

Upotreba ekstremnih referentnih godina u optimizaciji renoviranja zgrade

Use of extreme reference years in building retrofit optimization

Alessandro PRADA¹, Giovanni PERNIGOTTO², Andrea GASPARELLA³

¹ University of Trento, alessandro.prada@unitn.it,

² Free University of Bozen-Bolzano, giovanni.pernigotto@unibz.it,

³ Free University of Bozen-Bolzano, andrea.gasparella@unibz.it

Ključne reči:
tipična referentna godina; ekstremna referentna godina; višeciljna optimizacija; obnova postojeće zgrade

Optimizacija obnove postojećih objekata je jedna od najmerodavnijih najvažnijih projektnih aktivnosti za postizanje energetske efikasnosti i održivosti u skladu sa smernicama nacionalnih i međunarodnih politika. Potrebno je pronaći optimalna rešenja kako bi se uštedela energija uz minimalne ukupne troškove. Imajući u vidu taj cilj, tehnike višeciljne optimizacije u sprezi sa simulacijom performansi zgrade pokazale su se veoma efikasnim i od velike su pomoći za stručnjake i vlasnike zgrada prilikom izbora. Detaljno poznavanje karakteristika postojeće zgrade i graničnih uslova, među kojima su referentni meteorološki podaci od prvorazrednog značaja. Na definisanje interventnih mera koje treba primeniti za optimalnu obnovu u velikoj meri utiče reprezentativnost vremenskih podataka. Tipične referentne godine (TRG) su pogodne za procenu prosečnog ponašanja zgrade. Međutim, one ne sadrže neke informacije za tačno dimenzionisanje merenje naknadnih intervencija na obnovi zgrada i za procenu rezilijentnosti odnosno otpornosti optimalnih konfiguracija zgrade na tipičnu varijabilnost klime u serijama istorijskih vremenskih podataka.

Cilj ovog rada je da istraži kako na rešenja za obnovu optimizirana na osnovu TRG utiče klimatska varijabilnost i koliko su rezultati procesa višeciljne optimizacije robustni na varijabilnost vremenskih prilika. Pored procene karakteristika zgrade u tipičnim uslovima opisanim pomoću TRG, razmatraju se i tipični ekstremni uslovi, koji su sumirani u Ekstremnim Referentnim Godinama (ERG). Sintetičke ERG mogu da budu važan alat za dopunu informacija koje pruža TRG.

Key words:
typical reference year; extreme reference year; multi-objective optimization; existing building retrofit

Retrofit optimization of existing buildings is one of the most relevant design activities when addressing energy efficiency and sustainability according to the guidelines of national and international policies. Optimal solutions have to be identified to save energy at a minimum global cost. To this aim, multi-objective optimization techniques coupled with building performance simulation proved highly effective and supportive of the choice of the professional and the owner. A detailed knowledge of the characteristics of the existing building and of the boundary conditions, among which weather reference data, is of paramount importance. Indeed, the definition of the intervention measures to be included in the optimal retrofits is highly affected by the representativeness of weather data. Typical Reference Years (TRY) are suitable to estimate the average behavior of the building. However, they lack of some information when it comes to sizing correctly the retrofit interventions and to assessing the resilience of the optimal building configurations to typical climatic variability in the historical weather data series.

This work aims at exploring how renovation solutions optimized on TRY are affected by the climatic variability and how the outcomes of a multi-optimization process are robust to weather variability. Besides assessing the building performance in the typical conditions described by TRY, typical extreme conditions are considered, as summarized by Extreme Weather Years (ERY). Synthetic ERYs reveal to be an important tool to complement the information provided by TRY.

1. Uvod

Otpriblike 75% zgrada je energetska neefikasna [1] i oko 97% spada u klasu B ili nižu klasu po pitanju efikasnosti [2]. U zavisnosti od zemlje, svake godine se renovira samo 0.4-1.2% zgradarskog fonda. Stoga je potpuno razumljivo što politike Evropske unije vide veliki potencijal za postizanje efikasnosti u sektoru zgrada, za koji se zna da je najveći potrošač finalne energije u Evropi, i to smatraju jednom od glavnih strategija za povećanje energetske efikasnosti. Međutim, EU predlaže da se ovaj potencijal realizuje kroz troškovno optimalni pristup kojim se može odrediti kombinacija interventnih mera za energetska efikasnost uz minimalne globalne troškove, uz očuvanje ili poboljšanje kvaliteta unutrašnje sredine.

Izbor koji prave stručnjak i vlasnik zgrade može se pojednostaviti pomoću tehnika višeciljne optimizacije u kombinaciji sa simulacijom performansi zgrade. Simulacija zgrade omogućava da se napravi detaljna procena učinka koji imaju konfiguracije obnove u pogledu energetske efikasnosti i kvaliteta sredine, uzimajući u obzir sve interakcije između različitih aspekata. Algoritmi za višeciljnu optimizaciju smanjuju računsku troškovu ospežnih istraživanja prostora rešenja, koji se sastoji od svih mogućih kombinacija raspoloživih mera za energetska efikasnost. Međutim, od prevashodnog značaja je dobro sagledati karakteristike postojeće zgrade koju treba obnoviti, posebno granične uslove, među kojima su vremenski podaci posebno značajni. Ne samo da definisa-

nje optimalnih interventnih mera zavisi od vremenskih podataka, već i reprezentativnost vremenskih podataka utiče na robustnost definisanih rešenja.

U simulaciji zgrada se uveliko koriste tipične referentne godine (TRG), koje su pogodne za ocenu prosečnog ponašanja zgrade, na primer za energetska označavanje zgrade [3] i prilikom energetskog renoviranja zgrada uz optimalne troškove [4]. Međutim, TRG možda nisu najbolji izbor kada je reč o pravilnom određivanju intervencija za obnavljanje zgrade i procenu rezilijentnosti odnosno otpornosti optimalnih konfiguracija zgrade na klimatsku varijabilnost.

Uopšte gledano, procena rezilijentnosti energetskih performansi zgrade na klimatsku varijabilnost sve više dobija na značaju [5-9]. Takvu vrstu analize nemoguće je izvršiti sa TRG i ona zahteva da se usvoje nove serije referentnih podataka koje mogu da zabeleže anomalne ili ekstremne klimatske sollicitacije [10]. Prilikom projektovanja intervencija za obnavljanje zgrade referentni period je životni vek zgrade. Tipične referentne godine (TRG), koje izdvajaju tipičnu prosečnu godišnju varijabilnost iz višegodišnjih merenih podataka, nisu pogodna da opišu tipičnu varijabilnost iz godine u godinu za posmatranu lokaciju. U tu svrhu su uvedene Ekstremne Referentne Godine (ERG) zasnovane na istim dugoročnim izmerenim vrednostima [11-14].

Cilj ovog rada je da istraži da li klimatska varijabilnost utiče na rešenja koja su optimizirana prema TRG i kako se robustnost na vremensku varijabilnost može vrednovati u procesu višeciljne optimizacije. Pored ocene karakteristika zgrada u tipičnim uslovima koje opisuje TRG, uzimaju se u obzir tipični ekstremni uslovi kako bi se procenilo (i) da li su optimalna rešenja određena u odnosu na TRG robustna na tipičnu vremensku varijabilnost, i (ii) da li su optimalna rešenja određena u odnosu na TRG i dalje optimalna pod uslovima ekstremne referentne godine (ERG).

2. Metoda

Referentna zgrada

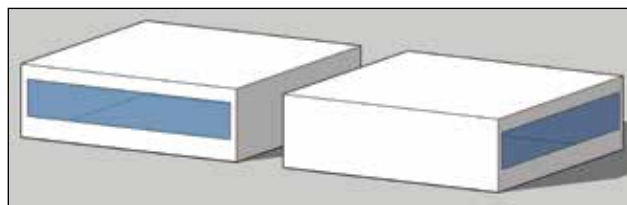
Da bi se ispitala osetljivost optimalnih konfiguracija za obnovu zgrade na osnovu tipične vremenske varijabilnosti, uzeta je u obzir pojednostavljena zgrada (Slika 1). Ona ima podnu površinu od 100 m², proporciju između površine i zapremine (S/V) od oko 1, kao što je slučaj dvojne kuće (kuće koja je jednim zidom spojena sa drugom kućom) i ima odnos prozora i poda (WFR) od oko 15%. Prvobitna toplotna otpornost neprozirnog omotača je prilično niska, oko 1 K m² W⁻¹. Prozori imaju drveni okvir sa termičkom propustljivošću od 3.2 W m⁻² K⁻¹ i jednostruko zastakljenje, koje omogućava propustljivost od 5.7 W m⁻² K⁻¹ i solarni koeficijent dobitaka toplote od 0.81. Razmatrane su dve moguće orijentacije za prozore, na južnoj i na istočnoj strani, kako bi se analizirali različiti uticaji raspoloživosti sunčevog zračenja i dnevnog profila. Sistem za grejanje se sastoji od radijatora i standardnog kotla (nominalne efikasnosti od 89% na nižoj vrednosti grejanja) sa punim kapacitetom rada koji se uključuje i isključuje. Pretpostavlja se tipično vreme i raspored boravka u stambenom prostoru. Za vreme boravka u kući uzeta je u obzir ventilacija spoljašnjim vazduhom sa 0.5 izmena vazduha na sat (ACH).

Razmotreno je šest kategorija raspoloživih mera za energetska efikasnost (MEE).

- Spoljašnja izolacija spoljašnjeg neprozirnog omotača sa slojem ekspaniranog polistirena sa termičkom provodljivošću od 0.04 W m⁻¹ K⁻¹, čija je debljina, od 0 do 20 cm i od 1 cm na stepenicama, optimizirana nezavisno za:
 - vertikalne zidove
 - krov, i
 - pod.

- Zamena prozora sa dvostrukim zastakljenjem (propustljivost od 1.1 W m⁻² K⁻¹) ili trostrukim zastakljenjem (propustljivost od 0.6 W m⁻² K⁻¹) sa visokim (0.6) ili niskim (0.3) solarni koeficijent dobitaka toplote (SHGC);
- Zamena kotla modulacionim kotlom (efikasnost 96 %) ili kondenzacionim kotlom (101 % na donjoj vrednosti grejanja) sa regulatorom za resetovanje spoljašnje temperature.
- Sistem mehaničke ventilacije sa sistemom za rekuperaciju toplote (osetljiva efektivnost od 0.7).

Kombinacijom opisanih mera mogu se dobiti ukupno 277830 različite konfiguracije.

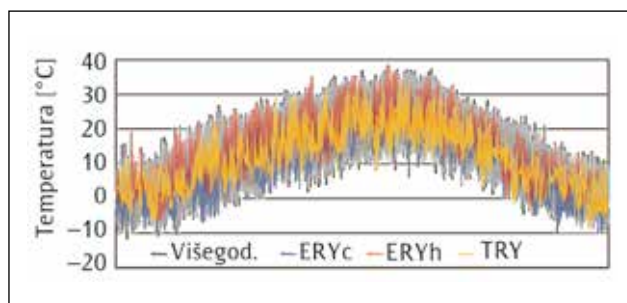


Slika 1. Referentne zgrade sa prozorima na južnoj i na istočnoj strani

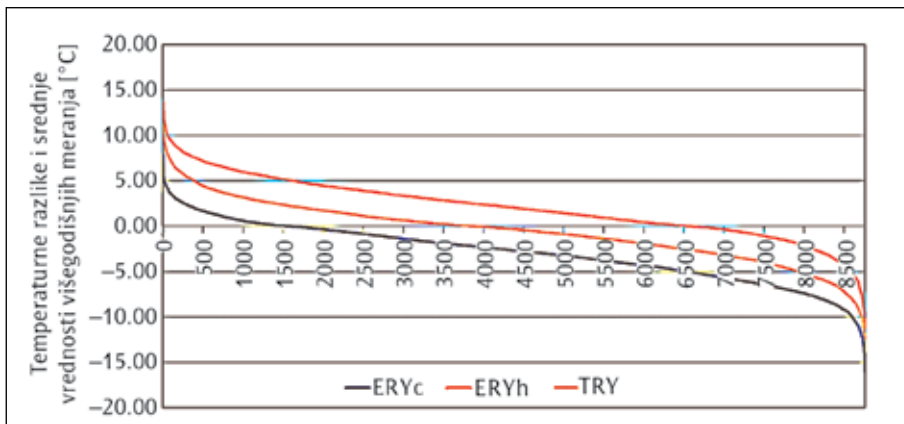
Vremenski podaci

Vremenski podaci su podaci za Trento, grad na severoistoku Italije (geografska širina 46° 4' 49" N, geografska dužina 11° 3' 1" E), sa klimom 4A prema klasifikaciji ASHRAE 90.1 [15].

Za ovu lokaciju je karakteristična velika sezonska varijabilnost vremenskih uslova, ali i značajna varijabilnost iz godine u godinu, kao što se to može videti za temperaturu spoljašnjeg vazduha iz 18 godišnjih zabeleženih vrednosti (prikazano sivom bojom na slici 2) koje su korišćene da bi se dobile tipična godina (žuta boja) i ekstremne godine (plava i crvena boja). Tipične i ekstremne godine su definisane prema određenim statističkim pristupima, tako što su iz serija podataka izabrani pravi meseci sa željenim karakteristikama. Tipična referentna godina je dobijena prema postupku zasnovanom na Finkelštajn-Šaferovoj statistici izračunatoj za neke vremenske promenljive (temperatura suvog termometra, globalna solarna horizontalna iradijansa (intenzitet zračenja), relativna vlažnost), onako kako je opisano u evropskom tehničkom standardu EN ISO 15927-4:2005. Dve ekstremne referentne godine, hladna ERG_c i topla ERG_h, razvijene su pomoću postupka koji su autori predložili u prethodnim radovima [4], a koji koristi istu Finkelštajn-Šaferovu statistiku za pronalaženje netipičnih i ekstremnih trendova umesto najtipičnijih. Konkretno, za ERG_c su izabrani meseci sa hladnijim temperaturama suvog termometra da bi se napravila referentna godina, dok su za ERG_h izabrani oni sa toplijim temperaturama suvog termometra i višim vrednostima solarne iradijance (intenziteta sunčevog zračenja). Pomoću grafikona trajanja mogu se uporediti razlike u temperaturi vazduha u ERG i TRG sa srednjim uslovima (Slika 3), koji za



Slika 2. Tipična referentna godina (TRG) i ekstremna referentna godina (ERGH za toplu, ERGC za hladnu) uzimajući u obzir serije višegodišnjih podataka za klimatske uslove grada Trenta (Severna Italija)



Slika 3. Grafikon trajanja temperaturnih razlika između tipične referentne godine (TRG), tople ekstremne referentne godine (ERG_h) i hladne ekstremne referentne godine (ERG_c), i srednjih vrednosti višegodišnjih meranja

temperaturu spoljašnjeg vazduha prikazuje simetrično trajanje za toplu i hladnu referentnu godinu (ERG_h i ERG_c).

Pristup optimizaciji

U procesu optimizacije uzeta su u obzir dva cilja: energetske karakteristike predstavljene indeksom energetskih karakteristika za grejanje (EPh), koji predstavlja potrebe za grejanjem po godini i po jediničnoj površini, i troškovi tokom životnog veka, opisani neto sadašnjom vrednošću (NSV) razmatrane konfiguracije.

Uslovi ugodnosti su procenjeni, ali nisu sadržani u ciljevima optimizacije. Veličina IC (Investicioni Troškovi) je izvedena iz regionalnog cenovnika [16] za sve mere za energetske efikasnost, i doprinosi ukupnim troškovima izraženim neto sadašnjom vrednošću (NPV), zajedno sa godišnjim troškovima za energiju, troškovima za održavanje, troškovima za zame-nu i preostalu (rezidualnu) vrednost za delove opreme za du-žim životnim vekom.

Optimizacija konfiguracije obnove izvršena je pomoću TRN-SYS 17, u sprezi sa Matlab script-om koji koristi genetski algoritam za optimizaciju. Simulacija zgrade omogućava detaljnu procenu performansi konfiguracija obnove u pogledu energetske efikasnosti i kvaliteta sredine i predstavlja sve interakcije između različitih aspekata. Algoritmi za višeciljnu optimizaciju smanjuju računске troškove opsežnog istraživanja prostora rešenja, koji se sastoji od svih mogućih kombinacija raspoloživih mera za energetske efikasnost. Veliki broj algoritama je razvijen za efektivan pristup višeciljnoj optimizaciji. Među evolucionim algoritimima, vrlo popularnim u optimizaciji performansi zgrada (Building Performance Optimisation - BPO), Ne-dominirajući Sortirajući Genetski Algoritam (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm - NSGA) je jedan od onih koji se najviše primenjuju [17]. U varijanti NSGA-II, koju su Deb et al. prvi razvili [18] i izabrali u ovom istraživanju, usvojen je elitizam, koji održava trenutnu i prethodnu populaciju na svakoj iteraciji. Nakon parenja populacije, populacije se sortiraju prema konceptu ne-dominacije, a najbolje rangiranje se bira kao sledeća roditeljska populacija.

NSGA-II algoritmu su dodata neka prilagođavanja. Prvo, za inicijalizaciju prve populacije je primenjeno uzorkovanje Sobolovih sekvenci za prevazilaženje grupisanja (klasteringa) koje može da se javi kod drugih tehnika uzorkovanja. Zatim je sačuvana baza podataka prethodnih simulacija kako bi se izbeglo ponavljanje skupih proba tokom optimizacije performansi zgrade (BPO). Takođe, korišćen je surogat model da ubrza proces optimizacije karakteristika zgrada prema pristupu zasnovanom na generacijskoj osnovi [19]. Algoritmi

koriste surogat model da bi pronašli odgovarajuće optimalno rešenje koje se mora simulirati pomoću TRN-SYS-a.

Na kraju, mera hiperzapremine [20] korišćena je kao kriterijum za zastavljanje. Izvršene su dve optimizacije kako bi se procenila robusnost (i) performanse optimalnih rešenja određenih u odnosu na TRG i (ii) konfiguracije optimalnih rešenja određenih u odnosu na TRG. U prvom slučaju, energetske i troškovne karakteristike optimalnih rešenja pronađene optimizacijom troškova pomoću TRG ponovo su izračunate u odnosu na uslove ERG_c i ERG_h i izračunata su odstupanja. U drugom slučaju optimizacija je ponovljena pod uslovima TRG, ERG_c i ERG_h i upoređene su optimalne kombinacije intervencija izabranih u svakom procesu optimizacije.

3. Rezultati i diskusija

U referentnim vremenskim uslovima (TRG) dvojna kuća (kuća koja je sa jedne strane povezana sa drugom kućom) ima EPh od $255.3 \text{ kWh m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ pre renoviranja i NSV od 70.2 kEUR za južnu orijentaciju prozora i EPh od $278.9 \text{ kWh m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ i NSV od 76.61 kEUR za istočnu orijentaciju prozora.

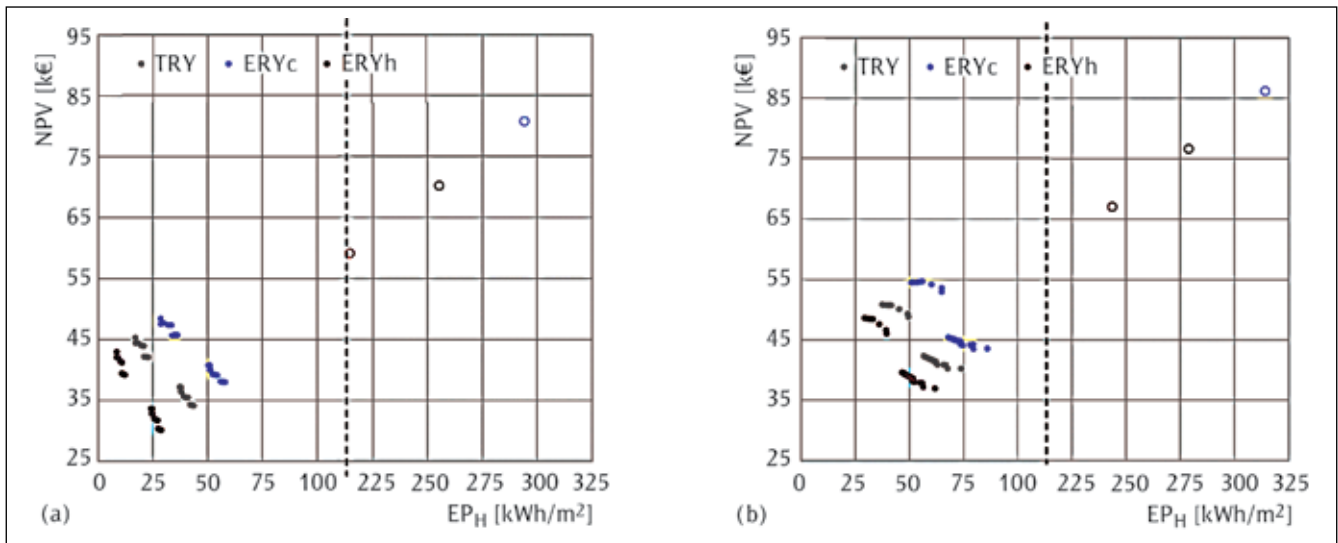
Robusnost optimalnih rešenja pod uslovima TRG

U pogledu robusnosti učinka optimalnih rešenja utvrđenih pod uslovima TRG, tačke u Pareto frontu za TRG mogu se uporediti sa odgovarajućim rešenjima kada se primene uslovi iz ERG_c i ERG_h . Na slici 4 se može videti da se tačke pomeraju nagore levo kada se uzme u obzir hladna referentna godina i nadole levo kada se uzme u obzir topla referentna godina. Značajno je to što se rezultati ne pomeraju simetrično i u istoj količini.

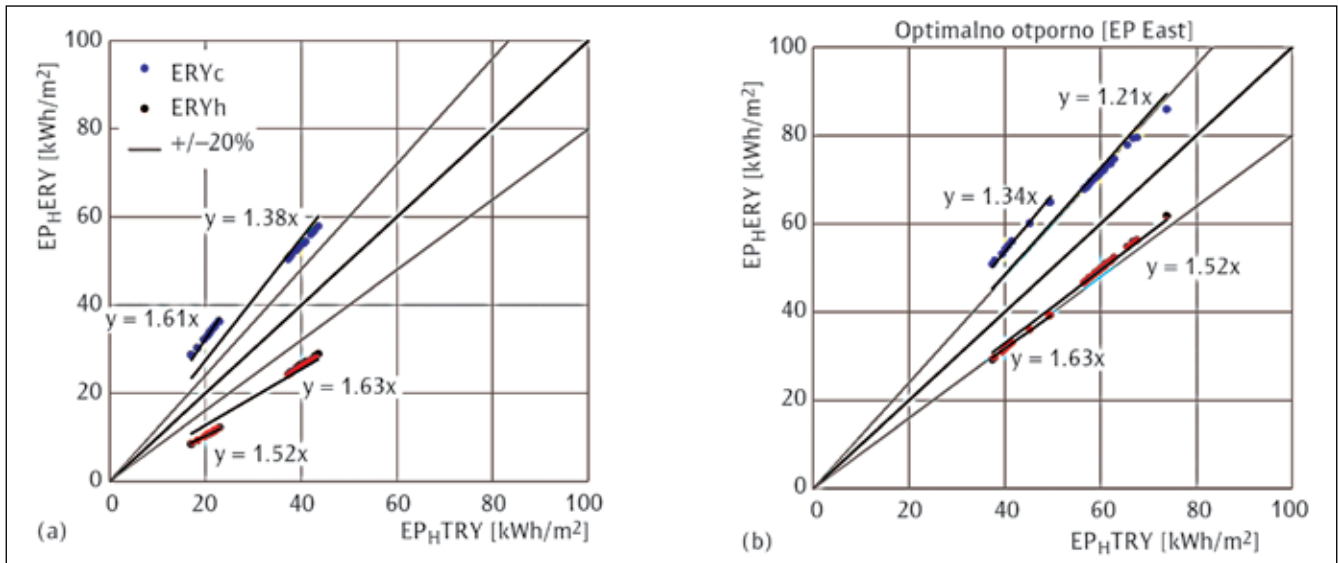
Počevši od južne orijentacije, za prvobitnu konfiguraciju koju treba obnoviti postoji varijacija od oko 15% (povećava se kada se uzme u obzir hladnija godina, a smanjuje kada se uzme u obzir topla referentna godina) i kod merenja energije i kod merenja troškova, u obe ERG_c i ERG_h , sa suprotnim znakom. Varijacije energetske performanse za Pareto rešenja su prilično velike, konkretno u proseku za +38 % ili -37%, ali za +61 % ili -49 % za podskup rešenja sa najboljim energetskim performansama, za odgovarajuće uslove ERG_c i ERG_h (slika 5a).

Kada se uzme u obzir istočna orijentacija prozora, dok za prvobitnu konfiguraciju koju treba obnoviti postoji varijacija od oko 13% (povećava se pod uslovima ERG_c i smanjuje pod uslovima ERG_h) i kod merenja energije i kod merenja troškova, indeks energetskih karakteristika (EPh) optimalnih rešenja se u proseku povećava za 21% ili smanjuje za 18%, za odgovarajuće ERG_c i ERG_h . Ponovo, kada se posmatra podskup rešenja bliži poreklu referentnog sistema, varijacija je veća: povećanje uslova ERG_c iznosi oko 34% i smanjenje iznosi oko 21% u ERG_h (slika 5b).

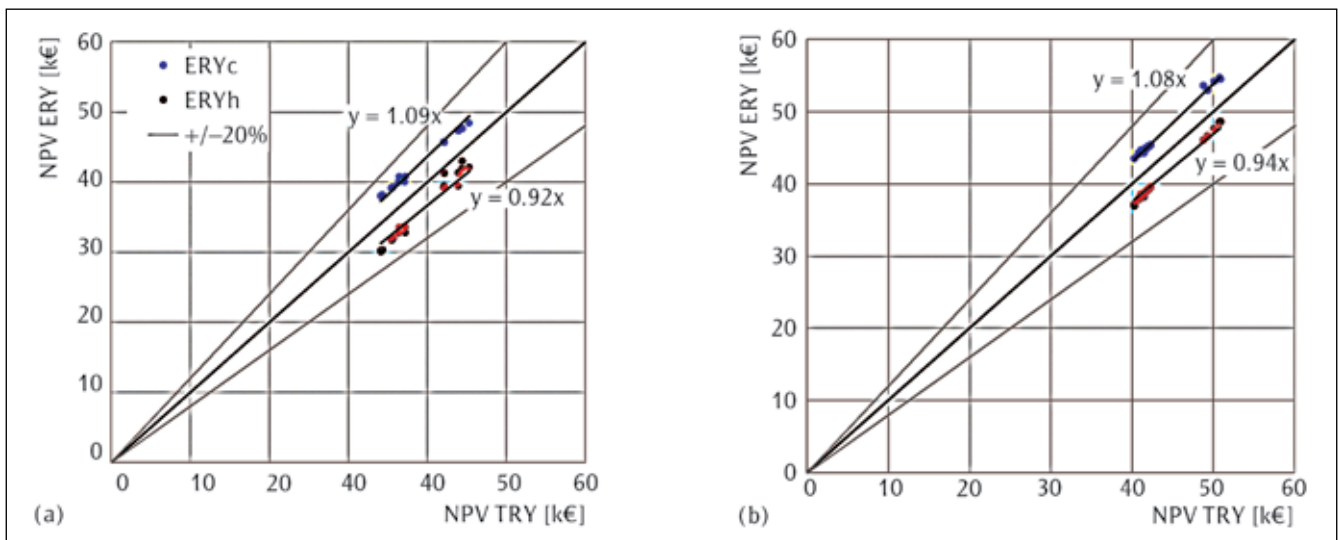
Za južnu orijentaciju prozora, modifikacija NSV je više ograničena, ujednačena i simetrična. Neto sadašnje vrednosti (NSV) se menjaju samo za +9% kod uslova ERG_c i za -8% kod uslova ERG_h (slika 6a). Kada se posmatraju prozori na istočnoj strani, NSV se povećava za 8% i smanjuje za 6% za ERG_c , odnosno ERG_h (slika 6b).



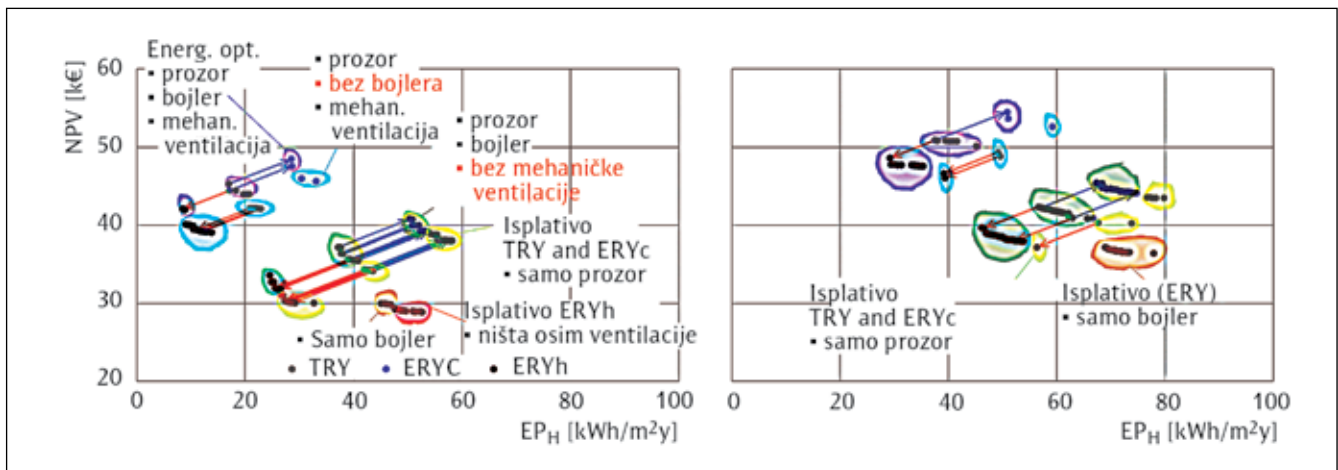
Slika 4. Rešenja Pareto fronta pod uslovima TRG (sive tačke) i iste konfiguracije pod uslovima ERY_c (plave tačke) ili ERY_h (crvene tačke), za južnu stranu (a) ili istočnu stranu (b)



Slika 5. EP_H optimalnih rešenja prema TRG pod uslovima ERG_c (plavo) i ERG_h (crveno) za (a) južnu orijentaciju i (b) istočnu orijentaciju



Slika 6. NPV optimalnih rešenja prema TRG pod uslovima ERG_c (plavo) i ERG_h (crveno) za (a) južnu orijentaciju i (b) istočnu orijentaciju



Slika 7. Konfiguracija optimalnih rešenja sa uslovima TRG (sivo), ERG_c (plavo) i ERG_h (crveno) za (a) južnu orijentaciju i (b) istočnu orijentaciju

Robustnost konfiguracije optimalnih rešenja prema TRG

Analiza robustnosti učinka optimalnih rešenja prema TRG pokazala je kako su energetske karakteristike značajno nesimetrične prema toploj i hladnoj ERG. Zato je važno da se ispita da li na sam proces optimizacije utiču referentni vremenski podaci. Posmatrajući Pareto frontove (slika 7), očigledno je da se optimalna rešenja menjaju, naročito u donjem desnom delu fronta, gde se nalaze troškovno optimalna rešenja. Strelice povezuju optimalne konfiguracije za slučaj TRG, takođe pronađene i pod uslovima ERG_c i ERG_h . Konkretno, rešenja robustna na proces optimizacije pod različitim uslovima učestalija su kada se prozori nalaze na južnoj strani nego kada se nalaze na istočnoj strani i učestalija su kod konfiguracija koje su energetski efikasnije nego kod onih koje su više isplative. Čak i ako se optimalna konfiguracija menja, i dalje je moguće pronaći odgovarajući skup rešenja u Pareto frontovima usvajajući iste vrste intervencija pored određenog stepena izolacije, koji se uvek uzima u obzir. Prva grupa sa rešenjima koja imaju najbolje energetske karakteristike obuhvata konfiguracije u kojima se usvajaju zamena prozora i kotla i mehanička ventilacija sa rekuperacijom toplote. Krećući se prema manje energetski efikasnim i skupljim rešenjima, u svim frontovima se pojavljuju tri dodatne grupe tačaka: u svim frontovima su prisutne druga grupa bez zamene kotla, treća bez mehaničke ventilacije i četvrta gde su samo zamenjeni prozori. Ova poslednja grupa je takođe grupa sa konfiguracijom optimalnih troškova za TRG i za ERG_c . Kada se uzmu u obzir uslovi ERG_h , tu su još dve grupe za južnu orijentaciju, konkretno rešenja u kojima se usvaja samo zamena kotla i rešenja u kojima se usvaja samo izolacija neprozirnog omotača, sa troškovno optimalnom tačkom. Za istočnu orijentaciju, poslednja grupa u Pareto frontu ERG_h jeste ona sa zamenom kotla.

4. Diskusija i zaključak

U ovom radu je analiziran uticaj karakteristika i varijabilnosti dugoročnih vremenskih podataka na učinak optimalnih rešenja za obnovu zgrade kada se uzme u obzir problem čijim rešenjem treba postići dva cilja. Izvršene su dve optimizacije kako bi se procenila robustnost (i) učinka optimalnih rešenja u odnosu na TRG i (ii) konfiguracija optimalnih rešenja u odnosu na TRG, uzimajući u obzir dve ERG koje opisuju tipične tople i hladne referentne godine.

Generalno, utvrđeno je da na rezultate optimizacije u velikoj meri utiče tipična varijabilnost vremenskih podataka. Posebno:

- Optimalna rešenja nađena pod uslovima TRG imaju energetske karakteristike na koje u velikoj meri utiču ekstremni uslovi:
 - Veći je uticaj na indeks energetske performansi (EP_H) nego na neto sadašnju vrednost (NSV)
 - Hladni uslovi imaju veći uticaj na energetske performanse nego topli uslovi, a taj uticaj na ekonomski učinak je balansirani
 - Ekstremni uslovi više utiču na efikasnija rešenja
- Optimalna rešenja nađena pod uslovima TRG razlikuju se od onih dobijenih pod uslovima ERG. U svakom slučaju, usvojena je ista grupa mera za intervenciju duž Pareto fronta, sa značajnim razlikama samo oko troškovno optimalnog rešenja:
 - Troškovno optimalno rešenje usvaja samo izolaciju i zamenu prozora u TRG i hladnoj ERG.
 - U uslovima tople ERG, optimalnost troškova se dobija izolacijom neprozirnog omotača i zamenom kotla za istočnu orijentaciju i samo izolacijom omotača za južnu orijentaciju.

Što se tiče njihove važnosti, ERG mogu da obezbede korisne informacije o osetljivosti optimalnih konfiguracija na dugoročne vremenske uslove i njihovu tipičnu varijabilnost. Njihov doprinos može da bude važan za ispitivanje dugoročnog učinka optimalnih rešenja za obnavljanje zgrada. Budući da:

- Ekstremni uslovi ne daju simetrične efekte, na dugoročne energetske performanse će više uticati hladno nego toplo vreme
- Postoji veći uticaj na dugoročne energetske performanse efikasnijih konfiguracija, mogu se javiti problemi, kao što su nepouzdana procena performansi ili jako velike razlike u performansama, naročito za energetski optimalna rešenja.
- Čak iako postoji manji uticaj na dugoročnu performansu troškova, troškovno optimalne konfiguracije su osetljivije na toplo vreme od energetski optimalnih konfiguracija

Višeciljna optimizacija ne bi trebalo da uzima u obzir samo TRG, već i dugoročnu varijabilnost klimatskih uslova.

5. Zahvalnica

Ova studija je finansirana iz projekta „Klimahouse i proizvodnja energije“ u okviru programsko-finansijskog ugovora između autonomne provincije i istraživača sa univerziteta Bocen-Bolcano.

6. Literatura

- [1] *** **European Commission**, *Proposal for a directive of the European parliament and of the council amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings*, Brussels, Belgium, 206
- [2] *** **Buildings Performance Institute Europe**, *Fact-sheet: 97% of buildings in the EU need to be upgraded*, Brussels, Belgium, <http://bpie.eu/publication/97-of-buildings-in-the-eu-need-to-be-upgraded/>
- [3] **Pernigotto, G., A. Prada, F. Cappelletti, A. Gasparella**, Impact of Reference Years on the Outcome of Multi-Objective Optimization for Building Energy Refurbishment, *Energies* 10 (2017), 11.
- [4] **Pernigotto, G., A. Prada, A. Gasparella**, Development Of Extreme Reference Years For Building Energy Simulation Scenarios, Proceedings of *EnviBUILD 2017*, Vienna, Austria, 2017.
- [5] **Short, C. A., K. J. Lomas, R. Giridharan, A. J. Fair**, Building resilience to overheating into 1960's UK hospital buildings within the constraint of the national carbon reduction target: Adaptive strategies, *Building and Environment*, 55 (2012), 73-95.
- [6] **Afgan, N. H.**, Energy, water and environment catastrophic events in resident buildings, *Energy and Buildings* 65 (2013), 523-528.
- [7] **Bhattachaya, M.**, Building Resilience through Real-life Scenario-based Technology Enhanced Learning Environment Design, Proceedings of *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference*, Sendai, Japan, 2013.
- [8] **O'Brien, W., I. Bennet**, Simulation-Based Evaluation of High-Rise Residential Building Thermal Resilience, *ASHRAE Transactions* 122 (2016), 1, 455-468.
- [9] **Lassandro, P., S. Di Turi**, Energy efficiency and resilience against increasing temperatures in summer: the use of PCM and cool materials in buildings, *International Journal of Heat and Technology* 35 (2017), 307-315.
- [10] **Crawley, D. B., L. K. Lawrie**, Rethinking the TMY: is the 'Typical' Meteorological Year best for Building Performance Simulation?, Proceedings of the *14th international Building Simulation conference*, Hyderabad, India, 2015.
- [11] **Ferrari, D., T. Lee**, Beyond TMY: climate data for specific applications, Proceedings *3rd International Solar Energy Society Conference - Asia Pacific Region*, Sydney, Australia, 2008.
- [12] **Frank, T.**, Climate change impacts on building heating and cooling energy demand in Switzerland, *Energy and Buildings* 37 (2005), 11, 1175-85.
- [13] **Freeman, T. L.**, *Evaluation of the 'Typical Meteorological Years' for Solar Heating and Cooling System Studies - Final Report*, Solar Energy Research Institute, Golden, CO, U.S.A., 1979.
- [14] **Nik, V. M.**, Making energy simulation easier for future climate - Synthesizing typical and extreme weather data sets out of regional climate models (RCMs), *Applied Energy*, 177 (2016), 204-226.
- [15] *** **ASHRAE**, *ASHRAE Standard 90.1-2007, Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, Georgia, USA, 2007.
- [16] **Penna, P., A. Prada, F. Cappelletti, A. Gasparella**, Multi-objective optimization for existing buildings retrofitting under government subsidization, *Science and Technology for the Built Environment*, 21 (2015), 847-861.
- [17] **Nguyen, A.T., S. Reiter, P. Rigo**, A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis, *Applied Energy*, 113 (2014), 1043-1058
- [18] **Deb, K., A. Pratap, S. Agarwal, T.A.M.T. Meyarivan**, A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Transaction on Evolutionary Computation*, 6 (2002), 182-197
- [19] **A. Prada, A. Gasparella, P. Baggio**, On the performance of meta-models in building design optimization, *Applied Energy*, 225 (2018), 814-826.
- [20] **Zitzler, E., L. Thiele**, Multiobjective evolutionary algorithms: A comparative case study and the strength Pareto approach, *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 3 (1999), 257-271.

kgH

