

Primljen / Received: 13.6.2017.

Ispravljen / Corrected: 1.10.2017.

Prihvaćen / Accepted: 2.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.8.2018.

# Optimizacija energetske učinkovitosti i toplinske ugodnosti uredske zgrade

## Autor:



Dr.sc. **Aslihan Senel Solmaz**, dipl.ing.arh.  
Sveučilište Dokuz Eylul  
Arhitektonski fakultet  
Izmir, Turska  
[asenelsolmaz@gmail.com](mailto:asenelsolmaz@gmail.com)

Prethodno priopćenje

## **Aslihan Senel Solmaz**

### Optimizacija energetske učinkovitosti i toplinske ugodnosti uredske zgrade

U radu se primjenjuje simulacijski višeciljni postupak u svrhu optimizacije parametara vanjske ovojnice uredske zgrade. Za analizu velikog broja mogućih rješenja primjenjen je algoritam optimizacije rojem čestica. Nakon toga su rezultati optimizacije analizirani pomoću regresijske analize osjetljivosti. Rezultati pokazuju da godišnje uštede u korištenju energije grijanja i hlađenja u optimiziranoj zgradi iznose 70 % za grijanje te 40 % za hlađenje, pri čemu je predviđeni postotak nezadovoljnih osoba 9 %.

#### **Ključne riječi:**

energetsko modeliranje zgrada, energetska učinkovitost, toplinska ugodnost, optimizacija učinkovitosti zgrada

Scientific Paper - Preliminary report

## **Aslihan Senel Solmaz**

### Optimisation of energy performance and thermal comfort of an office building

A simulation-based multi-objective procedure is utilized in this study to optimize building envelope parameters of an office building. The particle swarm optimization algorithm is used for the analysis of a wide array of possible solutions. A regression based sensitivity analysis is then applied to analyse optimization results. The optimization results show that the annual heating and cooling energy savings of the optimized building amount to 70 % and 40 %, respectively, while the predicted percentage of dissatisfied amounts to 9 %.

#### **Key words:**

building energy modelling, energy performance, thermal comfort, building performance optimization

Vorherige Mitteilung

## **Aslihan Senel Solmaz**

### Optimierung der Energieeffizienz und des Wärmekomforts in Bürogebäuden

In der Abhandlung werden mehrzielige Simulationsverfahren zum Zweck der Optimierung der Parameter der Außenhülle des Bürogebäudes angewandt. Für die Analyse einer großen Anzahl an möglichen Lösungen wurde ein Optimierungsalgorithmus mit einem Partikelschwarm angewandt. Danach wurden die Optimierungsergebnisse mithilfe der Regressionsanalyse der Empfindlichkeit analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die jährlichen Einsparungen bei der Nutzung von Heiz- und Kühlenergie in einem optimierten Gebäude 70% für die Heizung und 40% für die Kühlung betragen, wobei der vorhergesehene Prozentsatz an unzufriedenen Personen bei 9% liegt.

#### **Schlüsselwörter:**

Energiemodellierung von Gebäuden, Energieeffizienz, Wärmekomfort, Gebäudeeffizienzoptimierung

## 1. Uvod

Smatra se da je u globalnim okvirima sektor zgradarstva najveći pojedinačni potrošač energije jer se u njemu svake godine potroši više od četrdeset posto od ukupnog utroška energije. Spomenuti sektor u istoj je mjeri odgovoran i za zagađenje stakleničkim plinovima. Prema statističkim podacima američkog Ministarstva za energetiku, u SAD-u se u području zgradarstva potroši gotovo 41 % od ukupne potrošnje energije te se istovremeno u atmosferu ispušta otprilike 40 % CO<sub>2</sub> [1]. Ti statistički podaci u velikoj mjeri odgovaraju veličinama koje se bilježe u državama Europske unije [2]. U Turskoj se u tom sektoru sada troši oko 35 % od ukupnog utroška energije, pri čemu se generira 32 % od ukupno ispuštenog CO<sub>2</sub> [3]. Poboljšanje energetske učinkovitosti u zgradarstvu nužan je preduvjet za uspješno očuvanje i racionalno korištenje energije i prirodnih resursa, te za umanjeње štetnih ekoloških utjecaja. Uz to, financijska korist koja se ostvaruje primjenom energetski učinkovitih tehnologija u zgradama značajan je čimbenik koji itekako motivira vlasnike zgrada. Stoga se kao cilj postavlja učinkovito i ekološki prihvatljivo projektiranje, upravljanje i održavanje građevina [4]. Direktiva broj 2002/91/EC o energetskoj učinkovitosti zgrada (engl. *Energy Performance of Buildings Directive* - EPBD) i njena revizija 2010/31/EU [5] predstavljaju značajan iskorak u naporima koji se poduzimaju radi očuvanja energije, smanjenja štetnih ekoloških utjecaja te poboljšanja kvalitete u unutrašnjim prostorima građevina. Ta je direktiva kamen temeljac europske energetske politike koju je objavila Europska komisija. U Turskoj su definirani potrebni pravni okviri, u smislu zakona i propisa, radi usklađenja sa spomenutom direktivom EPBD, a naporima koji se poduzimaju u tom smislu naročito su se intenzivirali u periodu nakon 2007. godine. Ključni korak i najveći izazov je odabir optimalnih strategija građenja koje udovoljavaju visokim kriterijima u pogledu energetske učinkovitosti zgrade, kvalitete unutarnjeg prostora te ekoloških zahtjeva, uz istovremeno smanjenje troškova energije i očuvanje mogućnosti višenamjenskog korištenja tijekom cjelokupnog trajanja građevine. S obzirom na širok raspon mogućih primjena zgrada u građevinarstvu, što je usko povezano s energetskom učinkovitošću građevina i s ostalim kriterijima učinkovitosti, može se reći da je ocjena strategije energetske učinkovitosti pojedinačnih zgrada vrlo složen i težak zadatak. Zgrada i njena okolina složen su sustav s tehničkim, tehnološkim, ekološkim, toplinskim i drugim aspektima, gdje na ukupnu učinkovitost građevine utječu brojni međusobno povezani podsustavi, kao što su vanjska ovojnica zgrade, sustav grijanja, ventilacije i klimatizacije (GVK), instalacije u zgradi, itd. [6], pri čemu se sustav GVK može pronaći i pod oznakom sustav HVAC (eng. *heating, ventilation, and air conditioning*). Na primjer, izuzetno je značajna uloga vanjske ovojnice zgrade jer trajno djeluje na energetska svojstva zgrade, kvalitetu unutarnjeg prostora i ekološku učinkovitost tijekom čitavog trajanja građevine. Drugim riječima, na troškove upravljanja građevinom bitno utječu materijali koji su korišteni pri izvođenju vanjske ovojnice zgrade. Pri analizi velikog broja mogućih rješenja za određivanje energetske učinkovitosti i ostalih kriterija učinkovitosti zgrada,

kao glavno se pitanje postavlja određivanje optimalnog tj. najdjelotvornijeg niza radnji koje će dugoročno utjecati na zgradu. Prilikom biranja najdjelotvornijih rješenja, donositelji odluke (npr. arhitekti, inženjeri, vlasnici zgrada, stručnjaci za zgradarstvo) svakako trebaju biti spremni na kompromise prilikom razmatranja raznih kriterija kao što su energija, udobnost i zaštita okoliša, te pri ocjenjivanju financijskih, pravnih, zakonodavnih i društvenih aspekata. U praksi se primjenjuje nekoliko pristupa u svrhu određivanja obuhvata takvih rješenja. Prema jednom od tih pristupa, građevina se definira na bazi praktičnih uputa koje daju iskusni arhitekti [7]. Takav pristup može dovesti do prihvaćanja neodgovarajućih rješenja jer se ne bazira na analitičkim podacima. Iako taj pristup nije tradicionalna metoda za optimizaciju rješenja, on se ipak spominje jer se kao provjera primjenjuje u uobičajenom postupku projektiranja građevina.

Drugi pristup uključuje energetska analizu kroz simulaciju nekoliko unaprijed definiranih alternativnih scenarija kako bi se odredila optimalna rješenja za projektiranje građevine. Iako program za simulaciju učinkovitosti građevine (kao što je to EnergyPlus, TRNSYS ili ESP-r) može biti korisno sredstvo za ocjenjivanje utjecaja alternativnih scenarija na učinkovitost građevine, traženje najboljeg rješenja pomoću takvog jednodimenzionalnog pristupa koji se bazira na pojedinačnom ocjenjivanju svakog faktora svakako je naporan i dugotrajan postupak, a može rezultirati tek djelomičnim poboljšanjem učinkovitosti zgrade zbog malog broja drugih mogućnosti. Drugim riječima, taj postupak ne predstavlja jamstvo da će se pronaći najbolje moguće i potpuno optimalno rješenje, a nije ni praktičan za rješavanje višeciljnih problema s više varijabli kod kojih se trebaju ocijeniti interakcije parametara te raditi ustupci u odnosima između pojedinačnih ciljeva.

U trećem pristupu, proces optimizacije temelji se na spoju simuliranja učinkovitosti građevine i algoritamskih sredstava za optimizaciju (kao što su algoritmi programirani za posebne potrebe, optimizacijski paketi općeg karaktera, te posebni optimizacijski alati) pri čemu je cilj određivanje optimalnog rješenja na temelju analize velikog broja mogućnosti. Ti postupci, koji uključuju automatsko pretraživanje, izuzetno su značajni za određivanje optimalnog rješenja problema u vrlo kratkom vremenu i uz malo napora, pa se zbog toga vrlo često dodatno istražuju i poboljšavaju. Magnier i Haghghat [8] predlažu optimizacijsku metodu koja uključuje integraciju simulacijske umjetne neuronske mreže (ANN) s genetičkim algoritmom (GA) (NSGA-II) pomoću simulacijskog programa TRNSYS, radi drastičnog smanjenja potrošnje energije i troškova građenja stambenih zgrada [8]. Chantrelle i dr. [9] razvili su optimizacijski alat MultiOpt kroz povezivanje alata GA (NSGA-II) sa simulacijskim programom TRNSYS u svrhu ekonomičnog optimiziranja potrošnje energije, povećanja toplinske udobnosti te poboljšanja uvjeta za boravak u postojećoj školskoj zgradi, a pritom su koristili parametre vanjskog plašta zgrade i kontrolnih sustava. Hamdy i dr. [10] integrirali su višeciljni optimizacijski pristup na bazi GA s programom za simulaciju učinkovitosti

zgrade IDA ICE kako bi optimizirali parametre vanjske ovojnice zgrade i sustava GVK za tri različite zgrade u različitim klimatskim uvjetima, pri čemu je cilj bio svesti na minimum emisiju CO<sub>2</sub> i početne investicijske troškove. Asadi i dr. [11] razvili su višeciljni optimizacijski model kroz izravno spajanje optimizacijskog programa GenOpt, simulacijskog programa TRNSYS i programa Matlab, kako bi se odredio niz djelotvornih alternativa za definiranje troškova energetske poboljšanja, mogućih ušteda energije te postizanja odgovarajuće toplinske ugodnosti. Karaguzel i dr. [12] koristili su spoj simulacije energetske učinkovitosti zgrade i višedimenzijske numeričke optimizacije pomoću optimizacijskog programa GenOpt kako bi smanjili troškove korištenja uredske zgrade primjenom odgovarajućih mjera u svrhu poboljšanja vanjskog plašta građevine. Senel Solmaz i dr. [13] predložili su rješenje za pomoć pri donošenju odluka koje se temelji na integraciji višeciljne optimizacije i analize osjetljivosti kroz spajanje GenOpt-a s programom EnergyPlus, pri čemu je cilj bio pronaći primarni i optimalni niz mjera za poboljšanje učinkovitosti postojeće školske zgrade. Delgarm i dr. [14] prikazali su jednostavan i djelotvoran pristup utemeljen na simulaciji i višeciljnoj optimizaciji problema, a uključuje spajanje višeciljne optimizacije rojem čestica s programom za simuliranje energije zgrade EnergyPlus primjenom alata jEPlus u svrhu optimizacije energetske učinkovitosti zgrade. U okviru tog pristupa provedena je odgovarajuća korekcija godišnje potrošnje energije za hlađenje, grijanje i rasvjetu te građevine. U ovom se radu primjenjuje detaljna simulacijska optimizacija u svrhu ekonomičnog optimiziranja energetske učinkovitosti i toplinske udobnosti građevine. Optimizacija se temelji na povezivanju postupka simulacije učinkovitosti zgrade programom EnergyPlus s postupkom optimizacije pomoću programa GenOpt, uz primjenu algoritma za optimizaciju pomoću roja čestica (PSO). Analizira se vanjski plašt uredske zgrade kao problem višeciljne optimizacije, pri čemu je svrha definiranje optimalnih konfiguracija plašta zgrade uz istovremeno maksimalno povećanje godišnjih ušteda u grijanju i hlađenju, te poboljšanje toplinske ugodnosti i neto sadašnje vrijednosti. Ključne komponente vanjskog plašta zgrade odabrane su kao varijable koje predstavljaju alternativne materijale često korištene za toplinsku izolaciju vanjskih zidova, krova i katova, prozora i prozorskih sjenila. Nakon provođenja optimizacijskog postupka programom Simlab provodi se globalna analiza osjetljivosti utemeljena na regresiji u svrhu analiziranja i tumačenja rezultata optimizacije te kako bi se prikazali ulazno-izlazni odnosi.

## 2. Metodologija

U ovom istraživanju osnovna se metodologija bazira na simulacijskoj višeciljnoj optimizaciji. Opći princip provedbe te metodologije prikazan je na slici 1.

Kao što vidimo na slici 1., energetska simulacija zgrade najprije se izrađuje u programu Sketch-up Open Studio [15] koji koristi EnergyPlus – dobro poznati alat za energetske simulacije.

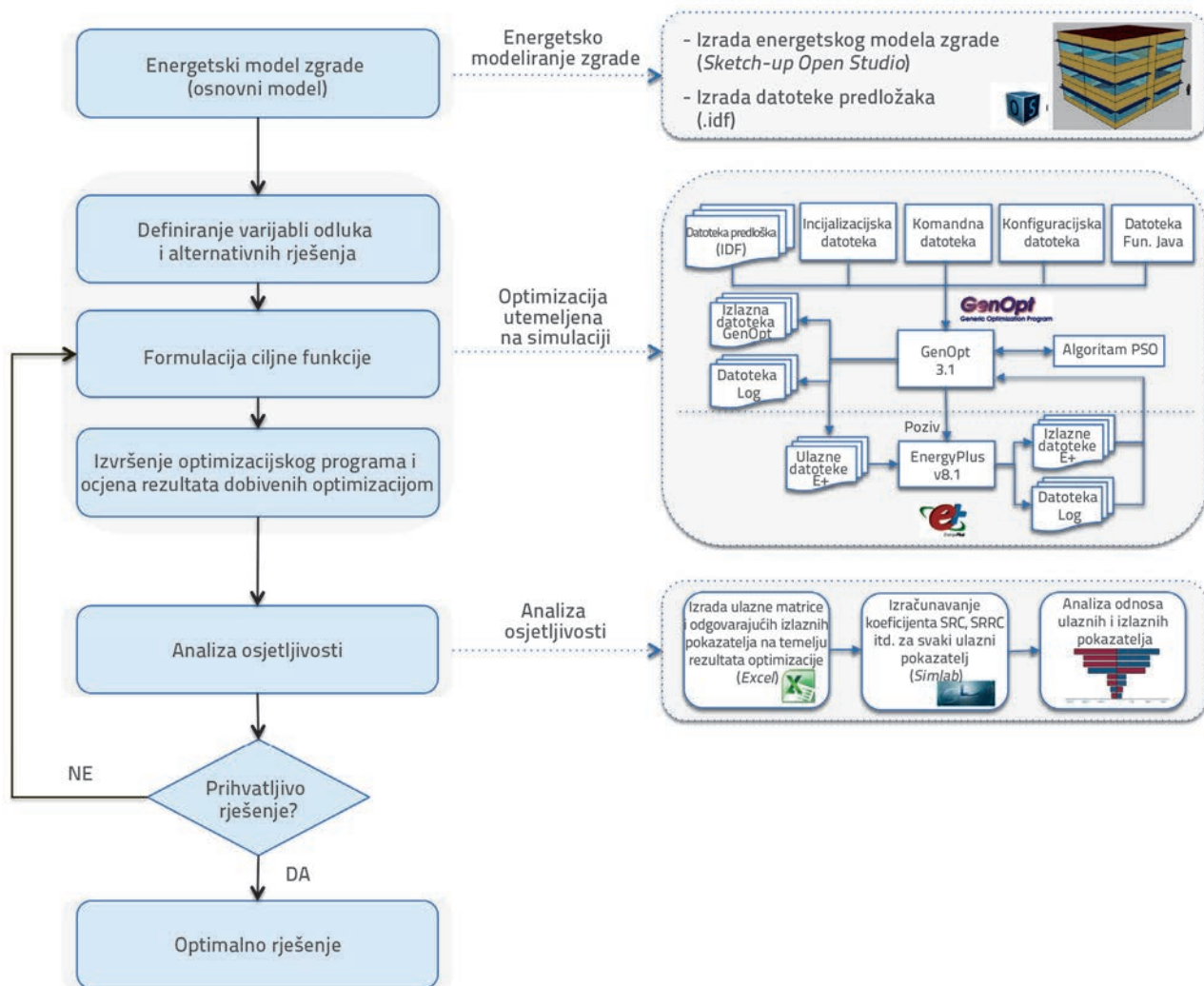
Rezultati za analiziranu zgradu dobivaju se nakon simulacije toplinskog ponašanja analizirane zgrade. EnergyPlus-ova ulazna tekstualna datoteka (.idf) eksportira se kao datoteka predložka i tada počinje optimizacijski postupak utemeljen na iterativnoj i automatskoj simulaciji. Kao što je prikazano na slici 1., taj postupak uključuje:

- definiranje varijabli odluka i alternativnih rješenja
- formuliranje ciljne funkcije
- provedbu optimizacijskog programa i ocjenu rezultata optimizacije.

U ovom se radu optimizacijski postupak baziran na simulaciji provodi povezivanjem programa za simulaciju energetske učinkovitosti zgrade EnergyPlus v 8.1 [16] i generičkog optimizacijskog paketa GenOpt v 3.1 [17]. Prema shemi povezivanja prikazanoj na slici 1, GenOpt treba neke ulazne datoteke (datoteka predložka, inicijalizacijska datoteka, komandna datoteka, konfiguracijska datoteka, datoteka fun. java) koji se moraju pripremiti prema odgovarajućoj sintaksi kako bi se pokrenuo vanjski simulacijski program koji je odgovoran za izračunavanje ciljne funkcije. Svaka ulazna datoteka zadužena je za drugačiji zadatak i sadržaje. Na primjer, tekstualna ulazna simulacijska datoteka predložka (.idf) ključna je datoteka predložka s lokacijom neovisnih varijabli označenih posebnim znakovima (npr. %input %). Inicijalizacijska datoteka (optWin7.ini) uključuje pojedinačne lokacije ulaznih, izlaznih, log- i konfiguracijskih datoteka, deklaraciju vremenske datoteke te definiciju ciljne funkcije. Komandna datoteka (command.txt) pokriva specifikacije parametara i postavke optimizacijskog algoritma. Konfiguracijska datoteka uključuje startnu komandu za programsku pozivnu simulaciju iz GenOpta te poruke o pogreškama simulacijskog programa. I, konačno, specifikacija alternativa, jedinični trošak i financijske kalkulacije sadržane su u datoteci Fun.Java.

Tijekom automatskog optimizacijskog postupka s iterativnim simulacijama, GenOpt preuzima ulaznu datoteku EnergyPlusa i pripisuje niz inicijalnih vrijednosti ulaznim varijablama koje su već definirane u komandnoj datoteci, nakon čega se generira nova ulazna datoteka. Nakon toga, GenOpt zove simulacijski program EnergyPlus te se nakon simulacijskog ciklusa izračunava ciljna funkcija. Nakon što genOpt očitava ciljnu funkciju iz jednog od EnergyPlusovih izlaznih datoteka (kao što su CSV, ESO, HTML itd.), unosi se još jedan niz ulaznih varijabli za novi simulacijski ciklus. Odabrani optimizacijski algoritam sadržan u genOptu u ovom je trenutku odgovoran za pripisivanje novog niza ulaznih podataka. Optimizacijski se postupak ponavlja sve dok ne dođe do konvergencije ciljne funkcije. U ovom se radu iz biblioteke optimizatora GenOpt odabire populacijski metaheuristički algoritam optimizacije rojem čestica [18].

Nakon dobivanja rezultata optimizacije provodi se analiza osjetljivosti pomoću generiranih rezultata kako bi se analizirali ulazno-izlazni odnosi. Analiza osjetljivosti obavlja se pomoću programa Simlab [19] i ulaznih-izlaznih odnosa, a najutjecajniji se parametri definiraju primjenom standardiziranog regresijskog koeficijenta (engl. *standardized regression coefficient* - SRC).



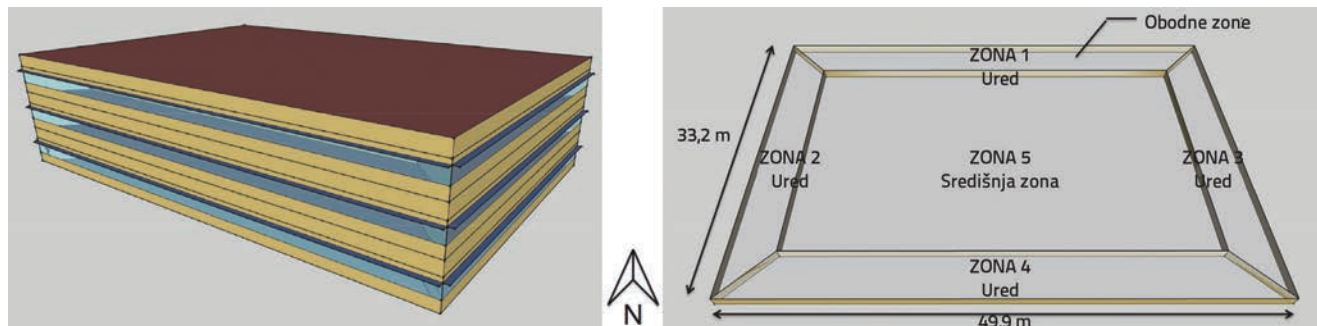
Slika 1. Opći princip provedbe predložene metodologije

### 3. Analiza konkretnog slučaja

#### 3.1. Energetski model zgrade (osnovni model)

U ovom se radu kao osnovni model koristi uredska zgrada srednje veličine koja je jedna od 16 hipotetskih komercijalnih mjerodavnih zgrada definiranih prema Programu građevinskih

tehnologija američkog Ministarstva za energetiku (DOE). Definicije za odabranu građevinu u skladu su s programom EnergyPlus [20]. Vanjski plašt zgrade kasnije je izmijenjen u modelu tako da bude usklađen s građevinskim normama koje se primjenjuju u Turskoj. Zadržana je geometrija zgrade i sustav GVK koji su definirani prema odredbama DOE za uredske zgrade srednje veličine.



Slika 2. Ukupna geometrija i tlocrt kata s toplinskim zonama analizirane uredske zgrade

Analizirani model (osnovni model) trokatna je uredska zgrada ukupne podne površine od 4982 m<sup>2</sup> koja je po dužini u smjer sjever-jug (slika 2.). Zgrada je pravokutna s istim tlocrtnim rasporedom na svim katovima, te s odnosom širine i visine od 1:5. U tablici 1. iskazane su opće informacije o toj zgradi. Svaki kat zauzima površinu od 1660,729 m<sup>2</sup> a visina kata je 2,74 m. Prozori su ravnomjerno raspoređeni u horizontalnom smjeru, a koeficijent ostakljenja iznosi 33 %.

Tablica 1. Opći podaci o analiziranoj zgradi

Opći podaci o zgradi	
Orijentacija zgrade	sjever-jug
Broj katova	3
Visina kata	2,74 m (3,96 s podgledom)
Ukupna visina zgrade	11,88 m
Površina kata	1660.729 m <sup>2</sup>
Podna površina čitave zgrade	4982 m <sup>2</sup>
Ukupna površina vanjskih zidova (sjever-jug)	397.451 m <sup>2</sup>
Ukupna površina vanjskih zidova (istok-zapad)	264.966 m <sup>2</sup>
Ukupna površina ostakljenih elemenata (jug-sjever)	195.851 m <sup>2</sup>
Ukupna površina ostakljenih elemenata (istok-zapad)	130.566 m <sup>2</sup>
Odnos prozora prema zidovima	33 %

Analizirani osnovni model sastoji se od 15 toplinskih zona raspoređenih od obodne zone do jezgre i u tri nadstropne zone. Nema izolacijskog sloja duž plašta zgrade niti na bilo kojem drugom dijelu zgrade kako bi se osiguralo da analizirana zgrada ne udovoljava minimalnim obveznim zahtjevima energetske učinkovitosti koji se primjenjuju u Turskoj prema TS-825 [21]. Po svojoj konstrukciji, zgrada je armiranobetonski okvirni sustav sa zidovima od opeke, ravnim krovom i plutajućom podnom konstrukcijom. Za sve prozore predviđen je PVC okvirni sustav s jednostrukim ostakljenjem, a niti na jednoj fasadi nije predviđeno osjenjenje. Izračunane U vrijednosti su: 1,35 W/m<sup>2</sup>K za vanjske zidove, 2,74 W/m<sup>2</sup>K za krov, 2,17 W/m<sup>2</sup>K za prizemlje i 5,2 W/m<sup>2</sup>K za prozore.

Što se tiče sustava GVK, višezonski sustav s promjenjivim obujmom zraka (MZ-VAV) ima krovnu jedinicu koja se sastoji od plinskih peći, jedinice sastavljene od električnih grijača i jedinice za štednju energije. Svaka zona opremljena je jednom završnom jedinicom za grijanje koja regulira dovod zraka. Jedinica koja se nalazi na krovu može održavati statički pritisak (tj. radi se o uređaju s promjenjivim obujmom) kako bi sve zone dobivale dovoljno zraka. Radni učinak plinskog plamenika

iznosi 80 %, a koeficijent učinkovitosti (engl. coefficient of performance, COP) rashladnog sustava iznosi 3,2. Rasvjetna i električna oprema u pojedinačnim zonama pridonose unutarjnim uštedama, pa tako i kod jedne i kod druge vrste opreme gustoća toka snage iznosi 10,76 W/m<sup>2</sup>. Gustoća stanovanja je 18,58 m<sup>2</sup>/po osobi. Podešena točka grijanja je 22°C a odgovarajuća točka za hlađenje je 24°C, dok su temperature u odsutnosti stanara, tj. temperature za spavanje u prvom slučaju 16°C a u drugom 26°C. Pretpostavljeno je da stopa ulaza zraka odgovara jednoj promjeni zraka po satu (ACH), što je simulacija zahtjeva za zgrade srednje veličine [22]. U uredu se boravi i tijekom radnih dana i vikendom, a koristi se raspored sličan onom za mjerodavnu uredsku zgradu srednje veličine.

Simulacija osnovnog modela energetske učinkovitosti zgrade provedena je u turskom gradu Izmiru (38,42° N, 27,14° E) u kojem prevladavaju vrući i vlažni klimatski uvjeti. Korišten je meteorološki prikaz za Izmir prema podacima ASHRAE IWEC (Međunarodno vrijeme za proračun potrošnje energije) te je na modelu provedena analiza energetske učinkovitosti. Prema dobivenim rezultatima simulacije na modelu, godišnja potrošnja energije za grijanje i hlađenje u Izmiru iznosi 299066,8 kWh/godišnje za grijanje tj. 553433,7 kWh/godišnje za hlađenje. Srednja vrijednost predviđenog postotka nezadovoljnih osoba (engl. *predicted percentage of dissatisfied* - PPD) za čitavu zgradu iznosi 21,58 %.

## 3.2. Optimizacija pomoću simulacije

### 3.2.1. Analizirane varijable odluka i moguća rješenja za postizanje energetske učinkovitosti

U ovom se radu analiziraju samo osnovne komponente ovojnice zgrade, jer je njena svrha prikazivanje mjera energetske učinkovitosti zgrada koje se često koriste u Turskoj. Varijable korištene u postupcima optimizacije su: materijali za toplinsku izolaciju vanjskih zidova, krova i prizemlja, prozori s različitim vrijednostima U, koeficijent dobijka solarne topline (engl. *solar heat gain coefficient* - SHGC) i komponente zasjenjenja (južna, zapadna i istočna fasada). Niz rješenja za povećanje energetske učinkovitosti uvodi se kombiniranjem različitih mogućnosti i varijabli. Prilikom definiranja mogućih materijala za svaku varijablu odluke, dogovoreno je da će se prednost dati onima koji su sada dostupni na tržištu. Stoga je na bazi materijala koji se često koriste u sektoru građevinarstva u Turskoj definirano nekoliko mogućih materijala s naznakom njihovih toplinsko-fizikalnih svojstava i cijene, uključujući i rad i PDV. Cilj je pritom bio da se stvori odgovarajući prostor za donošenje odluka u okviru postupka optimizacije.

U tablicama od 2. do 4. daje se popis mogućih mjera/rješenja koje su za povećanje energetske učinkovitosti primijenjene u ovom istraživanju.

Tablica 2. Karakteristike mogućih izolacijskih materijala za krov, vanjski zid i prizemlje, prema [13]

Komponenta ovojnice	Oznaka	Naziv materijala	Debljina [mm]	Provodljivost [W/mK]	Specifična toplina [J/kgK]	Gustoća [kg/m <sup>3</sup> ]	Cijena [TL/m <sup>2</sup> ]*	
KROV (R)	R <sub>1</sub>	XPS – ploča od ekstrudirane polistirenske pjene	20	0,035	1500	30	13,92	
	R <sub>2</sub>		40	0,035	1500	30	27,36	
	R <sub>3</sub>		60	0,035	1500	30	39,60	
	R <sub>4</sub>		80	0,035	1500	30	54,72	
	R <sub>5</sub>		100	0,035	1500	30	76,80	
	ZID (W)	R <sub>6</sub>	Staklena vuna	100	0,040	840	14	12,48
		R <sub>7</sub>		120	0,040	840	14	14,88
		R <sub>8</sub>		140	0,040	840	14	17,76
		R <sub>9</sub>		180	0,040	840	14	22,80
		R <sub>10</sub>		200	0,040	840	14	25,20
PRIZEMLJE (F)	W <sub>1</sub>	Kamena vuna	40	0,037	840	150	24,50	
	W <sub>2</sub>		60	0,037	840	150	36,75	
	W <sub>3</sub>		80	0,037	840	150	49,05	
	W <sub>4</sub>		120	0,037	840	150	73,58	
	ZID (W)	W <sub>5</sub>	EPS - ploča od ekspandirane polistirenske pjene	30	0,039	1500	16	7,95
		W <sub>6</sub>		50	0,039	1500	16	13,20
		W <sub>7</sub>		70	0,039	1500	16	18,30
		W <sub>8</sub>		100	0,039	1500	16	26,25
		W <sub>9</sub>		140	0,039	1500	16	36,75
	PRIZEMLJE (F)	W <sub>10</sub>	XPS - ploča od ekstrudirane polistirenske pjene	40	0,035	1500	30	18,75
		W <sub>11</sub>		60	0,035	1500	30	27,0
		W <sub>12</sub>		80	0,035	1500	30	37,80
		W <sub>13</sub>		120	0,035	1500	30	69,0
PRIZEMLJE (F)	F <sub>1</sub>	XPS - ploča od ekstrudirane polistirenske pjene	20	0,035	1500	30	13,92	
	F <sub>2</sub>		40	0,035	1500	30	27,36	
	F <sub>3</sub>		60	0,035	1500	30	39,60	
	F <sub>4</sub>		80	0,035	1500	30	54,72	
	F <sub>5</sub>		100	0,035	1500	30	76,80	

\*TL: turska lira. Jedinične cijene uključuju rad i PDV. 1 EUR = 7,3 TL

Tablica 3. Karakteristike mogućih vrsta prozora, prema [13]

Komponenta plašta	Oznaka	Naziv materijala	Vrijednost U [W/m <sup>2</sup> K]	Koeficijent dobitka solarne topline	Vidljiva toplinska prohodnost	Cijena [TL/m <sup>2</sup> ]*
PROZOR (Win)	Win <sub>1</sub>	Niskoenergetsko jednostruko ostakljenje, 4 mm	4,2	0,65	0,79	79,5
	Win <sub>2</sub>	Zatamnjeno niskoenergetsko jednostruko ostakljenje, 4 mm	4,2	0,54	0,71	84,0
	Win <sub>3</sub>	Prozirno dvostruko ostakljenje, ispunjena argonom, 4-12-4 mm	2,7	0,75	0,8	112,5
	Win <sub>4</sub>	Niskoenergetsko dvostruko ostakljenje, ispunjena zrakom, 4-12-4 mm	1,6	0,56	0,79	114,0
	Win <sub>5</sub>	Niskoenergetsko dvostruko ostakljenje, ispunjena zrakom, 4-16-4 mm	1,3	0,56	0,79	115,5
	Win <sub>6</sub>	Niskoenergetsko dvostruko ostakljenje, ispunjena argonom, 4-16-4 mm	1,1	0,56	0,79	120,0
	Win <sub>7</sub>	Zatamnjeno niskoenergetsko dvostruko ostakljenje, ispunjena zrakom, 4-12-4 mm	1,6	0,44	0,71	120,0
	Win <sub>8</sub>	Zatamnjeno niskoenergetsko dvostruko ostakljenje, ispunjena zrakom, 4-16-4 mm	1,3	0,44	0,71	121,5
	Win <sub>9</sub>	Prozirno trostruko ostakljenje, ispunjena zrakom, 4-12-4-12-4 mm	1,1	0,73	0,78	129,0

\*TL: turska lira. Jedinične cijene uključuju rad i PDV. 1 EUR = 7,3 TL

Tablica 4. Karakteristike mogućih materijala za zasjenjenje prozora, prema [13]

Komponenta plašta	ID	Naziv materijala	Dubina [m]	Cijena [TL/m <sup>2</sup> ]*
ZASJENJENJE (S)	S <sub>1</sub>	Fiksni horizontalni prijepust	0	90
	S <sub>2</sub>		0,25	
	S <sub>3</sub>		0,50	
	S <sub>4</sub>		0,75	
	S <sub>5</sub>		1	

\*TL: turska lira. Jedinične cijene uključuju rad i PDV. 1 EUR = 7,3 TL

### 3.2.2. Formuliranje ciljne funkcije

Kao što je već spomenuto, projektiranje plašta građevine provodi se kao višeciljni optimizacijski problem s četiri cilja: ušteda energije za grijanje, ušteda energije za hlađenje, određivanje predviđenog postotka nezadovoljnih (PPN) i definiranje financijskih pokazatelja (neto sadašnja vrijednost, NSV). Dakle, ciljna funkcija obuhvaća sva ta četiri cilja. Problem optimizacije može se izraziti kako slijedi:

$$\text{ako imamo} \quad f: X \rightarrow \mathbb{R} \quad (1)$$

$$\text{treba odrediti} \quad \text{minimalno } f(x) \quad (2)$$

$$\text{ovisno o} \quad x = (x_1, \dots, x_n) \in X \quad (3)$$

gdje je  $x$  vektor  $n$  broja varijabli odluke i diskretnih vrijednosti pripisanih svakoj varijabli.  $X$  je niz mogućih rješenja ili prostora varijabli odluke, dok je  $x \in X$ .  $f$  je objektivna funkcija koja svakoj varijabli odluke pripisuje stvarnu vrijednost. Niz ograničenja za neovisne varijable definiran je u jednadžbama (4)-(8):

$$x^1 = \{R_j, j \in \{1, \dots, 10\}\} \quad (4)$$

$$x^2 = \{W_k, k \in \{1, \dots, 13\}\} \quad (5)$$

$$x^3 = \{F_l, l \in \{1, \dots, 5\}\} \quad (6)$$

$$x^4 = \{Win_m, m \in \{1, \dots, 9\}\} \quad (7)$$

$$x^5 = \{S_n, n \in \{1, \dots, 5\}\} \quad (8)$$

gdje se vrijednosti  $R_j$ ,  $W_k$ ,  $F_l$ ,  $Win_m$  i  $S_n$  pojedinačno odnose na niz neovisnih mogućnosti, tj. alternativa za izolaciju krova, alternativa za izolaciju zida, alternativa za izolaciju prizemlja, alternativa za prozore te alternativa za zasjenjenje. Rješenja koja zadovoljavaju sva ograničenja nazivamo provedivim rješenjima, a rješenja koja ne zadovoljavaju barem jedno ograničenje nazivamo neprovedivim rješenjima.

GenOpt podržava singularnu ciljnu funkciju tijekom postupka optimizacije. Pristup "ponderirane sume" korišten je za integriranje četiri neovisna ciljna kriterija u funkciju troškova GenOpt. Prema tom pristupu, svaki ciljni kriterij ima ponderirani

faktor, a "ciljna funkcija je jednostavno dodatak ponderiranoj sumi kriterija". Jednadžba ciljne funkcije eksplicitno je prikazana izrazom (9):

$$f(x) = a \cdot (BHS) + b \cdot (BCS) + c \cdot (PPD) + d \cdot (NPV) \quad (9)$$

gdje je BHS postotak godišnjih ušteda u grijanju, a BCS je postotak godišnjih ušteda u hlađenju, u odnosu na početne vrijednosti. PPD je srednja vrijednost predviđenog postotka nezadovoljnih osoba za čitavu zgradu, a NPV je neto sadašnja vrijednost. Prema izrazu (9), a, b, c, i d su ponderirani faktori svakog kriterija, a uneseni su u odgovarajuću ulaznu datoteku GenOpta. BHS i BCS formulirani su u izrazima (10) i (11).

$$BHS = \frac{BHC - BHC_{bc}}{BHC_{bc}} \cdot 100 \quad (10)$$

$$BCS = \frac{BCC - BCC_{bc}}{BCC_{bc}} \cdot 100 \quad (11)$$

BHC i BCC su sadašnje vrijednosti godišnje potrošnje energije za grijanje (uključujući grijanje prostorija i toplu vodu), tj. godišnje potrošnje energije za hlađenje, što je izravno izračunano pomoću EnergyPlusa.  $BHC_{bc}$  i  $BCC_{bc}$  su inicijalne vrijednosti izračunane za godišnju potrošnju energije za grijanje tj. hlađenje.

Za ocjenjivanje toplinske ugodnosti u zgradi korištena je vrijednost PPD koja se temelji na Fangerovom modelu [23]. Vrijednost PPD označava predviđeni postotak nezadovoljnih osoba u pojedinačnim toplinskim zonama. Maksimalni broj nezadovoljnih osoba je 100 %, a prema ASHRAE 55-2013 [24], preporučeni prihvatljivi raspon PPD-a za toplinsku ugodnost u unutarnjim prostorima iznosi manje od 10 %. U ovom su istraživanju pomoću EnergyPlusa izračunane prosječne vrijednosti PPD za sve toplinske zone kroz čitavu godinu, tj. u razdoblju korištenja zgrade. Vrijednost  $PPD_{avg}$  definirana je u skladu s izrazom (12):

$$PPD_{avg} = \frac{\sum_{j=1}^n PPD_j}{n} \quad (12)$$

gdje je  $n$  broj zona dok je  $PPD_j$  prosječna godišnja vrijednost PPD za svaku zonu. Zadnji ciljni kriterij u ovom istraživanju je vrijednost

NPV koja označava financijsku održivost projekta 5 godina nakon početnog ulaganja, kako je to prikazano u izrazu (13).

$$NPV = \sum_{t=1}^N \frac{R_t}{(1+i)^t} - Inl_{inv} \quad (13)$$

U izrazu (13)  $t$  je trajanje gotovinskog toka,  $i$  je nominalna diskontna stopa, a  $R_t$  je neto gotovinski tok u vremenu  $t$  uključujući i inflaciju koja uzima u obzir povećanje cijene energenata. Vrijednost NPV izračunana je za promatrano razdoblje od pet godina s diskontnom stopom od 6 % i inflacijom od 9 %.  $Inl_{inv}$  predstavlja početno ulaganje, a to je ukupan trošak ulaganja za poboljšanje energetske učinkovitosti zgrade, kako je prikazano u jednadžbi (14).

$$Inl_{inv} = A_{roof} \cdot C_{roof}^j + A_{extwall} \cdot C_{extwall}^k + A_{floor} \cdot C_{floor}^l + A_{window} \cdot C_{window}^m + A_{shading} \cdot C_{shading}^n \quad (14)$$

Vrijednosti  $A_{roof}$ ,  $A_{extwall}$ ,  $A_{floor}$ ,  $A_{window}$  i  $A_{shading}$  pojedinačno predstavljaju ukupnu površinu (m<sup>2</sup>) krova, vanjskog zida, prizemlja, prozora i zasjenjenja zgrade. Vrijednosti  $C_{roof}^j$ ,  $C_{extwall}^k$ ,  $C_{floor}^l$ ,  $C_{window}^m$ ,  $C_{shading}^n$  označavaju jedinične cijene (TL/m<sup>2</sup>) toplinsku izolaciju za odabrani krov, vanjski zid, prizemlje, prozor i zasjenjenje, kako je to naznačeno u točki 3.2.1. (TL je oznaka tursku liru, 1 EUR = 7,3 TL). Kako je u ovom istraživanju osnovna usmjerenost na višeciljnu optimizaciju ušteda u grijanju i hlađenju, te na toplinsku ugodnost i NPV analizirane zgrade, ponderi pripisani svakom kriteriju

određeni su tako da se omogući iznalaženje najbolje iteracija koja je istovremeno kompatibilna sa svim ciljevima. Stoga su nakon optimizacije odabrani sljedeći pojedinačni ponderi ciljnih funkcija:  $a = 1$ ,  $b = 5$ ,  $c = 40$  i  $d = 0,1$  za BHS, BCS, PPD i NPV.

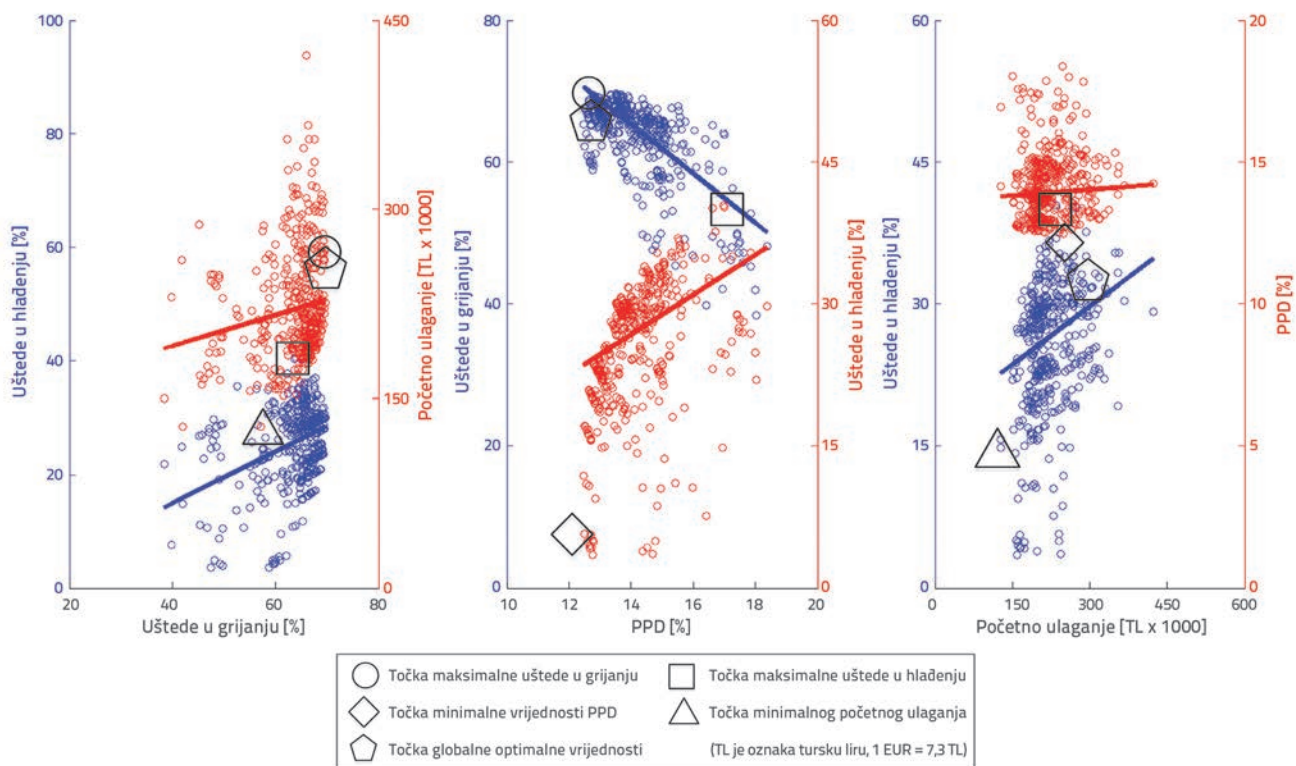
### 3.2.3. Postavke optimizacijskog algoritma

Moguća rješenja nazivaju se česticama, a skup čestica nazivamo populacijom. Lokacija čestica ažurira se pomoću jednadžbe za ažuriranje lokacije čestica [18], a parametri algoritma za optimizaciju rojem čestica definiraju promjenu svake čestice od jednog koraka do drugog (tablica 5).

Tablica 5. Parametri algoritma za optimizaciju rojem čestica u postupku optimizacije

Parametar algoritma	Vrijednost/odlika
Topologija susjedstva	Gbest
Veličina susjedstva	5
Broj čestica	35
Sjeme za generator proizvoljnog broja	0
Broj generacija	22
Kognitivno ubrzanje	2,8
Društveno ubrzanje	1,2
Porast konstrukcije	1,0
Diskretna maksimalna brzina	4

Broj generacija definiran u tablici 5. treba biti dovoljno velik da bi došlo do konvergencije. U optimizaciji s velikim brojem



Slika 3. Rezultati višeciljne optimizacije s odnosima parova i trendovima: a) ušteda toplinske energije; b) ušteda rashladne energije; c) prikaz PPD-a i početnog ulaganja (dijagrami su prikazani na dvostrukim osima Y pri čemu plave točke podataka pripadaju lijevoj osi, a crvene desnoj)



Tablica 6. Sažeti prikaz podatkovnih točaka izvedenih iz rezultata optimizacije i prikazanih na slici 3. te prikaz mogućnosti energetske učinkovitosti za parametre plašta zgrade

Podatkovne točke sa slike 3.	Ciljni kriteriji				Oznake mogućnosti energetske učinkovitosti*				
	Uštede toplinske energije [%]	Uštede rashladne energije [%]	PPD [%]	Početno ulaganje (TL)**	Krov	Zid	Pod	Prozor	Zasjenjenje
Točka maksimalne uštede toplinske energije (o)	69,70	30,08	13,53	225,737,42	R <sub>10</sub>	W <sub>9</sub>	F <sub>5</sub>	Win <sub>6</sub>	S <sub>1</sub>
Točka maksimalne uštede rashladne energije (□)	64,09	40,34	16,97	234,456,25	R <sub>10</sub>	W <sub>9</sub>	F <sub>1</sub>	Win <sub>7</sub>	S <sub>5</sub>
Minimalna prosječna vrijednost PPD (◇)	65,33	11,82	12,46	248,135,55	R <sub>10</sub>	W <sub>13</sub>	F <sub>5</sub>	Win <sub>9</sub>	S <sub>2</sub>
Minimalno početno ulaganje (Δ)	42,09	14,80	16,94	127,728,41	R <sub>10</sub>	W <sub>6</sub>	F <sub>4</sub>	Win <sub>2</sub>	S <sub>1</sub>
Globalno optimalno rješenje (.)	68,92	30,38	13,71	203,107,84	R <sub>10</sub>	W <sub>8</sub>	F <sub>4</sub>	Win <sub>6</sub>	S <sub>5</sub>

\* Dodatni podaci o oznakama mogućnosti energetske učinkovitosti iskazani su u tablicama od 2. do 4., \*\*TL: turska lira.

ulaznih parametara, parametri algoritma ključni su za postizanje globalne optimizacije.

### 3.2.4. Rezultati optimizacije i rasprava

Svaka simulacija u EnergyPlusu trajala je otprilike ~18 sekundi, a ukupno vrijeme optimizacije iznosilo je 3,5 sati uz korištenje računala Intel i7 Quad-Core CPU 2,2 GHz, 8 GB RAM.

Rezultati optimizacije s odnosima između parova i trendovima za četiri cilja prikazani su na slici 3. Kako se ovo istraživanje bazira na višeciljnoj optimizaciji grijanja i hlađenja zgrade, PPD-a i NPV-a, ne dobiva se samo jedno optimalno rješenje već se kao rezultat dobiva niz rješenja generiranih u okviru optimizacijskog postupka. Drugim riječima, cilj je pronaći najbolju iteraciju koja istovremeno odgovara svim ciljevima, a ne globalno optimalnu točku. Rezultati optimizacije pokazali su da su rezultati NPV-a (neto sadašnje vrijednosti) kroz petogodišnje razdoblje uvijek pozitivni, te da su bitno veći od iznosa početne investicije. Kako su sve optimizacijske alternative bile pogodne za ulaganje, odlučeno je da se umjesto NPV-a prikaže početno ulaganje radi što prikladnijeg iskazivanja financijskog učinka.

Na slici 3., pojedinačni ciljevi tj. uštede u grijanju, uštede u hlađenju, prosječna vrijednost PPD i početno ulaganje, prikazani su jedni uz druge na dvostrukim osima Y, pri čemu plave točke pripadaju lijevoj osi a crvene desnoj. Na dijagramima su također prikazane maksimalne vrijednosti ušteda u grijanju i hlađenju, minimalne vrijednosti PPD-a i točke početnog ulaganja. Rezultati optimizacije ne prikazuju samo numeričke vrijednosti već istovremeno pokazuju i uzajamne odnose i trendove ciljeva. Na primjer, prema slici 3., uštede toplinske energije u pozitivnoj su vezi s uštedama energije hlađenja i početnim ulaganjem, a u negativnoj su vezi s kriterijem prosječne vrijednosti PPD. Iako je PPD u pozitivnom odnosu s kriterijima uštede rashladne energije i početnog ulaganja, uočava se negativan odnos između PPD-a i

uštede toplinske energije. Uz to se može uočiti i pozitivan odnos između uštede rashladne energije i početnog ulaganja. Tablica 6. prikazuje uštede ili gubitke u postocima, utjecaj pripisanog niza energetski učinkovitih materijala na maksimalne toplinske i rashladne uštede te minimalne vrijednosti PPD i podatke o početnom ulaganju prema slici 3.

U tablici 6. vidimo da maksimalne uštede grijanja i hlađenja u odnosu na početno stanje iznose 69,70 % za grijanje i 30,08 % za hlađenje. U istoj točki, vrijednost PPD iznosi 13,53 %, a početno ulaganje iznosi 225.737,42 TL. U točki maksimalne uštede rashladne energije, ušteda energije hlađenja iznosi 40,34 %, a ušteda toplinske energije 64,09 %. Vrijednost PPD iznosi 16,97 % za početno ulaganje od 234.456,25 TL. Minimalna prosječna vrijednost PPD iznosi 12,46 % za 65,33 % uštede toplinske energije, 11,82 % uštede rashladne energije, te za početni trošak ulaganja od 248.135,55 TL. Minimalna početna točka ulaganja iznosi 127.728,41 TL s uštedom toplinske energije od 42,09 % i uštedom rashladne energije od 14,80 %, pri čemu vrijednost PPD iznosi 16,94 %. I konačno, za globalno optimalno rješenje definirano pomoću algoritma PSO, ušteda rashladne i toplinske energije iznosi 30,30 % tj. 68,92 %, uz vrijednost PPD od 13,71 %, pri ukupnom trošku ulaganja od 203.107,84 TL.

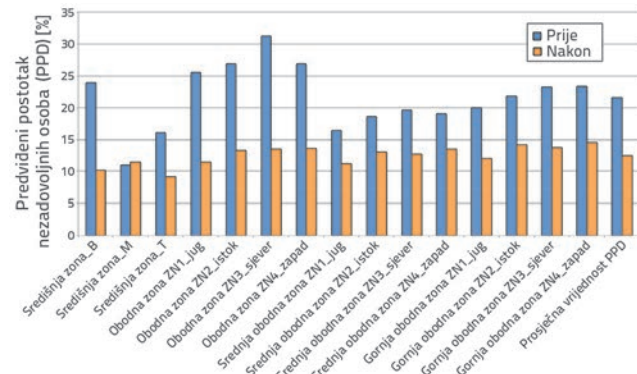
Kombinacija materijala plašta zgrade koja ostvaruje najveću uštedu toplinske energije prikazana je u tablici 6. Varijanta najveće debljine toplinske izolacije oznake R10 odabrana je za izolaciju krova. Varijante materijala s oznakama W9 i F5 korištene su za vanjske zidove tj. prizemlje. Za sve je prozore korištena varijanta Win6 koja ima vrijednost U 1,1 W/m<sup>2</sup>K, dok joj vrijednost SHGC iznosi 0,56. Niti na jednom prozoru nije korišteno zasjenjenje (oznaka: S1). Kombinacija materijala kojom se ostvaruju najveće uštede rashladne energije uključuje krovnu izolaciju od staklene vune debljine 200 mm (koja nosi oznaku: R10) te vanjsku izolaciju zida EPS debljine 140 mm (oznaka: W9), kao i u točki maksimalne uštede toplinske energije. Za ovo

rješenje odabrana je varijanta izolacije prizemlja najniže debljine (oznaka: F1), niskoenergetsko dvostruko ostakljenje (oznaka: Win7) s najnižom vrijednošću SHGC i s vrlo niskom vrijednošću U, te varijanta zasjenjenja oznake S5 s najvišom vrijednošću dubine (1 m). Što se tiče kombinacije materijala kojom se postiže najmanja prosječna vrijednost PPD, odabrana je – kao i kod prethodnih rezultata – toplinska izolacija krova najveće debljine (oznaka: R10), a za vanjske zidove i prizemlje odabrani su sljedeći materijali: za vanjske zidove odabran je izolacijski materijal XPS debljine 120 mm te toplinske provodljivosti od 0,035 W/mK (oznaka: W13), a za prizemlje je odabran izolacijski materijal XPS debljine 100 mm (oznaka F5). Za ovo je rješenje usvojena prozorska varijanta oznake Win9 s prozornim trostrukim ostakljenjem najniže vrijednosti U (1,1 W/m<sup>2</sup>K) te najviše vrijednosti SHGC (0,76) isto kao i varijanta zasjenjenja debljine 0,25 m. Točka minimalnog početnog ulaganja uključuje toplinsku izolaciju krova od staklene vune debljine 200 mm (oznake R10), varijantu materijala EPS debljine 50 mm za vanjske zidove (oznaka: W6) toplinske provodljivosti 0,039 W/mK, te izolaciju prizemlja materijalom EPS debljine 80 mm (oznake F4), zatamnjeno niskoenergetsko ostakljenje (oznake Win2) vrijednosti U = 4,2 te vrijednosti SHGC = 0,54, bez zasjenjenja na bilo kojem prozoru. Važno je naglasiti da je početno ulaganje posredno predstavljalo dio postupka optimizacije u okviru formule NPV. Kako je NPV vrijednost optimizirana umjesto početnog ulaganja, minimalna točka početnog ulaganja nije se uklopila u optimalno rješenje. Što se tiče kombinacije materijala za globalnu optimalnu točku prikazanu u ovoj studiji optimizacije, varijanta izolacijskog materijala od staklene vune oznake R10 najveće debljine (200 mm) odabrana je za izolaciju krova, a za vanjske zidove tj. prizemlje odabrana je varijanta toplinske izolacije EPS debljine 100 mm (oznake W8), tj. materijal XPS debljine 80 mm toplinske provodljivosti 0,035 W/mK. Za sve je prozore izabrano niskoenergetsko dvostruko ostakljenje debljine 4-16-4 mm s argonskom ispunom (oznaka: Win6), te varijanta zasjenjenja dubine 1,00 m (oznake S5).

Ako pogledamo kako se vrijednost PPD u svakoj zoni mijenja u skladu s najboljom iteracijom prosječne vrijednosti PPD (minimalna prosječna vrijednost PPD) prema slici 4., možemo uočiti da se vrijednosti PPD bitno smanjuju u svim zonama osim u zoni jezgre srednjeg kata. Dakle uočava se bitno poboljšanje u smislu toplinske ugodnosti zgrade.

Prilikom ocjenjivanja općih rezultata optimizacije, kombinacije materijala u optimalnoj točki svakog cilja (tj. kombinacija R10, W9, F5, Win6, S1 za postizanje maksimalne uštede toplinske energije, ili kombinacija R10, W13, F5, Win9, S2 za najmanju vrijednost PPD) ne mogu se odrediti intuitivnim postupcima ili na temelju procjene stručnjaka. Te su kombinacije jedinstvene i mogu se odrediti isključivo pomoću optimizacijskih studija. Iako se višeciljna optimizacija utemeljena na simulacijskim postupcima može uspješno primijeniti za rješavanje tako složenih problema, dobiveni se rezultati ipak trebaju pojednostavniti i prenijeti osobama koje donose odluke. Tu treba napomenuti da donositelj odluke ne može jednostavno

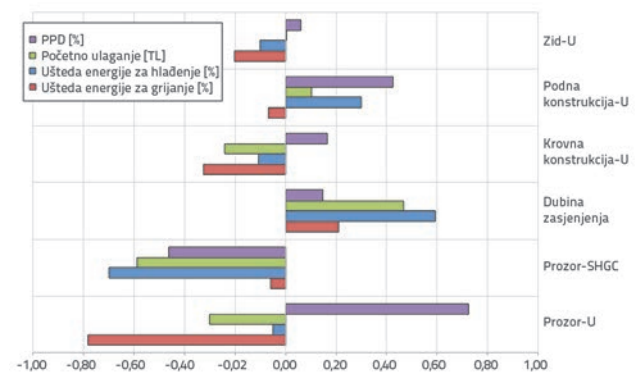
odrediti uzročno posljedičnu vezu između rezultata optimizacije ili između optimiziranih parametara i ciljnih kriterija. Analiza osjetljivosti provedena je u ovom radu kako bi se ocijenila razina postojanosti ciljne funkcije u slučaju promjene vrijednosti parametara te kako bi se odredile uzročno posljedične veze.



Slika 4. Vrijednosti PPD za pojedinačne zone zgrade prije i nakon energetske poboljšanja ovojnice zgrade

### 3.2. Analiza osjetljivosti

Globalna regresijska analiza osjetljivosti (SA) primijenjena je kako bi se dokazali ulazno-izlazni odnosi i rangirali ulazni parametri prema njihovom utjecaju na izlazne rezultate. Određeno je ukupno šest ulaznih parametara: U vrijednost za krov, U vrijednost za vanjske zidove, U vrijednost za prizemlje, U vrijednost za prozore, vrijednost SHGC i dubina zasjenjenja. Primjenom optimizacijskih rezultata generirana je ulazna matrica te su za svaki ulazni vektor pohranjene odgovarajuće izlazne varijable. Vrijednosti standardiziranog koeficijenta regresije (SRC) izračunane su pomoću programa Simlab.



Slika 5. Pokazatelji osjetljivosti (SRC) ulaznih parametara na uštedu toplinske energije, uštedu rashladne energije, PPD i početno ulaganje

Prema slici 5., pozitivnije vrijednosti SRC upućuju na pozitivne odnose između ulaznih i izlaznih vrijednosti. S druge strane, negativna SRC vrijednost znak je negativne veze. Prema istoj

slici, najvažniji parametar koji utječe na uštedu toplinske energije je vrijednost U za prozore, a nakon njega slijede vrijednost U za krov te vrijednost U za zidove. Što se tiče uštede rashladne energije, tri najvažnija ulazna parametra su vrijednost SHGC za prozore, dubina zasjenjenja i vrijednost U za pod. Dok vrijednost SHGC za prozore negativno utječe na uštedu rashladne energije, pozitivan utjecaj bilježi se kod dubine zasjenjenja i U parametra za podnu konstrukciju. Iako vrijednost U za krov i vrijednost U za zidove pozitivno utječu na uštedu rashladne energije, taj utjecaj je manji ako ga usporedimo s uštedom toplinske energije. Razlog tome mogla bi biti velika razlika u potrošnji toplinske i rashladne energije u zgradi prije poboljšanja te u odgovarajućim uštedama koje u postocima nisu velike. Ako analiziramo uzajamne odnose između ulaznih parametara i PPD-a, dva parametra koji najviše utječu na PPD su vrijednost U za prozore i vrijednost SHGC za prozore. Dok je utjecaj vrijednosti U za prozore pozitivan, utjecaj vrijednosti SHGC za prozore upravo je suprotan. Možda zvuči iznenađujuće, ali parametri za dubinu zasjenjenja, vrijednost U za krov i vrijednost U za zidove malo utječu na PPD. Tome bi mogao biti razlog gubitak topline kroz velike ostakljene površine i podnu površinu u zimskim klimatskim uvjetima koji prevladavaju u Izmiru, što negativno utječe na toplinsku ugodnost. Drugim riječima, toplinska neugoda zbog nedovoljnog grijanja prostora u zimskim mjesecima veća je od neugode koja se bilježi u ljetnim mjesecima. Što se tiče početnog ulaganja, usvojen je sljedeći redoslijed ulaznih parametara prema njihovom utjecaju na cijenu početnog ulaganja: vrijednost SHGC za prozore s negativnim korelacijama te vrijednost U za podnu konstrukciju s donekle pozitivnom korelacijom. Ne postoji značajna veza između vrijednosti U za zidove i početnog ulaganja.

#### 4. Zaključak

Optimizacijski pristup utemeljen na simulaciji pomoću programa EnergyPlus i primjeni alata za optimizaciju GenOpt proveden je u svrhu analize uredske zgrade u Izmiru gdje prevladava vruća i vlažna klima. Pritom je cilj bio odrediti optimalni niz konfiguracija plašta zgrade uz istovremeno maksimalno povećanje godišnjih ušteda u troškovima grijanja i hlađenja, te povećanje toplinske ugodnosti i neto sadašnje vrijednosti. Za diskretne neovisne varijable usvojeno je pet osnovnih kategorija mjera za poboljšanje učinkovitosti plašta zgrade: materijali za toplinsku izolaciju vanjskih zidova, krova i prizemlja, energetski učinkoviti prozorski sustavi, te komponente zasjenjenja s različitim vrijednostima dubine. Algoritam PSO sadržan u programu GenOpt odabran je za pretraživanje u tako širokom rasponu mogućih rješenja te je u tom smislu provedeno nekoliko postupaka optimizacije kako bi se definirali odgovarajući parametri PSO koji su istovremeno kompatibilni sa svim ciljevima. Kao rezultat optimizacije definiran je optimalan niz rješenja s maksimalnim ili minimalnim vrijednostima svakog cilja, a također su definirani i uzajamni odnosi i trendovi kriterija za određivanje ciljeva. Nakon optimizacije, provedena je analiza osjetljivosti bazirana na postupku regresije kako bi se uspostavile uzročno posljedične

veze te definirali odnosi između ulaznih i izlaznih vrijednosti, isto kao i najutjecajniji parametri za svaki cilj. Stoga su za svaki izlazni pokazatelj zasebno izračunani indeksi osjetljivosti SRC za ulazne parametre (vrijednost U za zidove, vrijednost U za krov, vrijednost U za podnu konstrukciju, vrijednost U za prozore, vrijednost SHGC za prozore te dubina zasjenjenja). Glavni zaključci provedenog istraživanja su sljedeći:

- Ustanovljeno je da je optimalno globalno rješenje za analiziranu uredsku zgradu u Izmiru konfiguracija plašta zgrade sa staklenom vunom debljine 200 mm, EPS materijalom debljine 100 mm, te XPS materijalom debljine 80 mm za izolaciju krova, zidova i prizemlja, u kombinaciji s dvostrukim ostakljenjem debljine 4-16-4 mm s ispunom argonom, te sa zasjenjenjem dubine 1,0 m.
- Najbolje iteracije za maksimalne vrijednosti uštede u grijanju i hlađenju pokazuju da se količina toplinske energije smanjuje za otprilike 70 %, dok ista vrijednost smanjenja količine energije za hlađenje iznosi 40 %. Optimizacijom parametara plašta zgrade, prosječna vrijednost PPD mogla bi se spustiti na 12,46 %. Optimalno globalno rješenje definirano pomoću algoritma PSO ukazuje na smanjenje potrošnje toplinske energije otprilike 69 %, tj. oko 30 % za potrošnju energije za hlađenje, dok se vrijednost PPD smanjuje za približno 8 %.
- Najvažniji zaključak koji se može izvući na temelju rezultata optimizacije glasi da čak i najbolja formula parametara plašta ne mora automatski biti najbolje rješenje za svaki kriterij cilja. Optimizacijom utemeljenom na simulaciji dobivaju se optimalni izbori koji bi se mogli predvidjeti ako bi se analiza temeljila na iskustvu stručnjaka ili na jednostavnom heurističkom postupku.
- Prema rezultatima analize osjetljivosti, najvažniji parametri za smanjenje troškova grijanja i hlađenja su vrijednost U za prozora te vrijednost SHGC za prozore, pri čemu i jedna i druga vrijednost negativno utječu na odgovarajuće izlazne parametre. Utvrđeno je da su najvažniji parametri za PPD i početno ulaganje u materijale vrijednost U za prozore i vrijednost SHGC za prozore. Stoga se može zaključiti da su za analiziranu zgradu parametri ostakljenja najznačajniji za smanjenje troškova grijanja i hlađenja te za smanjenje vrijednosti PPD. Moguće je da je takav rezultat uvjetovan geometrijom građevine te vrućom i vlažnom klimom koja prevladava u Izmiru.

Što se tiče ograničenja ovog istraživanja, treba napomenuti da je u ovom radu korišten tipičan model za koji se ne može reći da je suviše složen u smislu energetskog modeliranja zgrade. Primjena pristupa koji uključuje višezonsko modeliranje omogućuje postizanje veće preciznosti toplinskog modela, ali istovremeno i povećava vrijeme potrebno za provedbu simulacije. Stoga bi vrijeme simulacije moglo biti jedna od poteškoća koju treba riješiti tijekom primjene predloženog pristupa na postojećim zgradama ili na složenijim projektima. Kao dodatno ograničenje treba spomenuti mogućnost poteškoća pri definiranju lokalnih minimalnih vrijednosti

tijekom optimizacijskih postupaka. Definiranje ciljne funkcije s odgovarajućim ponderskim koeficijentima i parametrima algoritma vrlo je značajno tijekom optimizacije upravo zbog izravnog vođenja algoritma. Zato se za određivanje optimalnih vrijednosti trebaju provoditi probni optimizacijski postupci. Jasno je da takvi postupci mogu biti dugotrajni. U budućim bi se istraživanjima aspekt modularnosti ovog pristupa mogao proširiti tako da obuhvati različite vrste i/ili veličine zgrada te različite klimatske uvjete, a mogao bi se primijeniti i u analizi

drugih tehnologija za definiranje energetske učinkovitosti (npr. za tehnologije koje uključuju korištenje obnovljive energije i tehnologije za sustave GVK - grijanje, ventilacija i klimatizacija). Stoga možemo zaključiti da bi ovaj istraživački okvir mogao biti prilično koristan u postupcima donošenja odluka o optimizaciji više ciljeva. Osim toga, analiza bi mogla obuhvatiti detaljnije proučavanje utjecaja različitih parametara, kao što su stopa infiltracije i ponašanje korisnika, na energetske učinkovitost građevine te na optimizaciju troškova.

## LITERATURA

- [1] US Department of Energy: Buildings energy data book, Maryland D&R International, 2012.
- [2] Energy efficiency in buildings, <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>, 19.12.2015.
- [3] Kumburoglu, G., Arkan, Y.: Farkındalık ve fark yaratmak: Türkiye'nin CO<sub>2</sub> salımları, Türkiye, 2009.
- [4] Kolokotsa, D., Diakaki, C., Grigoroudis, E., Stavrakakis, G., Kalaitzakis, K.: Decision Support Methodologies on The Energy Efficiency and Energy Management in Buildings, *Advances in Building Energy Research*, 3 (2009), pp. 121-146.
- [5] European Union: Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the Energy Performance of Buildings (recast), *Official Journal of the European Union*, 53 (2010).
- [6] Şenel Solmaz, A.: An Approach to Identify the Optimal Solutions in the Context of Energy and Cost Criteria for Buildings in Different Climates, *Megaron*, 11 (2016), pp. 592-606, <https://doi.org/10.5505/megaron.2016.09609>
- [7] Bichiou, Y., Krarti, M.: Optimization of Envelope and HVAC Systems Selection for Residential Buildings, *Energy and Buildings*, 43 (2011), pp. 3373-3382, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.031>
- [8] Magnier, L., Haghghat, F.: Multiobjective Optimization of Building Design Using TRNSYS Simulations, Genetic Algorithm, and Artificial Neural Network, *Building and Environment*, 45 (2010), pp. 739-746, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.016>
- [9] Chantrelle, F.P., Lahmidi, H., Keilholz, W., Mankibi, M.E., Michel, P.: Development of a Multicriteria Tool for Optimizing the Renovation of Buildings, *Applied Energy*, 88 (2011), pp. 1386-1394, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.10.002>
- [10] Hamdy, M., Hasan, A., Siren, K.: Applying a Multi-Objective Optimization Approach for Design of Low-Emission Cost-Effective Dwellings, *Building and Environment*, 46 (2011), pp. 109-123, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.006>
- [11] Asadi, E., Silva, M.G., Antunes, C.H., Dias, L.: A Multi-Objective Optimization Model for Building Retrofit Strategies Using TRNSYS Simulations, *Genopt and MATLAB, Building and Environment*, 56 (2012), pp. 370-378, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.04.005>
- [12] Karaguzel, O., Zhang, R., Lam, K.: Coupling Of Whole-Building Energy Simulation And Multi-Dimensional Numerical Optimization For Minimizing The Life Cycle Costs Of Office Buildings, *Building Simulation*, 7 (2014), pp. 111-121, doi:10.1007/s12273-013-0128-5
- [13] Senel Solmaz, A., Halicioğlu, F.H., Gunhan, S.: An Approach for Making Optimal Decisions in Building Energy Efficiency Retrofit Projects, *Indoor and Built Environment*, 27(2018), pp. 348-368, <https://doi.org/10.1177/1420326X16674764>
- [14] Delgarm, N., Sajadi, B., Kowsary, F., Delgarm, S.: Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO), *Applied Energy*, 170 (2016), pp. 293-303, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.141>
- [15] OpenStudio v.1.3.0., <https://www.openstudio.net/>, 11.01.2014.
- [16] EnergyPlus 8.1., <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>, 10.01.2016
- [17] GenOpt—Generic Optimization Program, <http://simulationresearch.lbl.gov/>, 10.12.2012.
- [18] Eberhart, R., Kennedy, J.: A New Optimizer Using Particle Swarm Theory, *Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science 1995 (MHS '95)*, Nagoya, Japan, (1995), pp. 39-43
- [19] Simlab v.2.2. – Software package for uncertainty and sensitivity analysis, <https://ec.europa.eu/jrc/en/samo/simlab>, 12.02.2017.
- [20] Deru, M., Griffith, B., Torcellini, P.: Establishing Benchmarks for DOE Commercial Building R&D and Program Evaluation. California, National Renewable Energy Laboratory, 2006.
- [21] TS 825: The thermal insulation requirements for buildings (revision) in Turkish context. Turkish Standard Institution, 2008.
- [22] ASHRAE: 2017 ASHRAE Handbook-Fundamentals, SI Edition, Atlanta, GA, 2017.
- [23] Fanger, P.O.: Thermal comfort. Copenhagen, Danish Technical Press, 1970.
- [24] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013: Thermal environmental conditions for human occupancy, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE).