena na optimizaciju HVAC (eng. *Heat, Ventilation And Conditioning* - HVAC) sustava, ova upravljačka metoda direktno pokušava povećati energetska učinkovitost kritičnog elementa. Ukupna energetska učinkovitost zgrade s DSF sustavom može se povećati unošenjem raspoloživog termalnog medija s potrebnim svojstvima u šupljinu DSF-a. Raspoloživost u ovom kontekstu ima značenje da ne zahtijeva nikakve dodatne troškove. Također, u teoriji upravljanja aktivnim sustavima DSF-a, postoji praktičan problem učinkovite toplinske regulacije jer nema precizne informacije o toplinskim tokovima ([5-7] itd.). U našem slučaju, pitanje je vezano za grijanje zraka i njegovog unosa u šupljinu između stijenki, kad je zadatak izjednačiti toplinske gubitke između svih vertikalnih ravnina u ovojnici zgrade. Rješenje leži u razvoju prikladnog modela koji bi omogućio regulaciju neuronskom mrežom (eng. *Artificial Neural Network*, ANN) kao što je i opisano u [8-12]. Prema [8] i ostalim radovima, ANN je univerzalni aproksimator što znači da može aproksimirati svaku glatku funkciju sa željenom točnošću. Cilj je aproksimacija, i upravljanje sustava kao cjeline, a ne određenih parametara kao što je to slučaj u klasičnom adaptivnom upravljanju. Može se konstatirati kako je ovaj pristup oslobođen modela pri razvoju upravljačkog sustava. Ipak, to nije sasvim točno: postoje određeni preduvjeti koji omogućuju ovakav pristup upravljanju. Glavni preduvjet je stabilnost upravljanog sustava u otvorenoj petlji ili barem pasivnost sustava [13, 14]. Stoga, potrebno je analizirati i modelirati sustav DSF-a u obliku prikladnom za dokaz stabilnosti, dakle pokazati da je ANN upravljanje izvedivo. Budući da je to cilj rada, većina pozornosti je usmjerena na ponašanje sustava, a ne na detaljnu identifikaciju parametara.

Novina u DSF sustavima je konstantna potreba za aktivnom regulacijom. Prvi korak u oblikovanju upravljačke strategije jest matematički opisati sustav. Umjesto započinjanja od nule, ideja je bila koristiti provjerene modele iz programskih alata za simuliranje energetske dinamike u zgradarstvu. Na taj način, fokus modeliranja je zadržan na specifičnoj dinamici DSF-a. Većina standardnih simulacijskih alata za zgrade (npr. EnergyPlus®, ESP - r®, TrnSys®, EDSL Tas®, IDA ICE®, VA 114®, BSim®), koji su razvijeni za konvencionalne građevne elemente, ne može dovoljno precizno opisati prijelazne procese topline i zračne mase koji se pojavljuju u složenom trodimenzionalnom prostoru DSF-a, kao što je zaključeno u [15]. Stoga, očekuju se

značajne devijacije u odnosu na stvarni sustav. Jedno od rješenja je složenije upravljanje gdje adaptivni algoritmi kompenziraju gore navedene nedostatke.



Slika 1. Segment DSF zgrade

2. Modeliranje dinamike u DSF koridoru

Slika 1. prikazuje segment višekatne zgrade u sustavu dvoslojnih fasada koji je korišten kao ispitni objekt za ovo istraživanje. Funkcija toplinskog toka, prema [16], trodimenzionalna je parabolična parcijalna diferencijalna jednačnja, i jedini mogući način da se numerički izračuna jest uvođenje aproksimacija. Autorov odabir tipa aproksimacije pri računanju su termalne mreže. Takav je model detaljno opisan u [17], ovdje izostavljen zbog sažetosti te kako bi se izbjegla nepotrebna ponavljanja prethodno objavljenih i dostupnih istraživanja. Ukratko, toplinski tokovi su analogni strujama (Φ_{cg} - toplina svih unutarnjih izvora - sve osim HVAC, eng. *common heat gains*, Φ_{cgr} toplina radijacije, Φ_{xy} - toplina vanjskih površina itd.), temperature su analogne potencijalu (T_{ca} - temperature zraka u koridoru, T_x - unutarnja površinska temperatura), a koeficijenti toplinskih gubitaka su analogni otporu (L_{ca} - koeficijent između T_x i T_{ca}) te je toplinski kapacitet analogan električnom (C_{ca} - toplinski kapacitet koridora). Takvim pristupom autori su izbjegli kompleksna modeliranja, kao i radikalna pojednostavljenja poput onih u inženjerskim standardima i priručnicima kao npr. [18-21]. U velikoj domeni postojećih simulacijskih alata [22], najprikladnijim odabirom se pokazao HAMBASE model koji je podvrgnut različitim numeričkim i empirijskim analizama [17]. Numeričke analize sastojale su se od komparativnih testiranja te analitičkih verifikacija. Pri komparativnim testiranjima primjenjena je sjevernoamerička norma ASHRAE Bestest, [23].

Toplinska, hidrostatička i dinamika fluida međusobno su povezane. Njihove ovisnosti su značajno nelinearne, te je u smislu njihove provjere poželjno promatrati područja i uvjete u kojima linearizacija daje najbolje rezultate. Potrebni podaci o odzivu sustava su prikupljeni ponovljenim pokusima u kontroliranim uvjetima. Obično se za tu svrhu upotrebljavaju simulatori stvarnih dimenzija [24], međutim, takav pristup

je financijski, logistički i vremenski vrlo zahtjevan. Stoga je dinamika u ovom radu ispitana na skaliranom modelu u potpuno osmotrivom i upravljivom okruženju. Upotreba skaliranog modela, a ni upravljanje termodinamičkim procesima u DSF-u, nije uobičajena praksa u građevinarstvu. Već je u samom početku jasno kako neće biti zadovoljavajućeg podudaranja u vrijednostima promatranih procesa kod realnih i skaliranih sustava, no očekuje se sličnost u obliku prijelaznih pojava, kao što je bio i slučaj u [25]. Praksa je multimilijunskih investicija (pokazano u [26]) usporediti simulirane i mjerene rezultate prije gradnje, pa čak i tijekom same faze izgradnje, takozvane komisijske faze (eng. *commissioning phase*), s ciljem kalibracije i eventualne korekcije projekta.

2.1. Termodinamika

Najmanji entitet zgrade je zona. Zona je prostor s ujednačenim uvjetima: temperaturom, relativnom vlažnošću i postavkama HVAC-a. Termodinamički sustav od dvije zone, interijer i koridor, analiziran je s aspekta upravljanja. Sustav je opisan u formi prostora stanja za integraciju nelinearne funkcije. Također je pretpostavljeno kako nema infiltracije zraka između zona, a nema ni prozora ni vrata. Razmotrena je mogućnost upotrebe garaža kao dnevno obnovljivog toplinskog spremnika [27].

Poboljšanje energetske učinkovitosti zgrade temelji se na višefunkcionalnoj upotrebi DSF-a. Prema [17], DSF se može modelirati kao zona s dodatnim izvorima topline kao ulazima. Ova će se metoda primjenjivati u numeričkim simulacijama modela i analizi stabilnosti. Budući da je riječ o DSF tipa koridor, sustav se također može modelirati kao zona obložena jednostrukim zidom. Primjenom analogije termalnih mreža, dinamika DSF-a može biti opisana kao u višeslojnom zidu. Za oboje, zid i DSF, diferencijalne jednadžbe toplinskih tokova u graničnim uvjetima su linearizirane oko radne točke. Zbog različitog ponašanja na različitim frekvencijama, navedeni proces je podijeljen u proces cikličnog primanja (1) (eng. *admittance*) i prijenosa (2) (eng. *transmittance*):

$$k_{a1} \frac{d^2 \Phi_x}{dt^2} + k_{a2} \frac{d\Phi_x}{dt} + \Phi_x = k_{a3} \frac{d^2 T_x}{dt^2} + k_{a4} \frac{dT_x}{dt} \quad (1)$$

$$k_{t1} \frac{d^2 \Phi_{xy}}{dt^2} + k_{t2} \frac{d\Phi_{xy}}{dt} + \Phi_{xy} = A_{xy} U_{xy} T_{xy} (t - t_d) \quad (2)$$

gdje

$$k_{a1} = \frac{C_{x1} + C_{x2}}{L_{x1} + L_{x2}} \quad k_{a2} = \left(\frac{C_{x1}}{L_{x1}} + \frac{C_{x2}}{L_{x2}} \right) \quad (3)$$

$$k_{a3} = (L_{x1} + L_{x2}) \frac{C_{x1} C_{x2}}{L_{x1} L_{x2}} \quad k_{a4} = (C_{x1} + C_{x2})$$

$$k_{t1} = \tau_1 \tau_2 \quad k_{t2} = \tau_1 + \tau_2$$

Φ_x je toplina usmjerena prema DSF-u, a Φ_{xy} je transmisijski toplinski gubitak DSF-a. U_{xy} je koeficijent ukupne toplinske transmisije ($W/(m^2K)$) DSF-a. C_{x1} i C_{x2} su koeficijenti toplinskog spremnika unutrašnjih površina koridora. L_{x1} i L_{x2} su koeficijenti sprežanja. A_{xy} je površina razmatranog elementa. τ_1 i τ_2 su vremenske konstante toplinske transmisije. t_d je kašnjenje (eng. *time lag*) odziva temperature što uzrokuje nezaobilazne nelinearnosti u toplinskom toku. Svi koeficijenti se ne mogu izmjeriti, pa se do njihovih vrijednosti dolazi metodom minimizacije funkcije greške modela u odnosu na stvarni sustav [28]. Varijabla T_{xy} je temperaturna razlika između rezultantne površinske temperature T_x i temperature vanjskog zraka T_y . T_y se može mjeriti, a T_x estimirati relacijom (4) koja je izvedena iz admitancije sustava (1).

$$T_x = \frac{C_{ca}}{L_{xa}} \frac{dT_{ca}}{dt} + T_{ca} - \frac{1}{L_{xa}} \Phi_{cg} \quad (4)$$

gdje je T_{ca} temperatura koridora, C_{ca} je toplinski koeficijent zraka u koridoru (J/K), L_{xa} je koeficijent toplinskih gubitaka prema staklenoj površini, a Φ_{cg} je toplinski tok koji je ukupni rezultat svih unutarnjih poremećaja sustava (slika 1.).

Transmisijski dio termodinamike opisanog s (2) može biti i u obliku izraza (5):

$$\frac{d^2 \Phi_{xy}}{dt^2} + \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2} \frac{d\Phi_{xy}}{dt} + \frac{\Phi_{xy}}{\tau_1 \tau_2} = \frac{A_{xy} U_{xy} C_{ca}}{\tau_1 \tau_2 L_{xa}} \frac{dT_{ca}(t - t_d)}{dt} + \frac{A_{xy} U_{xy} T_{ca}(t - t_d)}{\tau_1 \tau_2} \quad (5)$$

$$\frac{A_{xy} U_{xy} \Phi_{cg}(t - t_d)}{\tau_1 \tau_2 L_{xa}} - \frac{A_{xy} U_{xy} T_y(t - t_d)}{\tau_1 \tau_2}$$

gdje je korištena supstitucija za T_x relacijom (4). Potom se jednostavnom grupacijom kreira vrlo dobro poznat oblik diferencijalne jednadžbe (6):

$$\frac{d^2 \Phi_{xy}(t)}{dt^2} + a_1 \frac{d\Phi_{xy}(t)}{dt} + a_0 \Phi_{xy} = b_1 \frac{dT_{ca}(t - t_d)}{dt} + b_0 T_{ca}(t - t_d) - \Phi_{aux}(t - t_d) \quad (6)$$

Ili u kraćoj formi:

$$\ddot{\Phi}_{xy}(t) + a_1 \dot{\Phi}_{xy}(t) + a_0 \Phi_{xy}(t) = b_1 \dot{T}_{ca}(t - t_d) + b_0 T_{ca}(t - t_d) - \Phi_{aux}(t - t_d) \quad (7)$$

gdje su:

$$a_1 = \frac{\tau_1 + \tau_2}{\tau_1 \tau_2}, \quad a_0 = \frac{1}{\tau_1 \tau_2}$$

$$b_1 = \frac{A_{xy} U_{xy} C_{ca}}{L_{xa} \tau_1 \tau_2}, \quad b_0 = \frac{A_{xy} U_{xy}}{\tau_1 \tau_2} \tag{8}$$

$$\Phi_{aux}(t - t_d) = \frac{A_{xy} U_{xy}}{\tau_1 \tau_2} \left[\frac{1}{L_{xa}} \Phi_{cg}(t - t_d) + T_y(t - t_d) \right]$$

Funkcija $\Phi_{aux}(t - t_d)$ predstavlja vanjski poremećaj sustava. Ako ne postoji poremećaj, funkcija ima nepromjenjiv izlaz. Za toplinski gubitak kroz DSF smatra se transmisijski dio, a ne i admitancija, pa se za izlaz sustava može upotrijebiti Φ_{xy} . Ulaz sustava je upravljačka varijabla. U slučaju DSF sustava gdje postoji vanjski toplinski izvor, upravljačka varijabla je ulazni toplinski tok koridora. Uvođenjem upravljačke varijable u i izlaza y dobiva se puno jednostavniji oblik:

$$\ddot{y}(t) + a_1 \dot{y}(t) + a_0 y(t) = b_1 \dot{u}_1(t - t_d) + b_0 u_1(t - t_d) \tag{9}$$

gdje su:

$$y = \Phi_{xy}, \quad u_1 = T_{ca}, \quad u_2 = \Phi_{aux} \tag{10}$$

Ulazna toplina zraka koja je unesena u koridor može biti modelirana kao diferencijalna funkcija prvog reda [17]:

$$C_{ca} \frac{dT_{ca}}{dt} = \frac{C_{ca}}{L_{ca}} \frac{d\Phi_{d2ca}}{dt} + \Phi_{d2ca} \tag{11}$$

Φ_{d2ca} je toplinski tok u unutrašnjosti koridora koji je rezultat dodatnog unosa zračne mase iz vanjskog izvora. Izraz (11) je valjana samo pod pretpostavkom idealnog miješanja zračne mase u koridoru, što će i biti ispitano u numeričkim simulacijama predstavljenim u poglavlju 3. Prije dodavanja supstitucije (11), jednačba (7) je derivirana i time dobivena nova funkcija trećeg reda:

$$\ddot{y}(t) + a_1 \ddot{y}(t) + a_0 \dot{y}(t) = b_1 \ddot{T}_{ca}(t - t_d) + b_0 \dot{T}_{ca}(t - t_d) - \dot{\Phi}_{aux}(t - t_d) \tag{12}$$

Konačno:

$$\ddot{y}(t) + a_1 \ddot{y}(t) + a_0 \dot{y}(t) = c_2 \ddot{u}_1(t - t_d) + c_1 \dot{u}_1(t - t_d) + c_0 u_1(t - t_d) - \dot{u}_2(t - t_d) \tag{13}$$

gdje su:

$$c_2 = \frac{b_1}{L_{ca}}, \quad c_1 = \frac{b_1}{C_{ca}} + \frac{b_0}{L_{ca}}, \quad c_0 = \frac{b_0}{C_{ca}} \tag{14}$$

$$u_1 = \Phi_{d2ca}, \quad u_2 = \Phi_{aux}$$

2.2. Prostor stanja

Jednačba (9) je transformirana u prostor stanja primjenom standardne metode ([29] u poglavlju 8.6.1):

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ b_0 - a_1 b_1 & -1 \end{bmatrix} U$$

$$Y = [1 \ 0] X \tag{15}$$

gdje je:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_1(t - t_d) \\ u_2(t - t_d) \end{bmatrix} \tag{16}$$

Vektori elemenata u prostoru stanja x_1 i x_2 , i njihove derivacije \dot{x}_1 i \dot{x}_2 su opisane kao:

$$x_1(t) = y(t) = \Phi_{xy}(t)$$

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) + b_1 u_1(t - t_d) \tag{17}$$

$$\dot{x}_2(t) = (b_0 - 1 - a_1 b_1) u_1(t - t_d) - a_0 x_1(t) - a_1 x_2(t) - u_2(t - t_d)$$

Prostor stanja, gdje je upravljačka veličina ulazna toplina, izveden je iz (13):

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -a_0 & -a_1 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} c_2 & 0 \\ c_1 - a_1 c_2 & -1 \\ a_1^2 c_2 - c_1 + c_0 - a_0 c_2 & a_1 \end{bmatrix} U \tag{18}$$

$$Y = [1 \ 0 \ 0] X$$

gdje je:

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} u_1(t - t_d) \\ u_2(t - t_d) \end{bmatrix} \tag{19}$$

Vektori elemenata u prostoru stanja iz (19) su:

$$x_1(t) = y(t) = \Phi_{xy}(t)$$

$$\dot{x}_1(t) = x_2(t) + c_2 u_1(t - t_d)$$

$$\dot{x}_2(t) = x_3(t) + (c_1 - a_1 c_2) u_1(t - t_d) - u_2(t - t_d)$$

$$\dot{x}_3(t) = -a_0 x_2(t) - a_1 x_3(t) + a_1 u_2(t - t_d) \quad (20)$$

$$+ (a_1^2 c_2 - a_1 c_1 - a_0 c_2 + c_0) u_1(t - t_d)$$

Jednadžba prostora stanja, koja je predstavljena u (18), upotrijebljena je kao izvoriste za kandidata Ljapunove funkcije u sustavu otvorene petlje kao u (21).

$$L = \frac{1}{2} x^T P x + \frac{1}{2} U^T B^{-1} U \quad (21)$$

gdje je P simetrična pozitivno definitna matrica definirana po karakteristikama sustava, a B je matrica gdje su uključeni vanjski poremećaji i upravljanje. U ovom slučaju, devijacije modela koje proizlaze iz nesavršenosti aproksimacije znatno utječu na ograničenje radnog područja, ali ne i na Ljapunovu funkciju definiranu karakteristikama sustava.

Kao i u spomenutim sličnim sustavima, logika upravljanja neuronskom mrežom je izvedena na način da se funkcija za podešavanje težina pobrine o kontinuiranoj stabilnosti sustava, [11, 13, 30]. Ovo je moguće zahvaljujući stabilnosti neuronskog upravljačkog sustava (potvrđeno i u [8]) i mogućnosti univerzalne aproksimacije ANN-a kao što je i dokazano u [31]. Ali prije pronalaska odgovarajuće funkcije za podešavanje ANN-a, koja će moći osigurati negativnost derivacije Ljapunovog kandidata, potrebno je utvrditi kontinuiranost i ograničenost ponašanja promatranog sustava unutar definiranih uvjeta. Cilj je sljedeće analize opravdati upotrebu pojednostavljenog modela kao bazu za adaptivnu neuronsku upravljačku metodu koja ne zahtijeva prethodno učenje.

2.3. Dinamika zračnog strujanja

Utjecaj zračnog strujanja na termodinamiku DSF-a je značajan i uzet je u obzir u koridoru na mjestima blizu mehaničkog izvora. Koridor nema tipičnu ventilaciju, već na zahtjev. Iako se topli zrak izravno unosi u koridor, zračni utjecaj je opisan jednostavnim modelom kao toplinski otpor zračnog toka, neposredno dodan u termalne mreže DSF-a. Prema pretpostavci, zrak je potpuno izmiješan, bez temperaturne stratifikacije, pa se otpor zračnog toka može izraziti kao $R_{\text{flow}} = 1 / (c_p \cdot Q_m)$, gdje je c_p specifična toplota zraka, a Q_m je tok zraka (kg/m^3) u koridoru. Ovo je pretjerano pojednostavljenje složenog procesa, ali autor u [17] tvrdi da problem nije u pojednostavljenju već u nesigurnosti ulaznih vrijednosti. U ovom slučaju nesigurnosti su: brzina zračnog toka i toplinski koeficijenti na površini koridora. Karakteristika odziva se nije promijenila uslijed promatranog raspona. Ovo je potvrđeno eksperimentalnim testovima, što je i cilj u razvoju modela potrebnog za strukturu ANN regulatora.

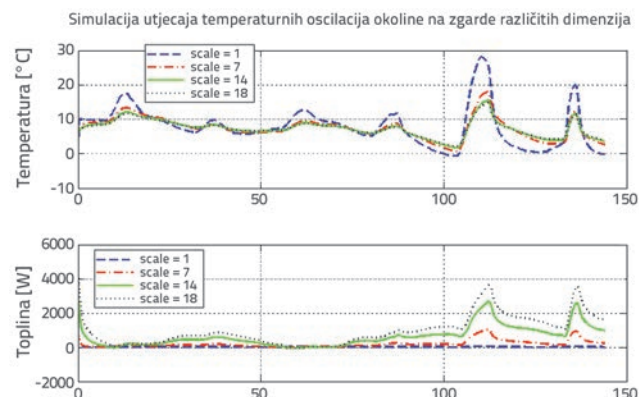
3. Numeričke simulacije

HAMBASE je korišten kao temelj numeričke analize. Ograničenja HAMBASE-a su prepoznata, pa je model prilagođen za numeričku analizu u formi prostora stanja za primjenu u razvoju sustava upravljanja. Nužne izmjene i izbor odgovarajuće numeričke metode (eng. *solver*) odrađene su u samom kodu. Izmjene su potkrijepljene matematičkim relacijama, no svi ostali detalji nisu uključeni u ovaj rad zbog opsežnosti.

3.1. Simulacija termodinamike

Najprije je analiziran utjecaj vanjske temperature zraka na ponašanje sustava zgrade primjenom programskih alata Matlab/Simulink i HAMBASE. Ulazni podaci numeričke analize su satne vrijednosti vremenskih uvjeta izmjerenih u Zagrebu, Hrvatska, od 1970. Solarna radijacija, namještaj, korisnička upotreba i svi ostali poremećaji su isključeni kao i u [32].

Dimenzije zgrade u numeričkom modelu su slične kao i dimenzije eksperimentalnog modela, koji je opisan u sekciji 4. Ovdje dimenzije variraju od skale 1:1 do skale 1:18. Četiri varijacije su izložene istim termalnim uvjetima tijekom šest dana, dok se promatraju promjene temperature zraka i izmjena topline. Simulacije su rezultirale s prilično različitim rezultatima. Rezultati su prikazani na slici 2.

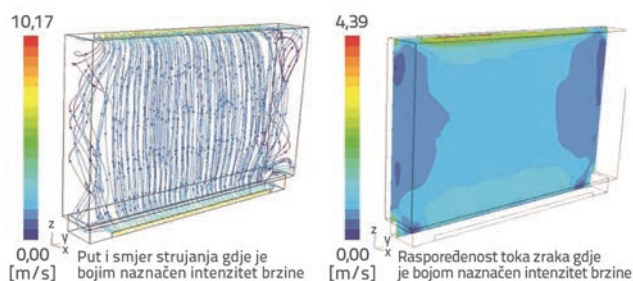


Slika 2. Utjecaj variranja dimenzija na temperature zraka u zonama

Povećanje dimenzija zgrade je uzrokovalo disproporcionalno veći energetske tok između interijera i okoline za vrijeme temperaturnih oscilacija. Međutim, to je očekivano zbog eksponencijalno većeg volumena. Vršna vrijednost temperature prilikom dnevnog maksimuma je upitna za skalu 1:1. Ta vrijednost je dvostruka u odnosu na prvu sljedeću dimenziju, a ni toplinski gubitak nije proporcionalno velik za istu skalu. Simulacijski rezultati prikazuju nemogućnost upotrebe standardnih alata za energetske analize zgrada, pa se može zaključiti kako HAMBASE, ili bilo kakav sličan model nije opcija za regulacijske metode i varijabilne dimenzije.

3.2. Simulacija i analiza zračnog toka

Na osnovi eksperimentalnih rezultata prikazanih u sljedećem poglavlju, maksimalna ulazna brzina zračnog strujanja iznosi 0,42 m/s na otvoru kanala neposredno prije koridora i 1,02 m/s ispred ventilatora. Ove vrijednosti su uzete kao početni uvjeti u CFD (eng. *Computational Fluid Dynamics*) analizi koja je uspješno provedena u Ansys Fluent v12. Prijelazne pojave zračnih tokova su simulirane za obje DSF konfiguracije: s otvorom i bez otvora na dijagonalno suprotnoj strani izvora zračnog toka. Simulacije su bile pod utjecajem standardne metodologije koja određuje geometriju testiranog objekta, funkcije parcijalnih proračuna, svojstva fluida, graničnih uvjeta i svih ostalih postavki. Rezultati su prikupljeni uobičajenom "post-processor" metodom. Slika 3. prikazuje rezultate CFD analize kao krivulje smjera i grafa intenziteta vektora brzina zraka. Vidljivo je kako rasprostranjenost uzoraka u predjelima niskih brzina zračnih tokova zadovoljava zahtjeve linearizacije. CFD simulacija zračnog toka kroz DSF koridor pokazuje mnogo bolje rezultate, odnosno manje toplinske gubitke, kad nema izlaznog otvora.



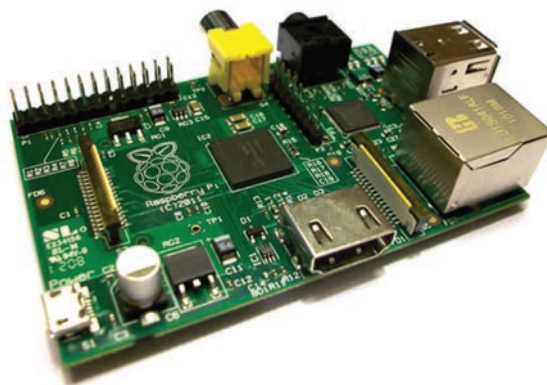
Slika 3. CFD - brzina zračnog toka: a) silnice inteziteta; b) konture inteziteta

4. Eksperimentalna simulacija

Eksperimentalna simulacija ima višestruku ulogu: prikupljanje podataka potrebnih za određivanje početnih uvjeta sustava i analiza numeričkog modela. Mjerenje je provedeno u periodu od lipnja do kolovoza 2015. u elektromehaničkom laboratoriju u Brodarskom institutu. Termalna mjerenja su postavljena po standardima građevinarstva Europske unije, [33]. Ne postoji službena norma za mjerenje dinamičkih karakteristika DSF-a, pa su preuzete metode iz radova na sličnim temama: [1, 5, 34, 35]. Eksperimenti su izvedeni na eksperimentalnom modelu koji je prikazan na slici 6. Eksperimentalni model je izrađen u skali 1:18, te predstavlja prizemni dio zgrade. Svi upotrijebljeni materijali su jednaki onima u uobičajenoj praksi: ekspandirani polistiren, zidna boja, staklo, beton i katran.

4.1. Oprema upotrijebljena u eksperimentu

Izvedba eksperimenta zahtijevala je različite uređaje i aktuatorne. Oprema kojom se koristilo navedena je u tablici 1. zajedno s informacijama o proizvođaču, modelu, godini proizvodnje (Y), količini (Q), specifikaciji (Spec.) i nesigurnošću mjerenja (Un). Sensori su služili za prikupljanje podataka, a grijač i ventilator kao izvor zraka s potrebnim svojstvima. Termalna komora je održavala potrebnu temperaturu vanjskog prostora. CPU (eng. *Control Process Unit*) je oblikovana za prikupljanje podataka i izvođenje upravljačkih potreba. Ne koristi se standardna industrijska varijanta, već povoljna kompaktna jedinica Raspberry Pi (slika 4.).



Slika 4. Povoljan kompaktni PC - Raspberry Pi

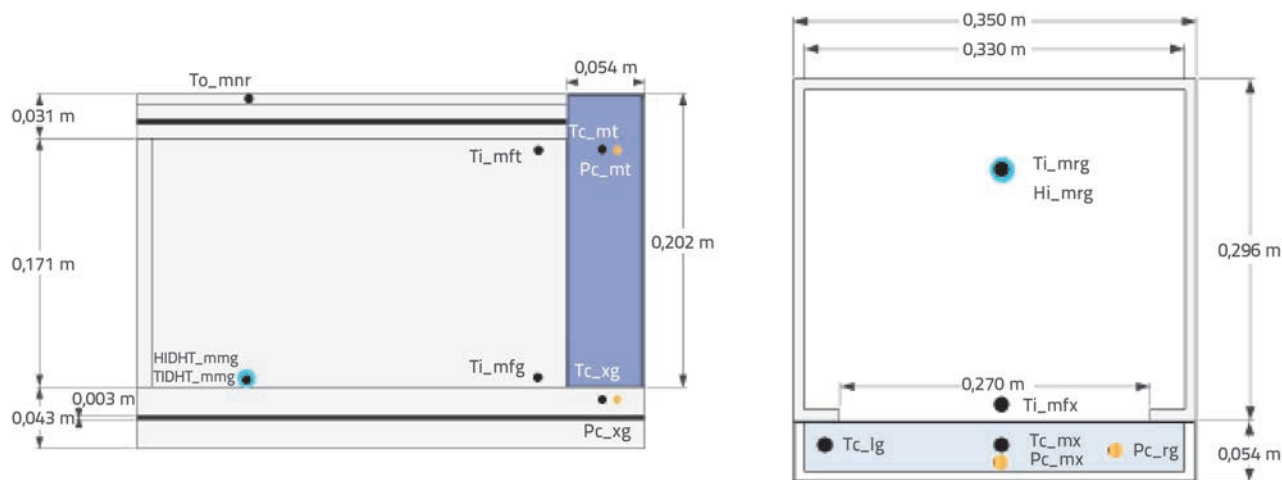
Glavna motivacija za ovakvu odluku je uvođenje novih tehnologija u industriju. Iako korišteni hardver nije dovoljno robusan za konstantnu upotrebu, a računalni program nije optimiziran, ističu se dvije prednosti: vrlo visoka dobivena vrijednost za uloženi novac, a "otvoren" kod jamči mogućnost kontinuiranog održavanja. Dodatno, promatrane veličine i kontrolirani proces nisu vremenski kritični, niti postoji financijski ili sigurnosni rizik u slučaju neispravnosti sustava.

4.2. Mjerne postavke

Slika 5. prikazuje bočne i ortogonalne projekcije modela s označenim pozicijama mjernih točaka. Mjerne točke predstavljaju senzore, čija su svrha, pozicija i tip navedeni u tablici 2. Zbog projekcije trodimenzionalnog u jednodimenzionalni prostor, neke točke predstavljaju više od jednog senzora. Na takvim pozicijama oznake senzora imaju slovo x, pa tako npr. T_{c-mx} predstavlja T_{c-mg} i T_{c-mt} .

4.3. Eksperimenti u termalnoj komori

Za vrijeme eksperimenta vanjska je temperatura zraka varirala u rasponu od -30°C do $+30^{\circ}\text{C}$, a temperatura interijera nije regulirana. Eksperimenti su provedeni upotrebom termalne komore za održavanje željenih vanjskih uvjeta, te ventilatora



Slika 5. Pozicije mjernih točaka: a) bokocrt; b) nacrt

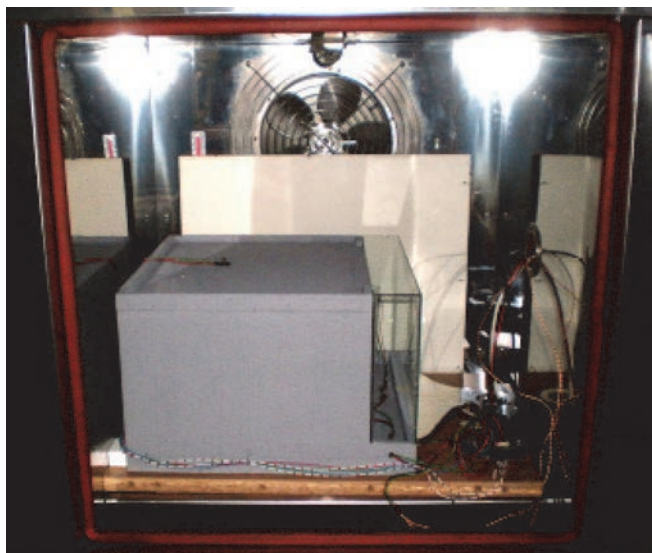
Tablica 1. Popis opreme

Stavka	Proizvođač	Model	Y	Q	Spec.	Un.
Senzori						
Termografska kamera	FLIR	ThermaCAM P 65	'07	1	video/slika	± 2 °C
Senzor temperature i vlažnosti	DHT22	AOSONG	'14	2	AM2302	± 0,5 °C ± RH
Temperaturni senzor	Dallas	DS18B20	'15	6	digitalni	± 0,5 °C
Senzor zračnog toka	Omega	FLO HH30	'94	1	rotirajući	± 1 %
Senzor tlaka	Bosch	BMP 180	'15	3	digitalni	± 6 hPa
CPU i akvizicijska jedinica						
Kompaktni PC	Raspberry Pi	B	'15	1	700 MHz 512 MB	
Aktuatori						
Grijač	Weller	21 021/50VA	'76	1	12 V 25 W	
Ventilator	Sunon	Maglev	'14	1	12 V 2,5 W	
Termalna komora	Kottermann	D3165-2302		1	-30 ... + 100 °C 900 W 3 x 380 V 50 Hz 4A	± 2 °C

Tablica 2. Pozicije senzora

Oznaka	Svojstvo	Lokacija	Postavljeno mjesto	Tip
T_{i-mfg}	temperatura	interijer	sredina, ispred, pod	DS18B20
T_{i-mft}	temperatura	interijer	sredina, ispred, strop	DS18B20
T_{c-mg}	temperatura	koridor	sredina, sredina, pod	DS18B20
T_{c-mt}	temperatura	koridor	sredina, sredina, strop	DS18B20
T_{c-lg}	temperatura	koridor	lijevo, sredina, pod	DS18B20
T_{o-mnr}	temperatura	vanjski	sredina, sredina, strop	DS18B20
$T_{IDHT-mmg}$	temperatura	interijer	sredina, srednji, pod	DHT22
$H_{IDHT-mmg}$	vlažnost	interijer	sredina, sredina, pod	DHT22
P_{c-mt}	tlak	koridor	sredina, strop	BMP180
P_{c-mg}	tlak	koridor	sredina, pod	BMP180
P_{c-rg}	tlak	koridor	desno, pod	BMP180

i grijača za isporuku toplijeg ili hladnijeg zraka. Postav eksperimenta je prikazan na slici 6.

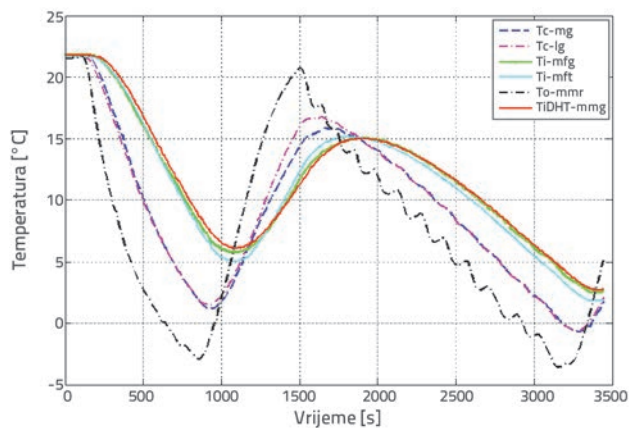


Slika 6. Eksperimentalni model postavljen u termalnoj komori

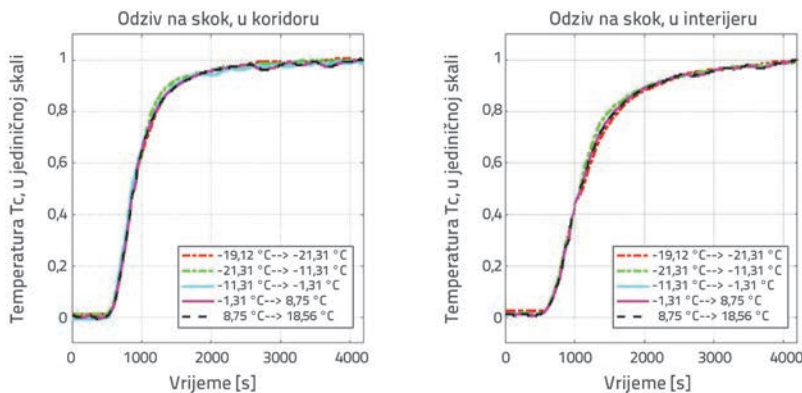
Prvi test je izveden kako bi se dobila općenita slika o dinamičkim svojstvima sustava. Testirani dio je pobuđen sa sinusoidnom funkcijom (To-mmr), što je prikazano na slici 7., zajedno s rezultatima odziva. Svi senzori daju gotovo jednake vrijednosti u inicijalnom stanju, i to oko 22 °C. Odzivi temperatura zraka (označeni kao u tablici 2.) jasno su grupirani prema zonskoj pripadnosti. Vrlo je mala razlika između temperatura zraka izmjerenih na različitim pozicijama iste zone. Razlika je malo značajnija u zoni interijera. U oba slučaja, ove devijacije su praktički zanemarive u odnosu na vrijednosti temperatura u susjednim i vanjskim zonama. U drugom dijelu testa model je pobuđen, odnosno hlađen skokovitim funkcijama, u približno jednakim vremenskim rasponima. Vanjske temperature zraka su rezultirale stepeničastim odzivom, no taj efekt nije prešao u zone. Ovi rezultati upućuju na mogućnost linearizacije u ovom specifičnom slučaju.

Slika 8. prikazuje odzive temperatura zraka u interijeru i koridoru na pozitivne skokovite funkcije vrijednosti 10 °C. Skokovite funkcije se odnose na referentne veličine za postavljanje vrijednosti vanjske temperature u termalnoj komori. Termalna komora generira promjenu vanjske temperature, koja ujedno direktno pobuđuje dinamiku interijera. Svaka slika prikazuje pet različitih odziva temperatura interijera. Svi odzivi su postavljeni na jediničnu skalu kako bi mogli usporediti ponašanje u različitim temperaturnim rasponima. Raspon temperatura je označen posebnim imenom za svaki signal.

Rezultati su vrlo slični za obje temperaturne veličine, što upućuje na konstantnost specifičnog termalnog otpora DSF-a. Prema tome, temperature ne utječu na svojstva DSF-a, pa se sustav može razmatrati kao višeslojni zid kao što je i utvrđeno u poglavlju 2.1.



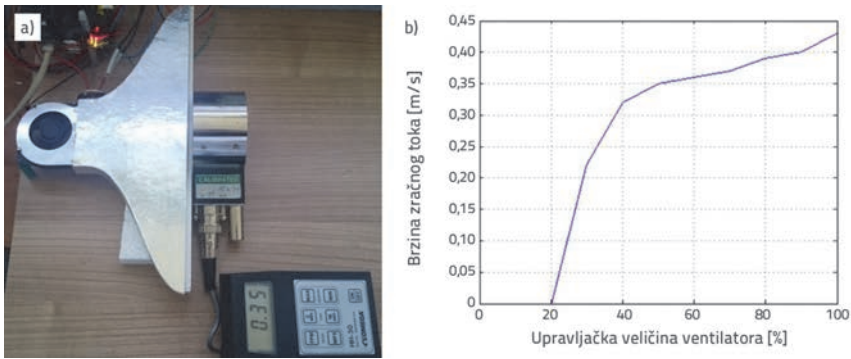
Slika 7. Temperature zraka različitih zona uslijed oscilacija vanjske temperature simuliranih u termalnoj komori



Slika 8. Odzivi temperatura zraka na negativne skokovite funkcije različitih područja: a) Zrak koridora; b) Zrak interijera

4.4. Eksperimenti zračnog toka

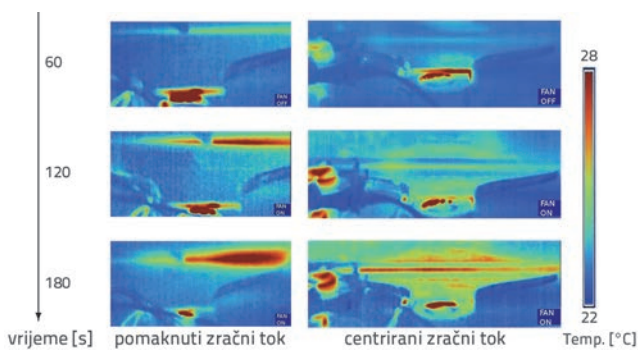
Istraživanje u [34] pokazalo je iznimne teškoće pri mjerenju zračnog toka u prirodno ventiliranim prostorima. Male dimenzije koridora u skaliranom modelu ne dopuštaju većinu direktnih mjerenja. Minijaturni senzori tlaka iz tablice 1. instalirani su, ali testiranja otkrivaju izrazito nepoželjne rezultate. Zračni tok uzrokovan mehaničkom ventilacijom je mnogo jednostavnije izmjeriti. Najčešći način dobivanja zračnog toka je estimacijom iz izmjerenih brzina zračnog strujanja. Brzina zračnog toka je mjerena neposredno ispred ventilatora i na otvoru dovodnog kanala kao na slici 9.a. Iz slike 9.b očito je kako se zračni tok ulaznog toplog zraka može linearizirati oko odabrane radne točke. Ovi podaci su korišteni za konfiguraciju numeričkih simulacija opisanih u poglavlju 3.



Slika 9. Mjerenje brzine zračnog toka: a) Postav; b) Karakteristika

4.5. Eksperimenti s termovizijskom kamerom

Termovizijskom kamerom se koristi kako bi se ispitala distribucija temperatura uslijed dinamičkog strujanja zraka. Ovakvi eksperimenti su započeti s namjerom dobivanja informacija o utjecaju zračnih tokova na termalni proces gdje se ne može direktno mjeriti zračni tok. Eksperimentalni model je smješten ispred termovizijske kamere prikazane u tablici 1. Fokus kamere je postavljen na dovodnom kanalu koji povezuje model s izvorom toplog zraka. Topli zrak se unosi u koridor DSF-a izravno kroz ulazni otvor tijekom 180 s. Slika 10. pokazuje usporedne infracrvene snimke koje su nastale u jednakim vremenskim razmacima, a mjerene su u dva eksperimenta s različitim položajima grijača.

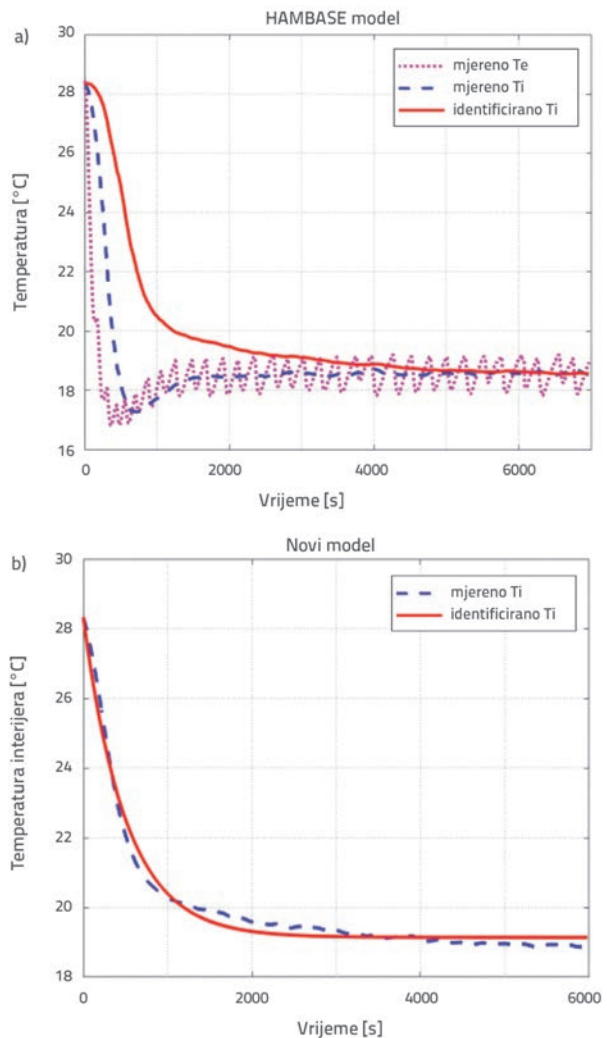


Slika 10. Termovizijski testovi

U prvom eksperimentu postoji zazor između grijača i stijenke kanala u vrijednosti od jednog centimetra, pa je toplinski tok u koridoru veći na desnoj strani. Usporedbom snimaka može se zaključiti da treba osigurati ispravno postavljanje eksperimenta kako bi se postiglo ravnomjerno rasprostiranje topline kroz zračni kanal. Eksperiment postavljen s necentriranim izvorom topline uzrokuje neujednačeno rasprostiranje topline, a katkad i ekstremni nelinearni zračni tok zvan turbulencija. Predložena regulacijska metoda ne može biti upotrijebljena u slučaju ovakvog procesa.

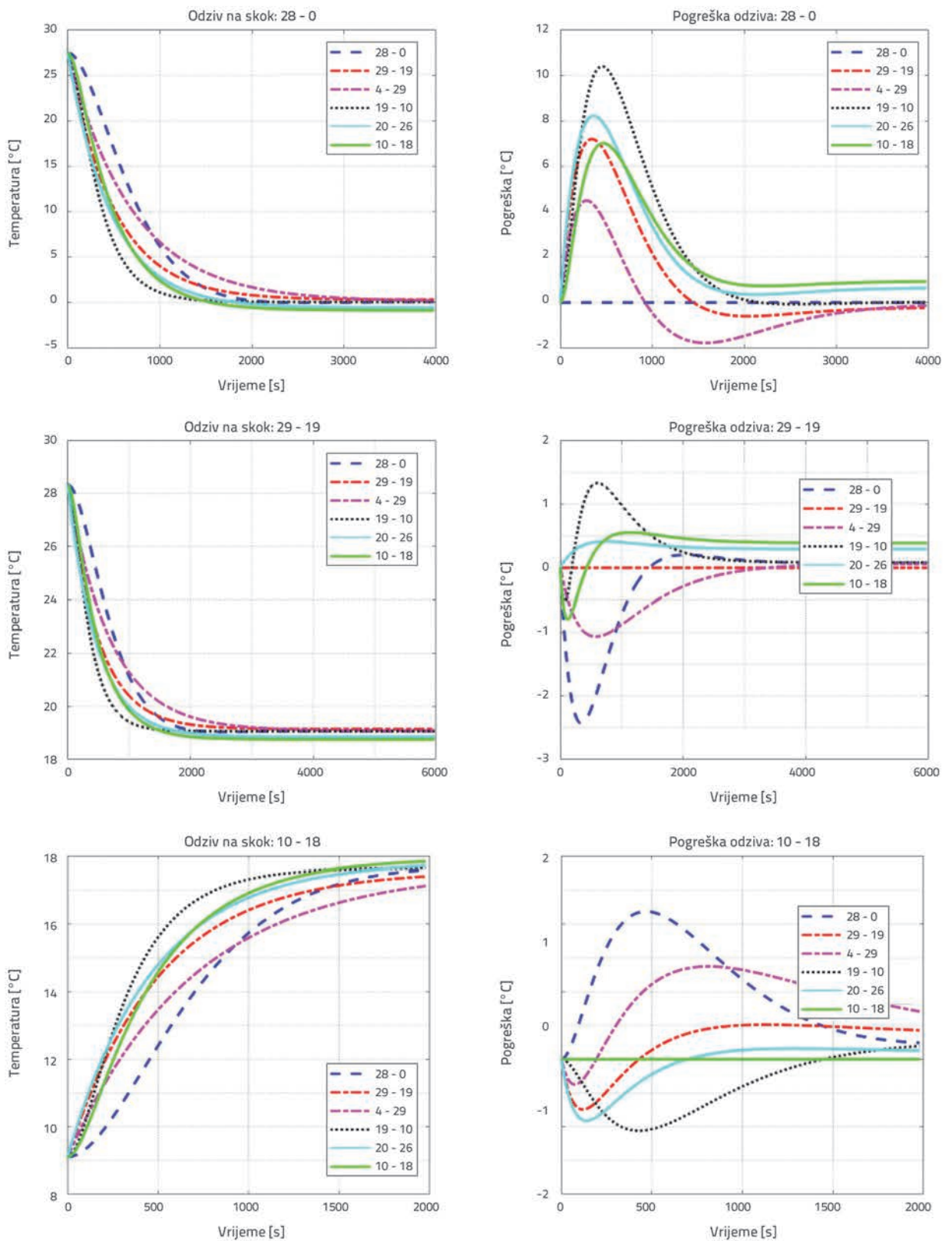
4.6. Analiza modela

Opisani eksperiment u poglavlju 4.3 je korišten kao pobudni signal u ispitivanju odziva. Vanjske temperature su generirane u termalnoj komori s preciznošću od jednog stupnja, što uzrokuje oscilacije pri stacionarnom stanju. Ipak, zahvaljujući sporoj dinamici procesa, rezultirajući odziv temperatura u interijeru je prilično gladak, neosjetljiv na spomenute oscilacije. Slika 11. prikazuje usporedbu mjerenih i simuliranih odziva na negativnu skokovitu funkciju vanjske temperature.



Slika 11. Odzivi temperatura interijera na skokovitu funkciju: a) HAMBASE model; b) modifikirani model

Parametri identifikacije simuliranih modela (HAMBASE), prikazanih na lijevoj slici, dobiveni su primjenom Matlab



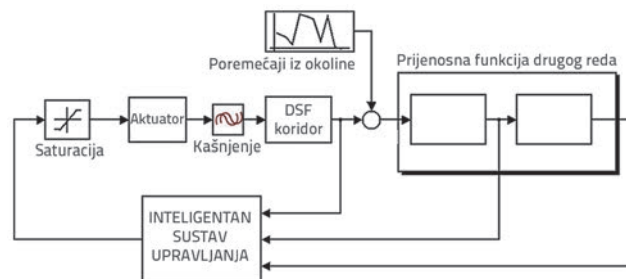
Slika 12. Usporedni prikaz eksperimentalnog i simuliranog odziva u različitim rasponima

funkcije $f_{minsearch}$, a parametri su definirani kroz specifikaciju građevinskih elemenata [36]. Iako su ti parametri ručno podešeni u odnosu na eksperimentalne rezultate, model ne može postići zadovoljavajuće poklapanje.

Slika 11.b prikazuje odzive simulirane novim modificiranim modelom. Matematički opis u oba modela je jednak, samo su parametri direktno identificirani u odnosu na izmjerene podatke, a ne na standardna svojstva zone. Rezultat je zadovoljavajuće mala devijacija između mjerenih i simuliranih vrijednosti. Kako bi se opravdalo korištenje modela, analiza je provedena na nekoliko različitih termalnih raspona. Slika 12. prikazuje odziv šest različitih setova parametara pobuđenih s tri različite skokovite funkcije. Krivulje na lijevoj slici predstavljaju temperature zraka interijera, a na desnoj pogreške odziva. Rezultati simulacija različitih odziva na skokovitu funkciju usporedno su prikazani s mjerenim podacima iz eksperimenta.

Za razliku od eksperimentalnih rezultata, prikazanih na slici 8., pogreške simuliranih odziva se međusobno znatno razlikuju. Uzrok je u različitom uzorku koji je korišten u identifikaciji. Linearni matematički sustav nije prikladan za modeliranje promatranog procesa u svim područjima, ali red prijenosne funkcije je identičan svugdje. U različitim područjima različite su vrijednosti parametara, no taj će se problem riješiti adaptivnom neuronskom mrežom. Adaptivna neuronska metoda upravljanja, korištena u istraživanju [30] ne zahtijeva precizan opis sustava ili prethodnu parametrizaciju. Broj najviše derivacije diferencijalne jednadžbe je dovoljna informacija za sintezu adaptivnog regulatora, što je tema za neko sljedeće istraživanje.

U ovom je radu također analizirana upotreba modela u toplinskom upravljanju koridorom DSF sustava. Rezultati su pokazali kako HAMBASE model ne može predvidjeti odziv sustava DSF-a na skokovitu funkciju. Smanjivanjem dimenzija zona i vremenskih konstanti promatranih poremećaja, sustav umnogome povećava nelinearne karakteristike, pa ipak je odziv linearan u određenom vremenskom rasponu što je i prikazano u eksperimentalnim rezultatima. Prema tome, upravljačka metoda mora biti prilagodljiva kako bi kompenzirala devijacije uzrokovane aproksimacijom pri odzivu, početnim uvjetima i mjernom pogreškom. Blok-dijagram takve zatvorene upravljačke petlje sustava DSF-a je prikazan na slici 13.



Slika 13. Blok dijagram predložene upravljačke petlje DSF sustava

5. Zaključak

Cilj je ovog istraživanja definirati polazište za sintezu adaptivnog regulatora koji u ovom slučaju preuzima ulogu modeliranja. Ovaj rad ne rezultira standardnim rezultatima modeliranja zbog značajno različite svrhe modeliranja. Jedan od rezultata istraživanja je opis sustava DSF-a u obliku jednadžbi prostora stanja, zajedno s definicijom ograničenja i opravdanjem korištenja u adaptivnom upravljačkom algoritmu. Glavni zadatak budućeg rada je razvoj upravljačke metode koja će smanjiti energetske zahtjeve za grijanjem zgrada kroz cijelu godinu, s obzirom na to da je fokus na toplinske gubitke promatrane kroz kritični element: dvoslojne staklene stijenke. Eksperimentalno istraživanje je provedeno na skaliranom modelu segmenta zgrade sa sustavom aktivne dvoslojne fasade. Sustav je testiran u kontroliranim uvjetima. Glavna prednost ovakvog pristupa je u jednostavnosti i niskim troškovima koji omogućuju ponovljivost eksperimenata pri različitim upravljačkim strategijama. Pretpostavke vezane za složenu dinamiku zračnog strujanja potvrđene su numeričkom analizom (eng. *Computational Fluid Dynamics - CFD*). Simulacije i eksperimentalni rezultati koji su predstavljani u ovom radu opravdavaju linearizaciju sustava jedino u slučaju ako je takav model korišten u skladu s opisom i u sintezi adaptivnog neuronskog regulatora. Upotrebom modela u bilo koje druge svrhe premašila bi se unaprijed postavljena ograničenja, što bi rezultiralo beznačajnim rezultatima. U konačnici, regulacija neće značajno poboljšati energetske učinkovitost u DSF zgradama, ali donosi rješenje u specifičnoj situaciji s oprečnim zahtjevima: djelomično ostakljena ovojnica nasuprot jednakomjerno rasprostranjenosti temperatura.

LITERATURA

- [1] Park, C.S.: Occupant Responsive Optimal Control Of Smart Façade Systems, Ph.D. thesis, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2003.
- [2] Stec, W.J.: Symbiosis of Double Skin Façade and indoor climate installation, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Delft, Delft, Nederland, 2006.
- [3] Dickson, A.: Modelling Double-Skin Facades, Master's thesis, Department of Mechanical Engineering University of Strathclyde, Glasgow, 2003.
- [4] Anđelković, A.: Modelling of the energy characteristics of a naturally ventilated double skin façade, Ph.D. thesis, Univerzitet u NovomSadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, 2015.

- [5] Carlos, J.S., Corvacho, H., Silva, P.D., Castro-Gomes, J.: Real climate experimental study of two double window systems with preheating of ventilation air, *Energy and Buildings*, 42 (2010), pp. 928-934, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.01.003>
- [6] Moon, J.W., Lee, J.H., Yoon, Y., Kim, S.: Determining optimum control of double skin envelope for indoor thermal environment based on artificial neural network, *Energies and Buildings*, 6 (2013), pp. 4223-4245, <https://doi.org/10.3390/en6084223>
- [7] Moore, K.L., Vincent, T.L., Lashhab, F., Liu, C.: Dynamic Consensus Networks with Application to the Analysis of Building Thermal Processes, pp. 3078-3083, 2011.
- [8] Barron, A.: Universal approximation bounds for superpositions of a sigmoidal function, *IEEE Trans. Info. Theory*, 39 (1993) 3, pp. 930-945.
- [9] Narendra, K.: Adaptive Control Using Neural Networks in: W.T.Miller, R.S. Sutton, P.J. Werbos (Eds.), *Neural Networks for Control*, MIT Press, Cambridge, pp. 115-142, 1991.
- [10] Lewis, F.L., Liu, K., Yesildirek, A.: Neural Net Robot Controller with Guaranteed Tracking Performance, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 6 (1995) 3, pp. 703-715.
- [11] Lewis, F.L., Jagannathan, S., Yesildirek, A.: *Neural Network Control of Robot Manipulators and Nonlinear Systems*, no. ISBN 0-7484-0596-8, Taylor and Francis Inc., 1999.
- [12] Kuljaca, O., Lewis, F.L., Horvat, K.: *Intelligent control of industrial and power systems: Adaptive Neural Network and Fuzzy Systems*, no. 978-3-8484-8468-3, LAMBERT Academic Publishing, 2012.
- [13] Bai, H., Arcak, M., Wen, J.: *Cooperative Control Design, A Systematic, Passivity-Based Approach*, Springer, 2011, <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-0014-1>
- [14] Mukherjee, S., Mishra, S., Wen, J.T.: Building Temperature Control: A Passivity-Based Approach, in: 51st IEEE Conference on Decision and Control, Maui, Hawaii, USA, pp. 6902-6907, 2012, <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6426676>
- [15] Kim, D.W., Park, C.S.: Integrated Control Strategies For Double Skin Systems, in: *Proceedings of Building Simulation 2011, 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Sydney, Australia, pp. 601-608, 2011.
- [16] Pletcher, R.H., Tannehill, J.C., Anderson, D.: *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Taylor and Francis Inc., USA, 2011.
- [17] deWit, H.M.: Part I Theory: Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Nederland, 2009, URL <http://www.hambase.org>
- [18] Pavković, B., Zanki, V.: *Handbook for Energy Certification in Buildings*, UNDP, Zagreb Croatia. 2010.
- [19] Anđelković, A.S., Cvjetković, T.B., Đaković, D.D., Stojanović, I.H.: The Development of Simple Calculation Model for Energy Performance of Double Skin Facades, *Thermal Science*, 16 (2012), pp. 251-267, <https://doi.org/10.2298/TSCI120201076A>
- [20] Xianfeng, Z., Junping, F., Xiaoqing, Y.: A simplified mathematical model of heat transfer process in double skin façade, in: *2011 International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring*, Changsha, Hunan, China, pp. 389-393, 2011, <https://doi.org/10.1109/CDCIEM.2011.487>
- [21] Kämpf, J.H., Robinson, D.: A simplified thermal model to support analysis of urban resource flows, *Energy and Buildings*, 39 (2007) 4, pp. 445-453.
- [22] Woloszyn, M., Rode, C.: Tools for performance simulation of heat, air and moisture conditions of whole buildings, *Building Simulation*, 1 (2008) 1, pp. 5-24.
- [23] Brayton, E.R., Aydogan, A.: ANSI/ASHRAE Standard 140-2001 (BESTEST), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004, URL <https://www.ashrae.org/>
- [24] Gavan, V., Woloszyn, M., Kuznik, F., Roux, J.J.: Experimental study of a mechanically ventilated double-skin façade with venetian sun-shading device a full-scale investigation in controlled environment., *Solar Energy*, 84 (2010) 2, pp. 183-195.
- [25] Xie, C., Hazzard, E., Nourian, S.: A Green Building Model Kit for Engineering Design, The Concord Consortium, Concord, MA 01742, USA 2012, URL <http://concord.org/>
- [26] Maile, T., Bazjanac, V., Donnell, J.O., Garr, M.: A software tool to compare measured and simulated building energy performance data, in: *Proceedings of 12th International IBPSA Conference*, Sydney, Australia, 2011.
- [27] Ataer, E.: Storage of thermal energy, in energy storage systems, developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, 2006, URL <http://www.eolss.net>
- [28] van Schijndel, A.W.M.: *Integrated Heat Air and Moisture Modeling and Simulation*, Ph.D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Nederland, 2007.
- [29] Vukić, Z., Kuljača, Lj.: *Automatsko upravljanje - analiza linearnih sustava*, no. 953604529-X, Kigen, Zagreb, 2005.
- [30] Kuljača, O., Horvat, K., Borović, B.: Design of Adaptive Neural Network Controller for Thermal Power System Frequency Control, *Automatika*, 52 (2011) 4, pp. 319-328.
- [31] Hornik, K., Stinchcombe, M., White, H.: Multilayer feedforward networks are universal approximators, *Neural Networks*, 2 (1989), pp. 359-366, [https://doi.org/10.1016/0893-6080\(89\)90020-8](https://doi.org/10.1016/0893-6080(89)90020-8)
- [32] Mazzarella, L., Pasini, M.: Integration time step issue in mediterranean historic building energy simulation, *Energy Procedia*, 133 (2017), pp. 53-67, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.371>
- [33] Laustsen, J.: Energy efficiency requirements in building codes, energy efficiency policies for new buildings, OECD/IEA (March 2008).
- [34] Kalyanova, O., Jensen, R.L., Heiselberg, P.: Measurement of Air Flow Rate in a Naturally Ventilated Double Skin Facade, in: *Proceedings of Roomvent 2007*, Helsinki, Finland, 2007.
- [35] Navvab, M.: Full Scale Testing and Computer Simulation of a Double Skin Façade Building, in: *Ninth International IBPSA Conference*, Montréal, Canada, 2005.
- [36] deWit, M.H.: Part II Input and Output: Heat Air and Moisture model for Building And Systems Evaluation, Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, Nederland (2009), URL <http://www.hambase.org>