

# Sistem za otkrivanje i dijagnostiku otkaza (ODO) za neefikasnosti na zonskom nivou zasnovan na kvantitativnom modelu

## A quantitative model-based fault detection and diagnostics (FDD) system for zone-level inefficiencies

Justin BERQUIST, National Research Council (NRC) in Ottawa, ON, Canada  
William O'BRIEN, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, ON, Canada

Ključne reči:  
otkrivanje grešaka;  
dijagnostika grešaka;  
kvantitativni model;  
zonski nivo

*Udeo sistema za grejanje, ventilaciju i klimatizaciju (KGH) je značajan deo ukupne potrošnje energije u zgradama. Većina istraživanja u oblasti otkrivanja otkaza zanemerala je otkaze na zonskom nivou (zone-level faults). U ovoj studiji je prikazana metodologija sistema za otkrivanje i dijagnostiku otkaza (ODO) zasnovanog na kvantitativnom modelu za zonski nivo. Razvijen je bazni toplotni model za jednu privatnu poslovnu prostoriju da bi se uporedile očekivane i izmerene performanse prostorije. Sprovedene su analize i identifikovano je pet neefikasnosti na zonskom nivou. Analizirana je težina/ozbiljnost tih neefikasnosti i utvrđeno je da je posledica bila prekomerna potrošnja energije ventilatora jedinice za pripremu vazduha (AHU). Prekomeran broj tih otkaza u zgradi tera uređaj za pripremu vazduha da troši neopravdanu količinu energije, što naglašava značaj primene sistema za otkrivanje i dijagnostiku na zonskom nivou. Koristi od ove metodologije obuhvataju otkrivanje prethodno postojećih otkaza koji potiču iz prvobitnog projekta, kao i mogućnost da se ona primeni na nove ili postojeće zgrade kada je na raspolaganju dovoljna senzorsko-merna infrastruktura, čime se poboljšava efikasnost zgrade.*

Key words:  
fault detection;  
fault diagnostics;  
quantitative model;  
zone level

*Heating, ventilating, and air-conditioning (HVAC) systems account for a significant portion of energy consumption in buildings. The majority of fault detection research has neglected zone-level faults. In this study, the methodology of a quantitative model-based fault detection and diagnostics (FDD) system for the zone level is presented. A basic thermal model for a private office was developed to compare expected and measured office performance. Analyses were conducted and five zone-level inefficiencies were identified. The severity of these inefficiencies was analyzed, and it was found that an excessive amount of air-handling unit (AHU) fan energy consumption resulted. The redundancy of these faults in the building forces the AHU to expend an unwarranted amount of energy, highlighting the importance of using FDD at the zone level. Benefits of this methodology include the detection of preexisting faults originating from initial design as well as the ability to apply it to new or existing buildings when sufficient sensing and metering infrastructure is available, improving the efficiency of the building.*

## Uvod

Na međunarodnom planu, energija koju troše zgrade u SAD iznosi oko 20% ukupne isporučene utrošene energije prema (DOE, 2016a). Grejanje, ventilacija i klimatizacija zaslužne su za polovinu ukupne energije utrošene u kanadskim zgradama (NRCan, 2013). To je značajan deo kada se ima u vidu da je za zgrade bilo izveštaja sa podacima da neefikasno funkcionišu zbog raznih otkaza u mehaničkom sistemu (Piette i dr., 2001).

Loše funkcionisanje sistema čini unapređenje performanse zgrada glavnom ciljnom tačkom u pokušaju smanjenja potrošnje energije i emisija gasova staklene bašte (Piette i dr., 2001). Pokazalo se da otkrivanje i dijagnostika otkaza (ODO) ima uspeha u smanjenju potrošnje energije kod zgrada, sa prosečnim uštedama energije većim od 20% i tipičnim periodom povraćaja ulaganja manjim od dve godine (Claridge i dr., 2000). Pored toga, razna iskustva sa terena pokazuju postizanje potencijalnih ušteda od 5% do 30% primenom otkrivanja i dijagnostike otkaza i ispravkom dijagnostikovanog (utvrđenog) otkaza (Dong i sar., 2014). ODO zahteva relativno mali trošak i ne zahteva mehaničke intervencije pošto može da se

kombinuje sa sistemom automatizacije komercijalne zgrade (BAS). ODO nudi metod za istraživanje postojećeg toka podataka kako bi se razmotrile/rešavale neefikasnosti u zgradi. Ovo uparivanje može da pruži informacije pri projektovanju novih zgrada, kako iz perspektive zgrade tako i iz perspektive zonskog nivoa, te da u krajnjem slučaju smanji neefikasnosti u radu u budućnosti. Prethodna istraživanja su uspešno koristila ODO na nivou zgrade. Međutim, nema dovoljno literature koja se odnosi na otkaze i neefikasnosti na zonskom nivou (Gunay i dr., 2017). Istraživanja koja su u toku usmerena su ka rešavanju jaza u istraživanjima koja se odnose na ODO za sisteme na nivou zgrade, a sastoje se u razvijanju jednog alata za otkrivanje i dijagnostiku otkaza koji bi se koristio za neefikasnosti na zonskom nivou.

Ovaj rad daje pregled literature i stavlja naglasak na teme prethodnih istraživanja vezanih za otkrivanje i dijagnostiku otkaza. Osim toga, prikazana je metodologija koja je ko-

*This publication translated by permission. ©2013 ASHRAE. All rights reserved. Translation by Tamara Vračarević. ASHRAE assumes no responsibility for the accuracy of the translation. To purchase the English language edition, contact ASHRAE, 1791 Tullie Circle, NE, Atlanta, GA 30329-2305 USA, [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org).*

rišćena u razvijanju alata za otkrivanje i dijagnostiku otkaza (ODO) za neefikasnosti na zonskom nivou i njena primena u Canal Zgradi, koja se nalazi u kampusu Univerziteta Karllton (Carleton University) u Otavi, Ontario, Kanada. Najzad, ovaj rad prikazuje rezultate, diskusiju/razmatranje, buduće aktivnosti i ograničenja istraživanja.

## Pregled literature

Ovaj odeljak daje pregled literature merodavne za trenutne aktivnosti i istraživanja; kratak pregled softverskih, hardverskih/mehaničkih, projektantskih otkaza, i otkaza u kontekstu zgrade; i istraživanje otkaza kojima su se bavile prethodne studije. Zatim se razmatraju metodologije otkrivanja i dijagnostike otkaza (ODO) zasnovane na kvalitativnom modelu, kvantitativnom modelu i na istoriji procesa, nakon čega sledi istraživanje prethodne literature i primena ODO u kontekstu zgrade.

### Uvod ka otkazima

Otkazi se često dele u dve kategorije: hard i soft otkaze (Cui i Wang 2005; Narayanaswamy i dr., 2014). Schein i dr., (2006) su identifikovali još jednu kategoriju, pod nazivom projektni otkazi, kojima se nije bavilo mnogo prethodne literature o otkrivanju i dijagnostici otkaza kod sistema za grejanje, klimatizaciju i hlađenje. Otkazi korisnika treba takođe da budu razmotrene, kao posebna kategorija; i ona je, na isti način, retko pominjana u prethodnoj literaturi.

**Soft (meki) otkazi.** „Soft“ otkazi se takođe nazivaju i softverski otkazi (Narayanaswamy i dr., 2014). Kao što samo ime govori, fokus u ovoj kategoriji je na lošim softverskim konfiguracijama što može da dovede do prekomernog hlađenja ili nedovoljnog hlađenja, pored oštećenja hardvera, osećaja neugodnosti kod korisnika, i nepotrebnog utroška energije (Narayanaswamy i dr., 2014). Osim toga, ova kategorija obuhvata i degradaciju performanse uređaja/opreme i senzora.

**Hard (tvrđi) otkazi.** Tvrđi otkazi se često nazivaju i otkazi u hardveru (Narayanaswamy i dr., 2014) i to su fizički otkazi koji dovode do prestanka funkcionisanja sistema (Cui i Wang, 2005). Ti otkazi se često dešavaju iznenada, prouzrokujući iznenadni kvar u delu sistema, što ih u principu čini lakšim za otkrivanje (Cui i Wang, 2005; Narayanaswamy i dr., 2014). Hardverski otkazi zapremaju glavni deo prethodne literature o otkrivanju i dijagnostikovanju otkaza u sistemima za grejanje, klimatizaciju i hlađenje, prvenstveno se usredsređujući na otkaze kod uređaja koji spadaju u primarnu petlju.

**Projektni otkazi.** Kako i sam naziv ukazuje, otkazi u projektu su suboptimalni aspekti projekta u sistemima koje je projektovao neki inženjer ili arhitekta i koji su prisutni pre (početka) funkcionisanja zgrade. Ova kategorija obuhvata otkaze poput lošeg izbora mesta termostata, lošeg postavljanja dovodnog difuzora i povratne rešetke koji imaju za posledicu kratku cirkulaciju (gde deo dovodnog vazduha ide direktno na povratnu rešetku bez mešanja u prostoru), kao i ugradnju opreme većih ili manjih dimenzija nego što je potrebno. Premda je poznato da vremenska ograničenja projekta mogu da dovedu do toga da se zgrade projektuju i grade sa otkazima, to se i dalje retko pominje u primeni otkrivanja i dijagnostike otkaza kod sistema za grejanje, klimatizaciju i hlađenje. Projektni otkazi ograničavaju maksimalnu potencijalnu efikasnost sistema i to tokom celog životnog veka zgrade. Na osnovu procene otkrivenih otkaza se možda neće moći da otklone svi otkazi u projektu u zgradi u kojoj su otkriveni; međutim, njihova procena može da pruži značajan uvid za dalje projektovanje zgrada. Jedan aspekt projekta koji je možda zanemaran u prošlosti mogao bi da postane ključna tačka, ukoliko se utvrdi da on donosi značajne uštede troškova.

Pregledano je ukupno 36 članaka i naučnih radova, od kojih samo jedan članak, onaj koji su napisali Schein i dr. (2006),

pominje otkaze u projektu kao problem: autori su izjavili da se njihova metodologija može koristiti za otkrivanje otkaza u projektu kao što su nedovoljno veliki kalemi (poddimenzijsani namotaji).

**Otkazi koje uzrokuju korisnici.** Kao otkaz korisnika može se podrazumevati svaka interakcija korisnika (ili nedostatak takve interakcije) koja dovede do povećanja potrošnje energije. Ova kategorija obuhvata otkaz poput nezatvaranja prozora, ostavljanja uključenih računara ili osvetljenja tokom noći i prekoračenja zadate temperature, i borba oko postavljene-tačke temperature u grupnoj kancelarijskoj zoni. Prethodne studije su pokazale da postupci korisnika mogu da prouzrokuju prekomernu potrošnju energije, čime se u krajnjoj liniji negiraju tehnološka poboljšanja u zgradama (Azar i Menassa, 2014). Ipak, ova vrsta otkaza nije pomenuta ni u jednom od članaka ili naučnih radova koji su pregledani. Međutim, Yu i dr. (2003) jesu imali za cilj otkrivanje otkaza korisnika u slučaju nezatvaranja otvorenog prozora.

### Uvod u otkrivanje i dijagnostiku otkaza

ODO koristi sistemske tehnike da otkrije i dijagnostikuje razne otkaze (Schein i Bushby, 2005). *Otkrivanje* otkaza se koristi da pokaže odstupanje od očekivane performanse, dok *dijagnostika* otkaza utvrđuje uzrok otkaza (Rossi i Braun, 1997). Još jedan korak u ODO-u je proces procenjivanja, koji procenjuje da li je uticaj otkaza dovoljno ozbiljan da opravda servis (Rossi i Braun, 1997). Katipamula i Brambley (2005) su istakli šemu klasifikacije ODO metoda koja koristi tri kategorije: metode zasnovane na kvalitativnom modelu, metode zasnovane na kvantitativnom modelu, i metode zasnovane na istoriji procesa.

**Metode zasnovane na kvalitativnom modelu.** Ove tehnike koriste ili sistem zasnovan na pravilima ili kvalitativnu fiziku (Zimmermann i dr., 2012; Beghi i dr., 2013). Sistemi zasnovani na primeni pravila koriste niz izjava tipa „ako–onda“ (if-then) koje se odnose na upravljačka ograničenja uređaja (Yang i dr., 2008) i zasnivaju se ili na stručnom znanju ili na analizi prvog načela (Bynum i dr., 2012) i jednostavniji su za postavljanje od strane stručnjaka za konkretnu oblast (Narayanaswamy i dr., 2014). Ovi sistemi su u stanju da identifikuju uobičajene greške koje se sreću u praksi, sa malim brzinama lažnog alarma za odgovarajuće pragove (Narayanaswamy i dr., 2014). Međutim, veliki broj lažnih alarma može da nastane ako se razvije set generičkih pravila (da bi se pokrili brojni otkazi) koja možda nisu primenjiva na situaciju u konkretnoj zgradi (Narayanaswamy i dr., 2014).

Premda tehnika zasnovana na pravilima ima i neke nedostatke, njena jednostavnost, sposobnost da identifikuju mnogi uobičajeni otkazi koji se sreću u praksi, i mnoge druge prednosti su učinile da ona spada u najčešće korišćene metode kontrolisanog/nadziranog ODO u zgradama (Rossi i Braun 1997; Narayanaswamy i dr., 2014). Tabela 1 prikazuje prethodnu literaturu koja je uspešno primenivala metode zasnovane na kvalitativnom modelu ODO i sadrži odgovarajuće tipove i nivoe otkaza kojima su se bavila istraživanja.

**Metode zasnovane na kvantitativnom modelu.** Ovi pristupi koriste modele zasnovane na prvom načelu i pominju se kao modeli bele kutije (engl. white-box) modeli (Bynum i dr., 2012). Oni se zasnivaju na fundamentalnim fizičkim odnosima i opisuju se ili kao pojednostavljeni ili kao složeni/sofisticirani modeli, zavisno od detalja matematičkog modela (Bynum i dr., 2012; Zimmermann i dr., 2012; Beghi i dr., 2013). Alati za modeliranje koji su na visokom tehničkom nivou kao što je EnergijaPlus (DOE, 2016b) tipično zahtevaju veliki broj ulaznih podataka – inputa da bi sproveli simulaciju (Bynum i dr., 2012). Kao posledica toga, ovi tipovi modela se često teško kalibrišu (Bynum i dr., 2012). Pojednostavljeni modeli zahtevaju manji broj ulaznih podataka/inputa, što

omogućava lakšu kalibraciju u poređenju sa složenijim modelima (Song i dr., 2003).

**Tabela 1. Pregled članaka o metodama zasnovanim na kvalitativnom modelu ODO**

Članak	Tip otkaza	Nivo na kome se razmatra otkaz
Schein i House (2003)	Hard	Zona
Schein i dr. (2006)	Hard, soft i projektna	Zona i zgrada
Yang i dr. (2008)	Hard i soft	Zgrada
Schein i Bushby (2006)	SOft	Zgrada

**Tabela 2. Pregled članaka o metodama zasnovanim na kvantitativnom modelu ODO**

Članak	Tip otkaza	Nivo na kome se razmatra otkaz
Yu i dr. (2003)	Hard i propusti korisnika	Zona
Beghi i dr. (2013)	Hard	Zona i zgrada
Gao i dr. (2016)	Soft	Zgrada
Buswell i dr. (2003)	Soft	Zgrada
Dong i dr. (2014)	Soft	Zgrada
Bynum i dr. (2012)	Hard i soft	Zgrada
Claridge i Lin (2009)	Hard i soft	Zgrada
Zimmermann i dr. (2012)	Hard i soft	Zgrada
Li i dr. (2010)	Hard i soft	Zgrada

Zbog podataka koje zahteva pristup primene metoda zasnovanih na kvantitativnom modelu, taj pristup može biti skup, jer on tipično ima za posledicu široke eksperimentalne kampanje da bi se uspostavila i uvela dodatna merenja ulaznih i izlaznih veličina koja nisu raspoloživa kroz BAS (Beghi i dr., 2016). Taj pristup je takođe i računarski zahtevno rešenje za ODO i često zahteva korišćenje računara opšte namene, zato što BAS ima ograničene raspoložive kapacitete procesora i memorije (Schein i Bushby, 2006). Tabela 2 prikazuje prethodna istraživanja koja su uspešno primenila metode zasnovane na kvantitativnom modelu ODO na razne komponente sistema i na nivo cele zgrade. Tabela 2 takođe sadrži odgovarajuće tipove otkaza i nivoe kojima se bavilo istraživanje.

**Metode zasnovane na istoriji procesa ODO.** Ovaj pristup se može dalje klasifikovati ili kao modeli crne kutije (engl. black-box) ili kao modeli sive-kutije (engl. gray-box) (Zimmermann i dr., 2012). Modeli crne kutije obuhvataju statističku, veštačku neuronsku mrežu (ANN), i druge tehnike prepoznavanja uzorka (Zimmermann i dr., 2012). Modeli sive-kutije takođe obuhvataju teoretsku strukturu, ali samo delimičnu, koja je kombinovana sa podacima da bi se kompletirao model (Li i Braun, 2007). Oba koncepta se zasnivaju na nizu podataka za obuku (trening) koji se koriste za mapiranje ulaznih i izlaznih podataka i uglavnom obuhvataju porednje izračunatih statističkih podataka za dati vremenski okvir sa istom vrstom statističkih podataka iz prethodnog vremenskog okvira (Narayanaswamy i dr., 2014). Performansa zgrade se promenila ako poređenje sadrži odstupanja, što prouzrokuje da se vremenski period obeleži kao anomalija (Narayanaswamy i dr., 2014).

Metode zasnovane na istoriji procesa ODO ne zahtevaju eksplicitan model sistema (Beghi i dr., 2016). Veoma velike su prednosti kada se metoda kombinuje sa velikom količinom podataka koji se mogu dobiti kroz nedavne razvoje u sistemima za monitoring (Beghi i dr., 2016). Pored toga, taj pristup se lako može proširiti na sisteme koji se sastoje iz raznih struktura (Beghi i dr., 2016). I obrnuto, taj pristup koji je zasnovan na podacima zahteva mnogo „trening“ podataka (Narayanaswamy i dr., 2014). Učinak ove metode značajno zavisi od ovih „trening“ podataka, i on može da degradira sa nepoznatim funkcionisanjem sistema (Beghi i dr., 2016). Ta metodologija je manje zahtevna računarski nego metode za-

snovane na kvantitativnom modelu (Schein i Bushby, 2006). Međutim, ona i dalje zahteva korišćenje računara opšte namene zbog ograničenih raspoloživih kapaciteta procesora i memorije u BAS-u (Schein i Bushby, 2006). U tabeli 3 je prikazana prethodna literatura u kojoj se obrađuju uspešno primenjene metode ODO zasnovane na istoriji procesa; ona obuhvata odgovarajuće tipove i nivoe otkaza koji su obrađeni u istraživanjima.

## Metodologija

Bila su potrebna dva glavna koraka da se identifikuju razne neefikasnosti koje se javljaju na zonskom nivou: otkrivanje otkaza i dijagnostike otkaza. Da bi se obavila ova dva koraka bilo je potrebno pribaviti podatke o zoni i mehaničkom sistemu koji se analizira. U ovom odeljku dat je detaljan opis procesa pribavljanja podataka, uključujući procenu metrike sistema. Zatim se detaljno razmatraju opisi razvoja i verifikacije modela, otkrivanje otkaza i dijagnostika otkaza.

## Prikupljanje podataka

Metodologija otkrivanja i dijagnostike otkaza razvijena je i testirana u četiri poslovne zone u Canal Zgradi, koja se nalazi u kompleksu Univerziteta Karleton (Carleton University) u Otavi, Kanada. Da bi alat za otkrivanje i dijagnostikovanje otkaza bio uspešan, bilo je potrebno nekoliko nivoa mernih podataka za poslovne prostore i mehanički sistem.

**Statičke informacije.** Ovo se odnosi na informacije koje se mogu pronaći u crtežima izvedenog stanja, dinamici rada uređaja i crtežima izvedenog stanja (Dong i dr., 2014). Potrebne informacije su bile geometrijski i fizički detalji o podovima, zidovima, plafonicama i prozorima. Ti detalji su se sastojali od vrsta materijala od kojih su sačinjeni i njihovih toplotnih karakteristika, površina, gustina i debljina. Imalo se u vidu da materijali i njihove toplotne karakteristike mogu vremenom i da se pogoršaju; ovaj efekat je u ovoj studiji zanemaren.

**Dinamičke informacije.** To se odnosi na podatke u realnom vremenu i zahteva da davači – senzori tačno prikupe vrednosti parametara (Dong i dr., 2014). Većina dinamičkih informacija prikupljena je kroz BAS. Za prikupljanje svih informacija – podataka koji se nisu mogli naći kroz BAS, poput podataka o sunčevom zračenju i temperaturi spoljnog vazduha, bili su postavljeni senzori. Traženi dinamički podaci za alat za simulaciju energije su se uglavnom sastojali od promenljivih veličina koje dovode ili do toplotnih dobitaka ili do toplotnih gubitaka unutar zone, dok su traženi dinamički podaci za merenje sistema pripadali mehaničkom sistemu. Traženi podaci su navedeni u tabeli 4 i podeljeni na osnovu toga u kom aspektu alata su prvenstveno primenjeni.

**Merene temperature i brzine grejanja/hlađenja.** Da bi se utvrdilo da li je neki otkaz (već) postojao u sistemu, trebalo je da bude izmereno nekoliko veličina sistema: temperatura u poslovnim prostorijama, brzina grejanja zasnovana na brzini hidronske grejanja za svaku prostoriju, i na brzini vazdušnog grejanja/hlađenja za zonu. Zatim je trebalo uporediti ove rezultate sa predviđenim vrednostima. Ako izmerene temperatura, brzina hidronske grejanja, ili brzina vazdušnog grejanja/hlađenja odstupaju od veličina predviđenih u modelu, možda je otkriven otkaz. Senzori koji se nalaze na raznim lokacijama u prostoriji, zoni, odnosno mehaničkoj opremi, su omogućavali merenje ova tri parametra. Merenja sobne temperature, brzine/intenziteta vazdušnog grejanja/hlađenja, i vodenog grejanja se detaljnije razmatraju u naredna dva stava.

**Temperatura vazduha u poslovnoj prostoriji.** Temperatura prostorije bila je promenljiva veličina koju su direktno merili senzori ugrađeni u termostate postavljene na srednjoj visini u prostorijama. Tipično, u analizama potrošnje energije

Tabela 3. Pregled članka o metodi ODO zasnovanoj na istoriji procesa

Članak	Tip otkaza	Nivo na kome se razmatra otkaz
Wu i Sun (2011)	Hard	Zona i zgrada
Cui i Wang (2005)	Soft	Zgrada
Li i Braun (2007)	Hard i soft	Zgrada
Cheung i Braun (2013a, 2013b)	Hard i soft	Zgrada
Rossi i Braun (1997)	Hard i soft	Zgrada
Angelov i dr. (2000)	Hard i soft	Zgrada

Tabela 4. Potrebni dinamički podaci

Podaci iz modela sistema	Izmereni podaci iz sistema
Sunčevo zračenje	Sobna temperatura (vazduha)
Temperatura spoljnog vazduha	Brzina dovodnog vazduha
Broj korisnika	Temperatura dovodnog vazduha
Osvetljenje	Temperatura povratnog vazduha
Opterećenje priključka/utičnice	Položaj radijatorskog ventila
Zadata temperatura grejanja	Brzina protoka vode u radijatoru
Zadata temperatura hlađenja	Temperatura ulazne i izlazne vode radijatora

neke zgrade pretpostavlja se da je vazduh u toj prostoriji savršeno izmešan, i prema tome homogen (Riederer, 2002). To je smatrano za prikladnu pretpostavku prilikom procenjivanja temperature prostorije za ovaj rad, pošto sistem ventilacije koristi i sekundarno kretanje vazduha – zahvatanje, koje podpomaže mešanje vazduha.

**Intenzitet vazdušnog i hidrinskog grejanja i hlađenja.** Za razliku od merenja temperature vazduha u prostoriji, za procenu brzina ukupnog vazdušnog i hidrinskog grejanja bili su potrebni proračuni. Stacionarni intenzitet grejanja/hlađenja koji se uspostavlja u jednom sistemu za vazdušno grejanje je procenjen jednačinom (1):

$$\dot{Q}_{Air,t} = \dot{m}_{Air,t} \cdot c_{pAir} (T_{Sup,t} - T_{Ret,t}) \quad (1)$$

gde je:

$\dot{Q}_{Air,t}$  – intenzitet vazdušnog grejanja i hlađenja u vremenu  $t$ ,  
 $\dot{m}_{Air,t}$  – maseni protok dovodnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $c_{pAir,t}$  – specifični toplotni kapacitet sobnog vazduha,  
 $T_{Sup,t}$  – temperatura dovodnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $T_{Ret,t}$  – temperatura povratnog vazduha u vremenu  $t$ .

Jednačina (1) je razvijena tako što je stvorena kontrolna zapremina oko prostorije i primenjen Prvi zakon termodinamike i bilans masenog protoka.

Stacionarni intenzitet hidrinskog grejanja procenjena je jednačinom (2):

$$\dot{Q}_{Rad,t} = \dot{m}_{Water,t} \cdot c_{pWater} (T_{Inlet,t} - T_{Outlet,t}) \quad (2)$$

gde je:

$\dot{Q}_{Rad,t}$  – brzina vodenog grejanja u vremenu  $t$ ,  
 $\dot{m}_{Water,t}$  – maseni protok radijatorske vode u vremenu  $t$ ,  
 $c_{pWater,t}$  – specifični toplotni kapacitet vode,  
 $T_{Inlet,t}$  – ulazna temperatura radijatorske vode u vremenu  $t$ ,  
 $T_{Outlet,t}$  – izlazna temperatura radijatorske vode u vremenu  $t$ .

Ova jednačina je sledila sličan princip izvođenja kao i jednačina (1). Na osnovu dugotrajnih merenja, pretpostavljeno je da je sav prenos toplote sa radijatora, koji je sa gornje strane dobro izolovan, išao direktno u prostoriju a da je vreme provedeno u prelaznom režimu beznačajno u poređenju sa stacionarnim režimom.

### Razvoj modela

Za otkrivanje otkaza na zonskom nivou odabrana je metodologija zasnovana na kvantitativnom modelu. Ovo je zna-

čilo da sledeću metriku sistema treba proceniti i uporediti sa zadatim vrednostima: temperaturu vazduha u prostoriji, intenzitet vodenog grejanja za svaku prostoriju, i intenzitet vazdušnog grejanja/hlađenja za zonu. Fleksibilnost i sposobnost da stvori jedan sveobuhvatni ODO alat bile su najznačajnije karakteristike ovog razvoja i tako je stvoren jedinstveni model u MATLAB®-u (MathWorks® n.d.) umesto postojećeg alata za simuliranje energije.

**Eksplicitna konačna razlika.** Kao osnovni za otkrivanje nefikasnosti u mehaničkom sistemu razvijen je alat za simulaciju energije koji je koristio metodu eksplicitne konačne razlike, zbog prednosti te metode u odnosu na implicitnu metodologiju: on ne zahteva da se rešava sistem linearnih jednačina, koji olakšava njegovo postavljanje, i računarski je brži od implicitne metode. Metoda eksplicitne konačne razlike koristi

prelaznu jednodimenzionu termalnu analizu koja se može primeniti na zgrade radi predviđanja brzina grejanja i hlađenja, dinamičke varijacije temperature unutar zidova, oscilacija sobne temperature i kondenzacije na unutrašnjim površinama zidova (Athienitis, 2010).

Primena metodu eksplicitne konačne razlike u kancelarijskom prostoru sastojala se u postavljanju nekoliko čvorova/čvorišta na način koji je obezbeđivao da budu uzete u obzir sve površine, toplotne kapacitivnosti, i vazduh u prostoru koji se procenjivao. Onda je rezolucija modela sistematično povećavana sve dok model nije dovoljno licio na merenja i primenu inženjerskog/tehničkog načina procene.

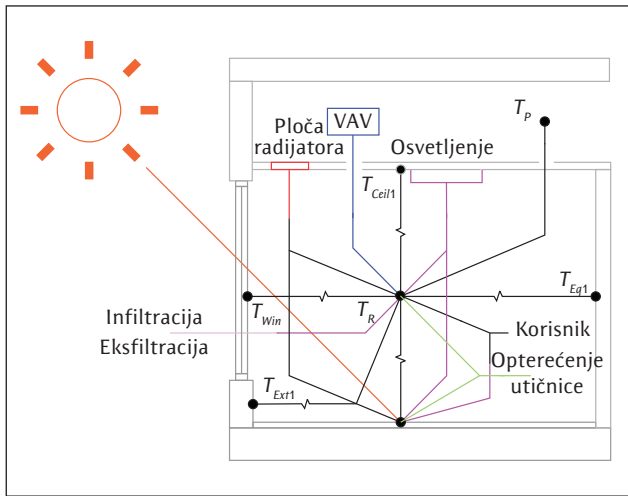
Slika 1 prikazuje sve površine prostorije i vazdušna čvorišta koja su modelirana. Slika 1 takođe prikazuje kako svaki spoljni parametar deluje u kombinaciji sa čvorovima/čvorištima i kako svaki čvor/čvorište deluje u kombinaciji sa drugima. Razmena zračenja između površina nije prikazana, radi jasnoće prikaza, premda je značajna i bila je modelirana.

Takođe radi jasnoće prikaza, na slici 1 nisu prikazani čvorovi/čvorišta koji predstavljaju sastav svakog zida. Za modeliranje svake prostorije upotrebljeno je ukupno 15 čvorova/čvorišta. Primer izvedenih jednačina dat je u jednačini (3), koja predstavlja temperature vazdušnih čvorova/čvorišta za prostorije:

$$T_{Rt,t+1} = T_{Rt,t} + \frac{\Delta t}{C_{Air}} \left[ \begin{array}{l} (T_{F1,t} - T_{Rt,t})(UA)_{F,t} \\ + (T_{EqW1,t} - T_{Rt,t})(UA)_{EqW,t} \\ + (T_{ExtW1,t} - T_{Rt,t})(UA)_{ExtW,t} \\ + (T_{Win,t} - T_{Rt,t})(UA)_{Win,t} \\ + (T_{Ceil,t} - T_{Rt,t})(UA)_{Ceil,t} \\ + (T_{Rad,d,t} - T_{Rt,t})(UA)_{Rad,t} \\ + \dot{Q}_{Air,t} + \dot{Q}_{Inf,t} + \dot{Q}_{PL,t} + PL_{PC} \\ + \dot{Q}_{Occ,t} \times Occ_{PC} \times \dot{Q}_{L,t} \times L_{PC} \end{array} \right] \quad (3)$$

gde je:

$T_{Rt,t+1}$  – sobna temperatura (vazduha) u vremenu  $t + 1$ ,  
 $T_{Rt,t}$  – sobna temperatura (vazduha) u vremenu  $t$ ,  
 $\Delta t$  – trajanje vremenskog intervala,  
 $C_{Air}$  – toplotna kapacitivnost sobnog vazduha,  
 $T_{F1,t}$  – temperatura površine poda u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{F,t}$  –  $UA$  koeficijent prelaza toplote između površine poda i sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $T_{EqW1,t}$  – ekvivalentna temperatura površine zida u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{EqW,t}$  – konvektivna  $UA$  (koeficijent prelaza toplote) vrednost između površine poda i sobnog vazduha u vremenu  $t$   
 $T_{ExtW1,t}$  – ekvivalentna temperatura površine zida u vremenu  $t$ ,



Slika 1. Toplotni mrežni dijagram prostorije

- $(UA)_{ExtW,t}$  – konvektivna  $UA$  vrednost između ekvivalentne površine zida i sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $T_{Win,t}$  – temperatura površine prozora u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{Win,t}$  – konvektivna  $UA$  vrednost između površine prozora i sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $T_{Ceil1,t}$  – temperatura površine plafonice u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{Ceil,t}$  – konvektivna  $UA$  vrednost između površine plafonice i sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $T_{Rad,t}$  – temperatura površine radijatora u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{Rad,t}$  – konvektivna  $UA$  vrednost između površine radijatora i sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $\dot{Q}_{Air,t}$  – brzina vazdušnog grejanja i hlađenja u vremenu  $t$ ,  
 $\dot{Q}_{inf,t}$  – opterećenje zbog infiltracije/eksfiltracije ubacivanja/izbacivanja toplote u vremenu  $t$ ,  
 $\dot{Q}_{PL,t}$  – opterećenje priključka/utičnice u vremenu  $t$ ,  
 $PL_{PC}$  – procenat opterećenja priključka/utičnice koji je konvekcijom prenet u prostor,  
 $\dot{Q}_{Occ,t}$  – opterećenje od strane korisnika u vremenu  $t$ ,  
 $Occ_{PC}$  – procenat opterećenja priključka/utičnice koji je konvekcijom prenet u prostor,  
 $\dot{Q}_{L,t}$  – opterećenje od strane osvetljenja u vremenu  $t$ ,  
 $L_{PC}$  – procenat opterećenja od strane osvetljenja koji je konvekcijom prenet prostor.

Jednačina (3) sadrži sve temperaturne i toplotne dobitke/gubitke koji su delovali u kombinaciji sa vazduhom u datom vremenskom intervalu da bi se izračunala temperatura vazdušnog čvora/čvorišta za jedan vremenski interval unapred u vremenu. Sprovedena je analiza stabilnosti koja je za posledicu imala izbor jednogminutnog vremenskog intervala za potrebe ovog rada.

Primer izvedenih jednačina temperature površinskih čvorova/čvorišta dat je jednačinom (4), koja predstavlja temperaturu čvorova/čvorišta površine poda za prostorije:

$$T_{F1,t+1} = \left[ \begin{array}{l} T_{Rt,t} \times (UA)_{F,t} + T_{F2,t} \\ \times 2 \times (UA)_{carp} + T_{EqW1,t} \\ \times (UA)_{EqF,t} + T_{ExtW1,t} \\ \times (UA)_{ExtF,t} + T_{Win,t} \\ \times (UA)_{WinF,t} + T_{Ceil1,t} \\ \times (UA)_{CeilF,t} + Q_{SR,t} \\ + Q_{Occ,t} \times Occ_{PR} + Q_{L,t} \\ \times L_{PR} + T_{Rad,t} \times (UA)_{RadF,t} \end{array} \right] \div \left[ \begin{array}{l} (UA)_{F,t} + 2 \\ \times (UA)_{carp} \\ + (UA)_{WinF,t} \\ + (UA)_{EqF,t} \\ + (UA)_{ExtF,t} \\ + (UA)_{CeilF,t} \\ + (UA)_{RadF,t} \end{array} \right] \quad (4)$$

gde je:

- $T_{F1,t+1}$  – temperatura površine poda u vremenu  $t + 1$ ,  
 $T_{Rt,t}$  – sobna temperatura (vazduha) u vremenu  $t$ ,

- $(UA)_{F,t}$  – konvektivna  $UA$  vrednost između površine poda i sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,  
 $T_{F2,t}$  – unutrašnja temperatura podne obloge u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{carp}$  – provodna  $UA$  vrednost podne obloge,  
 $T_{EqW1,t}$  – temperatura ekvivalentne površine zida u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{EqF,t}$  – radijaciona  $UA$  vrednost između ekvivalentne površine zida i površine poda,  
 $T_{ExtW1,t}$  – temperatura spoljne površine zida u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{ExtF,t}$  – radijaciona  $UA$  vrednost između spoljne površine zida i površine poda,  
 $T_{Win,t}$  – temperatura površine prozora u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{WinF,t}$  – radijaciona  $UA$  vrednost između površine prozora i površine poda,  
 $T_{Ceil1,t}$  – temperatura površine plafonice u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{CeilF,t}$  – radijaciona  $UA$  vrednost između površine plafonice i površine poda,  
 $Q_{SR,t}$  – opterećenje od direktnog sunčevog zračenja u vremenu  $t$ ,  
 $Q_{Occ,t}$  – opterećenje od strane korisnika u vremenu  $t$ ,  
 $Occ_{PR}$  – procenat opterećenja od strane korisnika koje je radijativno,  
 $Q_{L,t}$  – opterećenje od strane osvetljenja u vremenu  $t$ ,  
 $L_{PR}$  – procenat opterećenja od strane osvetljenja koje je radijativno,  
 $T_{Rad,t}$  – temperatura površine radijatora u vremenu  $t$ ,  
 $(UA)_{RadF,t}$  – radijaciona  $UA$  vrednost između površine radijatora i površine poda.

Jednačina (4) sadrži sve dobitke temperature i toplote koji su delovali u kombinaciji sa podom u datom vremenskom intervalu da bi se izračunala temperatura čvorova/čvorišta poda za jedan vremenski interval unapred u vremenu.

Jednačine (3) i (4) su primeri tipičnih jednačina koje se koriste za određivanje temperature čvora/čvorišta u budućem vremenu ( $t + 1$ ). Da bi sistem funkcionisao, morali su da budu definisani početni uslovi za temperaturu svakog čvora/čvorišta. Da bi se dobili odgovarajući početni uslovi, za svaku analizu su sprovedene dve simulacije. Prva simulacija služila je kao probno zagrevanje; tokom ove simulacije pretpostavljeno je da su početne/prethodne temperature svih čvorova/čvorišta jednake termostatskom očitavanju u odgovarajućoj prostoriji. Tokom ovog intervala, registrovana je prosečna temperatura svakog čvora/čvorišta. Nakon toga, prosečna temperatura je upotrebljavana kao početna/prethodna temperatura za svaki čvor/čvorište, osim za sobnu temperaturu (vazduha), za koju je bila zadata temperatura koju je registrovao termostat.

**Koeficijenti unutrašnje konvekcije.** Od raznih teorija koje su osmislili Peeters i dr. (2011), metoda adaptivnog koeficijenta konvekcije je najkomplikovanija. Ona kombinuje korelacije Alamdarija i Hammonda sa Fišerovim korelacijama (Beausoleil-Morrison, 2001). Korišćena je hibridna metodologija koja vrši izbor između adaptivnog koeficijenta konvekcije i metodologije grejanog plafona (Peeters i dr., 2011) pošto su se radijatori nalazili na plafonu.

**Unutrašnja razmena toplote zračenjem.** Napravljen je model za istraživanje ekološke performanse sistema (ESP-r) (ESRU, 2018) za prostorije, da bi se procenili svi faktori primenom tehnike praćenja zraka svetlosti (engl. ray tracing). Brzina kojom unutrašnja površina razmenjuje toplotu sa svakom drugom površinom može se karakterisati radijacionim koeficijentom prenosa toplote. Teorija nelinearizovanog radijacionog koeficijenta upotrebljena je da se izračuna radijacioni koeficijent između svake površine u svakom vremenskom intervalu.

**Intenzitet hidroničnog – vodenog grejanja.** Kada se u prostoriji ne postiže zadata tačka grejanja, primarni izvor grejanja je kroz radijacionu panel. Procena intenziteta toplovodnog grejanja pojednostavljena je podelom plafona na dve površi-

ne: površinu plafonske ploče i površinu radijacionog panela. Kada je modeliranoj prostoriji bilo potrebno grejanje, otvarao se teorijski radijatorski ventil. U ovoj tački, temperaturu površine radijacione ploče je nadvladalo ono što je utvrđeno metodom eksplicitne konačne razlike i uzete su vrednosti koje su određene detaljnim terenskim merenjima. Od te tačke je brzina – intenzitet grejanja predviđana na osnovu temperature površine panela i srednje sobne temperature, kao što se može videti u jednačini (5), koja sumira toplotni dobitak sa radijacione ploče koji nastaje zračenjem i konvekcijom:

$$\dot{Q}_{Rad,t} = \left( \sigma \times \varepsilon_{Rad} \times A_{Rad} \times [T_{Rad,t}^4 - T_{Rt,t}^4] + (UA)_{Rad,t} (T_{Rad,t} - T_{Rt,t}) \right) \quad (5)$$

gde je:

- $\dot{Q}_{Rad,t}$  – intenzitet toplovodnog grejanja u vremenu  $t$ ,
- $\sigma$  – Stefan-Boltzmann-ova konstanta,
- $\varepsilon_{Rad}$  – emisivnost radijatora,
- $A_{Rad}$  – površina radijatora,
- $T_{Rad,t}$  – temperatura površine radijatora u vremenu  $t$ ,
- $T_{Rt,t}$  – temperatura sobnog vazduha u vremenu  $t$ ,
- $(UA)_{Rad,t}$  – konvektivna  $UA$  vrednost između površine radijatora i sobnog vazduha u vremenu  $t$ .

Za deo zračenja, prosečna temperatura površine u prostoriji je aproksimirana temperaturom sobnog vazduha. Pretpostavljeno je da je to adekvatna aproksimacija zato što je površina spoljnog dela bila minimalna u odnosu na unutrašnje površine prostorije. Štaviše, sistem vazdušnog grejanja poboljšava prenos toplote između unutrašnjih površina i sobnog vazduha.

**Intenzitet vazdušnog grejanja i hlađenja.** Kada zadata tačka hlađenja nije postignuta u prostorijama, model je isporučio hlađenje u prostorije brzinom utvrđenom jednačinom (6). Vazdušno grejanje je funkcionisalo na sličan način. Međutim, radijator je primarni izvor grejanja za svaku prostoriju a vazdušni sistem je sekundarni izvor grejanja za zonu. Prema projektu, ventil za dogrevanje u VAV (varijabilna zapremina vazduha) kutiji samo inicira pitanje da li je radijator u nekoj prostoriji bio uključen na 15 min., a da zadata tačka grejanja još nije postignuta, i omogućava da se vazduh koji ulazi u zonu zagreva. Modelom je upravljano na sličan način. Ako je modelovani radijator bio uključen 15 min., otvarao se ventil za dogrevanje. Kada bi se otvorio ventil za dogrevanje, primenjavana je jednačina (6) da bi se utvrdila brzina vazdušnog grejanja:

$$\dot{Q}_{Airt,t} = k_p (T_{sp,t} - T_{Rt,t}) \quad (6)$$

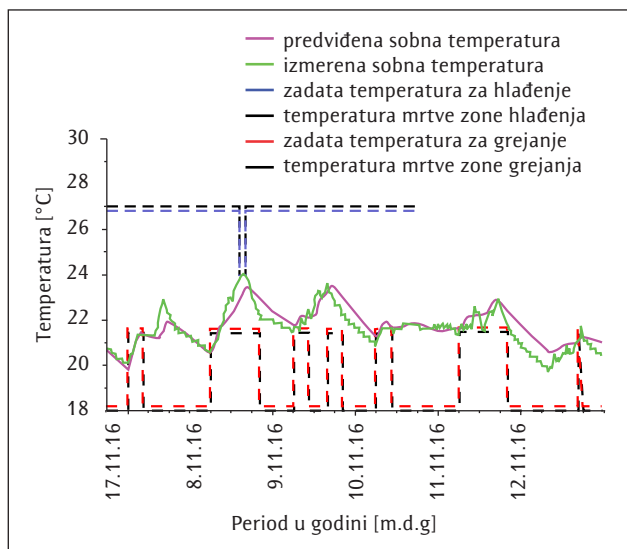
gde je

- $\dot{Q}_{Airt,t}$  – brzina vazdušnog grejanja i hlađenja u vremenu  $t$ ,
- $k_p$  – konstanta proporcionalne kontrole,
- $T_{sp,t}$  – zadata temperatura u vremenu  $t$  (dobijena iz BAS),
- $T_{Rt,t}$  – temperatura sobnog vazduha u vremenu  $t$ .

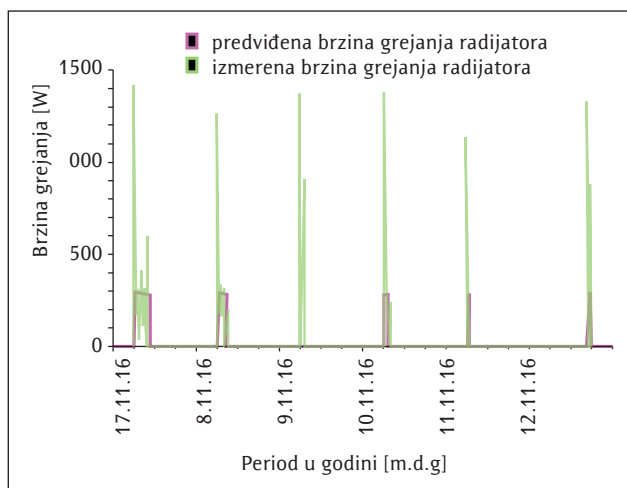
Jednačina (6) je definisana u knjižici *Toplotna analiza zgrade* (Athienitis, 2010) i u njoj se koristi kontrolna konstanta  $k_p$  da odmeri razliku između zadate i sobne temperature. Dobra vrednost za  $k_p$  je polovina vršnog opterećenja za prostor koji se analizira (Athienitis, 2010).

### Verifikacija modela

Kada je finaliziran razvoj modela, verifikovana je funkcionalnost modela. Odabrana je nedelja koja pada u rani period sezone grejanja zato što su i sistemi koji koriste vazduh i hidronske sistemi tada u funkciji i oba se mogu testirati. Slika 2 prikazuje temperaturni profil za prostoriju/kancelariju 1 i obuhvata zadate temperaturne tačke koje su dobijene iz BAS-a. U principu, izmereni i teorijski temperaturni profil su bili slični. Ovaj plan jeste sadržao manje razlike između iz-



Slika 2. Profil sobne temperature za prostoriju 1 tokom jedne nedelje u novembru



Slika 3. Profil brzina hidronskog grejanja za prostoriju tokom jedne nedelje u novembru

merenih vrednosti i onih predviđenih u modelu. Međutim, izračunato je da koren srednje kvadratnog odstupanja između izmerene i predviđene sobne temperature za nedelju dana iznosi približno 0.45 °C (0.81°F). Ova vrednost se nalazila unutar praga otkrivanja otkaza za temperaturne profile koji je definisan u narednom odeljku Otkrivanje otkaza. Tako je, sve u svemu, model smatran sposobnim da predviđa sobnu temperaturu u prostoriji 1, sa samo manjim odstupanjima.

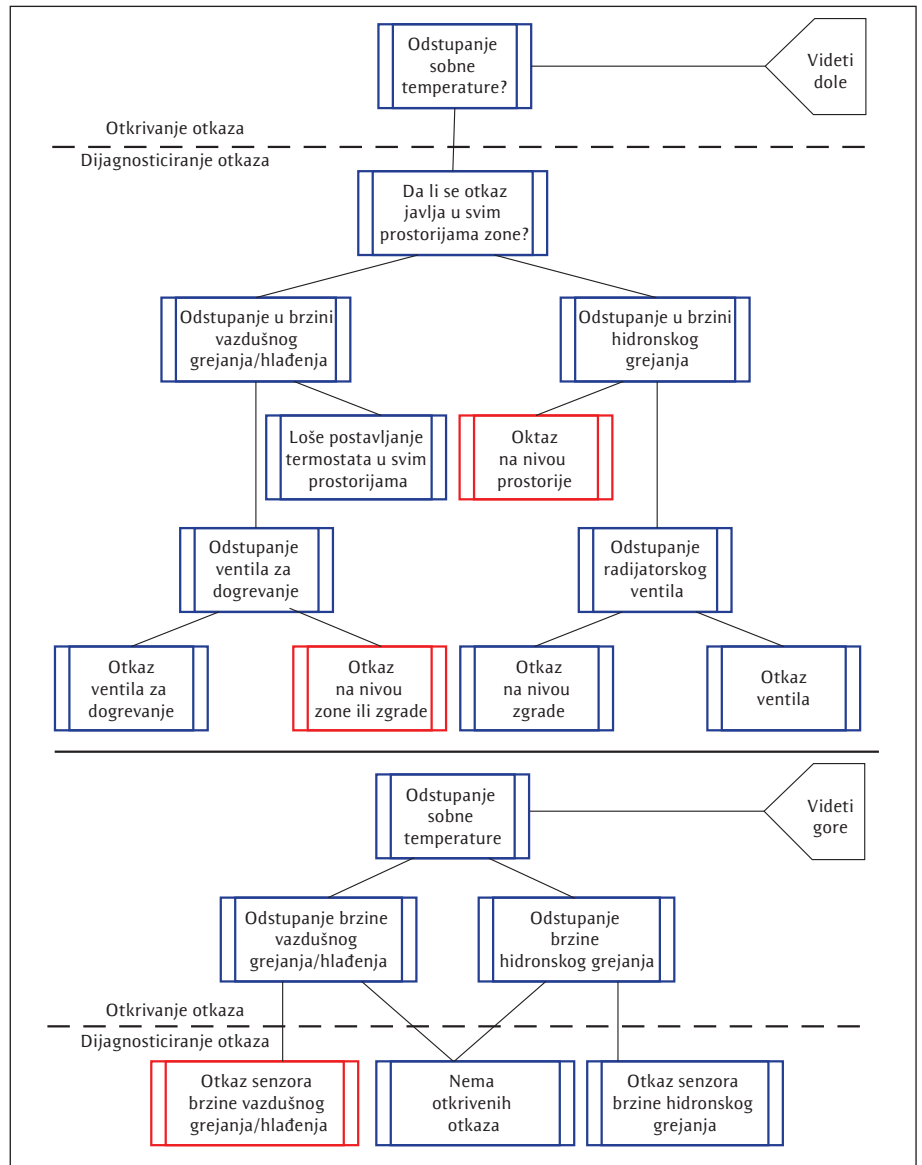
Slika 3 prikazuje profile hidronskog grejanja za prostoriju/kancelariju 1. Model je tipično predviđao da se radijator aktivira kada je stvarni radijator i bio uključen. Međutim, tokom nedelje je bilo odstupanja, koja su imala za posledicu standardno odstupanje od približno 89 W (303 Btu/h). Razlike u veličini odstupanja nisu bile zabrinjavajuće, jer su senzori koji su bili ugrađeni u radijator u prostoriji 1 uhvatili osnovni prelazni režim prenosa toplote. Međutim, nakon prvobitnog intenziteta grejanja od 1300 W (4436 Btu/h), izmerena brzina grejanja je pala na veličinu sličnu brzini grejanja predviđenoj na dan 7, 8. i 10. novembra. Vršne vrednosti su posledica kratkog prelaznog režima, kada je temperatura izlaznog fluida bila mnogo niža nego temperatura ulaznog fluida. Ujutro, na dan 9. novembra, model nije predvideo nikakvo grejanje, dok je radijator ustvari bio kratko vreme uklju-

čen. Razlika u brzini hidronskog grejanja koja se vidi na slici 3 bila je posledica razlike u temperaturnim profilima koja se vidi na slici 2. Ukupno, predviđeno hidronsko grejanje je blisko podsećalo na izmereno hidronsko grejanje za prostoriju 1, čime je verifikovana funkcionalnost modela. Tokom procesa verifikacije, izmerene i predviđene brzine vazdušnog grejanja/hlađenja su varirale (nije prikazano).

Utvrđeno standardno odstupanje za tu nedelju bilo je približno 534 W (1822 Btu/h), za šta je utvrđeno da je više od dvostrukog praga otkrivanja otkaza koji je definisan u narednom odeljku Otkrivanje otkaza. Kasnije je utvrđeno da je razlika u predviđenim i izmerenim brzinama vazdušnog grejanja/hlađenja nastupila zbog pomaka u senzoru za temperaturu dovodnog vazduha (SAT). Performansa u prostorijama je neposredno ispitivana tokom nedelje koja počinje na dan 7. novembra. U tom periodu nisu otkriveni nikakvi problemi u funkcionalnosti termostata ili radijatora. Temperaturni profili koje je model predvideo za četiri prostorije koje su bile predmet procene sledili su slične trendove kao i temperatura koju je zabeležio termostat. Standardno odstupanje za jednu prostoriju bilo je tek nešto izvan praga otkrivanja otkaza za taj temperaturni profil. Međutim, standardno odstupanje za druge tri prostorije nalazilo se unutar praga otkrivanja otkaza za temperaturne profile. Hidronsko grejanje koje je model predvideo za četiri prostorije bilo je takođe tačno. Sva odstupanja od izmerenog hidronskog grejanja bila su rezultat odstupanja u temperaturnim profilima. Dakle, model je pokazao sposobnost da predviđa sobnu temperaturu u prostorijama kada je prisutno hidronsko grejanje, u periodu u kome nije bilo otkaza.

### Otkrivanje otkaza

Za predviđanje da li je postojao otkaz u sistemu bilo je potrebno izmeriti i predvideti nekoliko mernih sistemskih podataka. Ako su izmerene merne veličine u sistemu prekoračivale određeni prag otkrivanja otkaza, otkaz je otkriven; ako nisu (prekoračivale), otkaz a nije otkriven. Izbor odgovarajućeg praga za otkrivanje otkaza bio je važan. Prag za otkrivanje otkaza koji bi bio previše mali, može da stvori značajan broj lažnih alarma, a prag za otkrivanje otkaza koji je suviše veliki može da ima za posledicu da otkazi prođu neotkriveni. U ovom istraživanju su pragovi za otkrivanje otkaza birani na osnovu odabranih nesigurnosti u pogledu materijalnih karakteristika, te nesigurnosti u senzorska merenja korišćena u alatu. Metodologija širenja nesigurnosti korišćena je za dobijanje pragova za otkrivanje otkaza, koji su na svim budućim planovima predstavljani isprekidanim linijama u purpurno-crvenoj boji (magenta). Vrednosti pragova za otkrivanje otkaza variraju, što je posledica unutrašnjih opterećenja koja jesu (ili nisu) prisutna u bilo kom datom vremenskom interva-



Slika 4. Heuristički skup pravila za dijagnosticiranje otkaza na nivou sistema

lu. Zato se pragovi za otkrivanje otkaza mogu određivati tek nakon analiza i dati su u odeljku Rezultati.

**Trajanje analize.** Trajanje analize utiče na rezultate koji se dobijaju kada se za otkrivanje otkaza koristi ovaj alat. Shodno tome, izbor odgovarajuće dužine trajanja analize bio je od vitalnog značaja. Otkaz je mogao da bude otkriven ako bi temperatura prostorije, brzina hidronskog grejanja za svaku prostoriju, ili brzina vazdušnog grejanja/hlađenja za zonu odstupala od predviđanja u modelu. U slučaju kad bi se ponovo pojavilo isto odstupanje, sistem je otkrivao otkaz, dozvoljavajući da započne proces dijagnostikovanja otkaza. Da bi se otkrile ponovljeni otkazi, bio je potreban vremenski period koji omogućava da se ponovo obavi sistemaska procedura. Međutim, model može i da odstupa od izmerenih rezultata (zanemari izmerene rezultate) ako analiza traje suviše dugo, što dovodi do lažnih alarma. Ovo je dovelo do izbora nedeljne analize, jer je ona nudila minimalni period, a omogućavala i da budu analizirane sve procedure sistema: radni dan, radna noć, i procedure za vreme vikenda. Značajno je primetiti da su, iako bi alat u idealnom smislu analizirao svih sedam dana u sedmici, u krajnjoj liniji nedelje morale da budu zanemarene zbog stalnih problema sa skladištenjem podataka u BAS nedeljom rano ujutro.

## Dijagnostika otkaza

Situacija je obeležavana kao potencijalni otkaz ako je neka izmerena vrednost prekoračila prag za otkrivanje otkaza. Otkaz je otkriven ako je ta ista situacija nastupila više od jednom tokom iste nedelje. Otkrivanje otkaza je vredno; međutim, utvrđivanje uzroka otkrivenog odstupanja je glavni prioritet ODO. Kada je otkaz otkriven, primenjen je heuristički skup pravila da bi se utvrdilo tačno mesto otkaza u sistemu. Kako je trenutni pristup metodologija „odozdo prema gore“, prvo su analizirana predviđanja temperature vazduha. Slika 4 predstavlja heuristički skup pravila po kome se postupalo radi dijagnostike otkrivanja otkaza. Na slici 4 „odstupanje“ se koristi da označi scenarij koji se ponavlja, a koji je imao za posledicu to da izmerene vrednosti pređu prag za otkrivanje otkaza. Slika 4 takođe koristi šemu u boji da identifikuje otkaze koji su otkriveni tokom ovog istraživanja. Otkazi koji su istaknuti crvenom bojom predstavljaju otkaze otkrivene u sistemu tokom analize.

Gornji deo slike 4 predstavlja skup pravila po kojima se postupalo nakon otkrivanja odstupanja sobne temperature (vazduha). Ovaj dijagram toka može da identifikuje tačan uzrok odstupanja, ali takođe može da dovede i do kategorizacije na „otkaze na nivou prostorije“, „otkaze na zonskom nivou“ ili „otkaze na nivou zgrade“. Ove tri dijagnoze otkaza zahtevaju jednu dublju analizu da bi se utvrdio koren uzroka otkrivenog otkaza. Otkaz u projektu, na nivou prostorije, bio je problem prisutan u konkretnoj prostoriji, a nastao je ili zbog lošeg postavljanja termostata, zbog toga što je unutrašnja oprema uticala na očitavanja termostata, ili što je prozor ostavljen otvoren. A na zonskom nivou otkaz je predstavljao problem koji je prouzrokovala terminalna jedinica. Ova kategorija obuhvata lošu logiku upravljačkih elemenata, neispravan rad prigušivač (prigušna klapna) i prevelike ili premale dimenzije terminalne jedinice.

Kada je dat detalj modela, potreban je dalji pregled izvan kompleta heurističkih pravila da bi se napravila razlika između ova dva pitanja. Najzad, otkaz na nivou zgrade je predstavljao problem koji se javljao u uređajima iz primarne petlje, kao što su otkazi kod AHU uređaja, rashladnih tornjeva, hladnjaka – čilera, ili kotlova, koje su bile izvan obuhvata ovog istraživanja.

Ako je otkriveno neko odstupanje u temperaturnim profilima, utvrđivano je da li to odstupanje nastupa stalno između prostorija u zoni. Ovaj korak je bio značajan zato što, ako se ovo otkrivanje ne događa dosledno u svim prostorijama, onda je problem verovatno radiator u tom prostoru. Takođe, u pojedinim prostorijama može postojati i otkaz u projektu, na nivou prostorije, ili je otkaz mogao biti otkriven u sistemu grejanja cele zgrade. Ako se otkaz dogodio u svim prostorijama, verovatno je da se radi o problemu sa VAV kutijom, jer ona snabdeva vazдушnim grejanjem/hlađenjem sve prostorije, što je značilo da treba analizirati ova predviđanja.

Ako su vrednosti predviđenih i izmerenih brzina vazdušnog grejanja/hlađenja bile stabilne/dosledne, verovatno da je lokacija termostata u svim prostorijama bila loše odabrana, jer je mala verovatnoća da je u svim prostorijama istovremeno došlo do intervencije korisnika. To jest, verovatnoća da je svaki korisnik ostavio svoj prozor otvoren ili postavio deo opreme u prostoriji na način koji je doveo do istih, i netačnih termostatskih merenja u svim prostorijama bila bi mala. Međutim, ako je došlo do odstupanja između predviđene i izmerene brzine vazdušnog grejanja/hlađenja, treba proceniti vrednosti ventila za dogrevanje. Razlika u ovoj tački bi značila da kod ventila za dogrevanje postoji neki problem. Ako nije bilo nikakve razlike, može biti da se radi o otkazu i prigušivač (prigušna klapna) na VAV kutiji, koja se sastoji ili od zaglavljenog prigušivač (prigušna klapna) ili postoji neki problem sa komandama prigušivač (prigušna klapna), i/ili neki otkaz na

nivou zgrade. Kako je prethodno pomenuto, otkazi koji se javljaju na nivou zgrade su bile izvan obuhvata ovog istraživanja.

Donji deo slike 4 prikazuje da, ako je postojala usklađenost između predviđene sobne temperature (vazduha) i očitavanja termostata, sledeća za procenu bi trebalo da budu predviđanja brzine grejanja/hlađenja. Bilo je važno da se procene predviđanja brzine grejanja/hlađenja čak i ako su predviđanja za sobni vazduh bila slična, zato što odstupanja između te dve tačke mogu da budu uzrok pogrešnih senzorskih merenja. Ova nedosledna očitavanja bi onda mogla da budu uzrok neefikasnog funkcionisanja sistema.

Ako je bilo odstupanja kod hidronskog grejanja, onda je to verovatno bio problem sa jednim od senzora koji su upotrebljeni za procenu brzine hidronskog grejanja. Ovo bi zahtevalo dalju analizu da se utvrdi koji senzor je bio neispravan. To bi mogao da bude ili ulazni ili izlazni temperaturni senzor ili senzor brzine protoka. Takođe su procenjivane brzine vazdušnog grejanja/hlađenja kako bi se obezbedilo da svi mehanički sistemi rade efikasno. Ako su i ova predviđanja bila tačna, nije otkriven nikakav otkaz. Ako je, međutim, u ovoj fazi bilo odstupanja, onda je postojao otkaz na jednom od senzora koji su korišćeni za utvrđivanje brzine vazdušnog grejanja/hlađenja. Ova odstupanja je mogao da prouzrokuje SAT, senzor za temperaturu povratnog vazduha, ili senzor za brzinu protoka. To je zahtevalo dalju analizu, da bi se utvrdilo koji senzor je bio neispravan.

## Rezultati

Nakon razvoja alata za ODO, on je postavljen u Canal Zgradi u zoni koja sadrži četiri prostorije. Alat za ODO je testiran tokom četiri nedelje u 2016. godini, jedne nedelje u proleće, leto, jesen i zimu. Ovi periodi su analizirani u cilju testiranja funkcionalnosti alata za vreme sezone grejanja, hlađenja, i u prelaznim periodima. Razvijeni alat za otkrivanje otkaza je proizveo tražene dijagrame da bi se sa predviđenim vrednostima uporedila stvarna temperatura prostorija, hidronsko – vodeno grejanje za svaku prostoriju i vazdušno grejanje/hlađenje za zonu. Nakon toga, ručno je sprovedena metodologija dijagnostike otkaz, što je donelo dijagnozu pet otkaz: pomeraj senzora SAT, loše postavljanje dovodnog difuzora i povratne rešetke, loše postavljanje termostata, loš izbor VAV kutije, i loš kontrolni niz VAV kutije – sekvence kontrole. Ovaj rad ističe prikaz dve od ovih pet otkaz, loše postavljanje termostata i loš kontrolni niz VAV kutije.

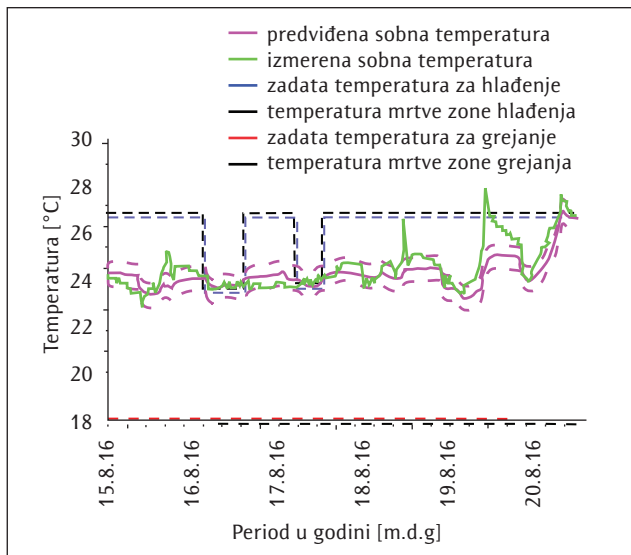
### Loše postavljanje termostata

Termostati mere temperaturu u prostoru na reprezentativnoj lokaciji da bi odredili da li prostor zahteva više ili manje grejanja/hlađenja. Kada je termostat dobro postavljen, on daje adekvatno merenje prosečne temperature za dati prostor. S druge strane, ako je lokacija termostata loša, to može da dovede do isporučivanja nepotrebne količine grejanja ili hlađenja ili isporučivanja nedovoljnog grejanja ili hlađenja i neugodnih uslova za korisnike. Tipično, mašinar projektant će postaviti termostat malo van domašaja vrata poslovne zgrade a izvođač će ugraditi termostat na visinu od oko 1.5 m (4.9 ft). Ova standardna praksa može da ima za posledicu neefikasnost, ako se prenebregnu druga razmatranja. Analiza je pokazala da su termostati u dve prostorije merili temperature koje su se značajno razlikovale od onih na termostatima u drugim prostorijama, što je posledica lošeg postavljanja termostata. Metoda kojom je otkriven ovaj otkaz je otkriven i razmotren u ovom odeljku, iza čega sledi procena ozbiljnosti otkaza.

**Otkrivanje otkaza.** Tokom nedelje koja počinje 15. avgusta, 2016. godine u dve prostorije su pronađena odstupanja između predviđene i izmerene temperature. Tokom dva dana, očitavanja termostata u prostorijama 1 i 3 odjednom su skakala na temperaturu koja je prelazila gornji prag otkrivanja

otkaza. Na dan 18. i 19. avgusta uveče, temperatura u ove dve prostorije je prelazila prag otkrivanja otkaza za približno 2 °C odnosno 4 °C (3.6°F odnosno 7.2°F). Slike 5, 6, 7 i 8 prikazuju profil temperatura tokom nedelje koja počinje 15. avgusta za prostorije 1, 2, 3, odnosno 4.

Tokom te nedelje, standardno odstupanje za prostorije 1 i 3 je bilo 0.64 °C (1.15°F) odnosno 0.97 °C (1.75°F). Standardno odstupanje za obe prostorije 1 i 3 je bilo veće od fiksnog praga otkrivanja otkaza koji je iznosio ±0.51 °C (±0.92°F). Slike 5 i 7 pokazuju kako je tokom nekoliko dana izmerena temperatura prekoračivala prag otkrivanja otkaza na sličan način, što znači da je došlo do otkaza.



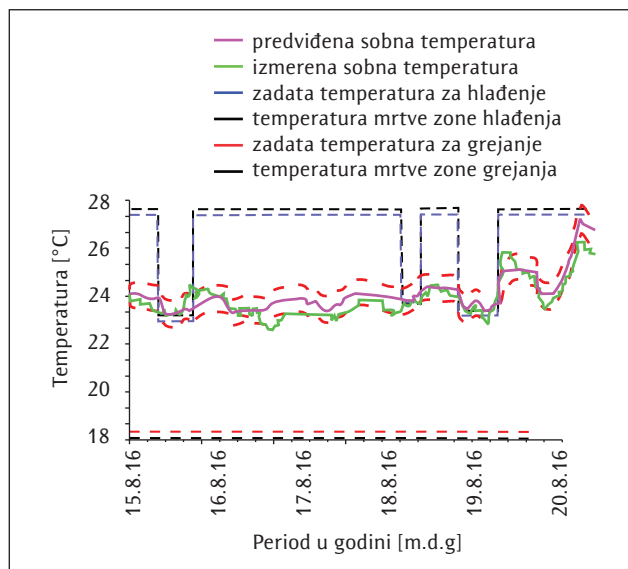
Slika 5. Profil sobne temperature za prostoriji/kancelariji 1 tokom jedne nedelje u avgustu

Tokom te nedelje standardno odstupanje za prostorije 2 i 4 je bilo 0.44 °C (0.79°F) odnosno 0.62 °C (1.12°F). Standardno odstupanje za prostoriju 2 je bilo niže od fiksnog praga otkrivanja otkaza koji je iznosio ±0.51 °C (±0.92°F), dok je standardno odstupanje za prostoriju 4 bilo veće od fiksnog praga otkrivanja otkaza koji je iznosio ±0.51 °C (±0.92°F). Slike 6 i 8 pokazuju minimalna odstupanja između izmerenih i predviđenih vrednosti, a nema sličnih odstupanja koja se ponovo javljaju tokom te nedelje; zato nije obeležen nijedan otkaz.

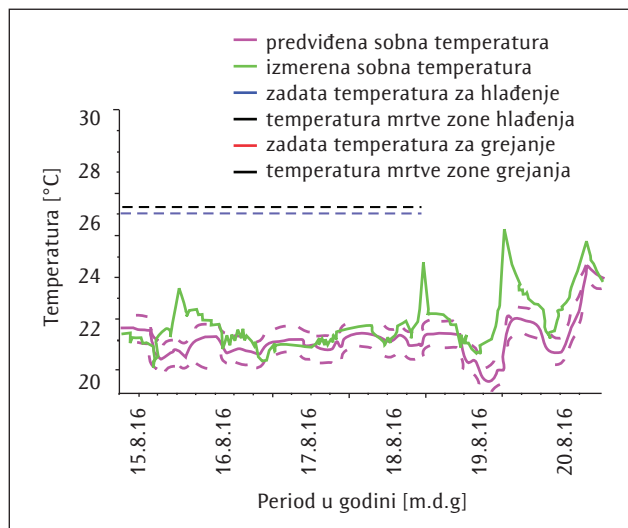
Pregledom dijagrama za tu nedelju može se videti da su predviđanja modela pratila veoma sličan trend kao i izmerene vrednosti za prostorije 2 i 4. Prostorije 1 i 3 su takođe pratile sličan trend; međutim, termostati u ove dve prostorije bi povremeno iznenada skočili na temperature koje su značajno prekoračivale prag otkrivanja otkaza. U prostoriji 1 očitavanja termostata su na dan 19. avgusta prekoračivala predviđenu vrednost za približno 4 °C (7.2°F). Tokom istog vremenskog perioda očitavanja termostata u prostoriji 3 su prekoračivala predviđenu temperaturu za skoro 5 °C (9°F). Na dan 15, 18, i 19. avgusta pikovi temperatura značajno su prekoračivali prag otkrivanja grešaka, kao što se može videti na slikama 5 i 7.

**Dijagnostika otkaza.** Ovi pikovi/skokovi su se dešavali u samo dve od četiri prostorije; tako je kao sledeće trebalo proceniti brzine grejanja, kada se sledi heuristički skup pravila. Kako se ovo otkrivanje dogodilo tokom sezone hlađenja, i predviđeno i izmereno hidronsko grejanje je bilo isključeno, zaključeno je da je u ove dve prostorije otkriven otkaz na nivou ove dve prostorije. Kako je prethodno razmatrano, otkaz na nivou prostorije mogu da budu mnoge stvari. Međutim, uzrok odstupanja je bio to što su ova dva termostata

loše postavljena, pošto je do ovih temperaturnih odstupanja došlo istovremeno u dve prostorije.



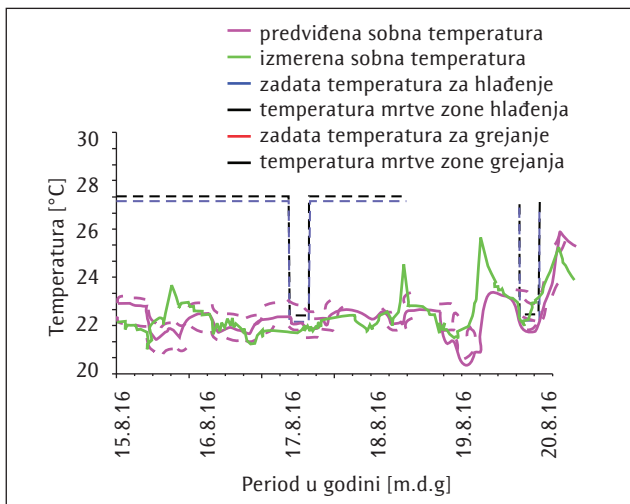
Slika 6. Profil sobne temperature za prostoriji/kancelariji 2 tokom jedne nedelje u avgustu



Slika 7. Profil sobne temperature za prostoriju 3 tokom jedne nedelje u avgustu

Termostat je u prostorijama/kancelarijama 1 i 3 registrovao skokove sobne temperature u kasnim popodnevним satima, u tri dana: 15, 18. i 19. avgusta. Prema termostatskim merenjima, prostorije 1 i 3 su se zagrevale neverovatnom brzinom od oko 1.5 °C (2.7°F) na svakih 30 minuta. Pošto prostorije 2 i 4 nisu imale ove skokove, bilo je verovatno da je tu bilo odstupanja na nivou projekta između lokacija termostata u ovim prostorijama i u prostorijama 1 i 3. Inspekcija prostorija je otkrila da su termostati u prostorijama 1 i 3 mogli eventualno da dobijaju direktnu sunčevu svetlost, dok prostorije 2 i 4 to nisu mogle. To je pratilo rezultate, jer prostorije 2 i 4 nisu imale iznenadne skokove temperature koje prostorije 1 i 3 jesu imale. Imajući u vidu vreme kada su se desili ovi skokovi, oko 18.30 h, kao i da se te prostorije nalaze na strani fasade koja je okrenuta prema zapadu, pretpostavljeno je da je u ove dve prostorije na termostate padala direktna sunčeva svetlost.

Za prostorije 1 i 3 sačinjena je skica SketchUp (Trimble, Inc., 2018) modelom, koja je obuhvatila lokacije termostata. Ovaj softverski alat za senčenje je upotrebljen da bi se odredilo



Slika 8. Profil sobne temperature za prostoriju 4 tokom jedne nedelje u avgustu

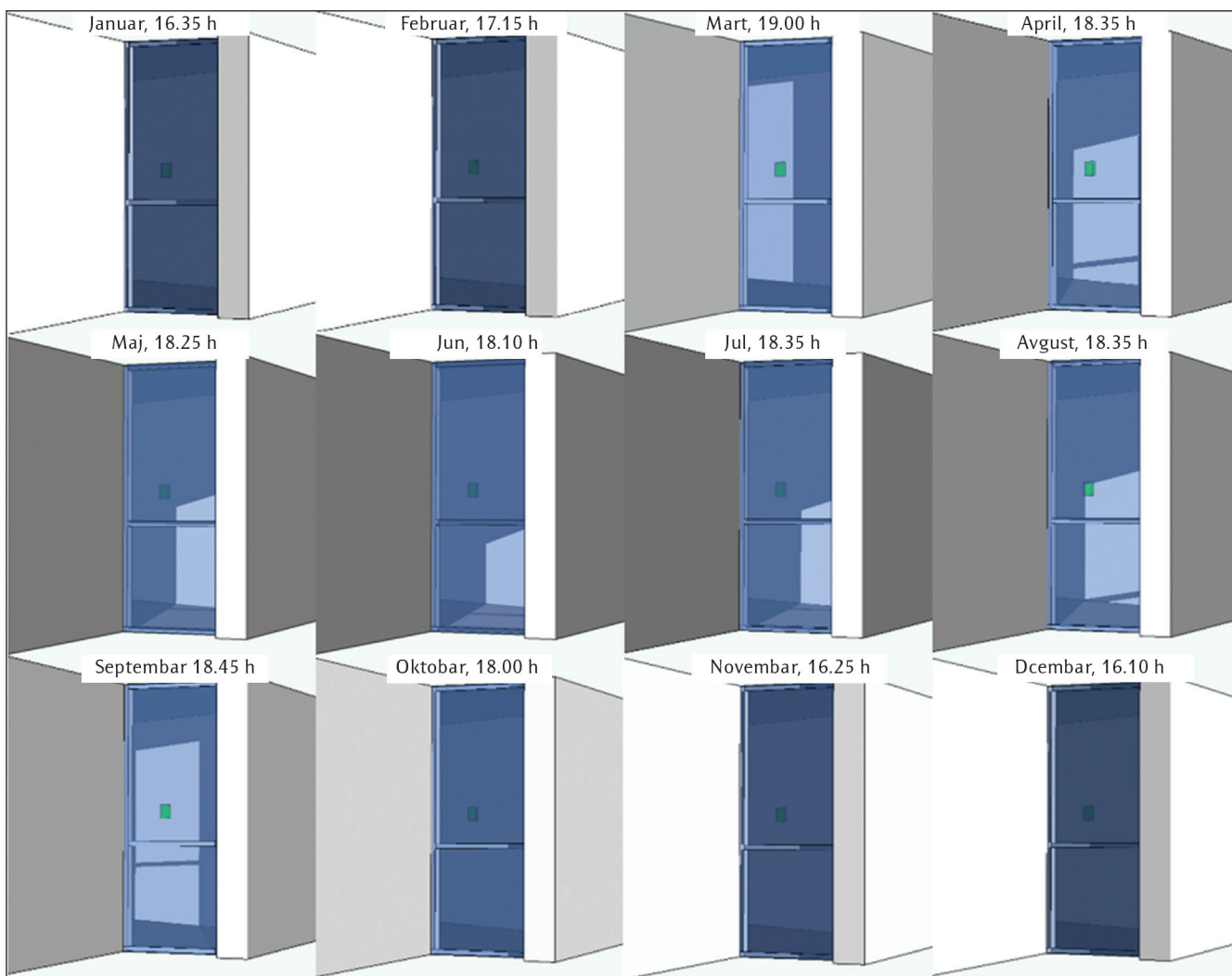
da li je to krivac za otkaz. Procenjavana je dnevna svetlost u prostorijama tokom celog jednog dana, sredinom meseca. Od dvanaest meseci, četiri su dala vremena u kasno popodne kada je sunce moglo da ostvari direktan kontakt sa termostatom. Slika 9 prikazuje rezultate senčenja koji su dobije-

ni pomoću SketchUp alata i vreme kada je sunce prodiralo najdublje u prostoriju, ili padalo na termostat. Sati uštede dnevne svetlosti su uključeni u vremena prikazana na slici 9.

**Procena otkaza.** VAV kutija modulira svoj prigušivač (prigušnu klapnu) kako bi zadovoljio potražnju hlađenja prostorije koju opslužuje. Direktna sunčeva svetlost može da prouzrokuje da termostatsko očitavanje pređe zadatu temperaturu. Ako temperatura jedne prostorije pređe zadatu tačku hlađenja, damper prigušivač (prigušna klapna) VAV kutije će više da se otvori. Kao rezultat toga, AHU će povećati brzinu protoka dovodnog vazduha da bi održao projekтовani statički pritisak voda. Ako temperatura u nekoj drugoj prostoriji/kancelariji unutar zone pređe zadatu tačku, postavljanje damper prigušivača (prigušne klapne) će se još više povećati, što će dovesti do još jednog povećanja brzine protoka dovodnog vazduha AHU.

Da bi se kvantifikovala potrošnja energije prouzrokovana ovim lošim postavljanjem termostata, analiziran je 26. avgust, 2016. godine. Slika 10 prikazuje termostatsko očitavanje i zadatu temperaturu u prostoriji 3 tokom popodneva 26. avgusta i obuhvata zadate temperature koje su dobijene iz BAS. Ova slika takođe prikazuje brzinu dovodnog vazduha VAV kutije i temperaturu za zonu 1.

Slika 10 prikazuje da je između 16.00 h i 18.00 h rad VAV kutije bio diktiran drugom prostorijom i čak se vratio u režim ventilacije, u kome je isporučivao svoju minimalnu brzinu protoka u 18.00 h. Međutim, očitavanja termostata u prostoru



Slika 9. Rezultati dnevnog osvetljavanja za reprezentivno vreme svakog meseca u godini

riji 3 dostigla su setback temperaturu ponovnog zagrevanja od 27 °C (80.6°F), što je prouzrokovalo skok brzine dovodnog vazduha u VAV kutiji. Ovo povećanje brzine protoka bilo je posledica toga da su sunčevi toplotni dobici direktno delovali na termostat i prouzrokovali da dovodni i odvodni ventilator AHU troše prekomernu količinu energije. Povećanje energije se može kvantifikovati primenom trećeg zakona ventilatora, što se može videti u jednačini (7):

$$\frac{\text{Energija}_1}{\text{Energija}_2} = \frac{(\text{Brzina protoka}_1)^3}{(\text{Brzina protoka}_2)^3} \quad (7)$$

Tabela 5 prikazuje izmerenu brzinu protoka vazduha kroz VAV kutiju koja opslužuje zonu 1, brzinu protoka vazduha nakon uključenja dovodnog ventilatora i odgovarajuće povećanje snage tokom ovog perioda. Važno je zapaziti da se jednačina (7) koristi za analiziranje ukupnog protoka vazduha kroz ventilator, a ne samo brzine protoka vazduha koji prolazi kroz VAV kutiju. Zato je i osnovna brzina protoka kroz dovodni ventilator AHU takođe dobijena iz BAS u 18.20 h, i utvrđeno je da ona iznosi 13,736 L/s (29,226 cfm). Pretpostavljeno je da ova brzinu protoka vazduha samo fluktuiira na osnovu promene u brzini protoka vazduha kroz VAV kutiju koja opslužuje zonu koja se analizira. Zato su vrednosti za dovodni ventilator koje se vide u tabeli 5 sve teorijske vrednosti, sa izuzetkom jedne izmerene vrednosti u 18.20 popodne.

Tabela 5 prikazuje da ovaj otkaz može da prouzrokuje značajno povećanje potrošnje energije kod ventilatora AHU. Posledica tog otkaza, kada se dogodi, velika je; međutim, taj otkaz može da se dogodi samo u odabranim mesecima zbog solarne geometrije i orijentacije prozora. Premda će, kada se ovaj otkaz dogodi, ove prostorije biti previše rashlađene, on se ne događa u značajnom vremenskom trajanju. Rezultat toga je da korisnici neće biti izloženi neugodnosti zato što u prostorima neće doći do velikog pada sobne temperature.

SketchUp model (slika 9) je prikazao da tokom četiri meseca postoji mogućnost da termostat bude pogođen (obasjan) sunčevom svetlošću. Kada se ovaj otkaz dogodi, potreban je sunčan dan da termostat dostigne setback temperaturu ili je potrebno da korisnik bude prisutan u kasnim popodnevним časovima da bi temperatura prešla zadatu tačku.

Taj otkaz se može dogoditi u četiri zone dela fasade koja je okrenuta prema zapadu, u zgradi Canal, ali ne izgleda da se on javlja veoma često tokom godine, te tako možda i ne zavređuje premeštanje termostata. Međutim, taj otkaz se može rešavati podešavanjem komandi. Sistem bi mogao da bude programiran da privremeno dozvoli da rad VAV kutije reguliše isključivo termostat iz druge dve prostorije. To bi omogućilo da se zanemari direktan uticaj sunca na očitavanja termostata u prostorijama 1 i 3.

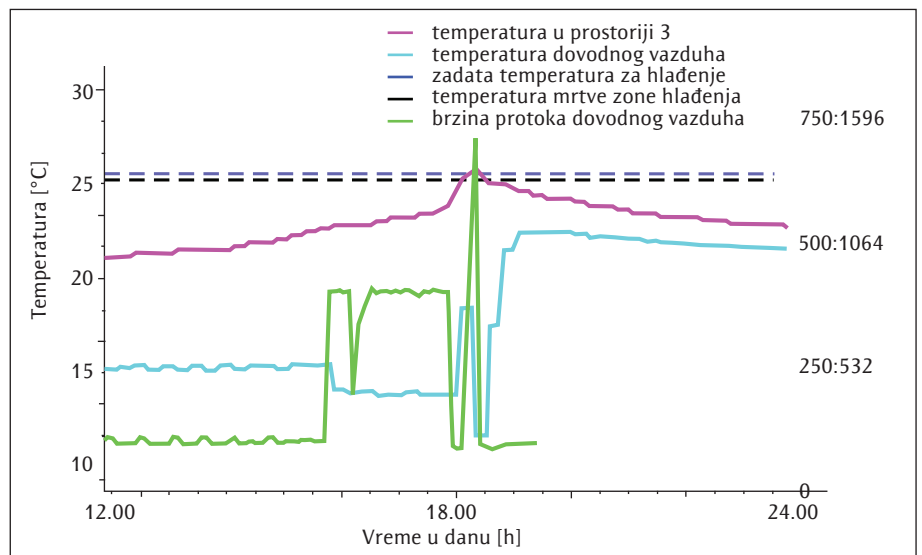
Tabela 5. Brzina dovodnog vazduha i povećanje snage

Vreme u danu	VAV Box 1 brzina protoka vazduha L/s (cfm)	AHU dovod brzina protoka vazduha L/s (cfm)	Snaga ventilatora %
18:15	86 (183)	13,332 (28,366)	0
18:20	490 (1042)	13,736 (29,226)	9.36
18:25	610 (1298)	13,856 (29,481)	12.27
18:30	712 (1515)	13,958 (29,698)	14.75
18:35	92 (196)	13,338 (28,379)	0.14

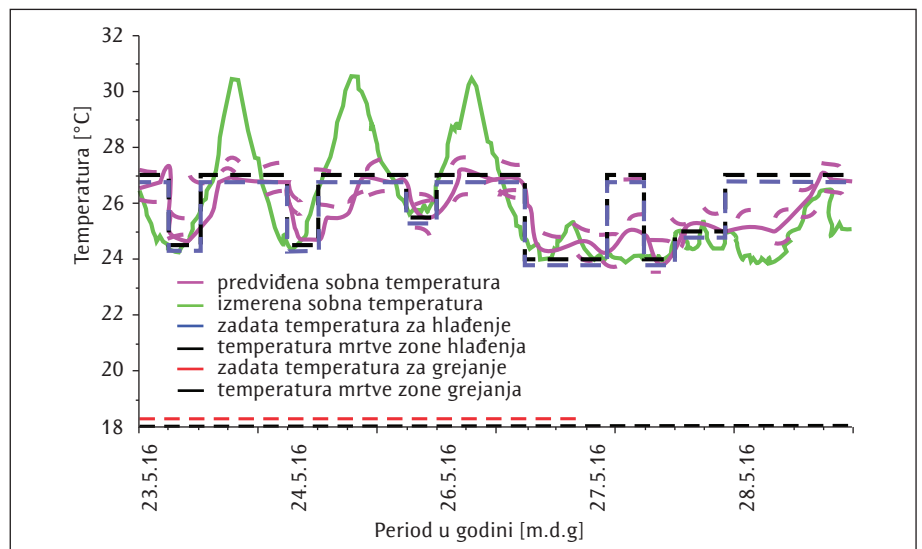
Premda ne izgleda da ovaj otkaz ima značajan uticaj na zone okrenute prema zapadu, on može da prouzrokuje značajne probleme ako se dogodi scenario iz prostorije okrenute prema zapadu, zato što bi verovatno tokom dana tu bio prisutan jedan korisnik, zajedno sa zadatom razumnom temperaturom, što bi imalo za posledicu isporučivanje značajnog dela prekomernog hlađenja.

### Loš kontrolni niz VAV kutije

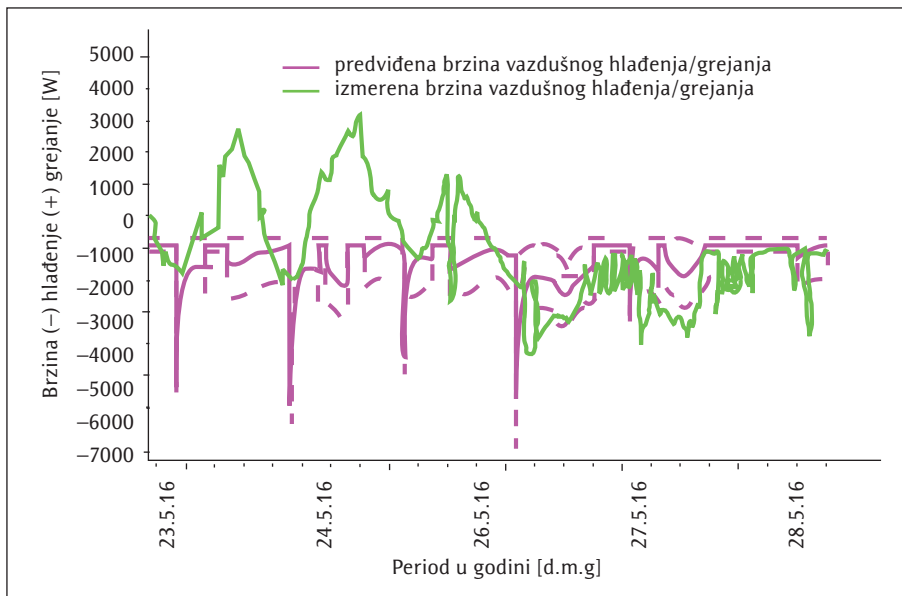
U zgradi Canal, VAV kutije funkcionišu tako da ako temperatura vazduha u jednoj prostoriji pređe zadatu tačku, prigu-



Slika 10. Izmerena performansa za zonu 1 i prostoriju 3 na dan 26. avgusta 2016.



Slika 11. Profil sobne temperature za prostoriju 1 tokom jedne nedelje u maju



Slika 12. Profil brzina vazdušnog grejanja/hlađenja za zonu 1 tokom jedne nedelje u maju

šivač (prigušna klapna) VAV kutije se više otvara. Zbog toga će AHU da poveća brzinu dovodnog vazduha kako bi održala projektovani statički pritisak u kanalu. Ako temperatura u nekoj drugoj prostoriji unutar zone prekorači zadatu tačku, pozicioniranje dampersa (prigušne klapne) će se još više povećati, što će dovesti do još većeg povećanja brzine dovodnog vazduha u AHU. Iako ova logika nije potpuno pogrešna, ona navodi na to da VAV kutija radi pod pretpostavkom da će, ako su prostorije suviše tople, u zonu biti doveden hladan vazduh.

**Otkrivanje otkaza** Tokom prve polovine nedelje koja počinje 23. maja 2016, predviđanja sobne temperature (vazduha) za sve četiri prostorije značajno su odstupala od očitavanja termostata. Standardno odstupanje za prostoriju 1 bilo je oko 1.43 °C (2.57°F), što je bilo značajno više od fiksnog praga otkrivanja otkaza koji je iznosio  $\pm 0.51$  °C ( $\pm 0.92$ °F). Slika 11 prikazuje temperaturni profil za prostoriju 1 tokom ove nedelje. Slična odstupanja između izmerene i predviđene temperature u prostoriji desila su se tokom prva tri dana, što je za posledicu imalo otkrivanje otkaza.

Ostale tri prostorije su sve pokazale sličan trend. Standardna odstupanja za prostorije 2, 3, i 4 bila su oko 1.77 °C, 2.38 °C, odnosno 69 °C (3.19°F, 4.28°F i 3.04°F). Ove vrednosti su bile značajno veće od fiksnog praga otkrivanja grešaka koji je iznosio  $\pm 0.51$  °C ( $\pm 0.92$ °F).

Slika 11 prikazuje da su očitavanja termostata u prostoriji 1 značajno prekoračivala predviđenu temperaturu. Očitavanja termostata su dostigla vrednosti za oko 3.4 °C, 4.5 °C, i 3.4 °C (6.12°F, 8.1°F, i 6.12°F) više od predviđanja modela na dan 23, 24. odnosno 25. maja. Ove vrednosti su prekoračivale prag za otkrivanje otkaza i tako je otkaz otkriven.

**Dijagnostika otkaza.** Tokom prva tri dana nedelje došlo je do odstupanja u predviđanjima sobne temperature. Prema slici 4, trebalo je da budu procenjena predviđanja brzine vazdušnog grejanja/hlađenja, jer su sve četiri prostorije pokazale isti trend. Predviđanja brzine vazdušnog grejanja/hlađenja imala su standardno odstupanje od 1668 W (5691 Btu/h), koje je bilo značajno veće od prosečnog praga otkrivanja otkaza koji iznosi  $\pm 748$  W ( $\pm 2552$  Btu/h). Slika 12 prikazuje izmerenu i predviđenu brzinu vazdušnog grejanja/hlađenja za ovu nedelju.

Slika 12 prikazuje da je tokom prva tri dana došlo do sličnog odstupanja između izmerene i predviđene brzine vazdušnog grejanja/hlađenja u prostoriji. To je značilo da je potrebno da se kao naredni analizira ventil za dogrevanje, kada se sledi skup heurističkih pravila. Pošto je sistem bio u režimu hlađenja, ventil je bio zatvoren i za predviđeni i za stvarni rad. Prema slici 4, odstupanja mogu da budu izazvana ili otkazom na zonskom nivou i/ili otkazom na nivou zgrade.

Pri normalnom radu u sezoni hlađenja, brzina protoka vazduha kroz VAV kutiju se povećava ako temperatura vazduha u prostorijama prekorači zadatu tačku. Međutim, utvrđeno je da čiler nije radio u jednom delu nedelje i zbog toga je temperatura dovodnog vazduha bila u stvari viša nego temperatura prostorije. Umesto očekivanog efekta da će povećanje brzine protoka vazduha

obezbediti veće hlađenje, ono je ustvari donelo grejanje. Povećanje brzine protoka vazduha je bilo kontraproduktivno i imalo je za posledicu prekomernu potrošnju energije od strane ventilatora u AHU.

**Procena otkaza.** To što SAT nije uzet u obzir dovelo je do otvaranja dampersa prigušivača (prigušne klapne) VAV kutije u trenutku kada je trebalo da on(a) ostane u svom minimalnom položaju. Tokom prva tri dana analizirane nedelje brzina protoka vazduha kroz VAV kutiju je u proseku bila oko 530 L/s (1123 cfm), što je vrednost veća od minimalne brzine protoka vazduha kroz VAV kutiju.

Otkaz otkriven u kontrolnom nizu bio je prisutan u svim VAV kutijama u zgradi Canal, što je omogućilo analizu cele zgrade. Da bi se uticaj ovog otkaza stavio u kontekst, potrošnja energije ventilatora AHU u maju 2016. godine (kada se otkaz dogodio) bila je 23 puta veća nego u sličnoj nedelji u maju 2017. Ovo je bio značajan višak potrošnje energije za tu zgradu, a još više kada se uzme u obzir da taj problem može da se reši izmenom komandi tako da se SAT uzme u razmatranje.

### Ograničenja istraživanja

Premda je stvorena metodologija ODO uspešno dijagnostikovala nekoliko grešaka za zgradu Canal, u razvoju postoje neka ograničenja.

Prvo, neka ograničenja u istraživanjima prouzrokovana su izborom metode zasnovane na kvantitativnom modelu za deo razvoja koji se odnosio na otkrivanje otkaza. Ova metodologija jeste dovela do vrednih rezultata, jer je ostvarila uvid u odnosu na otkaze u projektu. Međutim, obezbeđenje efikasnog funkcionisanja zgrade zahteva primenu ove metodologije u zgradi, što se teško ostvaruje iz nekoliko razloga. Jedan od uzroka se može pripisati broju senzora potrebnih da se sprovede adekvatna analiza za otkrivanje i dijagnostiku otkaza na sobnom nivou. Osim toga, primena alata za otkrivanje otkaza u drugim zgradama može da zapremi značajnu količinu vremena, jer je za završavanje kompletnog razvoja modela bilo potrebno oko godinu dana. Čak i nakon investiranja te količine vremena koja je upotrebljena za razvoj modela, model je i dalje sadržao nekoliko temeljnih pretpostavki koje doprinose otkazima. Neke od takvih pretpostavki bile su pretpostavka o savršeno izmešanom vazduhu, te da celokupno sunčevo zračenje pada na pod, da kroz provr-

šine zidova zgrade postoji jednodimenzionalni protok toplote, i da postoji konstantna provodljivost kroz svaki material iz aspekta prostora i vremena. Sve ove pretpostavke su standardne metode u EnergijaPlus (DOE, 2016b) i smatralo se da su prihvatljive za potrebe ovih istraživanja.

Pored toga, metode zasnovane na metodologiji koja se bazirala na kvantitativnom modelu i skupu heurističkih pravila prilagođene su zoni od zona četiri-prostorije u zgradi koja ima hidronski i vazdušni sistem. Premda je ovaj tip sistema veoma uobičajen u današnjoj praksi u projektovanju, to nije jedini tip sistema, te bi tako alat morao da se proširuje za sisteme drugih zgrada. Ovo znači da direktna primena ovog alata, bez izmena u skupu pravila, može da dovede do lažne dijagnostike. Pošto je to slučaj, primena ovog alata u drugim zgradama zahteva pažljivost i poznavanje sistema, kako bi se obezbedilo adekvatno otkrivanje i dijagnostika otkaza ODO.

### Buduće aktivnosti

Idealno gledano, ljudska intervencija u alatu za proces otkrivanja i dijagnostiku bila bi ograničena u najvećoj mogućoj meri. Ovo bi se moglo postići automatizacijom alata gde god je to moguće. Nekoliko aspekata alata bi moglo biti automatizovano da bi se ograničila ova interakcija.

**Importovanje modela informacionog sistema zgrade (BIM)** u alat za otkrivanje i dijagnostiku otkaza. U boljoj varijanti, sistem bi automatski dobijao tražene informacije od BIM. Sistem bi prikupljao informacije, poput površina i sastava zidova, podova i plafona, orijentacije prostorija, itd.

**Povećanje rezolucije modela.** Sistem je radio dobro, ali da bi on radio besprekorno potrebno je da se poveća rezolucija modela kako bi se smanjilo pojavljivanje lažnih alarma. Ovo se može postići smanjenjem broja pojednostavljenih pretpostavki koje koristi trenutni model. Taj problem se takođe može rešiti testiranjem radi provere da li je otkaz koji je dijagnostikovao uzrok odstupanja. Nakon dijagnostikovanja određenog otkaza, sistem bi automatski izolovao navodni otkaz na način koji prisiljava (tera) sistem da se prvenstveno osloni na tu jednu promenljivu. Ako performansa prostora zavisi samo od ovog jednog navodnog otkaza, mogu se analizirati rezultati da bi se odredilo da li je taj otkaz uzrok. Ovaj proces bi se mogao koristiti da se proveri da li je dijagnoza bila tačna, čime bi se u krajnjoj liniji smanjio broj lažnih alarma.

**Smanjenje računarskog vremena.** U ovom trenutku, računarsko vreme potrebno da sistem proizvede rezultate za jednu nedelju je minimalno. Međutim, povećanje složenosti/kompleksnosti modela će imati za posledicu povećanje potrebnog vremena računara za obezbeđenje funkcija alata. Ako ovaj sistem treba da bude formalizovan, alat bi trebalo da bude u stanju da radi u realnom vremenu sa BAS-om, što znači da treba da bude efikasan u pogledu vremena rada.

**Detaljniji teorijski sistem.** Skup heurističkih pravila povremeno zahteva da korisnik dalje istražuje scenario kako bi postigao tačnu dijagnostiku otkaza. Da bi se razvoj u potpunosti automatizovao, model bi morao da bude u stanju da primi više merenja, koja bi dobijao od BAS-a da bi mogao da predviđa izvesne aspekte. Na primer, model trenutno predviđa brzinu vazdušnog grejanja/hlađenja ali onda koristi SAT senzor u VAV kutiji da predvidi potrebnu brzinu protoka vazduha. Pošto je to slučaj, potrebno je dalje istraživanje da bi se odredilo da nije otkaz u senzoru protoka vazduha ili temperaturnom senzoru kada dođe do odstupanja između brzina vazdušnog grejanja/hlađenja. AHU bira SAT tako što procenjuje sve sobne temperature i zadate tačke. Da bi jedan model tačno predvideo SAT, bio bi potreban sličan pristup, što znači da je potrebno da sistem dobije svako očitavanje termostata u zgradi.

## Zaključak

Većina prethodnih istraživanja u oblasti otkrivanja i dijagnostike otkaza za zgrade bila je usmerena na uređaje u primarnoj petlji, tipično na optimizaciju AHU jedinica zbog značajne količine energija koju troše. Ovo je imalo za posledicu zanemarivanje otkrivanja i dijagnostike otkaza na nivou prostorije i zone. Zbog toga, ova istraživanja su imala za cilj da razvijaju sistem koji otkriva i dijagnostikuje greške na nivou prostorije i na nivou zone. Sprovedena je studija slučaja, koja je otkrila nekoliko otkaza u proučavanom sistemu: tri otkaza u projektu na zonskom nivou, dva softverska otkaza na zonskom nivou, i jedan hardverski otkaz na nivou zgrade. Okazi na zonskom nivou obuhvataju pogrešna očitavanja termostata, pomeraj kod SAT senzora, kratke spojeve, loš izbor terminalnih jedinica, i loš kontrolni niz VAV kutije. U ovom radu su procenjivani otkazi koji su nastali zbog lošeg postavljanja/pozicioniranja/lošeg izbora mesta termostata i lošeg kontrolnog niza VAV kutije. Iz ove procene otkaza nađeno je da, kada se pojave ti otkazi, dovodni i odvodni ventilatori AHU troše na zonu koja se provoduje više energije nego što je potrebno. Pogrešna očitavanja termostata u jednoj prostoriji prouzrokovala su da se potrošnja energije ventilatora AHU poveća za 14.75% tokom odabranih perioda u godini. A uobičajeni, loši kontrolni nizovi VAV kutije povećali su potrošnju energije ventilatora AHU za 2300% jedne nedelje u poređenju sa sličnom nedeljom godinu dana kasnije. Na prvi pogled, može izgledati da otkazi u projektu imaju zamearljiv uticaj na operativne troškove zgrade. Međutim, verovatnoća da se ovaj otkaz dogodi u drugim zonama je velika, a brojnost ovih problema ima za posledicu značajan deo prekomerne potrošnje energije.

## Literatura

- [1] Angelov, P., R. A. Buswell, V. I. Hanby, J. A. Wright, 2000. A methodology for modeling HVAC components using evolving fuzzy rules. *Proceedings of the Industrial Electronics Society, 2000, IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE*, pp. 247–52.
- [2] Athienitis, A. K. 2010. *Building thermal analysis*. Quebec: PTC.
- [3] Azar, E., C. C. Menassa, 2014. A data collection and analysis framework to improve the performance of energy-intensive commercial buildings. *Computing in Civil and Building Engineering*, pp. 1142–49.
- [4] Beausoleil-Morrison, I., 2001. An algorithm for calculating convection coefficients for internal building surfaces for the case of mixed flow in rooms. *Energy and Buildings*, 33(4):351–61.
- [5] Beghi, A., L. Cecchinato, L. Corso, M. Rampazzo, F. Simmini, 2013. Process history-based fault detection and diagnosis for VAVAC systems. *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, pp. 1165–70.
- [6] Beghi, A., R. Brignoli, L. Cecchinato, G. Menegazzo, M. Rampazzo, F. Simmini, 2016. Data-driven fault detection and diagnosis for HVAC water chillers. *Control Engineering Practice* 53(8):79–91.
- [7] Buswell, R. A., P. Haves, J. A. Wright, 2003. Model-based condition monitoring of a HVAC cooling coil subsystem in a real building. *Building Services Engineering Research and Technology*, pp. 103–16.
- [8] Bynum, J. D., D. E. Claridge, J. M. Curtin, 2012. Development and testing of an automated building commissioning analysis tool (ABCAT). *Energy and Buildings*, 55(12):607–17.
- [9] Cheung, H., and J. E. Braun, 2013a. Simulation of fault impacts for vapor compression systems by inverse modeling. Part I: Component modeling and validation. *HVAC&R Research* 24(2):892–906.

- [10] **Cheung, H., J. E. Braun**, 2013b. Simulation of fault impacts for vapor compression systems by inverse modeling. Part II: System modeling and validation. *HVAC&R Research* 19(7):907–21.
- [11] **Claridge, D. E., G. Lin**, 2009. Retrospective testing of an automated building commissioning analysis tool (ABCAT). Technical Report ESL-TR-09-01-01. College Station, TX: Energy Systems Laboratory.
- [12] **Claridge, D. E., C. H. Culp, M. Liu, S. Deng, W. D. Turner, J. Haberl**, 2000. Campus-wide continuous commissioning of university buildings. *Proceedings of the ACEEE 2000 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, pp. 101–12.
- [13] **Cui, J., S. Wang**, 2005. A model-based online fault detection and diagnosis strategy for centrifugal chiller systems. *International Journal of Thermal Sciences*, 44(10):986–99.
- [14] \*\*\* DOE, 2016a. Chapter 6, Building sector energy consumption. *International energy outlook*. Washington, DC: U.S. Department of Energy. <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/buildings.cfm>.
- [15] \*\*\* DOE, 2016b. *EnergyPlus*, ver. 8.6. Washington, DC: U.S. Department of Energy, Building Technologies Office; and National Renewable Energy Laboratory. [www.energyplus.net](http://www.energyplus.net).
- [16] **Dong, B., Z. O'Neill, Z. Li**, 2014. A BIM-enabled information infrastructure for building energy fault detection and diagnostics. *Automation in Construction*, 44(2014):197–211.
- [17] \*\*\* ESRU, 2018. ESP-r software. <https://github.com/ESP-rCommunity/ESP-rSource>. Glasgow, Scotland: Energy Systems Research Unit.
- [18] **Gao, D.-c., S. Wang, K. Shan, C. Yan**, 2016. A system level fault detection and diagnosis method for low delta T syndrome in the complex HVAC systems. *Applied Energy* 164(2016):1028–38.
- [19] **Gunay, B., W. Shen, C. Yang**, 2017. Characterization of a building's operation using automation data: A review and case study. *Building and Environment*, 118(2017):196–201.
- [20] **Katipamula, S., M. R. Brambley**, 2005. Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems – A review, Part 1. *HVAC&R Research* 11(1): 3–25.
- [21] **Li, H., J. E. Braun**, 2007. A methodology for diagnosing multiple simultaneous faults in vapor-compression air conditioners. *HVAC&R Research* 13(2):369–95.
- [22] **Li, X., Y. Li, J. E. Seem**, 2010. Dynamic modeling of mechanical draft counter-flow wet cooling tower with Modelica. *Proceedings of ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference*, pp. 687–94.
- [23] \*\*\* MathWorks® n.d. *MATLAB®*. Natick, MA: The MathWorks, Inc. [https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s\\_tid=hp\\_ff\\_p\\_matlab](https://www.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_ff_p_matlab).
- [24] **Narayanaswamy, B., B. Balaji, R. Gupta, Y. Agarwal**, 2014. Data driven investigation of faults in HVAC systems with model, cluster and compare (MCC). *Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings*, pp. 50–59.
- [25] \*\*\* NRCAN, 2013. *Energy use data handbook*. Ottawa, Ontario: Natural Resources Canada. <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistics/handbook2010/handbook2013.pdf>.
- [26] **Peeters, L., I. Beausoleil-Morrison, A. Novoselac**, 2011. Internal convective heat transfer modeling: Critical review and discussion of experimentally derived correlations. *Energy and Buildings* 43(9):2227–39.
- [27] **Piette, M., S. Kinney, P. Haves**, 2001. Analysis of an information monitoring and diagnostic system to improve building operations. *Energy and Buildings*, 33(8):783–91.
- [28] **Riederer, P.**, 2002. *Thermal room modelling adapted to the test of HVAC control systems*. Paris: Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [29] **Rossi, T. M., J. E. Braun**, 1997. A statistical, rule-based fault detection and diagnostic method for vapor compression air conditioners. *HVAC&R Research* 3(1):19–37.
- [30] **Schein, J., S. T. Bushby**, 2005. Fault detection & diagnostics for AHUs and VAV boxes. *ASHRAE Journal* 47(7):58–63.
- [31] **Schein, J., S. T. Bushby**, 2006. A hierarchical rule-based fault detection and diagnostic method for HVAC systems. *HVAC&R Research* 12(1):111–25.
- [32] **Schein, J., J. M. House**, 2003. Application of control charts for detecting faults in variable-air-volume boxes. *ASHRAE Transactions* 109(2).
- [33] **Schein, J., S. T. Bushby, N. S. Castro, J. M. House**, 2006. A rule-based fault detection method for air handling units. *Energy and Buildings* 38(12):1485–92.
- [34] **Song, L., M. Liu, D. E. Claridge, P. Haves**, 2003. Study of on-line simulation for whole building level energy consumption fault detection and optimization. *Proceedings of Architectural Engineering 2003: Building Integration Solutions*, pp. 1–8.
- [35] **Sreedhara, P., P. Haves**, 2001. Comparison of chiller models for use in model-based fault detection. Energy Systems Laboratory. *Proceedings of the International Conference for Enhanced Building Operations*, Austin, TX.
- [36] \*\*\* Trimble, Inc. 2018. SketchUp software. <https://www.sketchup.com/>.
- [37] **Wu, S., J.-Q. Sun**, 2011. Cross-level fault detection and diagnosis of building HVAC systems. *Building and Environment* 46(8):1558–66.

- [39] **Yang, H., S. Cho, C.-S. Tae, M. Zabeeruddin**, 2008. Sequential rule based algorithms for temperature sensor fault detection in air handling units. *Energy Conversion and Management* 49(8):2291–306.
- [40] **Yu, B., A. Van Paassen, S. Riahy**, 2003. Open window and defective radiator valve detection. *Building Services Engineering Research and Technology* 24(2):117–24.
- [41] **Zimmermann, G., Y. Lu, G. Lo**, 2012. Automatic HVAC fault detection and diagnosis system generation based on heat flow models. *HVAC&R Research* 18(1–2):112–25.