

Usporedba globalne i lokalne analize osjetljivosti na primjeru potrošnje energije u zgradama

Bađun, Nikola

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:884357>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-10-12**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Nikola Bađun

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

doc. dr. sc. Tea Žakula, dipl. ing.

Student:

Nikola Bađun

Zagreb, 2020.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se dr. sc. Tei Žakuli na pruženoj prilici za ulazak u područje energijskog modeliranja i obrađivanja ovako zanimljive teme te na ukazanoj pomoći i konstantnom poticanju tijekom izrade rada i za vrijeme cjelokupnog studija. Također se zahvaljujem dr. sc. Nenadu Ferdeljiju i dr. sc. Saši Mudriniću na dodatnim savjetima, preporukama i ispravcima za vrijeme pisanja ovog rada, kao i dr. sc. Ivi Ugrini na pomoći prilikom razumijevanja matematičkog modela Sobol metode.

Također hvala mojoj obitelji na poticanju tijekom cijelog studija i pisanja rada, a posebno Nini, Luni, Srećku i Ružici koji su uvijek tu, čuvaju mjesto, kuću i pomažu kod stvarno ozbiljnih stvari.

Nikola Bađun



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Nikola Bađun**

Mat. br.: 0130272855

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Usporedba globalne i lokalne analize osjetljivosti na primjeru potrošnje energije u zgradama**

Naslov rada na engleskom jeziku: **A comparison of the global and the local sensitivity analysis illustrated with special reference to energy use in buildings**

Opis zadatka:

Analiza osjetljivosti predstavlja ključnu metodu prilikom energijskih analiza zgrade u cilju rangiranja utjecaja pojedinih parametara na konačan rezultat. Analiza se dijeli na lokalnu i globalnu, pri čemu je osnovna prednost globalne analize to što promatra istovremene varijacije više varijabli te na taj način daje znatno potpuniju informaciju o utjecaju parametara u odnosu na lokalnu analizu, koja u obzir uzima varijaciju samo jedne varijable. Međutim, zbog svoje složenosti i znatno većeg utroška vremena za provođenje simulacija, globalna analiza se vrlo rijetko provodi pri analizama energijskih tokova u zgradama. Cilj rada je usporedba lokalne i globalne analize osjetljivosti na primjeru potrebne energije za grijanje i hlađenje referentne zgrade škole u Republici Hrvatskoj za kontinentalnu klimu. Za meteorološke podatke te podatke o geometriji, sastavu ovojnice i načinu korištenja referentne zgrade koristiti službene podatke Ministarstva graditeljstva i prostornog uređenja. Dinamičku simulaciju energijskih tokova zgrade u ovisnosti o utjecajnim parametrima provesti u detaljnom računalnom programu za energijsko modeliranje, TRNSYS®.

Rad treba sadržavati:

- pregled literature o analizama osjetljivosti u zgradama,
- opis korištenih metoda za analizu osjetljivosti,
- rezultate te zaključke usporedbe lokalne i globalne analize osjetljivosti na zadanoj zgradi.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

16. siječnja 2020.

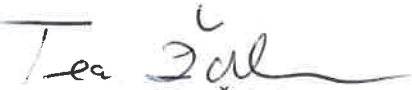
Datum predaje rada:

19. ožujka 2020.

Predviđeni datum obrane:

23. – 27.3.2020.

Zadatak zadala:


doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA	VI
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. ANALIZA OSJETLJIVOSTI – OPĆENITI PREGLED.....	3
2.1. Podjele metoda analize osjetljivosti	4
2.2. Tijek provedbe analize osjetljivosti	5
2.3. Pregled literature	7
3. OPIS REFERENTNOG MODELA ZGRADE.....	11
3.1. Zoniranje zgrade.....	11
3.2. Svojstva zidova	13
3.3. Svojstva prozora.....	15
3.4. Ostali ulazni podaci energijskog modela zgrade.....	17
3.5. Potrebna energija za grijanje i hlađenje referentne zgrade	18
4. OPIS KORIŠTENIH METODA ANALIZE OSJETLJIVOSTI.....	20
4.1. Matematički model lokalne analize osjetljivosti.....	24
4.2. Matematički model Sobol metode.....	26
4.2.1. Princip raščlambe varijance.....	26
4.2.2. Indeksi osjetljivosti.....	28
4.2.3. Generiranje uzorka kod Sobol metode	31
4.2.4. Izračun indeksa osjetljivosti	33
5. OPIS KORIŠTENIH RAČUNALNIH PROGRAMA.....	36
5.1. Računalni program TRNSYS za energijsko modeliranje sustava.....	36
5.2. Računalni program za analizu osjetljivosti SIMLAB	38
5.3. Automatizacija simulacija	40

5.3.1. Stvaranje modela zgrada.....	41
5.3.2. Automatizacija simulacija u TRNSYS korisničkom sučelju TRNEdit.....	45
6. REZULTATI LOKALNE ANALIZE OSJETLJIVOSTI.....	47
6.1. Analiza utjecaja toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova.....	47
6.2. Analiza utjecaja koeficijenta prolaza topline prozora i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora	50
6.3. Analiza utjecaja udjela površine prozora u fasadi.....	53
6.4. Analiza utjecaja infiltracije	57
6.5. Analiza utjecaja unutarnjih toplinskih dobitaka, udjela konvektivnih toplinskih dobitaka te vremena prekida grijanja i hlađenja.....	59
6.6. Sumarni prikaz rezultata lokalne analize	62
6.7. Rangiranje ulaznih varijabli po utjecaju na temelju lokalne metode	65
7. REZULTATI GLOBALNE ANALIZE OSJETLJIVOSTI.....	69
7.1. Indeksi osjetljivosti prvog reda i raščlamba varijance	74
7.2. Indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja	76
7.3. Utjecaj interakcija	79
8. USPOREDBA REZULTATA ANALIZE OSJETLJIVOSTI LOKALNOM I GLOBALNOM METODOM	82
8.1. Usporedba s obzirom na rangiranje ulaznih varijabli po utjecaju.....	82
8.2. Usporedba s obzirom na vrijednosti normaliziranih indeksa osjetljivosti	84
8.3. Konačni zaključci usporedbe lokalne i globalne metode analize osjetljivosti.....	86
9. ZAKLJUČAK	88
10. LITERATURA	91
PRILOZI	94

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema modela s ulaznim i izlaznim varijablama	3
Slika 2. Dijagram toka analize osjetljivosti	5
Slika 3. Dijagram toka odabira metode analize osjetljivosti.....	8
Slika 4. Referentna zgrada stare škole za kontinentalnu klimu u Republici Hrvatskoj [23] ...	11
Slika 5. Tlocrt zgrade škole s podjelom na šest zona	12
Slika 6. Sastav vanjskih zidova referentnog modela zgrade.....	13
Slika 7. Sastav pregradnih zidova referentnog modela zgrade	13
Slika 8. Sastav poda referentnog modela zgrade	14
Slika 9. a) Temperatura okoliša i b) ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu za grad Zagreb	18
Slika 10. Potrebna energija za grijanje i hlađenje referentne zgrade škole	19
Slika 11. Primjer raščlambe varijance za model s 4 ulazne varijable.....	26
Slika 12. Shema stvaranja matrica za primjer s tri ulazne varijable	33
Slika 13. Grafičko povezivanje korištenih komponenti u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio.....	37
Slika 14. Korisničko sučelje računalnog programa SIMLAB	39
Slika 15. Shema provedbe vanjskog modela u TRNSYS-u.....	40
Slika 16. Shema automatizacije provođenja analize osjetljivosti	40
Slika 17. Ovisnost a) toplinskog kapaciteta zida o debljini masivnog sloja, b) koeficijentu prolaza topline zida o debljini izolacijskog sloja	42
Slika 18. Utjecaj promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje	48
Slika 19. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje	51
Slika 20. Slika uz objašnjenje maksimuma potrebne energije za hlađenje u ovisnosti o koeficijentu prolaza topline prozora	53
Slika 21. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u fasadi na potrebnu godišnju energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje	54
Slika 22. Utjecaj promjene vrijednosti udjela površine prozora u fasadi na potrebnu energiju za grijanje kod prozora s a) $U_{\text{zid}} = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $U_{\text{proz}} = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $g_{\text{proz}} = 0,65$	56

Slika 23. Utjecaj promjene vrijednosti infiltracije na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje	58
Slika 24. Utjecaj promjene vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka, udjela konvektivnih toplinskih dobitaka i vremena prekida grijanja i hlađenja na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje	59
Slika 25. Objedinjeni prikaz utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje.....	63
Slika 26. Objedinjeni prikaz utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za hlađenje	64
Slika 27. Objedinjeni prikaz utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	65
Slika 28. Rangiranje ulaznih varijabli i indeksi utjecajnosti za potrebnu energiju za grijanje	66
Slika 29. Rangiranje ulaznih varijabli i indeksi utjecajnosti za potrebnu energiju za hlađenje	67
Slika 30. Rangiranje ulaznih varijabli i indeksi utjecajnosti za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	68
Slika 31. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskog zida	70
Slika 32. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti koeficijenta prolaza topline vanjskog zida.....	70
Slika 33. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora	70
Slika 34. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora.....	71
Slika 35. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela površine prozora na sjevernoj fasadi.....	71
Slika 36. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela površine prozora na istočnoj fasadi.....	71
Slika 37. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela površine prozora na južnoj fasadi	72
Slika 38. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela površine prozora na zapadnoj fasadi	72
Slika 39. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka	72

Slika 40. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela konvektivnih toplinskih dobitaka.....	73
Slika 41. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti infiltracije.....	73
Slika 42. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti vremena prekida grijanja i hlađenja.....	73
Slika 43. Raščlamba varijance potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje	74
Slika 44. Rangiranje ulaznih varijabli prema indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za grijanje.....	77
Slika 45. Rangiranje ulaznih varijabli prema indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za hlađenje	78
Slika 46. Rangiranje ulaznih varijabli prema indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	79
Slika 47. Primjer utjecaja interakcija za promjenu vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja i površine prozora	80
Slika 48. Utjecaj interakcija između ulaznih varijabli na varijancu vrijednosti potrebne energije za grijanje, hlađenje te grijanje i hlađenje zajedno	81
Slika 49. Usporedba rangiranja ulaznih varijabli lokalnom i globalnom metodom po utjecaju na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje.....	82
Slika 50. Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za grijanje.....	85
Slika 51. Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za hlađenje	85
Slika 52. Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	86

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podaci o površinama zona i ostakljenja	12
Tablica 2. Fizikalna svojstva pojedinih slojeva zidova	15
Tablica 3. Fizikalna svojstva zidova za referentni model zgrade	15
Tablica 4. Površine vanjskih zidova i prozora po pripadajućim orijentacijama za referentni model zgrade	16
Tablica 5. Površine prozora po orijentacijama i zonama referentnog modela zgrade	16
Tablica 6. Unutarnji toplinski dobici za referentni model zgrade	17
Tablica 7. Ulazne varijable i pripadajuće distribucije korištene pri globalnoj analizi osjetljivosti	21
Tablica 8. Vrijednosti ulaznih varijabli za lokalnu metodu analize osjetljivosti	23
Tablica 9. Mogući načini izračuna indeksa utjecajnosti lokalnom metodom	24
Tablica 10. Popis oznaka korištenih u jednadžbama i dimenzije matrica	34
Tablica 11. Ulazni parametri za komponentu Type56	37
Tablica 12. Izlazni parametri iz komponente Type56	38
Tablica 13. Ulazni podaci o vremenu rada sustava	44
Tablica 14. Svojstva prozora korištenih pri analizi	45
Tablica 15. Utjecaj promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskih zidova na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	48
Tablica 16. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	49
Tablica 17. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	51
Tablica 18. Utjecaj promjene vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	51
Tablica 19. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u sjevernoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	54
Tablica 20. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u istočnoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	54
Tablica 21. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u južnoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	55
Tablica 22. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u zapadnoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	55

Tablica 23. Utjecaj promjene vrijednosti infiltracije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	58
Tablica 24. Utjecaj promjene vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	60
Tablica 25. Utjecaj promjene vrijednosti udjela konvektivnih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	60
Tablica 26. Utjecaj promjene vrijednosti vremena prekida grijanja i hlađenja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje	60

SAŽETAK

U okviru ovog rada provedena je usporedba lokalne i globalne metode analize osjetljivosti s obzirom na potrebnu godišnju energiju za grijanje i hlađenje referentne zgrade škole za kontinentalnu klimu u Republici Hrvatskoj. Na temelju detaljnog pregleda literature te preporuka za provedeni tip analize kao globalna metoda odabrana je Sobol metoda. Varirane su vrijednosti 12 ulaznih varijabli energijskog modela zgrade: toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova, koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora, udjela površine prozora u sjevernoj, istočnoj, južnoj i zapadnoj fasadi, unutarnjih toplinskih dobitaka, konvektivnog udjela toplinskih dobitaka, infiltracije te vremena prekida rada grijanja i hlađenja. Dinamička simulacija energijskih tokova zgrade provedena je koristeći računalni program za energijsko modeliranje TRNSYS, dok je generiranje uzorka i računanje indeksa osjetljivosti provedeno u računalnom programu SIMLAB. Rezultati dviju metoda uspoređeni su s obzirom na rangiranje ulaznih varijabli po utjecaju te na kvantifikaciju tog utjecaja pripadajućim indeksima osjetljivosti. Kao najutjecajnije varijable na potrebnu energiju za grijanje prepoznate su infiltracija i koeficijent prolaza topline zida, dok su za hlađenje to unutarnji toplinski dobici i stupanj propuštanja prozora. Međutim, redoslijed rangiranja utjecaja varijabli razlikuje se s obzirom na dvije metode. Također, lokalna metoda zahtjeva puno manji broj simulacija (73 kod lokalne naspram 13.312 kod globalne u okviru ovog rada) te su njeni rezultati vizualno jednostavni i pregledni. Međutim, rezultati lokalnom metodom pokazuju izrazitu ovisnost o odabranom referentnom slučaju i ne mogu kvantificirati utjecaj interakcija između varijabli. S druge strane, globalna je metoda neovisna o modelu i referentnom slučaju, a prikazuje rezultate koji uključuju sve moguće kombinacije vrijednosti ulaznih varijabli te se stoga smatra pouzdanijom i sveobuhvatnijom metodom.

Ključne riječi: analiza osjetljivosti, lokalna metoda, globalna Sobol metoda, energijski model zgrade

SUMMARY

In this work, a comparison between the local and the global sensitivity analysis method has been carried out with regard to the annual energy need for heating and cooling of the reference school building for continental climate in Croatia. The values of 12 energy building model inputs have been varied: heat capacity and heat transfer coefficient of the external walls, heat transfer coefficient and solar heat gain coefficient of windows, window-to-wall ratio of the north, east, south and west façades, internal heat gains, convective part of the internal heat gains, infiltration and duration of night hours without heating or cooling. Dynamic simulation of building energy flows has been calculated using TRNSYS energy modelling software, whereas sample generation and the calculation of sensitivity indices has been conducted using SIMLAB software. The results of the two methods have been compared concerning input factor influence ranking and quantification of that influence using normalized sensitivity indices. Infiltration and heat transfer coefficient of the external walls have been recognized as the two most influential inputs concerning heating energy need, whereas internal heat gains and SHGC were most influential inputs concerning cooling energy need. However, the ranking order differs with respect to the two methods. A smaller number of simulations is needed for the local method (73 for the local method compared to 13.312 for the global method) and the results are visually easy to interpret. However, the results of the local method show a distinct dependence on a base case, and cannot quantify the interaction effects among inputs. On the other hand, the Sobol method is model-independent and does not depend upon a base case. Moreover, its results include all possible combinations of input values so it is therefore considered to be a more reliable and robust method.

Key words: sensitivity analysis, local method, global Sobol method, building energy model

1. UVOD

U posljednjim je desetljećima došlo do razvoja raznih metoda energijskih analiza zgrada, kako računalnih programa koje koriste energijske simulacije, tako i proračunskih normi, odnosno standarda kojima se nastoje što točnije izračunati energijske potrebe građevina. Prilikom definiranja modela zgrade potrebno je poznavati vrijednosti brojnih ulaznih parametara, kao što su primjerice podaci o sastavu ovojnice, geometriji zgrade, meteorološki podaci te podaci o načinu i rasporedu korištenja. Pogreške i nesigurnosti prilikom definiranja ulaznih vrijednosti mogu dovesti do većih ili manjih grešaka prilikom određivanja potrebne energije za grijanje i hlađenje. Također, zbog velike složenosti modela proračuna potrebne energije, utjecaj ulaznih varijabli na rezultat najčešće je nepoznat. S druge strane, prilikom rekonstrukcije već postojećih građevina korisno je poznavati parametre čijom će se promjenom najviše utjecati na, primjerice, smanjenje potrebne energije za grijanje i hlađenje i na povećanje energetske učinkovitosti. Analiza osjetljivosti predstavlja ključnu metodu prilikom rangiranja utjecaja ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje, a uključuje promjenu vrijednosti ulaznih varijabli modela i određivanje utjecaja promjene te vrijednosti na konačan rezultat.

Analiza osjetljivosti predstavlja matematički postupak kojim se varijacije vrijednosti izlazne varijable (na primjer, potrebne energije za grijanje i hlađenje u okviru ovog rada) mogu pripisati različitim izvorima varijacija kod vrijednosti ulaznih varijabli [1]. Metode analize osjetljivosti najčešće se dijele na lokalne i globalne metode, pri čemu se kod lokalne mijenja vrijednost samo jedne ulazne varijable, dok se kod globalne mijenja vrijednost svih ulaznih varijabli istovremeno. Glavna prednost globalne metode je neovisnost o referentnom slučaju zgrade i mogućnost određivanja utjecaja međudjelovanja više ulaznih varijabli. Međutim, za globalne metode potreban je znatno veći broj simulacija od lokalne. Također, rezultati dobiveni lokalnom metodom jednostavniji su za razumijevanje i vizualni prikaz, dok je za tumačenje rezultata globalne analize često potrebno dodatno znanje o korištenoj metodi. U okviru ovog rada provedena je analiza literature vezana za analizu osjetljivosti te je za provedbu odabrana globalna Sobol metoda bazirana na raščlambi varijance. Njene su prednosti neovisnost o modelu te visoka pouzdanost rezultata. U radu je također provedena i lokalna metoda analize osjetljivosti s ciljem usporedbe rezultata dvije metode.

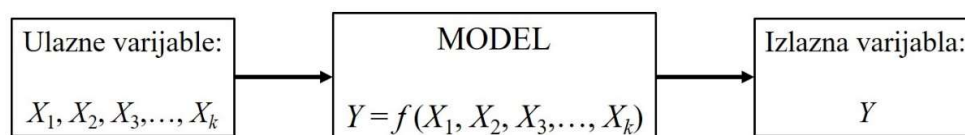
Analize osjetljivosti provedene su za 12 ulaznih varijabli modela izračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje: toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline vanjskih zidova, koeficijent prolaza topline i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora, udio površine

prozora u sjevernoj, istočnoj, južnoj i zapadnoj fasadi, unutarnji toplinski dobici, udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka, infiltracija te vrijeme prekida grijanja i hlađenja. Dvije metode analize osjetljivosti, globalna i lokalna, provedene su na modelu referentne zgrade škole za kontinentalnu klimu u Republici Hrvatskoj. Dinamička simulacija energijskih tokova zgrade provedena je u detaljnom računalnom programu za energijsko modeliranje, TRNSYS. Za generiranje uzorka i računanje indeksa globalne analize osjetljivosti korišten je računalni program za analizu osjetljivosti i nesigurnosti SIMLAB. Izmjena podataka između navedenih programa automatizirana je izradom skripta u računalnim programima PYTHON i MATLAB. Broj provedenih simulacija za lokalnu metodu bio je 73, dok je za globalnu iznosio 13.312 simulacija. Rezultati pojedine metode uspoređeni su na temelju rangiranja utjecaja pojedinih ulaznih varijabli i kvantifikacije tog utjecaja.

2. ANALIZA OSJETLJIVOSTI – OPĆENITI PREGLED

Jedna od najizraženijih prepreka u poboljšanju energetske učinkovitosti zgrada jest nedostatak znanja o parametrima koji najviše utječu na potrošnju energije i povećanje energetske učinkovitosti [2]. Također, nepoznavanje utjecaja pojedinih ulaznih parametara utječe na kvalitetu izračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje korištenjem normi ili računalnih programa kao što su TRNSYS ili EnergyPlus, budući da je prilikom njihovog korištenja potrebno definirati brojne ulazne vrijednosti koje često nisu dostupne ili ih je teško dovoljno točno odrediti. Jedno od mogućih rješenja za prethodno iznesene probleme predstavlja analiza osjetljivosti energijskih modela zgrada koja omogućuje rangiranje ulaznih varijabli s obzirom na njihov utjecaj na rezultat te kvantifikaciju intenziteta tog utjecaja.

U svrhu definicije analize osjetljivosti potrebno je definirati pojmove modela te ulaznih i izlaznih varijabli. Na Slici 1 prikazana je općenita shema modela za koji se želi provesti analiza osjetljivosti. Model je predstavljen kao funkcija k ulaznih varijabli $X_1, X_2, \dots, X_k$ čijom se provedbom može izračunati vrijednost izlazne varijable Y . Primjerice, ukoliko se želi izračunati potrebna godišnja energija za grijanje, ulazne varijable bile bi geometrija zgrade, klimatski elementi, svojstva ovojnice te način korištenja zgrade. Model bi bila norma (skup jednadžbi) za proračun energijskih potreba građevine ili računalni program za provođenje energijskih simulacija zgrada. Budući da vrijednost izlazne varijable ovisi o vrijednostima ulaznih varijabli, svaka promjena vrijednosti neke od ulaznih varijabli uzrokovat će promjenu vrijednosti izlazne varijable. Ukoliko se ta promjena može numerički odrediti, tada se može odrediti i osjetljivost promjene izlazne varijable Y na promjenu vrijednosti ulazne varijable [3]. Iz prethodne rečenice proizlazi i definicija analize osjetljivosti kao matematičkog postupka kojim se varijacije vrijednosti izlazne varijable modela mogu pripisati različitim izvorima varijacije vrijednosti ulaznih varijabli [1].



Slika 1. Shema modela s ulaznim i izlaznim varijablama

Provođenje analize osjetljivosti omogućuje definiranje ulaznih varijabli modela na čije se određivanje vrijednosti važno usredotočiti prilikom izračuna izlazne varijable kako bi se smanjila nesigurnost dobivenog rezultata [4]. Također, analiza osjetljivosti omogućuje i

utvrđivanje ulaznih varijabli koje nemaju gotovo nikakav utjecaj na vrijednost rezultata, čime se izbjegavaju precizna utvrđivanja njihovih vrijednosti u budućim izračunima. Osim pri evaluacijama modela za izračun potrebne energije za grijanje i hlađenje, analiza osjetljivosti može se koristiti i na već postojećim zgradama sa svrhom odabira mjera poboljšanja ili prilikom definiranja najpovoljnijih građevinskih zahvata s ciljem optimizacije energijskih potreba građevine.

2.1. Podjele metoda analize osjetljivosti

Postoje brojne metode analize osjetljivosti i mogu se podijeliti na različite načine, pri čemu je najčešća podjela na lokalne i globalne metode. Lokalne metode uključuju variranje vrijednosti jedne od ulaznih varijabli i određivanja njenog utjecaja na vrijednost izlazne varijable. Nazivaju se lokalne metode budući da se vrijednosti ostalih ulaznih varijabli (koje nisu predmet analize) drže konstantnima u svim evaluacijama modela. Odnosno, kod lokalnih se metoda promatra utjecaj varijacije jedne od ulaznih varijabli oko referentnog slučaja. Lokalna metoda često se naziva i OAT pristup (eng. *one-at-a-time*) budući da se utjecaj svake od ulaznih varijabli određuje zasebno [1]. Matematički gledano, lokalna metoda može se shvatiti i kao parcijalna derivacija izlazne varijable po promatranoj ulaznoj varijabli, $\partial Y / \partial X_i$. Za razliku od lokalne, kod globalnih metoda variraju se vrijednosti svih ulaznih varijabli istovremeno. Iz tog se razloga globalne metode smatraju pouzdanijim metodama od lokalnih budući da ne ovise o odabranom referentnom slučaju i uključuju utjecaje međudjelovanja između ulaznih varijabli pri različitim kombinacijama njihovih vrijednosti. Podjeli na lokalne i globalne metode često se može pridodati i treća skupina orijentacijskih metoda koje najčešće uključuju grafičke interpretacije rezultata sa svrhom smanjenja velikog broja ulaznih varijabli [5].

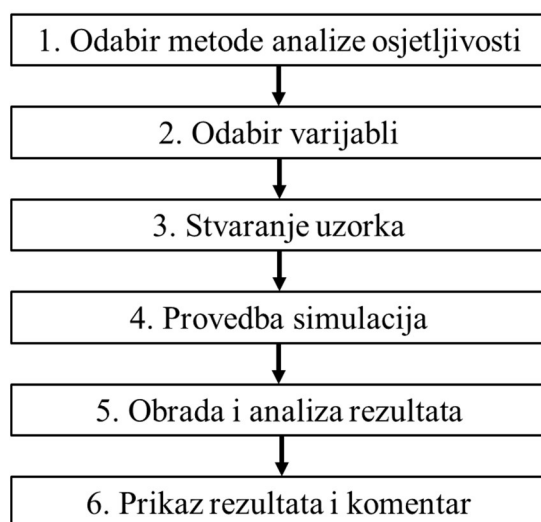
Drugačiji način podjele metoda analize osjetljivosti temelji se na pristupu analizi te se prema [6] mogu podijeliti na matematički, statistički i grafički pristup. Matematičke metode procjenjuju osjetljivost izlazne varijable na određenom rasponu vrijednosti ulazne varijable. Obično uključuju izračun vrijednosti izlazne varijable za nekoliko vrijednosti ulazne, tako da se najčešće poistovjećuju s lokalnom metodom. Statističke metode uključuju većinu globalnih metoda analize, a temelje se na izračunu izlazne varijable za različite vrijednosti svih ulaznih varijabli. Pri tome su vrijednosti ulaznih varijabli generirane iz pripadajućih distribucija ili raspona vrijednosti nasumičnim odabirom. Statistički pristup spada u širu grupu Monte Carlo metoda, pri čemu Monte Carlo metoda uključuje nasumično generiranje vrijednosti ulaznih varijabli, svaku prema njenoj definiranoj distribuciji, i provedbu modela za različite

kombinacije ulaznih varijabli. Grafički pristup predočuje rezultate analize osjetljivosti kroz različite dijagrame i može se koristiti kao metoda koja prethodi nekoj globalnoj metodi sa svrhom smanjenja broja utjecajnih ulaznih varijabli. Također, može se koristiti i u kombinaciji s nekom od globalnih metoda kao vizualni, a time i zorniji prikaz rezultata, te kao potvrda valjanosti rezultata statističkih metoda.

Prema [4] metode analize osjetljivosti mogu se podijeliti u tri grupe: metode koje uključuju variranje vrijednosti jedne ulazne varijable (lokalne metode), metode koje uključuju generiranje uzorka iz distribucije vrijednosti ulaznih varijabli (većina globalnih metoda) te metode koje uključuju podjelu domene vrijednosti ulaznih varijabli i provedbu globalne analize osjetljivosti za svaku od subdomena zasebno (metode koje se koriste za specifična istraživanja).

2.2. Tijek provedbe analize osjetljivosti

Na Slici 2 prikazan je općeniti dijagram toka provedbe analize osjetljivosti koji vrijedi neovisno o odabranoj metodi. Prvi je korak odabir metode pri čemu je potrebno provesti analizu literature kako bi se ustanovilo koja je metoda najpogodnija za specifične ciljeve analize. Primjerice, ukoliko se želi analizirati model s mnogo ulaznih varijabli čije je ponašanje u potpunosti nepoznato, može se započeti s nekom od orijentacijskih metoda koja će eliminirati veliki broj ulaznih varijabli i proglasiti ih nevažnim. Nakon toga se, primjerice, može primijeniti neka od globalnih ili lokalnih metoda sa svrhom detaljnijeg razumijevanja dotičnog modela.



Slika 2. Dijagram toka analize osjetljivosti

Nakon odabira metoda analize osjetljivosti potrebno je odabrati ulazne varijable za koje se želi ispitati osjetljivost modela. Odabir ulaznih varijabli provodi se na temelju prethodnog

istraživanja ili iskustva analitičara o varijablama koje bi mogle imati određeni utjecaj na vrijednost željene izlazne varijable modela. Međutim, prilikom odabira varijabli potreban je dodatan oprez budući da ne mogu sve metode analize osjetljivosti analizirati sve vrste ulaznih varijabli. Primjerice, kod mnogih se metoda izbjegava utvrđivanje osjetljivosti za međusobno zavisne ulazne varijable. Zavisne varijable su one kod kojih promjena vrijednosti jedne varijable uzrokuje promjenu vrijednosti druge varijable. Kao primjer u okviru energijskih simulacija zgrada, mogao bi se javiti problem ukoliko bi se kao ulazne varijable odabrale toplinska provodnost materijala zida i koeficijent prolaza topline zida, budući da promjena toplinske provodnosti uzrokuje promjenu koeficijenta prolaza topline.

Nakon definiranja ulaznih varijabli za koje se želi provesti analiza osjetljivosti potrebno je izraditi uzorak (eng. *sample*). Uzorak jest matrica $\mathbf{X}$ s N redaka i k stupaca prikazana jednadžbom (1) pri čemu N predstavlja ukupan broj provedbe modela (simulacija), a k broj odabranih ulaznih varijabli. Ukupan broj provedbe modela N u literaturi se često naziva i računalni trošak analize osjetljivosti (eng. *computational cost*) budući da je direktno vezan na vrijeme trajanja analize. Svaki stupac matrice $\mathbf{X}$ predstavlja jednu ulaznu varijablu, dok svaki redak matrice predstavlja skup vrijednosti ulaznih varijabli za koji se želi izračunati vrijednost izlazne varijable modela, odnosno izračunati funkciju $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$. Nakon provedbe modela za svaki redak matrice $\mathbf{X}$ dobiva se vrijednost izlazne varijable Y u obliku matrice $N \times 1$ prikazane jednadžbom (2). U ovisnosti o odabranoj metodi analize osjetljivosti provodi se obrada i analiza rezultata, kao i njihov prikaz i komentar.

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} X_1^{(1)} & X_2^{(1)} & \dots & X_k^{(1)} \\ X_1^{(2)} & X_2^{(2)} & \dots & X_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{(N)} & X_2^{(N)} & \dots & X_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

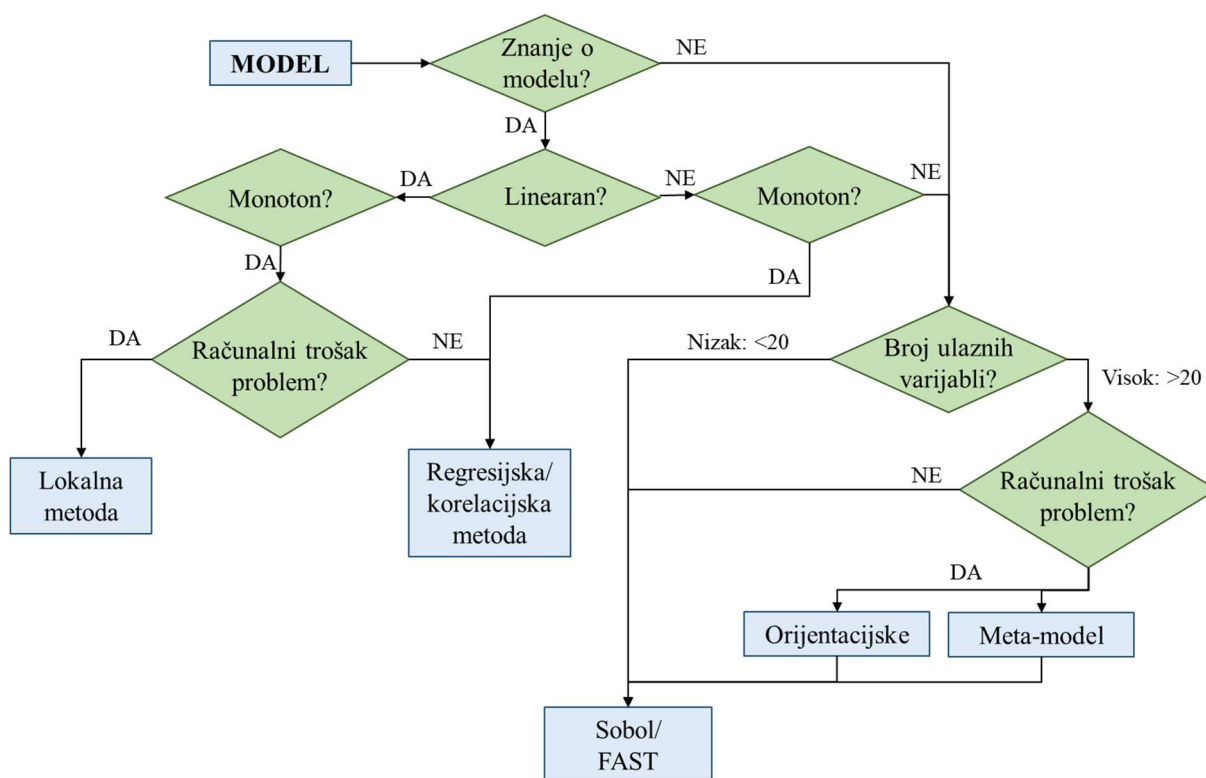
$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y^{(1)} \\ Y^{(2)} \\ \dots \\ Y^{(N)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.3. Pregled literature

U nastavku je dan pregled literature o analizama osjetljivosti u kontekstu energijskih simulacija zgrada, pri čemu je podijeljen na dva dijela. Prvi se dio tiče odabira metode analize osjetljivosti, dok su u drugom dijelu dani primjeri korištenja odabranih metoda u kontekstu energijskih simulacija zgrada.

Prvi korak provedbe analize osjetljivosti odnosi se na odabir metode. Na Slici 3 prikazan je dijagram toka odabira metode preuzet iz [7]. Pri tome ključne karakteristike modela za odabir metode predstavljaju linearnost i monotonost modela te prihvatljiv računalni trošak. Model je linearan ukoliko je odnos izlazne i ulazne varijable modela konstantna vrijednost, odnosno ukoliko se ta ovisnost može prikazati linearnom funkcijom. Monotonost modela očituje se u stalnom rastu ili padu vrijednosti izlazne varijable na promatranom intervalu ulaznih varijabli. Drugim riječima, monotonost predstavlja konstantan predznak derivacije modela (funkcije) u ovisnosti o ulaznoj varijabli. Lokalna metoda koristi se u slučaju da je model linearan i monoton te ukoliko računalni trošak izvođenja simulacija predstavlja problem. Za sve ostale slučajeve preporuča se provedba globalne analize osjetljivosti. Prema [8] globalne metode analize osjetljivosti dodatno se mogu podijeliti na regresijske, orijentacijske, meta-model metode i metode bazirane na raščlambi varijance. Regresijske metode bazirane su na linearnoj analizi i pogodne su za linearne modele. Ukoliko model nije linearan, regresijske metode daju približno točne rezultate, ali pod uvjetom da je model monoton. Najčešće korištene regresijske metode su PEAR, metoda standardiziranih regresijskih koeficijenata (SRC) i metoda parcijalnih regresijskih koeficijenata (PCC) [9]. Za korištenje regresijskih metoda preporuča se provjera hipoteze linearnosti modela [10], pri čemu se, na primjer, R^2 vrijednost od 0,7 često postavlja kao granica za procjenu pouzdanosti regresijskih metoda [11]. Ukoliko je model nelinearan i nemonoton potrebno je korištenje metoda baziranih na raščlambi varijance koje uključuju Sobol i FAST metodu [10]. Pri tome raščlamba varijance predstavlja određivanje utjecaja varijacije vrijednosti ulaznih varijabli na varijancu izlazne varijable modela. Iz tog se razloga ove metode nazivaju ANOVA (ANalysis Of the VAriance) pristup. Računalno su najzahtjevnije, te se, ukoliko to predstavlja problem, preporuča preliminarno korištenje orijentacijskih ili meta-model metoda s ciljem smanjenja velikog broja ulaznih varijabli. Najčešće korištena i najmanje računalno zahtjevnja orijentacijska metoda je Morris metoda kod koje se, za razliku od lokalne metode, u svakoj evaluaciji modela mijenja referentni slučaj. FAST metoda računalno je manje zahtjevnja od Sobol metode, ali sklona sustavnim odstupanjima (eng. *systematic bias*) te stoga manje pouzdana [12]. Također, FAST metoda se ne preporuča ukoliko su vrijednosti ulaznih varijabli zadane diskretno, pogotovo ukoliko je

broj diskretno zadanih vrijednosti malen budući da to može dovesti do diskontinuiteta u rezultatima [13]. Sobol metoda smatra se najpouzdanijom metodom analize osjetljivosti te se često koristi kao referentna metoda u odnosu na koju su uspoređivani rezultati ostalih metoda [14]. Iz tog je razloga Sobol metoda izabrana kao referentna i u okviru ovog rada. S obzirom da je često vrlo zahtjevno procijeniti točnost rezultata analize osjetljivosti, preporuča se provedba dvije fundamentalno različite metode analize osjetljivosti za određeni problem i usporedba rezultata [15]. Iz tog je razloga u okviru ovog rada odabrana najjednostavnija lokalna metoda analize osjetljivosti čiji su rezultati uspoređeni s globalnom Sobol metodom. U nastavku je dan kratak pregled literature u kojoj je korištena lokalna ili globalna Sobol metoda analiza osjetljivosti te njihovi rezultati.



Slika 3. Dijagram toka odabira metode analize osjetljivosti

Prema [9] ulazne varijable čiji se utjecaj najčešće određuje prilikom analize osjetljivosti energijskih modela zgrada su klima (meteorološki podaci), svojstva ovojnice i prozora, geometrija zgrade, infiltracija te rasporedi i režimi korištenja zgrade. U [16] provedena je lokalna analiza osjetljivosti s jednim pomakom vrijednosti za svaku od početnih 139 varijabli (ukupno 140 simulacija) s ciljem smanjenja broja ulaznih varijabli na 10 najutjecajnijih. Za preostalih 10 varijabli naknadno je provedena globalna Sobol analiza osjetljivosti. S obzirom

na varijaciju vrijednosti unutarnje temperature zraka u režimu grijanja najutjecajnije varijable bile su infiltracija, debljina izolacije i unutarnji toplinski dobici. U [17] provedene su lokalna i globalna Sobol metoda analize osjetljivosti na testnoj višekatnoj uredskoj zgradi za 4 različita tipa klime u Iranu. Izlazne varijable modela bile su potrebna godišnja energija za grijanje, potrebna godišnja energija za hlađenje te njihova suma, dok su ulazne varijable bile orijentacija zgrade, površine prozora te skup varijabli povezanih s toplinskim svojstvima zidova i prozora. S obzirom na rezultate globalne analize osjetljivosti najutjecajnije varijable na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje bile su orijentacija i površina prozora. Međutim, usporedbom rezultata lokalne i globalne analize zaključeno je da je rangiranje utjecaja varijabli lokalnom metodom neodgovarajuće zbog kompleksnosti i nelinearnosti energijskog modela zgrade. Usporedba variranja utjecajnih varijabli Sobol, Morris i lokalnom metodom provedena je u [18], pri čemu je izlazna varijabla bila potrebna energija za grijanje i hlađenje. Tri najutjecajnije varijable za dvije globalne metode bile su infiltracija, korisna površina i koeficijent prolaza topline vanjskih zidova, dok je kod lokalne najveći utjecaj predstavljala postavna temperatura, nakon koje slijede infiltracija i korisna površina. U radu je zaključeno kako je Sobol metoda najpouzdanija i kako se njeno korištenje preporuča u analizama koje zahtijevaju visoku točnost te velike raspone vrijednosti diskretno ili kontinuirano zadanih ulaznih varijabli. S druge strane, zaključeno je kako je lokalna metoda pogodna za korištenje prilikom identificiranja nekoliko najutjecajnijih varijabli iz velikog skupa ulaznih varijabli.

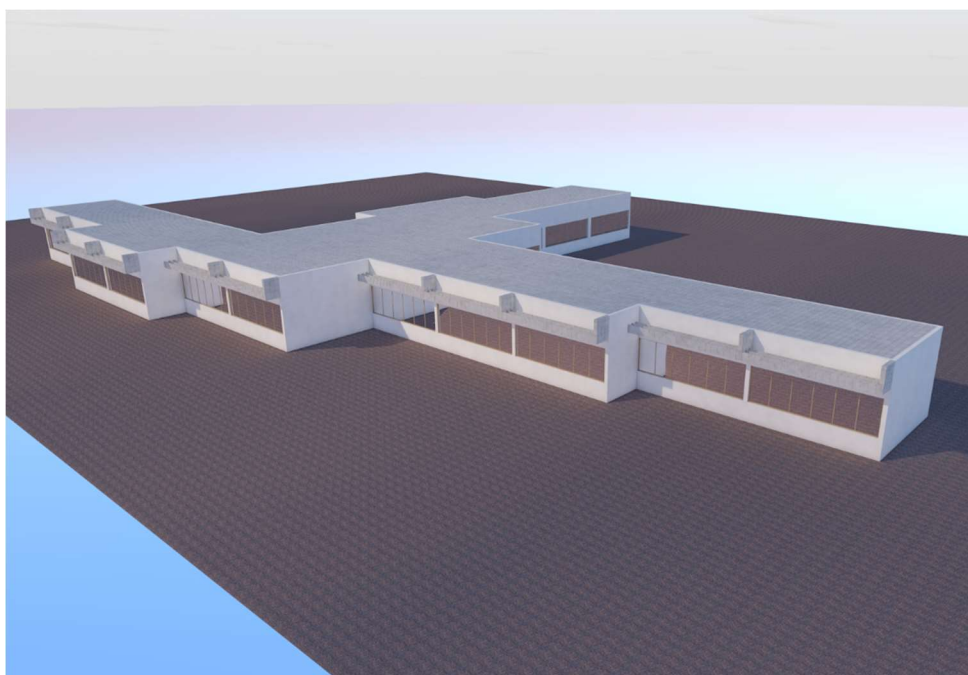
Lokalna analiza osjetljivosti na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje provedena je na uredskoj zgradi za 5 različitih tipova klima u Kini [19]. Ulazne varijable podijeljene su u 3 kategorije: ovojnica zgrade, unutarnji toplinski dobici te karakteristike sustava grijanja i hlađenja. Za hladnije klime najutjecajnije varijable bile su koeficijent prolaza topline zida i prozora te infiltracija. Za toplije klime dobiveni su drugačiji rezultati, pri čemu su varijable čije variranje najviše doprinosi promjeni potrebne energije za grijanje i hlađenje bile udio površine prozora u fasadi, stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora te unutarnji toplinski dobici. U [20] provedena je lokalna analiza osjetljivosti varijabli ovojnice na industrijskoj zgradi s obzirom na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Varirane su vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora, zida i krova, te udio prozora u fasadi za cijelu zgradu. Zaključeno je da koeficijent prolaza topline prozora ima manji utjecaj na potrebnu energiju od koeficijenta prolaza topline zida i krova. Utjecaj udjela površine prozora u fasadi pokazuje nelinearne karakteristike s optimalnom vrijednošću (minimum potrebne energije) za udio prozora u fasadi u iznosu od 14%.

Sobol metoda korištena je u [21] na uredskoj zgradi pri čemu je izlazna varijabla bila potrebna energija za grijanje i hlađenje. Analiziran je utjecaj toplinskih karakteristika zidova i prozora, unutarnjih toplinskih dobitaka, postavne temperature grijanja i hlađenja te COP rashladnog sustava. Najutjecajnije varijable na potrebnu energiju za grijanje bile su gustoća stanovanja (m^2/osobi), koeficijent prolaza topline zida te postavna temperatura, dok su za hlađenje to stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora i COP rashladnog sustava. U [2] provedena je Sobol metoda na testnoj zgradi za 6 različitih europskih klima, pri čemu je izlazna varijabla bila godišnja potrošnja energije sustava grijanja i hlađenja. Analiza je provedena za 68 ulaznih varijabli. Koeficijent prolaza topline zida i koeficijent prolaza topline prozora prepoznate su kao dvije najutjecajnije varijable, pri čemu je njihov utjecaj manje izražen kod toplijih klima, a više kod hladnijih. Dodatan naglasak odnosi se na odabir raspona vrijednosti ulaznih varijabli, budući da u nekim slučajevima pogrešno odabran raspon može dati netočne rezultate analize osjetljivosti. Analiza osjetljivosti Sobol metodom provedena je za zgrade različite namjene u [22], pri čemu su varirane vrijednosti površina prozora, infiltracije, toplinskih svojstava zidova i prozora, postavne temperature te režimi rada sustava grijanja i hlađenja. Najutjecajnije varijable na potrebnu energiju za grijanje su toplinska svojstva ovojnice i infiltracija. Pri tome je utjecaj stupnja propuštanja Sunčevog zračenja kroz ostakljenje najviše izražen kod stambenih zgrada, a infiltracija kod bolnica. Kod potrebne energije za hlađenje daleko najveći utjecaj ima postavna temperatura hlađenja, ponajviše kod bolnica. Od utjecaja preostalih varijabli može se izdvojiti udio površine prozora u fasadi i koeficijent prolaza topline prozora, posebice u obrazovnim i uredskim zgradama.

Na temelju analize literature odabrane su ulazne varijable za analizu osjetljivosti korištene u okviru ovog rada. Od toplinskih svojstava zidova i prozora analizirani su utjecaji koeficijenta prolaza topline zida i prozora, stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora te toplinskog kapaciteta vanjskog zida. Utjecaj površine prozora ispitivan je promjenom vrijednosti udjela površine prozora u fasadi za sve četiri strane svijeta. Infiltracija i unutarnji toplinski dobitci odabrani su zbog čestog pojavljivanja u literaturi kao utjecajnih varijabli. Dodatne dvije varijable korištene u analizi su udio konvektivnih toplinskih dobitaka i vrijeme prekida rada sustava grijanja i hlađenja. Rasponi vrijednosti s pripadajućim referencama za svaku od ulaznih varijabli dani su u poglavlju 4.

3. OPIS REFERENTNOG MODELA ZGRADE

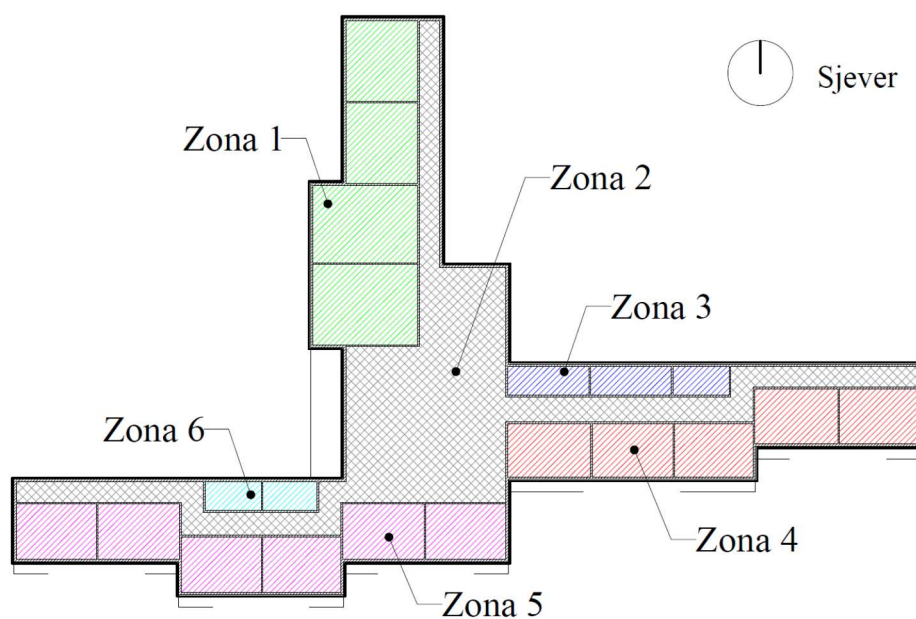
Kao referentni model za analizu osjetljivosti u okviru ovog rada modelirana je referentna zgrada škole za kontinentalnu klimu u Republici Hrvatskoj izgrađena u razdoblju između 1970. i 1987. godine (Slika 4). Zgrada je orijentirana u smjeru sjever-jug-istok-zapad te ima ostakljene površine na sve četiri strane svijeta. Duljina zgrade u smjeru istok-zapad iznosi 110 m, dok širina u smjeru sjever-jug iznosi 70 m. Visina zgrade iznosi 4,5 m. Na vrhu zgrade nalazi se ravni krov ukupne tlocrtne površine u iznosu od 2.260 m². Ukupna korisna površina škole iznosi 2.086 m².



Slika 4. Referentna zgrada stare škole za kontinentalnu klimu u Republici Hrvatskoj [23]

3.1. Zoniranje zgrade

Zgrada je podijeljena na šest proračunskih zona prema preporukama danih u [24], a podjela je prikazana na tlocrtu prema Slici 5. Zone se razlikuju po površinama, namjeni i orijentaciji pri čemu su zone 1, 4 i 5 prostori učionica ili kabineta, zona 2 predstavlja hodnik koji se proteže kroz cijelu zgradu, dok zone 3 i 6 predstavljaju manje prostorije namijenjene za sanitarne čvorove. Zone 4 i 5 su svojim većim dijelom orijentirane prema jugu, zone 3 i 6 prema sjeveru, zona 1 prema zapadu, dok zona 2 zbog svoje razvedenosti ima vanjske površine na zapadnoj, sjevernoj i istočnoj strani. U Tablici 1 prikazane su vrijednosti korisne površine poda svake zone, orijentacije, površine vanjskih zidova prema stranama svijeta i površine prozora. Za svaku je zonu i orijentaciju prikazan udio površine prozora u vanjskoj fasadi.



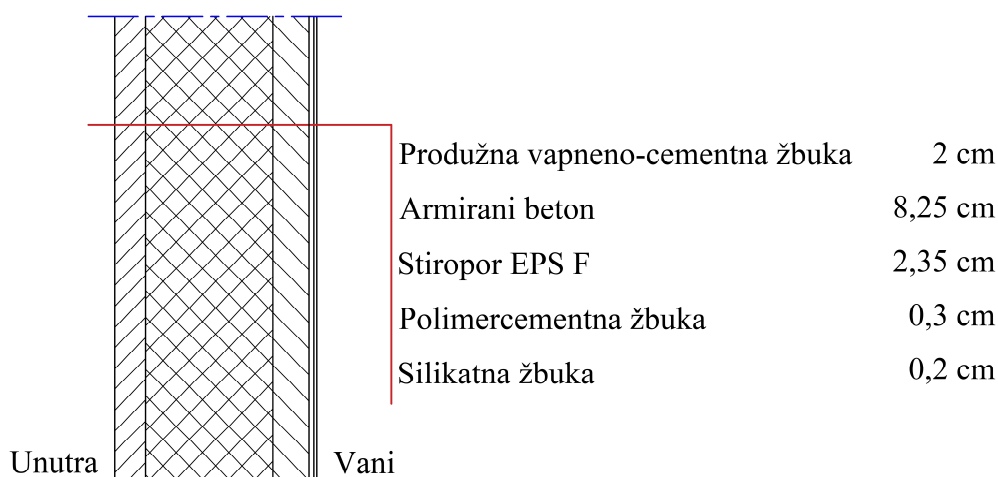
Slika 5. Tlocrt zgrade škole s podjelom na šest zona

Tablica 1. Podaci o površinama zona i ostakljenja

Naziv zone	Korisna površina [m ²]	Orijentacija	Površina vanjskog zida [m ²]	Površina prozora [m ²]	Udio prozora u fasadi [%]
Zona 1	414,4	Sjever	59	-	-
		Jug	18	-	-
		Zapad	180	95,5	53
Zona 2	818,3	Sjever	270,9	162,3	59,9
		Istok	215,1	129,5	60,2
		Zapad	85,1	61,9	72,8
Zona 3	92,8	Sjever	121,1	71	58,6
Zona 4	322,4	Istok	50	27,9	55,9
		Jug	225	116,4	51,8
Zona 5	391,3	Istok	50	-	-
		Jug	270	139,7	51,8
		Zapad	50	-	-
Zona 6	46,9	Sjever	62,1	23,7	38,1
UKUPNO:	2.086	-	1.656	827,9	50

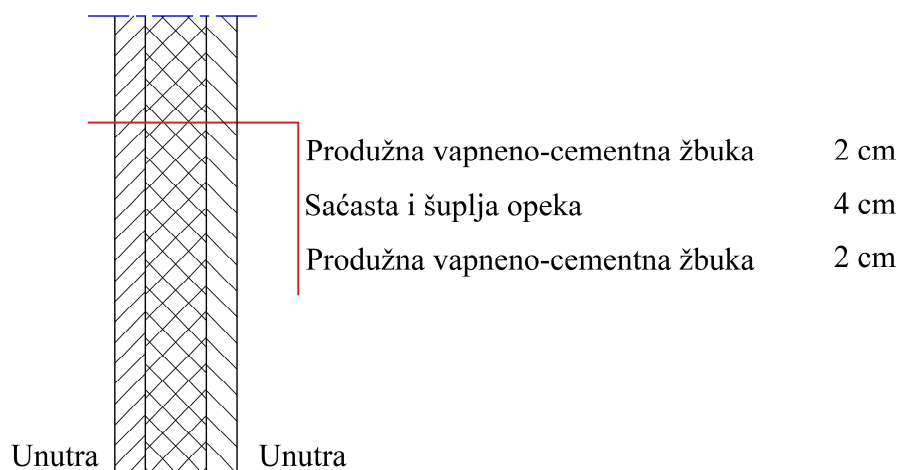
3.2. Svojstva zidova

Na Slici 6 prikazan je sastav vanjskih zidova zgrade škole. S unutarnje strane zida nalazi se sloj produžne vapneno-cementne žbuke debljine 2 cm. Masivni dio zida čini sloj od 8,25 cm armiranog betona, dok izolacijski sloj zida debljine 2,35 cm čini stiropor EPS F. S vanjske strane zida nastavlja se sloj polimercementne žbuke debljine 0,3 cm i sloj silikatne žbuke debljine 0,2 cm.



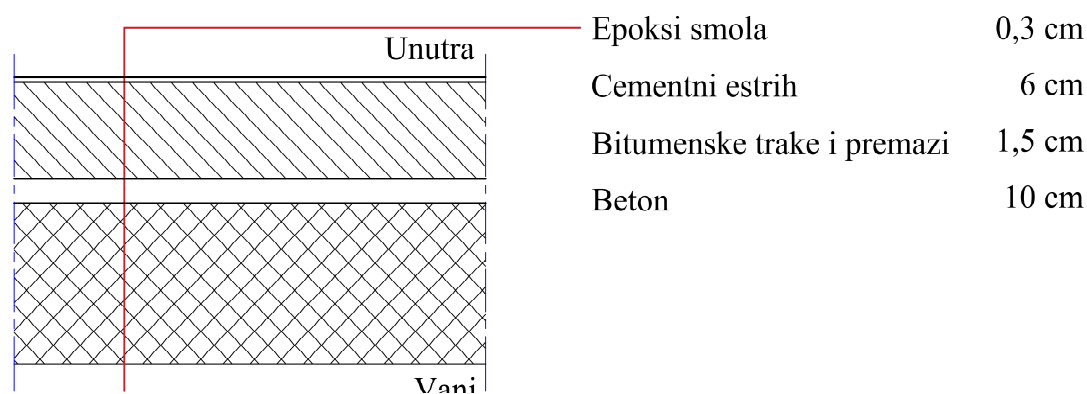
Slika 6. Sastav vanjskih zidova referentnog modela zgrade

Masivni sloj pregradnih zidova načinjen je od saćaste i šuplje opeke debljine 4 cm. Sa svake strane opeke nalazi se sloj produžne vapneno-cementne žbuke debljine 2 cm. Shematski prikaz slojeva pregradnih zidova prikazan je na Slici 7.



Slika 7. Sastav pregradnih zidova referentnog modela zgrade

Temelji zgrade izrađeni su od betona debljine 10 cm. Na beton se nastavljaju bitumenske višeslojne trake i bitumenski premazi debljine 1,5 cm, na što je postavljen sloj od 6 cm cementnog estriha. Posljednji sloj prema unutra je sloj epoksi smole debljine 0,3 cm. Shematski prikaz sastava poda prikazan je na Slici 8. Prilikom proračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje u obzir nije uzet sloj betona u sastavu poda.



Slika 8. Sastav poda referentnog modela zgrade

S unutrašnje strane ravnog krova nalazi se sloj produžne vapneno-cementne žbuke debljine 2 cm te masivni sloj armiranog betona debljine 8,25 cm. Izolacijski sloj sastoji se od 2,35 cm stiropora EPS F. Posljednja dva sloja s vanjske strane su sloj polimercementne žbuke debljine 0,3 cm i sloj silikatne žbuke debljine 0,2 cm. Ravni krov je modeliran s istim sastavom kao i vanjski zid, a kako bi sve površine koje graniče s vanjskim zrakom bile jednakog sastava, odnosno jednakog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline. Shematski prikaz sastava slojeva ravnog krova jednak je vanjskom zidu prikazanom na Slici 6.

U prethodnim odlomcima definirano je ukupno deset različitih slojeva zidova: armirani beton, beton, bitumenska traka i premazi, cementni estrih, epoksi smola, polimercementna žbuka, produžna vapneno-cementna žbuka, saćasta i šuplja opeka, silikatna žbuka te stiropor EPS F. U Tablici 2 prikazane su vrijednosti toplinske provodnosti, specifičnog toplinskog kapaciteta i gustoće svakog od korištenih slojeva zgrade. Fizikalna svojstva slojeva kao i vrijednosti debljina pojedinih slojeva koriste se za izračun koeficijenta prolaza topline i toplinskog kapaciteta pojedine vrste zida prikazanih u Tablici 3. Prilikom računanja koeficijenata prolaza topline korištene su vrijednosti koeficijenta prijelaza topline s vanjske strane zida u iznosu od $20 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ i koeficijenta prijelaza topline s unutarnje strane zida u iznosu od $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

Tablica 2. Fizikalna svojstva pojedinih slojeva zidova

Sloj	Toplinska provodnost, λ [W/(m K)]	Specifični toplinski kapacitet, c [J/(kg K)]	Gustoća, ρ [kg/m ³]
Armirani beton	2,6	1.000	2.500
Beton	1,35	1.000	2.000
Bitumenska traka i premazi	0,17	1.000	1.050
Cementni estrih	1,6	1.100	2.000
Epoksi smola	0,2	1.400	2.000
Polimercementna žbuka	0,7	1.000	1.100
Produžna vapneno-cementna žbuka	1	1.000	1.800
Saćasta i šuplja opeka	0,61	920	1.400
Silikatna žbuka	0,87	1.050	1.850
Stiropor EPS F	0,039	1.260	15

Tablica 3. Fizikalna svojstva zidova za referentni model zgrade

Vrsta zida	Koeficijent prolaza topline, U_{zid} [W/(m ² K)]	Kapacitet zida izražen po jedinici površine, C_{zid} [J/(m ² K)]
Vanjski zid	0,9	250.000
Pregradni zid	1,1	123.520
Pod	-	152.790
Ravni krov	0,9	250.000

3.3. Svojstva prozora

U Tablici 4 prikazane su vrijednosti površina vanjskih zidova i prozora kao i udio prozora u fasadi za sve četiri orijentacije zgrade. Površine prozora definirane su za referentni slučaj na način da udio površine prozora u površini vanjskih zidova za svaku pojedinu orijentaciju iznosi 50%. Zadnji stupac tablice predstavlja maksimalno mogući udio prozora u fasadi, odnosno onaj postotak koji bi se dobio ukoliko bi cijeli vanjski zidovi zona koje imaju prozore na dotičnoj strani bili ostakljeni. Razlog zbog kojeg udio ostakljenja ne može biti veći jest postojanje zona koje imaju vanjske zidove, a nemaju prozore za tu orijentaciju. Primjerice,

prema Tablici 1 zona 1 ima vanjski zid prema jugu površine 18 m², ali nema definirane prozore na toj strani. U Tablici 5 prikazane su površine prozora za svaku orijentaciju, ali po pojedinim zonama. Najveći prozor površine 162,3 m² nalazi se u zoni 2 i orijentiran je na sjevernu stranu, dok se najmanji prozor površine 23,7 m² nalazi u zoni 6 i također je orijentiran na sjevernu stranu.

Tablica 4. Površine vanjskih zidova i prozora po pripadajućim orijentacijama za referentni model zgrade

Orijentacija [-]	Površina vanjskih zidova [m ²]	Površina prozora [m ²]	Udio prozora u fasadi [%]	Maksimalni udio prozora u fasadi [%]
Sjever	513	256,9	50	88,5
Istok	315	157,4	50	84,1
Jug	513	256,2	50	96,5
Zapad	315	157,4	50	84,1
Ukupno	1.656	827,9	50	89,3

Tablica 5. Površine prozora po orijentacijama i zonama referentnog modela zgrade

Orijentacija	Zona	Površina prozora [m ²]	Ukupna površina prozora [m ²]
Sjever	Zona 2	162,3	256,9
	Zona 3	71	
	Zona 6	23,7	
Istok	Zona 2	129,5	157,4
	Zona 4	27,9	
Jug	Zona 4	116,4	256,2
	Zona 5	139,7	
Zapad	Zona 1	95,5	157,4
	Zona 2	61,9	

Svi prozori na referentnoj zgradi dvostrukih su stakala, nazivnog koeficijenta prolaza topline od 2,81 W/(m² K) prema standardima EN410 i EN/673 (pri unutarnjoj temperaturi od

20°C, vanjskoj temperaturi 0°C, koeficijentu prijelaza topline s unutarnje strane od 8 W/(m² K) te koeficijentu prijelaza topline s vanjske strane od 23 W/(m² K)). Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora iznosi 0,54 te je definiran prema istom standardu, odnosno pri unutarnjoj temperaturi od 25°C, vanjskoj temperaturi od 30°C, direktnom Sunčevom zračenju od 500 W/m² te jednakim koeficijentima prijelaza topline kao i kod određivanja koeficijenta prolaza topline prozora.

3.4. Ostali ulazni podaci energijskog modela zgrade

Na temelju pregleda literature određeni su rasponi vrijednosti svake od ulaznih varijabli za analizu osjetljivosti opisani kasnije u poglavlju 4, te su za referentni slučaj definirane srednje vrijednosti. Za svaku je zonu definirana vrijednost infiltracije od 1,5 h⁻¹, dok je period korištenja zgrade pretpostavljen od 3 sati ujutro do 21 sat navečer (prekid rada sustava grijanja i hlađenja iznosi 6 h), isključujući vikende. O rasporedu ovise i unutarnji toplinski dobici zgrade koji su pretpostavljeni na 22 W/m² za svaku od zona. Vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka po zonama prikazane su u Tablici 6. Udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka iznosi 40%, dok je udio unutarnjih toplinskih dobitaka zračenjem 60%.

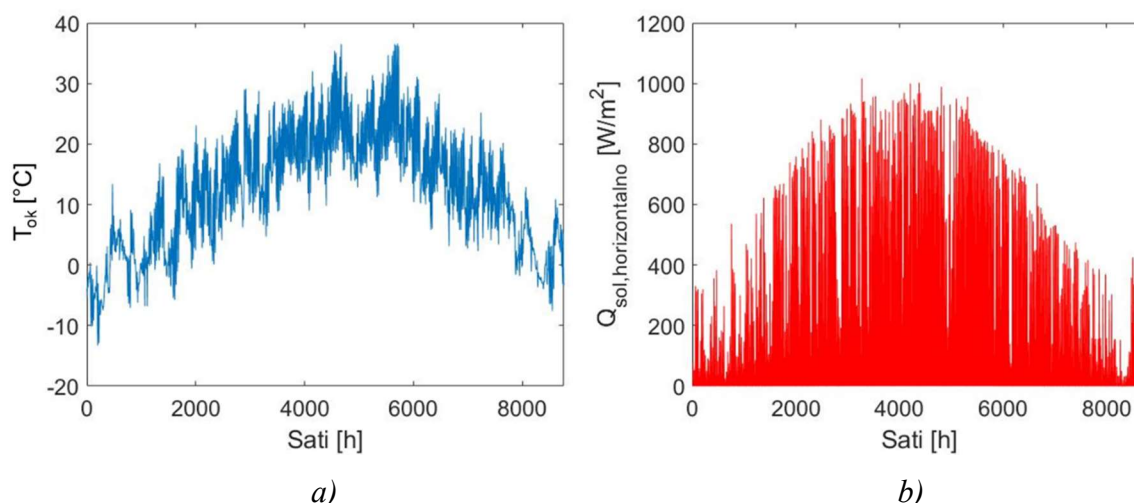
Tablica 6. Unutarnji toplinski dobici za referentni model zgrade

Ime zone	Ukupni unutarnji toplinski dobici [W]
Zona 1	9.116
Zona 2	18.002
Zona 3	2.041
Zona 4	7.093
Zona 5	8.608
Zona 6	1.032

Postavna temperatura grijanja iznosi 20°C, a postavna temperatura hlađenja 22°C. U periodu kada se zgrada ne koristi, unutarnja temperatura nije regulirana. Pretpostavljeno je da zgrada ima neograničen kapacitet za grijanje i hlađenje budući da se računa potrebna godišnja energija za grijanje i hlađenje. U obzir nije uzeta regulacija vlažnosti.

Za meteorološke podatke kao što su vanjska temperatura, relativna vlažnost vanjskog zraka, fiktivna temperatura neba i tla, kut upada Sunčevog zračenja i Sunčevo zračenje

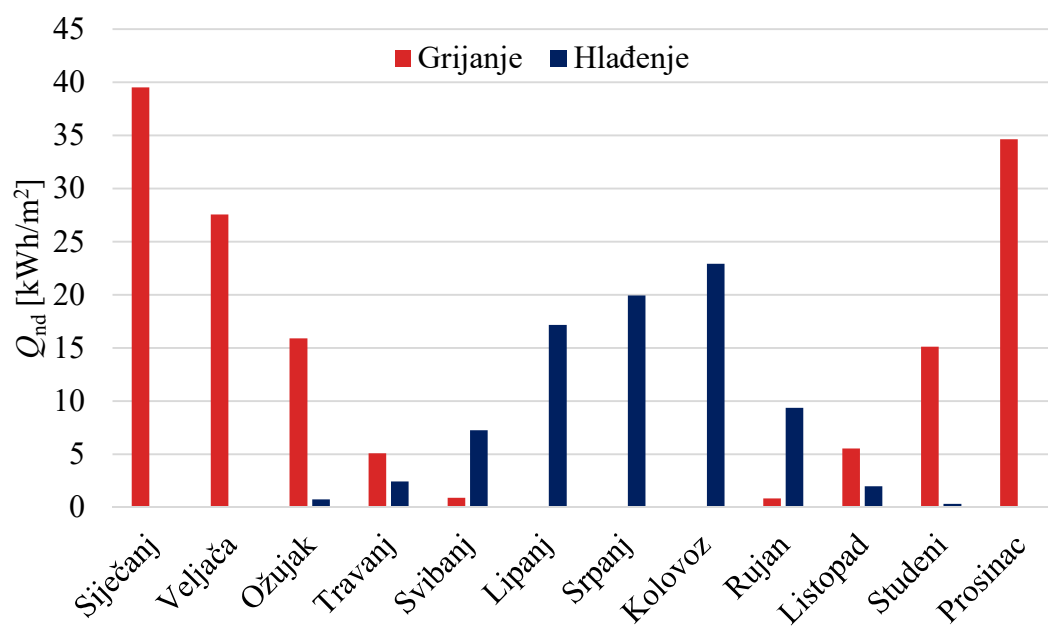
korištene su satne vrijednosti za tipičnu meteorološku godinu za grad Zagreb. Na Slici 9 prikazana je promjena (a) temperature vanjskog zraka i (b) ukupnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu kroz godinu. Maksimalna temperatura vanjskog zraka iznosi $36,6^{\circ}\text{C}$ i pojavljuje se u kolovozu, a minimalna od $-13,3^{\circ}\text{C}$ se pojavljuje u siječnju. Maksimalna vrijednost ukupnog Sunčevog zračenja na horizontalnu plohu iznosi 1.016 W/m^2 i pojavljuje se u svibnju.



Slika 9. a) Temperatura okoliša i b) ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu za grad Zagreb

3.5. Potrebna energija za grijanje i hlađenje referentne zgrade

Potrebna energija za grijanje i hlađenje referentnog modela zgrade izračunata je korištenjem računalnog programa za energijsko modeliranje TRNSYS, pri čemu su korištene prethodno definirane ulazne vrijednosti. Simulacija je provedena za razdoblje od godinu dana (8.760 sati) s korakom od jednog sata. Rezultati su prikazani na Slici 10. Najveće potrebe za grijanjem javljaju se u siječnju (39 kWh/m^2) i prosincu (35 kWh/m^2), a za hlađenjem u lipnju (17 kWh/m^2), srpnju (20 kWh/m^2) i kolovozu (23 kWh/m^2). Godišnja potrebna energija za grijanje iznosi 145 kWh/m^2 (302.675 kWh), dok godišnja potrebna energija za hlađenje iznosi 82 kWh/m^2 (171.386 kWh). Godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje ukupno iznosi 227 kWh/m^2 (474.062 kWh).



Slika 10. Potrebna energija za grijanje i hlađenje referentne zgrade škole

4. OPIS KORIŠTENIH METODA ANALIZE OSJETLJIVOSTI

U okviru ovog rada provedene su dvije metode analize osjetljivosti za 12 ulaznih varijabli energijskog modela zgrade: toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline vanjskih zidova, koeficijent prolaza topline i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora, udjeli površine prozora u sjevernoj, istočnoj, južnoj i zapadnoj fasadi, unutarnji toplinski dobici, udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka, infiltracija te vrijeme prekida grijanja i hlađenja. Kod lokalne analize osjetljivosti vrijednosti ulaznih varijabli zadane su diskretno, dok se kod globalne analize osjetljivosti za svaku varijablu nasumično uzima uzorak vrijednosti izvađen iz pripadajuće distribucije. Pri tome svaki stupac ulazne matrice **X** (jednadžba (1)) predstavlja distribuciju varijable u tom stupcu. U Tablici 7 definirane su distribucije svake od 12 ulaznih varijabli odabranih za globalnu analizu osjetljivosti. Pri tome su toplinski kapacitet zida, vrijeme prekida grijanja, koeficijent prolaza topline i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora zadani diskretno, dok su preostale varijable zadane kao uniformna distribucija iz pripadajućeg raspona. Diskretno zadane vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskih zidova preuzete su iz kategorija masivnosti definiranih u [24]. Minimalna vrijednost koeficijenta prolaza topline zidova od $0,1 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ preporučena je vrijednost za Arktičku klimu preuzeta iz [25]. Maksimalna vrijednost koeficijenta prolaza topline od $2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ odnosi se na zgradu referentnog slučaja ukoliko nema izolacije. Vrijednosti za koeficijent prolaza topline i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora preuzete su iz [26]. Udjeli površine prozora u vanjskoj fasadi za sve četiri strane svijeta vrijednosti su odabrane iskustveno, s time da su maksimalne vrijednosti za svaku fasadu ograničene maksimalnim vrijednostima navedenim u Tablici 4. Maksimalna vrijednost unutarnjih toplinskih dobitaka preuzeta je iz [27] za kategoriju obrazovnih ustanova. Udio konvektivnih toplinskih dobitaka varijabla je s vrijednošću između 0 i 1. Maksimalna vrijednost infiltracije od 3 h^{-1} preuzeta je iz [28] za nezaklonjene zgrade kategorije I kojima je vjetru izloženo više od jedne fasade. Vrijednosti vremena prekida grijanja i hlađenja odabrane su iskustveno.

Tablica 7. Ulazne varijable i pripadajuće distribucije korištene pri globalnoj analizi osjetljivosti

Redni broj	Ulazna varijabla	Mjerna jedinica	Distribucija	Raspon
1	Toplinski kapacitet vanjskog zida i ravnog krova, C_{zid}	$\text{J}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Diskretna	50.000
				75.000
				125.000
				250.000
				400.000
2	Koeficijent prolaza topline vanjskog zida i ravnog krova, U_{zid}	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Uniformna	0,1 – 2
3	Koeficijent prolaza topline prozora, U_{proz}	$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})$	Diskretna	0,84
				1,51
				2,8
				3,6
				5,8
4	Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora, g_{proz}	-	Diskretna	0,27
				0,42
				0,56
				0,73
5	Udio prozora u sjevernoj fasadi, WWR_{S}	-	Uniformna	0,2 – 0,8
6	Udio prozora u istočnoj fasadi, WWR_{I}	-	Uniformna	0,2 – 0,8
7	Udio prozora u južnoj fasadi, WWR_{J}	-	Uniformna	0,2 – 0,8
8	Udio prozora u zapadnoj fasadi, WWR_{Z}	-	Uniformna	0,2 – 0,8
9	Unutarnji toplinski dobici, Q_{int}	W/m^2	Uniformna	0 – 44

10	Udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka, $f_{\text{int,con}}$	-	Uniformna	0 – 1
11	Infiltracija, ACH	h^{-1}	Uniformna	0 – 3
12	Vrijeme prekida grijanja i hlađenja, t_{off}	h	Diskretna	0
				2
				4
				6
				8
				10

Ukupan broj simulacija globalne analize Sobol metodom ovisi o broju ulaznih varijabli k i o veličini osnovnog uzorka N' prema jednadžbi (19), objašnjenom kasnije u poglavlju 4.2. Prema [14] zadovoljavajuća konvergencija vrijednosti indeksa osjetljivosti postiže se pri veličini osnovnog uzorka od 256 redaka. U okviru ovog rada odabrana je sljedeća veća veličina osnovnog uzorka od 512 redaka. Prema tome, ukupan broj simulacija potreban za izračun indeksa osjetljivosti prvog reda i indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja Sobol metodom iznosi 13.312 simulacija, što je izračunato jednadžbom (3):

$$N = N' \cdot 2 \cdot (k + 1) = 512 \cdot 2 \cdot (12 + 1) = 13.312 \quad (3)$$

U Tablici 8 prikazane su odabrane vrijednosti ulaznih varijabli korištenih u lokalnoj analizi osjetljivosti. Vrijednosti svih ostalih varijabli u pojedinoj simulaciji jednake su onima u referentnom modelu zgrade opisanog u poglavlju 3. Vrijednosti pojedinih varijabli u referentnom slučaju odabrane su kao srednja vrijednost diskretno zadanih vrijednosti u Tablici 8. Za svaku varijablu prvi redak uključuje diskretno zadane vrijednosti pojedine varijable, dok drugi redak prikazuje postotnu promjenu vrijednosti pojedine varijable u odnosu na njenu vrijednost u referentnom slučaju. Ukupan potreban broj simulacija lokalnom metodom jest $N = 73$ i predstavlja računalni trošak lokalne analize osjetljivosti.

Tablica 8. Vrijednosti ulaznih varijabli za lokalnu metodu analize osjetljivosti

Kapacitet vanjskih zidova, C_{zid} [J/(m ² K)]							
C_{zid}	50.000	75.000	125.000	250.000	400.000		
%ref.	-80%	-70%	-50%	0%	+60%		
Koeficijent prolaza topline vanjskih zidova, U_{zid} [W/(m ² K)]							
U_{zid}	0,1	0,3	0,5	0,9	1,3	1,7	1,9
%ref.	-88,9%	-66,7%	-44,4%	0%	+44,4%	+88,9%	+122,2%
Koeficijent prolaza topline prozora, U_{proz} [W/(m ² K)]							
U_{proz}	0,84	1,49	2,81	3,58	5,83		
%ref.	-70,1%	-47%	0%	+27,4%	+107,5%		
Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora, g_{proz} [-]							
g_{proz}	0,32	0,38	0,54	0,8			
%ref.	-40,7%	-29,6%	0%	+48,2%			
Udio površine prozora u sjevernoj fasadi, WWR_{S} [-]							
WWR_{S}	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
%ref.	-60%	-40%	-20%	0%	+20%	+40%	+60%
Udio površine prozora u istočnoj fasadi, WWR_{I} [-]							
WWR_{I}	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
%ref.	-60%	-40%	-20%	0%	+20%	+40%	+60%
Udio površine prozora u južnoj fasadi, WWR_{J} [-]							
WWR_{J}	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
%ref.	-60%	-40%	-20%	0%	+20%	+40%	+60%
Udio površine prozora u zapadnoj fasadi, WWR_{Z} [-]							
WWR_{Z}	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
%ref.	-60%	-40%	-20%	0%	+20%	+40%	+60%
Unutarnji toplinski dobici, Q_{int} [W/m ²]							
Q_{int}	0	11	22	33	44		
%ref.	-100%	-50%	0%	+50%	+100%		
Udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka, $f_{\text{int,con}}$ [-]							
$f_{\text{int,con}}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	
%ref.	-100%	-50%	0%	+50%	+100%	+150%	

Infiltracija, ACH [h^{-1}]							
ACH	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
%ref.	-100%	-66,7%	-33,3%	0%	+33,3%	+66,7%	+100%

Vrijeme prekida grijanja i hlađenja, t_{off} [h]							
t_{off}	0	2	4	6	8	10	
%ref.	-100%	-66,7%	-33,3%	0%	+33,3%	+66,7%	

4.1. Matematički model lokalne analize osjetljivosti

Lokalna analiza osjetljivosti provodi se varijacijom vrijednosti samo jedne ulazne varijable pri čemu su vrijednosti ostalih ulaznih varijabli održavane konstantnima. Vrijednost izlazne varijable za referentni model zgrade opisan u poglavlju 3 naziva se referentni slučaj (eng. *base case*). Prema tome, za provedbu lokalne analize osjetljivosti veoma je važan odabir referentnog slučaja u odnosu na koji se uspoređuju različite vrijednosti izlazne varijable modela.

Za kvantifikaciju osjetljivosti pojedine ulazne varijable na vrijednost izlazne varijable kod lokalne analize osjetljivosti koristi se koeficijent utjecajnosti IC (eng. *influence coefficient*). Postoji nekoliko različitih načina izračuna koeficijenta utjecajnosti, a prikazani su jednadžbama u Tablici 9. Pri tome su korištene sljedeće oznake:

IC	koeficijent utjecajnosti
Y	vrijednost izlazne varijable
X	vrijednost ulazne varijable
Y_{BC}, X_{BC}	vrijednost izlazne, odnosno ulazne varijable za referentni slučaj (eng. <i>base case</i>)
$\bar{Y}, \bar{X}$	srednje vrijednosti izlazne, odnosno ulazne varijable

Tablica 9. Mogući načini izračuna indeksa utjecajnosti lokalnom metodom

Redni broj	Jednadžba	Mjerna jedinica
1	$IC = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1}$	Dimenzijski: [Y] / [X]
2a	$IC = \frac{\Delta Y / Y_{BC}}{\Delta X / X_{BC}}$	Postotno: %Y / %X

2b	$IC = \frac{\Delta Y / Y_{BC}}{\Delta X}$	Dimenzijski: %Y / [X]
3a	$IC = \frac{\Delta Y / \left(\frac{Y_1 + Y_2}{2} \right)}{\Delta X / \left(\frac{X_1 + X_2}{2} \right)}$	Postotno: %Y / %X
3b	$IC = \frac{\Delta Y / \bar{Y}}{\Delta X / \bar{X}}$	Postotno: %Y / %X

Prema [3] načini izračuna indeksa utjecajnosti lokalnom metodom podijeljeni su u tri grupe sukladno rednim brojevima u Tablici 9. Najjednostavnija je jednadžba grupe (1) koja postavlja u omjer razliku vrijednosti izlazne varijable modela i razliku vrijednosti pripadajućih ulaznih varijabli. Nedostatak ove metode računanja jest dimenzijski oblik indeksa utjecajnosti, budući da on tada ima mjernu jedinicu ovisno o promatranoj ulaznoj varijabli. Primjerice, ukoliko indeks utjecajnosti površine prozora na potrebnu energiju za grijanje iznosi 10 kWh/m², a indeks utjecajnosti unutarnjih toplinskih dobitaka iznosi 15 kWh/W, ne može se zaključiti da su unutarnji toplinski dobici utjecajnija varijabla budući da zbog različitih mjernih jedinica promatrana dva indeksa nisu međusobno usporediva.

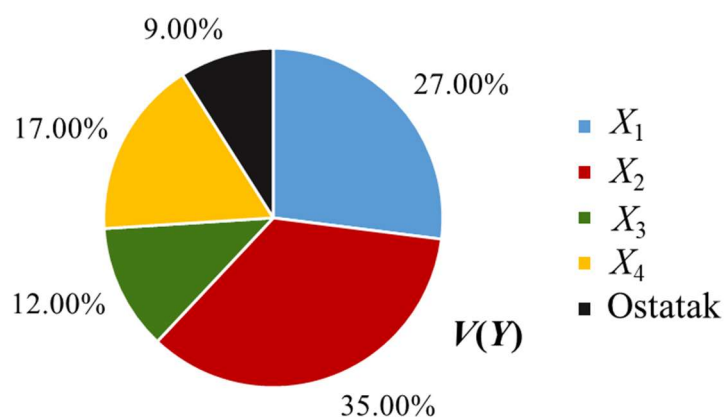
Druga grupa oblika izračuna indeksa utjecajnosti (2a i 2b) prilikom računanja uključuje korištenje vrijednosti izlazne ili ulazne varijable u referentnom slučaju. Pri tome je oblik (2a) izražen kao postotak promjene izlazne varijable po postotku promjene ulazne u odnosu na referentni slučaj, dok oblik (2b) ovisi o dimenziji ulazne varijable, prilikom čega se također javlja problem usporedbe indeksa za više različitih ulaznih varijabli. Treća grupa oblika izračuna indeksa utjecajnosti uključuje samo bezdimenzijske oblike indeksa, a od grupe (2) se razlikuje samo po odabiru djelitelja razlike izlazne, odnosno ulazne varijable. Pri tome se grupa (3a) koristi prilikom provedbe modela za samo dvije vrijednosti ulazne varijable, dok se kod grupe (3b) model može evaluirati za višestruke vrijednosti ulazne varijable, pri čemu se računa prosjek njihovih vrijednosti. Najčešće korišteni oblici izračuna indeksa utjecajnosti su oblici (1), (2a) i (3b), ovisno o primjeni [3]. U okviru ovog rada za evaluaciju utjecajnosti lokalnom metodom korišten je oblik indeksa (3b) iz razloga što je bezdimenzijski te su indeksi različitih ulaznih varijabli međusobno usporedivi, a također omogućuje evaluaciju modela za višestruke vrijednosti ulazne varijable.

4.2. Matematički model Sobol metode

4.2.1. Princip raščlambe varijance

Sobol metoda ubraja se u metode globalne analize osjetljivosti bazirane na raščlambi varijance vrijednosti izlazne varijable modela. Matrica vrijednosti izlazne varijable modela prikazana jednadžbom (2) predstavlja skup točaka za koji se može izračunati varijanca $V(Y)$. Varijanca, kao kvadrirana vrijednost standardne devijacije, predstavlja rasipanje vrijednosti izlazne varijable oko srednje vrijednosti. Rasipanje vrijednosti je posljedica različitih vrijednosti ulaznih varijabli korištenih u pojedinim evaluacijama modela. Ukoliko se za analizu odaberu varijable od manjeg značaja za rezultat, rasipanje vrijednosti izlazne varijable biti će manje, odnosno varijanca izlaznih vrijednosti će biti manja. Suprotno vrijedi za ulazne varijable od značaja, varijanca izlaznih vrijednosti će u tom slučaju biti veća. Jednako tako, pojedine ulazne varijable više utječu na promjenu varijance od drugih. Iz tog bi razloga bilo korisno izračunati koliki postotak varijance vrijednosti izlazne varijable proizlazi iz utjecaja variranja vrijednosti pojedine ulazne varijable, što je postupak koji se naziva raščlamba varijance.

U nastavku je prikazan primjer raščlambe varijance za četiri ulazne varijable: X_1 , X_2 , X_3 i X_4 od kojih svaka varijabla ima određeni utjecaj na izlaznu varijablu Y . Na Slici 11 prikazan je mogući rezultat analize raščlambe varijance. Puni krug predstavlja ukupnu varijancu izlaznih vrijednosti $V(Y)$, dok svaki kružni isječak predstavlja udio varijance koji otpada na utjecaj variranja vrijednosti pojedine ulazne varijable. Primjerice, u ovom bi slučaju najznačajnija varijabla bila X_2 budući da je 35% rasipanja vrijednosti izlazne veličine (varijance) uzrokovano promjenama vrijednosti ulazne varijable X_2 . Nakon X_2 najveći utjecaj imala bi varijabla X_1 , te zatim X_4 i X_3 .



Slika 11. Primjer raščlambe varijance za model s 4 ulazne varijable

Crnom bojom na grafu označen je kružni isječak koji se odnosi na udio varijance koji se ne može pripisati ni jednoj ulaznoj varijabli te je na legendi označen kao ostatak. To je udio varijance koji je posljedica interakcije između ulaznih varijabli, a koji postoji isključivo kod neaditivnih modela. Matematička definicija aditivnog modela prikazana je jednadžbom (4). Aditivni model predstavlja model od k ulaznih varijabli koji se može zapisati kao suma k funkcija f_i koje ovise samo o ulaznoj varijabli X_i [29].

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) = \sum_{i=1}^k f_i(X_i) \quad (4)$$

Kako bi se pobliže opisali pojmovi aditivnog i neaditivnog modela, jednadžbama (5) i (6) prikazani su primjeri istih. Jednadžba (5) predstavlja aditivan model budući da se može prikazati kao zbroj tri funkcije od kojih svaka ovisi o samo jednoj ulaznoj varijabli. Međutim, jednadžba (6) predstavlja neaditivan model budući da se nikako ne može prikazati kao zbroj funkcija samo jedne ulazne varijable. Između varijable X_2 i X_3 postoji interakcija u obliku produkta i model je neaditivan. Kod neaditivnih modela varijanca vrijednosti izlazne varijable može se raščlaniti na utjecaje pojedinih faktora, u ovom slučaju X_1 , X_2 i X_3 . Međutim, određeni udio varijance posljedica je interakcije između ulaznih varijabli (na primjer produkt u jednadžbi (6)). Crni isječak od 9% prikazan na Slici 11 posljedica je upravo takve interakcije u prikazanom primjeru raščlambe varijance te je iz tog razloga označen kao ostatak. Spada li model u skupinu aditivnih ili neaditivnih modela ovisi o samom modelu, ali i o odabranim ulaznim varijablama za analizu. Energijski modeli zgrada uglavnom spadaju u neaditivne modele. Primjerice, stupanj propuštanja Sunčevog zračenja i površina prozora u međusobnoj su interakciji budući da njihov produkt određuje Sunčevo zračenje koje prolazi kroz prozor.

$$Y = X_1 + X_2 + X_3 \quad (5)$$

$$Y = X_1 + X_2 \cdot X_3 \quad (6)$$

Upravo na temelju prethodnih razmatranja definirana je i raščlamba varijance Sobol metodom. Sobol [30] je dokazao da se svaka funkcija međusobno nezavisnih ulaznih varijabli može rastaviti na sumu funkcija s rastućim brojem ulaznih varijabli prema jednadžbi (7). Pri tome jednadžba (7) predstavlja općeniti prikaz koji uključuje i aditivne i neaditivne modele. Ukoliko bi model bio aditivan, u jednadžbi bi preostala samo prva dva člana budući da ne bi postojale funkcije drugog reda f_{ij} ili bilo kojeg višeg reda koje su funkcija dvije, odnosno više ulaznih varijabli.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_k) = f_0 + \sum_i f_i + \sum_i \sum_{j>i} f_{ij} + \dots + f_{12\dots k} \quad (7)$$

Postavlja se pitanje kako izračunati udjele utjecaja pojedine ulazne varijable u varijanci vrijednosti izlazne varijable prikazane kružnim isječcima na Slici 11. Jedan od mogućih načina jest ponovna provedba modela za isti skup vrijednosti ulaznih varijabli osim vrijednosti varijable čiji se udio u varijanci želi izračunati. Pri tome bi vrijednost te varijable u svim simulacijama bila jednaka. Primjerice, ukoliko se želi izračunati udio varijance koji otpada na varijablu X_1 , ponovile bi se simulacije za isti skup vrijednosti ulaznih varijabli osim vrijednosti varijable X_1 koja bi u svim simulacijama bila jednaka vrijednosti x_1 . Ovakvim bi se postupkom eliminirao jedan izvor varijance (onaj koji otpada na varijablu X_1) te bi varijanca vrijednosti izlazne varijable bila niža od prethodno izračunate vrijednosti $V(Y)$ kod koje su varirane vrijednosti svih ulaznih varijabli. Varijanca vrijednosti izlazne veličine izračunata ovim postupkom naziva se uvjetna varijanca $V(Y|X_i = x_i)$ budući da je izračunata pod uvjetom da je određena varijabla fiksirana na određenu vrijednost u svim provedbama modela. Omjer uvjetne i neuvjetne varijance mogao bi se koristiti kao mjera značaja varijable X_i , na način da manji omjer predstavlja važniju varijablu: održavanje varijable X_i konstantnom vrijednošću uzrokuje veliko smanjenje varijance vrijednosti izlazne varijable – varijabla X_i je od značaja. Međutim, kod spomenutog pristupa postoji nekoliko problema. Jedan od problema očituje se u ovisnosti analize o odabiru fiksirane vrijednosti x_i za svaku varijablu, što dovodi do nedostatka općenitosti ovakvog pristupa i mogućnosti donošenja pogrešnih zaključaka. Primjerice, može se odabrati vrijednost varijable X_i za koju je uvjetna varijanca viša od neuvjetne čime bi se izgubila mogućnost usporedbe tih dviju vrijednosti. Također, za različito odabrane vrijednosti fiksne točke x_i , vrijednosti uvjetnih varijanci se razlikuju. Iz tog je razloga potrebno provesti simulacije za raspon fiksnih vrijednosti x_i te uvjetnu varijancu izračunati kao prosjek uvjetnih varijanci dobivenih za svaku fiksnu vrijednost x_i , što se može označiti s $E(V(Y|X_i))$. Pri tome vrijedi jednadžba (8), odnosno zbroj očekivanja uvjetne varijance i varijance uvjetnog očekivanja daju ukupnu varijancu $V(Y)$. Što je prvi pribrojnik u jednadžbi (8) manji, odnosno što je drugi pribrojnik veći, to je X_i utjecajnija varijabla, i obratno.

$$E(V(Y|X_i)) + V(E(Y|X_i)) = V(Y) \quad (8)$$

4.2.2. Indeksi osjetljivosti

Prethodna razmatranja omogućuju matematičku definiciju indeksa osjetljivosti prvog reda (eng. *first order*) prikazanog jednadžbom (9). Indeks osjetljivosti prvog reda predstavlja udio varijance $V(Y)$ koji je posljedica varijacije vrijednosti varijable X_i , odnosno posljedica utjecaja funkcije f_i u jednadžbi (7). Što je indeks veći, to je X_i utjecajnija varijabla, i obratno.

Definicijski, vrijednost indeksa osjetljivosti prvog reda predstavlja očekivano smanjenje varijance vrijednosti izlazne varijable iz modela kada bi ulazna varijabla X_i bila poznata, odnosno fiksirana na neku vrijednost [31]. Primjerice, prema brojevima sa Slike 11 indeks S_2 iznosio bi 0,35. Prema tome, ukoliko bi vrijednost varijable X_2 bila poznata, varijanca vrijednosti izlazne varijable smanjila bi se za 35%. Indeks S_i naziva se indeksom osjetljivosti prvog reda zato što uključuje samo samostalne utjecaje pojedinih ulaznih varijabli na varijancu vrijednosti izlazne varijable Y , a ne uključuje utjecaj interakcija između ulaznih varijabli na krajnji rezultat.

$$S_i = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)} \quad (9)$$

Utjecaj interakcija između varijabli opisuju indeksi osjetljivosti viših redova, pri čemu se broj reda odnosi na broj varijabli koje sudjeluju u interakciji. Prema tome, indeksi osjetljivosti drugog reda opisuju utjecaj interakcije između dvije ulazne varijable. Primjerice, indeks osjetljivosti drugog reda S_{12} opisuje udio varijance za koju je odgovorna interakcija između varijabli X_1 i X_2 . Indeks trećeg reda bio bi, primjerice, S_{123} , pri čemu bi u interakciji sudjelovale varijable X_1 , X_2 i X_3 . U općenitom smislu vrijedi jednačba (10), odnosno zbroj svih indeksa osjetljivosti svih redova jednak je jedinici. Drugim riječima, ukoliko bi bili poznati svi indeksi osjetljivosti svih redova, raščlamba varijance bila bi potpuna, odnosno ukupna varijanca $V(Y)$ bila bi u potpunosti razjašnjena i definirana. Kod modela bez interakcija, odnosno aditivnih modela, indeksi viših redova jednaki su nuli te je suma indeksa prvog reda jednaka jedinici.

$$\sum_i S_i + \sum_i \sum_{j>i} S_{ij} + \sum_i \sum_{j>i} \sum_{l>j} S_{ijl} + \dots + S_{12\dots k} = 1 \quad (10)$$

Budući da broj indeksa viših redova raste eksponencijalno u ovisnosti o broju ulaznih varijabli k preko jednačbe $2^k - 1$, broj simulacija koje bi bilo potrebno provesti za izračun svih indeksa bio bi preveliki za praktičnu primjenu. Iz tog se razloga definiraju indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja (eng. *total effect*) koji za određenu ulaznu varijablu X_i uključuju indekse svih redova koji se odnose na promatranu varijablu X_i . Primjerice, za model od 3 ulazne varijable, indeks osjetljivosti ukupnog utjecaja varijable X_1 bio bi definiran pomoću jednačbe (11), odnosno predstavljao bi sumu indeksa osjetljivosti svih redova koji u svome indeksu sadrže znamenku 1. U općenitom smislu za indekse ukupnog utjecaja vrijedi jednačba (12). Ovako definirani indeksi ukupnog utjecaja uključuju sav doprinos pojedine ulazne varijable na prisutnost varijacija vrijednosti izlazne varijable modela Y , pa tako i utjecaj interakcija.

Ukoliko postoji razlika u vrijednosti između indeksa prvog reda i indeksa ukupnog utjecaja, to je jasan znak da je promatrani model neaditivan i da interakcije između ulaznih varijabli postoje.

$$S_{T,1} = S_1 + S_{12} + S_{13} + S_{123} \quad (11)$$

$$S_{T,i} = S_i + \sum_{j>i} S_{ij} + \sum_{l>j} \sum_{j>i} S_{ijl} + \dots + S_{12\dots k} \quad (12)$$

Princip izračuna indeksa ukupnog utjecaja sličan je onom za indekse prvog reda. Međutim, umjesto da se fiksira vrijednost varijable X_i za koju se vrijednost indeksa želi izračunati, fiksira se vrijednost svih ostalih varijabli te se izračuna varijanca vrijednosti izlazne varijable u tom slučaju. Na taj se način eliminira izvor varijacije koji se može pripisati svim ostalim varijablama, a ostavlja se izvor varijacije pripisan samo varijabli X_i . Kao i kod indeksa prvog reda postupak se mora provesti za više različitih fiksniranih vrijednosti ostalih varijabli, nakon čega se računa očekivanje vrijednosti uvjetnih varijanci izlazne varijable. Pri tome također vrijedi jednadžba (13), pri čemu oznaka $\sim$ označava fiksiranje vrijednosti svih varijabli osim varijable X_i . Izračun indeksa tada se provodi korištenjem jednadžbe (14). Definicijski, indeks osjetljivosti ukupnog utjecaja označava varijancu koja bi ostala ukoliko bi sve ulazne varijable osim X_i bile poznate, odnosno fiksirane [31]. Što je indeks ukupnog utjecaja veći, to je X_i utjecajnije varijabla. Primjerice, ukoliko bi indeks ukupnog utjecaja neke varijable iznosio 0,9, fiksiranjem svih ostalih varijabli varijanca vrijednosti izlazne varijable modela smanjila bi se za 10%. U tom slučaju to znači da je utjecaj varijacija promatrane varijable veliki te se ta varijabla proglašava značajnom.

$$V(E(Y | \mathbf{X}_{\sim i})) + E(V(Y | \mathbf{X}_{\sim i})) = V(Y) \quad (13)$$

$$S_{T,i} = \frac{E(V(Y | \mathbf{X}_{\sim i}))}{V(Y)} = 1 - \frac{V(E(Y | \mathbf{X}_{\sim i}))}{V(Y)} \quad (14)$$

Problem s prethodno opisanim postupkom izračuna indeksa je broj potrebnih simulacija. Prvo bi bilo potrebno izračunati model N puta kako bi se izračunala varijanca $V(Y)$. Zatim bi za svaku varijablu bilo potrebno definirati r fiksniranih vrijednosti i pokrenuti model N puta za svaku od tih vrijednosti. U konačnici se to ponavlja k puta za svaku ulaznu varijablu što znači da je ukupan broj simulacija koje je potrebno provesti za izračun indeksa osjetljivosti prvog reda krN . Kada bi se željelo, primjerice, izračunati indeks osjetljivosti koristeći $r = 1000$ fiksniranih točaka i s brojem simulacija $N = 1000$, bilo bi potrebno izračunati 10^6 simulacija za izračun indeksa osjetljivosti za samo jednu ulaznu varijablu. Iz tog je razloga razvijena posebna

metoda proračuna indeksa osjetljivosti Sobol metodom za međusobno nezavisne ulazne varijable koja drastično smanjuje potreban broj simulacija, a objašnjena je u nastavku.

4.2.3. Generiranje uzorka kod Sobol metode

Kako bi se smanjio ukupan potrebni broj simulacija za izračun indeksa osjetljivosti prvog reda i ukupnog utjecaja Sobol metodom, Saltelli [29, 31] je razvio metodu uzorkovanja opisanu u nastavku. Potrebno je stvoriti dvije matrice s kvazi-nasumično generiranim vrijednostima ulaznih varijabli, matricu **A** i matricu **B**, prikazane jednadžbama (15) i (16). Sa svrhom jednostavnijeg objašnjenja matrica **A** može se nazvati osnovnim uzorkom, a matrica **B** ponovljenim uzorkom. U obje matrice svaki stupac predstavlja jednu ulaznu varijablu, dok svaki redak predstavlja skup vrijednosti ulaznih varijabli potrebnih za provođenje jedne simulacije. Svaka se matrica stoga sastoji od k stupaca i N' redaka. Broj redaka matrice N' označen je apostrofom kako bi se naglasila razlika između te oznake i oznake ukupnog broja simulacija N korištene u prethodnim odlomcima. U jednadžbama korištenje zvjezdice (*) signalizira vrijednost varijable koja se nalazi u matrici **B**, odnosno u ponovljenom uzorku. Broj redaka svake matrice N' po izboru korisnika poprima vrijednosti potencija broja 2 započinjući od 16 (16, 32, 64, 128, 256,...).

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_k^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N')} & x_2^{(N')} & \dots & x_k^{(N')} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)*} & x_2^{(1)*} & \dots & x_k^{(1)*} \\ x_1^{(2)*} & x_2^{(2)*} & \dots & x_k^{(2)*} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N')*} & x_2^{(N')*} & \dots & x_k^{(N')*} \end{bmatrix} \quad (16)$$

pri čemu su:

x_j	vrijednost varijable j ($j = 1, 2, 3, \dots, k$)
k	ukupan broj parametara odabranih za analizu [-]
N'	broj redaka svake od matrica (veličina osnovnog i ponovljenog uzorka) [-]

Matrice **A** i **B** generirane su koristeći Sobol sekvence [30] koje pripadaju skupini kvazi-nasumičnog uzorkovanja (eng. *quasi-random sampling*). Karakteristike kvazi-nasumičnog uzorkovanja očituju se u činjenici da vrijednosti uzoraka nisu uzete nasumično iz cjelokupne

definirane razdiobe vrijednosti pojedine varijable budući da bi u tom slučaju postojala mogućnost da određeni dio domene vrijednosti ulazne varijable nije dovoljno popunjen, dok je neki drugi dio prepunjen, odnosno u uzorku bi se pojavila mjesta s prazninama i mjesta s nakupinama [31]. U slučaju postojanja nakupina u uzorku (eng. *clusters*), vrijednosti izlazne varijable Y u blizini tog područja bile bi prenaplašene prilikom provođenja statističke analize. Ukoliko bi se pojavile praznine u uzorku (eng. *gaps*), određeni raspon vrijednosti ulaznih varijabli uopće ne bi bio uzet u obzir, što bi također moglo dovesti do pogrešnog tumačenja rezultata. Iz tog se razloga kod kvazi-nasumičnih metoda prostor domene svake varijable dijeli na nekoliko podprostora iz kojih se tada generiraju vrijednosti nasumičnim odabirom.

Svaki stupac svake od dvije ulazne matrice predstavlja uzorak izvađen iz distribucije dotične varijable definirane u početnim koracima analize osjetljivosti. Svaki redak matrica predstavlja ulazni uzorak za koji je moguće izračunati željenu izlaznu vrijednost modela Y . Osim matrica $\mathbf{A}$ i $\mathbf{B}$ izlazne vrijednosti modela Y potrebno je izračunati i za matrice $\mathbf{C}_j$ pri čemu se indeks j odnosi na varijable koji sudjeluju u analizi ($j = 1, 2, 3, \dots, k$). Broj tih matrica jednak je broju parametara k . Jednadžba koja opisuje matricu $\mathbf{C}_j$ prikazana je jednadžbom (17). Matrica $\mathbf{C}_j$ predstavlja matricu u kojoj su svi članovi preuzeti iz matrice $\mathbf{B}$ osim stupca u kojem se nalazi parametar X_j pri čemu je taj stupac preuzet iz matrice $\mathbf{A}$. U jednadžbi (17) stupac preuzet iz osnovnog uzorka nije označen zvjezdicom, dok su svi ostali stupci, preuzeti iz ponovljenog uzorka, označeni zvjezdicom. Matrice $\mathbf{C}_j$ koriste se prilikom izračuna indeksa osjetljivosti prvoga reda.

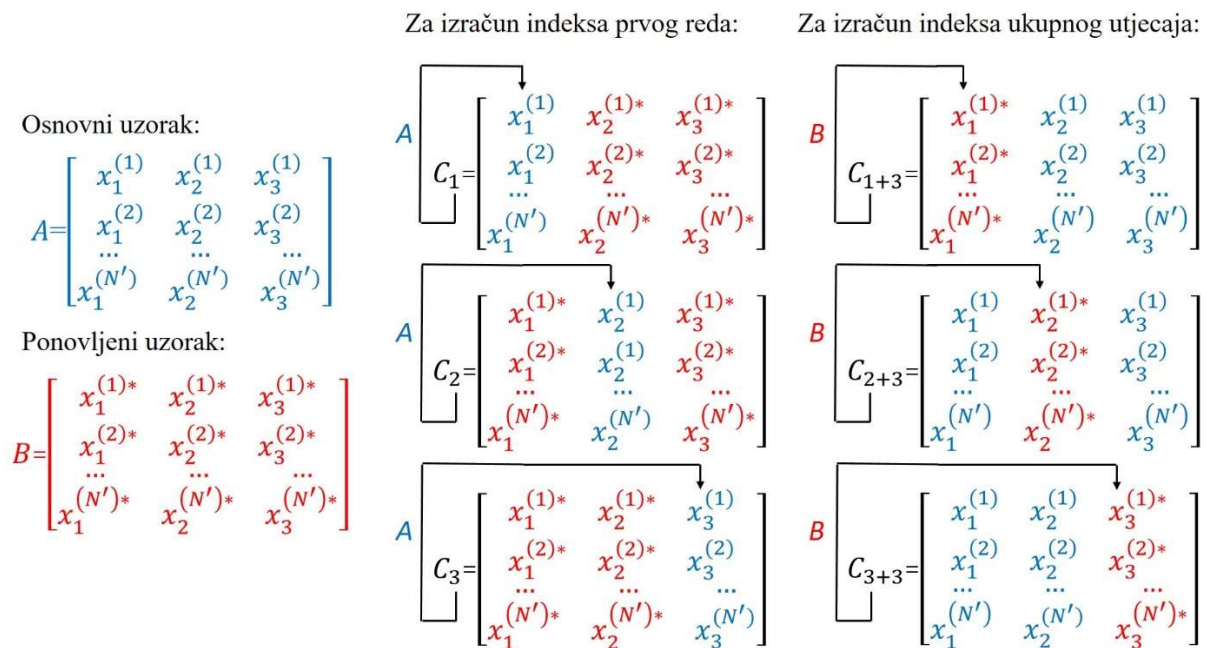
$$\mathbf{C}_j = \begin{bmatrix} x_1^{(1)*} & x_2^{(1)*} & \dots & x_j^{(1)} & \dots & x_k^{(1)*} \\ x_1^{(2)*} & x_2^{(2)*} & \dots & x_j^{(2)} & \dots & x_k^{(2)*} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N')*} & x_2^{(N')*} & \dots & x_j^{(N')} & \dots & x_k^{(N')*} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Posljednje matrice koje je potrebno definirati za provedbu Sobol metode definirane su jednadžbom (18), a koriste se za izračun indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja. Ove matrice predstavljaju suprotnost matricama $\mathbf{C}_j$: svi stupci matrica $\mathbf{C}_{j+k}$ preuzeti su iz osnovnog uzorka (matrice $\mathbf{A}$) osim j -tog stupca koji je preuzet iz ponovljenog uzorka (matrice $\mathbf{B}$).

$$\mathbf{C}_{j+k} = \begin{bmatrix} x_1^{(1)} & x_2^{(1)} & \dots & x_j^{(1)*} & \dots & x_k^{(1)} \\ x_1^{(2)} & x_2^{(2)} & \dots & x_j^{(2)*} & \dots & x_k^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^{(N')} & x_2^{(N')} & \dots & x_j^{(N')*} & \dots & x_k^{(N')} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Sa svrhom slikovitijeg objašnjenja stvaranja matrica potrebnih za provedbu analize osjetljivosti Sobol metodom izrađena je shema za primjer koji se sastoji od tri ulazne varijable (Slika 12). Osnovni uzorak (matrica **A**) označen je plavom bojom, dok je ponovljeni uzorak (matrica **B**) označen crvenom bojom. Za izračun indeksa prvog reda potrebno je stvoriti dodatne tri matrice C_j , za svaku ulaznu varijablu po jednu. Pri tome indeks j označava stupac matrice C_j koji se preslikava iz matrice **A**, dok se svi ostali stupci preslikavaju iz matrice **B**. Na slici su crvenom i plavom bojom označeni stupci preslikani iz odgovarajuće matrice. Za izračun indeksa ukupnog utjecaja potrebno je također stvoriti tri dodatne matrice, s razlikom što u tom slučaju indeks j matrice C_{j+k} odgovara stupcu koji se uzima iz matrice **B**, dok se svi ostali stupci uzimaju iz matrice **A**. Iz prikazanog primjera može se izvesti i jednadžba za izračun ukupnog potrebnog broja simulacija N . U matricama **A** i **B** nalazi se $2N'$ redaka, čemu je potrebno dodati kN' redaka matrica C_j i kN' redaka matrica C_{j+k} . Ukupan potrebn broj simulacija tada se može prikazati jednadžbom (19).

$$N = 2 \cdot N' + k \cdot N' + k \cdot N' = N' \cdot 2 \cdot (k + 1) \quad (19)$$



je potrebno voditi računa o tome koje su ulazne matrice korištene za dobivanje vrijednosti izlazne varijable te prema ulaznim matricama grupirati vrijednosti izlazne varijable Y . U Tablici 10 sumirane su sve oznake koje se koriste u jednadžbama (20) do (26). U trećem stupcu tablice prikazan je zapis vrijednosti izlazne varijable kao funkcije vrijednosti ulaznih varijabli pri čemu je zvjezdicom (*) označena vrijednost izvađena iz ponovljenog uzorka.

Tablica 10. Popis oznaka korištenih u jednadžbama i dimenzije matrica

Ulazna matrica	Dimenzija	Izlazna matrica	Dimenzija	Svaki redak izlazne matrice prikazan kao funkcija vrijednosti ulaznih varijabli:
A	$N' \times k$	Y(A)	$N' \times 1$	$y(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_k^{(r)})$
B	$N' \times k$	Y(B)	$N' \times 1$	$y(x_1^{(r)*}, x_2^{(r)*}, \dots, x_k^{(r)*})$
C_j	$N' \times k$	Y(C_j)	$N' \times 1$	$y(x_1^{(r)*}, x_2^{(r)*}, \dots, x_{j-1}^{(r)*}, x_j^{(r)}, x_{j+1}^{(r)*}, \dots, x_k^{(r)*})$
C_{j+k}	$N' \times k$	Y(C_{j+k})	$N' \times 1$	$y(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_{j-1}^{(r)}, x_j^{(r)*}, x_{j+1}^{(r)}, \dots, x_k^{(r)})$

Za izračun indeksa osjetljivosti potrebno je izračunati kvadrat srednje vrijednosti izlazne varijable modela i njenu varijancu. Izračun kvadrata srednje vrijednosti prikazan je jednadžbom (20). Kvadrat srednje vrijednosti računa se kao skalarni produkt matrica izlazne varijable iz modela dobivene korištenjem uzoraka iz matrica **A** i **B**.

$$\hat{E}^2(Y) = \frac{1}{N'} \sum_{r=1}^{N'} y(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_k^{(r)}) y(x_1^{(r)*}, x_2^{(r)*}, \dots, x_k^{(r)*}) = \frac{1}{N'} \cdot (\mathbf{Y(A)} \cdot \mathbf{Y(B)}) \quad (20)$$

pri čemu su:

r broj retka matrice izlazne varijable iz modela [-]

y vrijednost izlazne varijable za redak r

Varijanca izlaznih vrijednosti modela računa se pomoću jednadžbe (21). Za razliku od kvadrata srednje vrijednosti pri čijem se računanju koriste rezultati dobiveni matricama **A** i **B**, za računanje varijance koriste se samo rezultati dobiveni korištenjem matrice **A**.

$$\hat{V}(Y) = \frac{1}{N'-1} \sum_{r=1}^{N'} y^2(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_k^{(r)}) - \hat{E}^2(Y) = \frac{1}{N'-1} \cdot (\mathbf{Y(A)} \cdot \mathbf{Y(A)}) - \hat{E}^2(Y) \quad (21)$$

Prethodne dvije izračunate vrijednosti, kvadrat srednje vrijednosti i varijanca, koriste se za izračun i indeksa prvog reda i indeksa ukupnog utjecaja. U nastavku, jednadžbe od (22) do (24) koriste se za izračun indeksa prvog reda. Uvjetna varijanca $V(E(Y|X_j))$ računa se pomoću jednadžbe (22). Za pojedinu se ulaznu varijablu ova vrijednost računa pomoću skalarnog produkta matrica izlazne varijable Y dobivene pomoću ulaznih varijabli iz matrice $\mathbf{A}$ i matrice $\mathbf{C}_j$.

$$V(E(Y|X_j)) = U_j - \hat{E}^2(Y) \quad (22)$$

pri čemu je:

$$U_j = \frac{1}{N'-1} \sum_{r=1}^{N'} y(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_k^{(r)}) y(x_1^{(r)*}, x_2^{(r)*}, \dots, x_{j-1}^{(r)*}, x_j^{(r)}, x_{j+1}^{(r)*}, \dots, x_k^{(r)*}) \quad (23)$$

$$U_j = \frac{1}{N'-1} \cdot (\mathbf{Y}(\mathbf{A}) \cdot \mathbf{Y}(\mathbf{C}_j))$$

Indeks osjetljivosti prvog reda za ulazni parametar X_j zatim se računa pomoću jednadžbe:

$$S_j = \frac{V(E(Y|X_j))}{V(Y)} \quad (24)$$

Prilikom izračuna indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja koriste se izračunate vrijednosti kvadrata srednje vrijednosti i varijance, a prema jednadžbi (25). Za pojedinu se ulaznu varijablu ova vrijednost računa pomoću skalarnog produkta matrica izlazne varijable Y dobivene vrijednostima iz matrice $\mathbf{A}$ i matrice $\mathbf{C}_{j+k}$.

$$S_{T,j} = 1 - \frac{U_{\sim j} - E^2(Y)}{V(Y)} \quad (25)$$

pri čemu je:

$$U_{\sim j} = \frac{1}{N'-1} \sum_{r=1}^{N'} y(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_k^{(r)}) y(x_1^{(r)}, x_2^{(r)}, \dots, x_{j-1}^{(r)}, x_j^{(r)*}, x_{j+1}^{(r)}, \dots, x_k^{(r)}) \quad (26)$$

$$U_{\sim j} = \frac{1}{N'-1} \cdot (\mathbf{Y}(\mathbf{A}) \cdot \mathbf{Y}(\mathbf{C}_{j+k}))$$

5. OPIS KORIŠTENIH RAČUNALNIH PROGRAMA

Za provedbu energijskih simulacija zgrade sa svrhom izračuna potrebne godišnje energije za grijanje i hlađenje u okviru ovog rada korišten je računalni program za energijsko modeliranje, TRNSYS. Uzorak za analizu osjetljivosti Sobol metodom izrađen je koristeći računalni program za analizu osjetljivosti i nesigurnosti SIMLAB. Budući da je za provedbu globalne analize osjetljivosti potreban vrlo veliki broj evaluacija modela, izrađene su skripte u računalnim programima MATLAB i PYTHON koje ubrzavaju proces generiranja pojedinih modela zgrada i obrade podataka o rezultatima simulacija. U nastavku je opisan rad u pojedinim programima, kao i opis automatizacije provedbe simulacija za različite vrijednosti ulaznih varijabli.

5.1. Računalni program TRNSYS za energijsko modeliranja sustava

Računalni program TRNSYS® (*Transient System Simulation Program*) [32] koristi se za provedbu dinamičkih simulacija raznih sustava među kojima se ističe i dinamička simulacija višezonske zgrade kakva je provedena u okviru ovog rada. Osim simulacija višezonske zgrade, TRNSYS se primjenjuje i pri simulacijama svih sustava za koje je potrebno odrediti dinamičke odzive, kao što su HVAC sustavi, kogeneracijski sustavi, sustavi s obnovljivim izvorima energije i slično.

Simulacije u računalnom programu TRNSYS provode se u glavnom korisničkom sučelju programa zvanom Simulation Studio. U njemu se grafički povezuju različite komponente (u TRNSYS-u nazvani *Type*) definiranog projekta. Svaka je komponenta definirana brojem, pa se tako komponenta višezonske zgrade naziva Type56. Matematički model komponente Type56 detaljno je opisan u [33]. Prilikom izračuna dinamičkog temperaturnog odziva i potrebne energije za grijanje i hlađenje koristi se model energijskih bilanci, pri čemu model uključuje bilance za sve unutarnje i vanjske površine te za zrak u zoni.

U okviru ovog rada korištene su tri TRNSYS komponente čije je povezivanje prikazano na Slici 13: Type9e, Type56 i Type25c. Komponenta Type9e koristi se za učitavanje ulaznih meteoroloških podataka koji se koriste za izračun potrebne energije za grijanje i hlađenje. Svi ulazni podaci komponente Type56 definirani su za svaki sat u godini i prikazani su u Tablici 11. Komponenta Type9e povezana je s komponentom višezonske zgrade Type56 koja sadrži sve relevantne podatke o geometriji, sastavu ovojnice, rasporedu korištenja i režimima sustava grijanja i hlađenja. Provedbom dinamičke simulacije sustava višezonske zgrade izračunavaju se satne vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje te se šalju u komponentu Type25c

koja obavlja ispis rezultata u tekstualne datoteke na način definiran od strane korisnika programa. Izlazni parametri iz komponente Type56 prikazani su u Tablici 12.



Slika 13. Grafičko povezivanje korištenih komponenti u TRNSYS korisničkom sučelju Simulation Studio

Tablica 11. Ulazni parametri za komponentu Type56

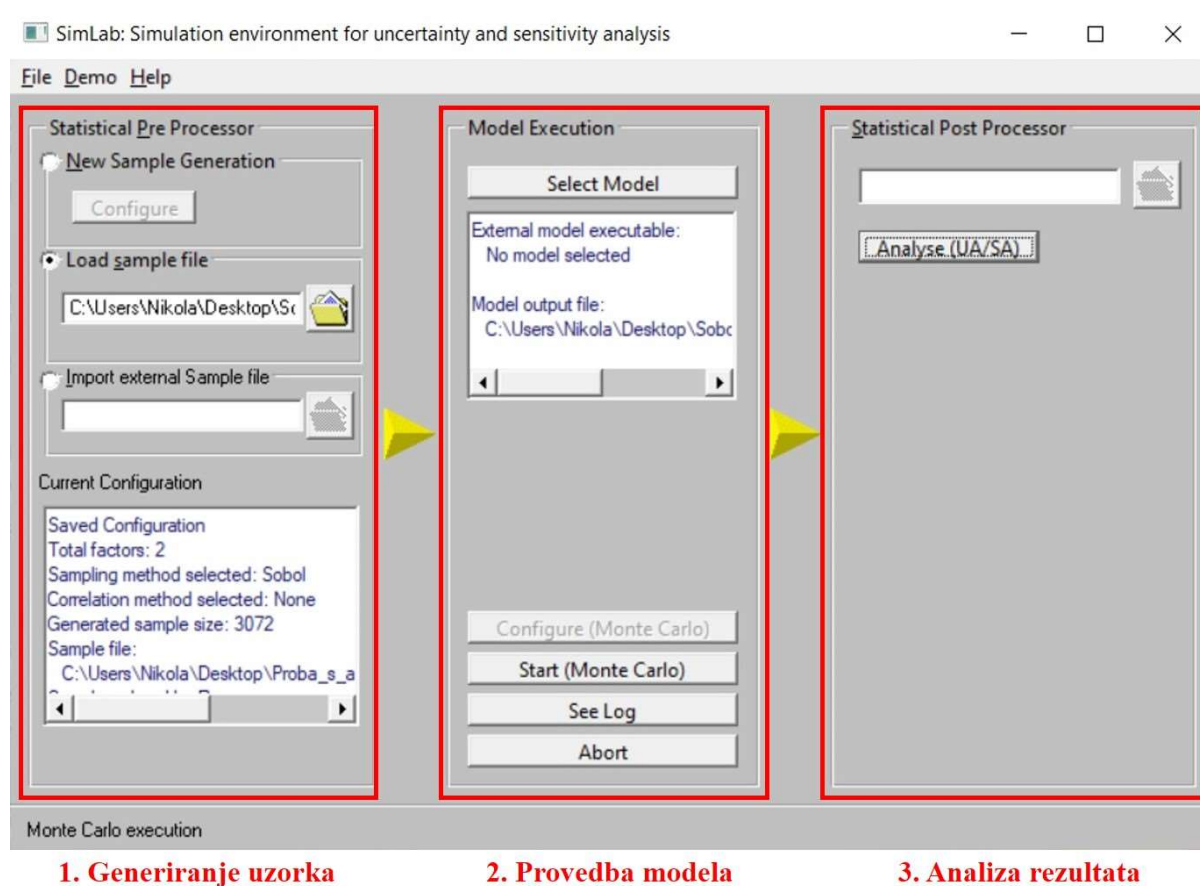
Redni broj	Opis parametra	Mjerna jedinica
1	Temperatura vanjskog zraka	°C
2	Relativna vlažnost vanjskog zraka	%
3	Fiktivna temperatura neba	°C
4	Fiktivna temperatura tla	°C
5	Zenitni kut Sunca	°
6	Azimut Sunca	°
7	Ukupno Sunčevo zračenje za orijentaciju sjever	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
8	Ukupno Sunčevo zračenje za orijentaciju istok	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
9	Ukupno Sunčevo zračenje za orijentaciju jug	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
10	Ukupno Sunčevo zračenje za orijentaciju zapad	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
11	Ukupno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
12	Direktno Sunčevo zračenje za orijentaciju sjever	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
13	Direktno Sunčevo zračenje za orijentaciju istok	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
14	Direktno Sunčevo zračenje za orijentaciju jug	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
15	Direktno Sunčevo zračenje za orijentaciju zapad	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
16	Direktno Sunčevo zračenje na horizontalnu plohu	$\text{kJ}/(\text{h m}^2)$
17	Upadni kut Sunca za orijentaciju sjever	°
18	Upadni kut Sunca za orijentaciju istok	°
19	Upadni kut Sunca za orijentaciju jug	°
20	Upadni kut Sunca za orijentaciju zapad	°
21	Upadni kut Sunca na horizontalnu podlogu	°
22	Faktor refleksije tla	-

Tablica 12. Izlazni parametri iz komponente Type56

Redni broj	Opis parametra	Mjerna jedinica
1	Temperatura zraka zone 1	°C
2	Temperatura zraka zone 2	°C
3	Temperatura zraka zone 3	°C
4	Temperatura zraka zone 4	°C
5	Temperatura zraka zone 5	°C
6	Temperatura zraka zone 6	°C
7	Potrebna energija za grijanje i hlađenje zone 1	kJ/h
8	Potrebna energija za grijanje i hlađenje zone 2	kJ/h
9	Potrebna energija za grijanje i hlađenje zone 3	kJ/h
10	Potrebna energija za grijanje i hlađenje zone 4	kJ/h
11	Potrebna energija za grijanje i hlađenje zone 5	kJ/h
12	Potrebna energija za grijanje i hlađenje zone 6	kJ/h

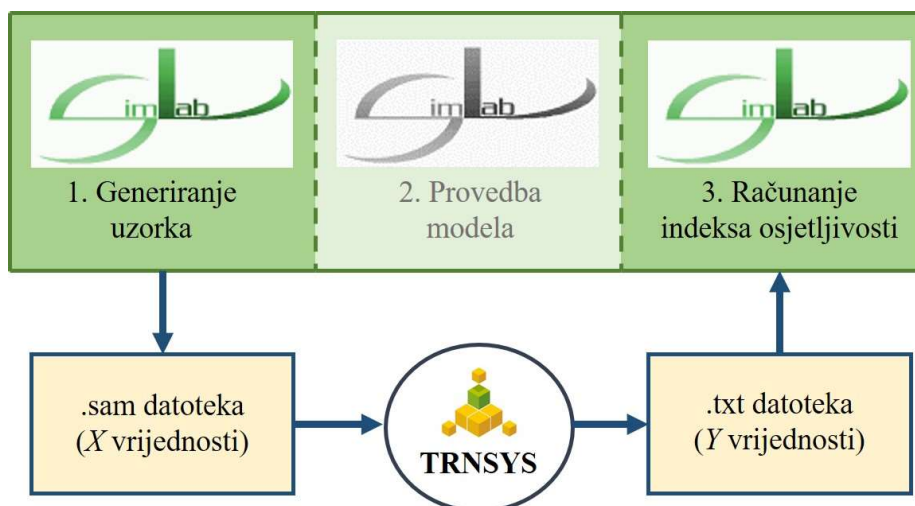
5.2. Računalni program za analizu osjetljivosti SIMLAB

Za provedbe metoda analize osjetljivosti baziranih na Monte Carlo analizi koristi se računalni program SIMLAB® [34]. Pri tome Monte Carlo analiza uključuje nasumično ili kvazi-nasumično generiranje uzoraka iz distribucije i raspona ulaznih varijabli te provedbu modela za generirani skup vrijednosti. Pokretanjem programa otvara se korisničko sučelje prikazano na Slici 14, pri čemu je crvenim pravokutnicima podijeljeno na tri dijela koji formalno odgovaraju trima blokovima prikazanim na Slici 1. Prvi se dio odnosi na definiranje ulaznih varijabli koje sudjeluju u analizi i njihovih raspona i distribucija, odnosno na generiranje uzorka. Drugi se dio odnosi na provedbu modela, odnosno na izračunavanje vrijednosti izlazne varijable Y za svaki redak definiranog uzorka. Treći se dio odnosi na matematičku provedbu analize osjetljivosti, a koja u slučaju Sobol metode podrazumijeva izračun indeksa osjetljivosti. Prilikom definiranja uzorka potrebno je odabrati distribucije i raspone vrijednosti za svaku od ulaznih varijabli, u okviru ovog rada prema Tablici 7. Također je potrebno definirati koja se metoda globalne analize osjetljivosti želi primijeniti, kako bi se uzorak izradio prema obrascu odabrane metode. U okviru ovog rada SIMLAB se koristio za analizu osjetljivosti Sobol metodom te je stoga uzorak izrađen prema matričnom modelu opisanom u poglavlju 4.2.



Slika 14. Korisničko sučelje računalnog programa SIMLAB

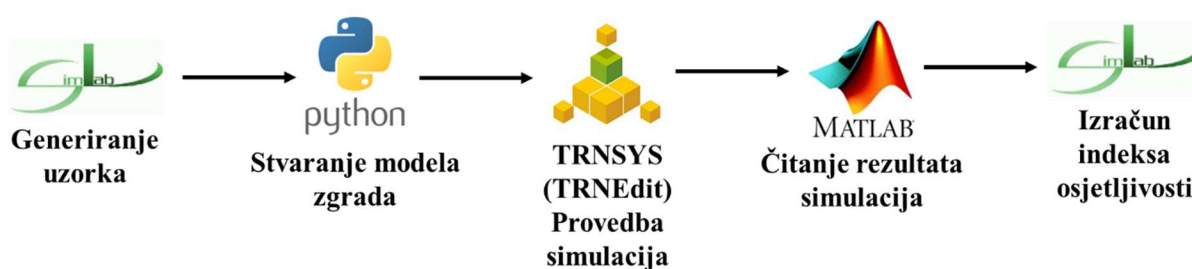
Nakon generiranja uzorka stvara se datoteka s nastavkom .sam koja sadrži uzorak za analizu, odnosno matricu $\mathbf{X}$ dimenzija $N \times k$ definiranu jednadžbom (1). Sljedeći korak analize uključuje provedbu modela N puta s ciljem stvaranja matrice $\mathbf{Y}$ definirane jednadžbom (2). Budući da energijske simulacije zgrada predstavljaju vrlo kompleksne modele, za njihovo provođenje ne može se koristiti SIMLAB, već je potrebno izračunati vrijednost izlazne varijable Y , odnosno potrebne energije za grijanje i hlađenje, pomoću nekog drugog programa, u ovom slučaju programa za energijske simulacije TRNSYS. Shema spajanja SIMLAB-a i TRNSYS-a prikazana je na Slici 15. Datoteka .sam koja sadrži uzorak ulaznih varijabli koristi se za izradu modela zgrada s pripadajućim vrijednostima ulaznih varijabli za koje se računalnim programom TRNSYS računa potrebna energija za grijanje i hlađenje. Rezultati simulacija zapisuju se u tekstualnu datoteku .txt koja se zatim učitava u računalni program SIMLAB. Koristeći rezultate energijskih simulacija u TRNSYS-u, računalnim programom SIMLAB računaju se vrijednosti indeksa osjetljivosti prvog reda i ukupnog utjecaja koristeći matematički model Sobol metode opisanog u poglavlju 4.2.



Slika 15. Shema provedbe vanjskog modela u TRNSYS-u

5.3. Automatizacija simulacija

Budući da provedba globalne analize osjetljivosti zahtjeva vrlo veliki broj simulacija ($N = 13.312$) bilo je potrebno automatizirati proces njihovog pokretanja i izvođenja. Na Slici 16 prikazan je dijagram toka za razvijeni proces automatizacije izvođenja simulacija. Proces započinje generiranjem uzorka u računalnom programu SIMLAB. Uzorak je matrica s N redaka i k stupaca, pri čemu svaki redak predstavlja vrijednosti ulaznih varijabli za jednu simulaciju zgrade. U računalnom programu PYTHON izrađena je skripta koja za svaki redak matrice uzorka izrađuje model višezonske zgrade s pripadajućim vrijednostima ulazne varijable. Zatim su za svaki model zgrade provedene energijske simulacije korištenjem TRNSYS korisničkog sučelja TRNEdit u kojem je omogućena parametarska analiza. Rezultati svakog modela zgrade čitani su i obrađivani skriptom izrađenom u računalnom programu MATLAB. U istom se programu stvara i datoteka s vrijednostima izlaznih varijabli, a koja se zatim koristi za izračun indeksa osjetljivosti korištenjem računalnog programa SIMLAB. U nastavku je detaljnije opisan svaki od navedenih koraka.



Slika 16. Shema automatizacije provođenja analize osjetljivosti

5.3.1. Stvaranje modela zgrada

Modeli višezonskih zgrada čiji je dinamički odziv simuliran računalnim programom TRNSYS izrađuju se u TRNSYS korisničkom sučelju TRNBuild pri čemu se stvara datoteka .b17 koja sadrži sve podatke o geometriji, svojstvima zidova i prozora, infiltraciji te pogonskim režimima. U okviru ovog rada u TRNBuild-u je modelirana referentna zgrada škole prema opisu u poglavlju 3. Datoteka .b17 predstavlja tekstualnu datoteku zapisanu TRNSYS sintaksom koju je moguće uređivati u tekstualnom obliku. Referentni model zgrade škole korišten je kao osnovni model u čijem je tekstualnom obliku moguće mijenjati vrijednosti pojedinih ulaznih varijabli. U nastavku je opisan princip promjene tekstualne datoteke .b17 za svaki redak matrice uzorka u računalnom programu PYTHON.

U računalnom programu PYTHON izrađena je skripta koja za svaki redak matrice uzorka stvara novu datoteku zgrade .b17 mijenjajući vrijednosti referentnog modela s pripadajućim vrijednostima ulaznih varijabli prema matrici uzorka. Primjerice, ukoliko je vrijednost toplinskog kapaciteta u prvom retku matrice uzorka $250.000 \text{ J/(m}^2 \text{ K)}$, a vrijednost koeficijenta prolaza topline zida $0,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$, skripta će stvoriti datoteku zgrade koja je jednaka referentnoj zgradi škole, ali s izmijenjenom vanjskom ovojnicom čiji će slojevi poprimiti takve vrijednosti da toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline poprime vrijednosti od $250.000 \text{ J/(m}^2 \text{ K)}$ i $0,5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. Jednako vrijedi i za sve ostale ulazne varijable.

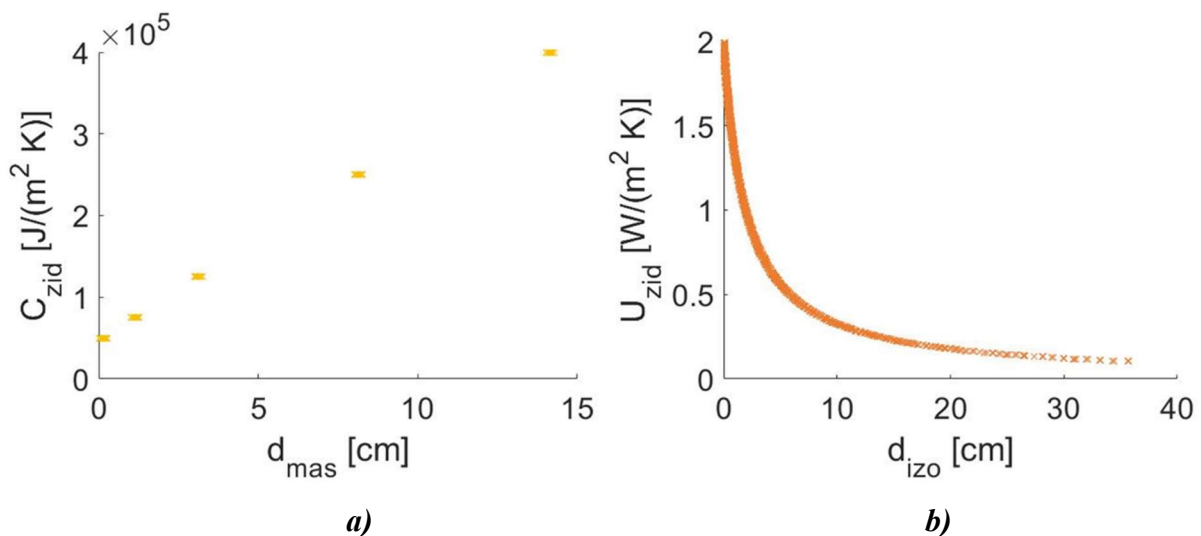
Međutim, toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline nije moguće kao samostalne vrijednosti promijeniti u datoteci .b17 zato što su zidovi definirani debljinama i svojstvima korištenih materijala. Primjerice, prema poglavlju 3 vanjski se zid sastoji od pet slojeva: produžne vapneno-cementne žbuke, armiranog betona, stiropora te polimercementne i silikatne žbuke. Toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline vanjskih zidova definirani su jednadžbama (27) i (28), pri čemu se masivni sloj odnosi na sloj armiranog betona, a izolacijski sloj na sloj stiropora. Indeksom i označeni su svi preostali slojevi vanjskog zida. Matricom uzorka za svaki su model zgrade definirani toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline. Ukoliko su poznata svojstva i debljine svih slojeva vanjskog zida, jedine dvije nepoznanice u jednadžbama (27) i (28) su debljina masivnog dijela zida i debljina izolacijskog dijela zida. Stoga se korištenjem ove dvije jednadžbe za svaki redak uzorka mogu izračunati debljine armiranog betona i stiropora kojima vrijednost toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskog zida poprime vrijednosti definirane u matrici uzorka. Ovisnost toplinskog kapaciteta zida i koeficijenta prolaza topline o debljini masivnog, odnosno izolacijskog sloja prikazana je na Slici 17.

$$C_{\text{zid}} = (\rho_{\text{mas}} c_{\text{mas}} d_{\text{mas}}) + (\rho_{\text{izo}} c_{\text{izo}} d_{\text{izo}}) + \sum_i (\rho_i c_i d_i) \quad (27)$$

$$U_{\text{zid}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_u} + \frac{d_{\text{mas}}}{\lambda_{\text{mas}}} + \frac{d_{\text{izo}}}{\lambda_{\text{izo}}} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_v}} \quad (28)$$

pri čemu su:

ρ_{mas}	gustoća masivnog sloja vanjskog zida [kg/m^3]
c_{mas}	specifični toplinski kapacitet masivnog sloja vanjskog zida [$\text{J}/(\text{kg K})$]
λ_{mas}	toplinska provodnost masivnog sloja vanjskog zida [$\text{W}/(\text{m K})$]
d_{mas}	debljina masivnog sloja vanjskog zida [m]
ρ_{izo}	gustoća izolacijskog sloja vanjskog zida [kg/m^3]
c_{izo}	specifični toplinski kapacitet izolacijskog sloja vanjskog zida [$\text{J}/(\text{kg K})$]
λ_{izo}	toplinska provodnost izolacijskog sloja vanjskog zida [$\text{W}/(\text{m K})$]
d_{izo}	debljina izolacijskog sloja vanjskog zida [m]
ρ_i	gustoća i -tog sloja vanjskog zida [kg/m^3]
c_i	specifični toplinski kapacitet i -tog sloja vanjskog zida [$\text{J}/(\text{kg K})$]
λ_i	toplinska provodnost i -tog sloja vanjskog zida [$\text{W}/(\text{m K})$]
d_i	debljina i -tog sloja vanjskog zida [m]
α_u	koeficijent prijelaza topline na unutarnjoj strani zida [= 2,5 $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]
α_v	koeficijent prijelaza topline na vanjskoj strani zida [= 20 $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$]



Slika 17. Ovisnost a) toplinskog kapaciteta zida o debljini masivnog sloja, b) koeficijentu prolaza topline zida o debljini izolacijskog sloja

Udjelo površina prozora u fasadi za sve četiri orijentacije također nije moguće kao takve definirati u .b17 datoteci, već je potrebno definirati površine prozora. Stoga se površine prozora za svaki redak matrice uzorka računaju prema jednadžbi (29). Površine prozora u referentnom modelu zgrade množe se s omjerom udjela površine prozora definiranog u matrici uzorka i udjela površine prozora u fasadi kod referentnog modela zgrade. Jednadžba (29) vrijedi za sve četiri orijentacije. Udjeli površina prozora u fasadi za sve četiri orijentacije u referentnom slučaju prikazane su u Tablici 4, dok su površine prozora u referentnom slučaju prikazane u Tablici 5.

$$A_{p,i} = \frac{WWR_i}{WWR_{ref}} \cdot A_{p,ref} \quad (29)$$

pri čemu su:

$A_{p,i}$	površina prozora za i -ti redak matrice uzorka [m^2]
WWR_i	udio površine prozora u fasadi za i -ti redak matrice uzorka [-]
WWR_{ref}	udio površine prozora u fasadi za referentni slučaj [-]
$A_{p,ref}$	površina prozora za referentni slučaj [m^2]

Unutarnje toplinske dobitke potrebno je definirati za svaku zonu, sukladno njenoj površini. Pri tome je također potrebno zasebno definirati vrijednosti konvektivnih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka zračenjem. Toplinski dobici za svaku zonu definiranu su pomoću jednadžbi (30) i (31), a iz matrice uzorka koriste se vrijednosti specifičnih unutarnjih toplinskih dobitaka Q_{int} i udjela konvektivnih toplinskih dobitaka $f_{int,con}$. Vrijednosti površina zona prikazane su u Tablici 1.

$$Q_{int,con} = Q_{int} \cdot A_{zone} \cdot f_{int,con} \quad (30)$$

$$Q_{int,rad} = Q_{int} \cdot A_{zone} \cdot (1 - f_{int,con}) \quad (31)$$

pri čemu su:

$Q_{int,con}$	konvektivni unutarnji toplinski dobici za zonu [W]
Q_{int}	specifični unutarnji toplinski dobici za i -ti redak matrice uzorka [W/m^2]
$Q_{int,rad}$	unutarnji toplinski dobici zračenjem za zonu [W]
$f_{int,con}$	udio konvektivnih toplinskih dobitaka za i -ti redak matrice uzorka [-]
A_{zone}	površina zone [m^2]

Vrijeme prekida rada sustava grijanja i hlađenja u datoteci .b17 definirano je kao raspored u kojem je potrebno definirati sat početka i kraja rada sustava. U Tablici 13 prikazana su vremena početka i vremena kraja rada sustava za diskretno definirane vrijednosti u matrici uzorka t_{off} . Vrijednost infiltracije direktno se zadaje u datoteci .b17 kao vrijednost koja se nalazi u matrici uzorka.

Tablica 13. Ulazni podaci o vremenu rada sustava

Vrijeme trajanja prekida rada sustava, t_{off} [h]	Početak rada sustava grijanja i hlađenja (sat)	Kraj rada sustava grijanja i hlađenja (sat)
0	00:00	24:00
2	01:00	23:00
4	02:00	22:00
6	03:00	21:00
8	04:00	20:00
10	05:00	19:00

Vrijednosti koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora nije moguće direktno definirati u datoteci .b17, već je za svaki redak matrice uzorka potrebno mijenjati tip prozora sukladno kombinaciji njihovih vrijednosti. Budući da je koeficijent prolaza topline prozora zadan diskretno s pet vrijednosti, a stupanj propuštanja Sunčevog zračenja diskretno s četiri vrijednosti, ukupni broj analiziranih prozora je dvadeset. Svi korišteni prozori prikazani su u Tablici 14. Prozori s najnižim vrijednostima koeficijenta prolaza topline ($U_{\text{proz}} = 0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) prozori su s trostrukim staklima te punjeni argonom, dok su prozori s najvišim vrijednostima koeficijenta prolaza topline ($U_{\text{proz}} = 5,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) jednostruki prozori. Srednje vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora dobivene su modeliranjem prozora s dvostrukim staklima te su punjeni sa zrakom ili argonom. Različite vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora ovise o vrsti premaza ostakljenja.

Tablica 14. Svojstva prozora korištenih pri analizi

		$g_{\text{proz}} [-]$			
		0,2 – 0,35	0,35 – 0,5	0,5 – 0,65	0,65 – 0,8
$U_{\text{proz}} [\text{W}/(\text{m}^2 \text{ K})]$	0,8	$U_{\text{proz}} = 0,84$ $g_{\text{proz}} = 0,21$	$U_{\text{proz}} = 0,83$ $g_{\text{proz}} = 0,39$	$U_{\text{proz}} = 0,84$ $g_{\text{proz}} = 0,53$	$U_{\text{proz}} = 0,84$ $g_{\text{proz}} = 0,65$
	1,5	$U_{\text{proz}} = 1,53$ $g_{\text{proz}} = 0,3$	$U_{\text{proz}} = 1,51$ $g_{\text{proz}} = 0,47$	$U_{\text{proz}} = 1,49$ $g_{\text{proz}} = 0,63$	$U_{\text{proz}} = 1,51$ $g_{\text{proz}} = 0,75$
	2,8	$U_{\text{proz}} = 2,76$ $g_{\text{proz}} = 0,32$	$U_{\text{proz}} = 2,77$ $g_{\text{proz}} = 0,38$	$U_{\text{proz}} = 2,81$ $g_{\text{proz}} = 0,54$	$U_{\text{proz}} = 2,82$ $g_{\text{proz}} = 0,8$
	3,6	$U_{\text{proz}} = 3,6$ $g_{\text{proz}} = 0,24$	$U_{\text{proz}} = 3,59$ $g_{\text{proz}} = 0,43$	$U_{\text{proz}} = 3,58$ $g_{\text{proz}} = 0,56$	$U_{\text{proz}} = 3,6$ $g_{\text{proz}} = 0,68$
	5,8	$U_{\text{proz}} = 5,8$ $g_{\text{proz}} = 0,29$	$U_{\text{proz}} = 5,8$ $g_{\text{proz}} = 0,43$	$U_{\text{proz}} = 5,83$ $g_{\text{proz}} = 0,54$	$U_{\text{proz}} = 5,8$ $g_{\text{proz}} = 0,73$

5.3.2. Automatizacija simulacija u TRNSYS korisničkom sučelju TRNEdit

TRNSYS korisničko sučelje TRNEdit koristi se za uređivanje datoteka u tekstualnom obliku korištenjem TRNSYS sintakse. U njemu je također moguće pokretanje simulacija izrađenih u sučelju Simulation Studio. Kako bi se simulacija mogla uređivati u TRNEdit-u potrebno je izraditi ulaznu datoteku simulacije (eng. *input file*) ekstenzije .dck pritiskom na *Calculate* → *Create input file* u korisničkom sučelju Simulation Studio. Ovako definirana .dck datoteka sadrži sve podatke potrebne za pokretanje simulacije u jednakoj mjeri kao i simulacija izrađena spajanjem pojedinih komponenti u sučelju Simulation Studio prikazana na Slici 13. U .dck datoteci nalaze se podaci o korištenim TRNSYS komponentama, o parametrima koji spajaju pojedine komponente, o vanjskim datotekama kao meteorološkim podacima ili datotekama .b17 kojima je definirana višezonska zgrada. Prednost korištenja sučelja TRNEdit za pokretanje simulacija je mogućnost provedbe parametarske analize. Parametarska analiza omogućuje automatsko pokretanje većeg broja simulacija za različite vrijednosti ulaznih parametara. Primjerice, ukoliko se simulira solarni kolektor, moguće je odjednom provesti deset simulacija s deset različitih vrijednosti površina kolektora. Pri tome se izrađuje tablica u koju se upisuju vrijednosti parametra za koji se želi provesti analiza. U okviru ovog rada provedena je parametarska analiza pri čemu je promjenjivi parametar predstavljao model zgrade. Svakome je modelu zgrade izrađenom programom PYTHON na način opisan u

prethodnom odjeljku dodijeljen broj koji se naziva logička jedinica za datoteku modela zgrade (eng. *logical unit for building description file*). Promjenom vrijednosti logičke jedinice za svaku je simulaciju učitavan drugi model zgrade čime je omogućeno automatsko pokretanje simulacija u TRNEdit-u.

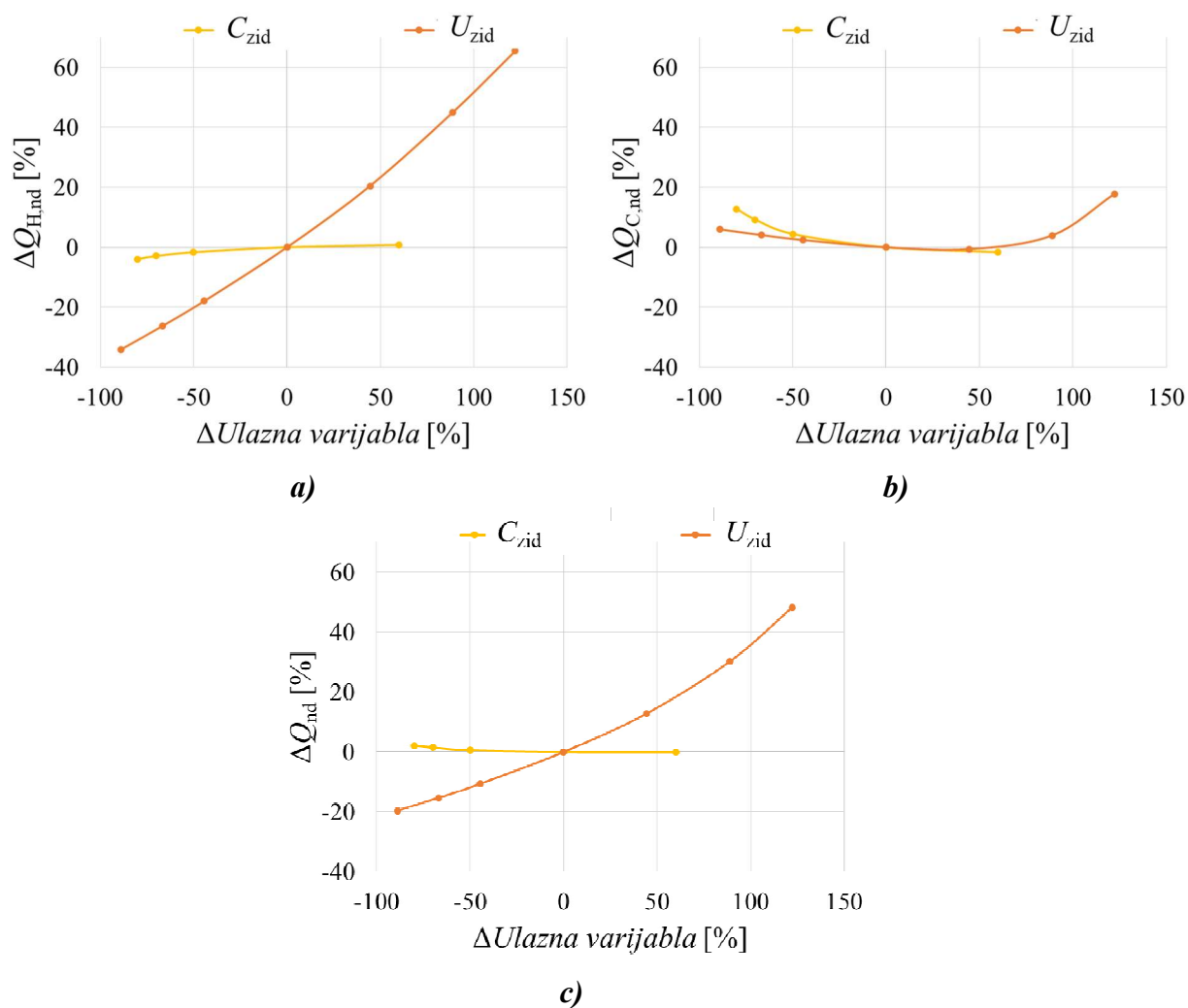
6. REZULTATI LOKALNE ANALIZE OSJETLJIVOSTI

U nastavku su prikazani rezultati lokalne analize osjetljivosti, pri čemu je kao referentni slučaj korišten model zgrade opisan u poglavlju 3. Za svaki je od slučajeva izračunata postotna promjena ulazne i izlazne varijable u odnosu na referentni slučaj te je izračunat indeks utjecajnosti prema obrascu objašnjenom u poglavlju 4.1. Radi jednostavnijeg pregleda rezultata ulazne su varijable podijeljene u pet skupina:

1. Varijable koje se odnose na toplinske karakteristike vanjskog zida (2 varijable)
 - Koeficijent prolaza topline vanjskih zidova
 - Toplinski kapacitet vanjskih zidova
2. Varijable koje se odnose na toplinske karakteristike prozora (2 varijable)
 - Koeficijent prolaza topline prozora
 - Stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora
3. Varijable koje se odnose na površine prozora (4 varijable)
 - Udio površine prozora u fasadi za sjevernu orijentaciju
 - Udio površine prozora u fasadi za istočnu orijentaciju
 - Udio površine prozora u fasadi za južnu orijentaciju
 - Udio površine prozora u fasadi za zapadnu orijentaciju
4. Infiltracija (1 varijabla)
5. Varijable koje se odnose na unutarnje toplinske dobitke i vrijeme prekida rada grijanja i hlađenja (3 varijable)
 - Unutarnji toplinski dobici
 - Udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka
 - Vrijeme prekida rada grijanja i hlađenja

6.1. Analiza utjecaja toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova

Na Slici 18 prikazan je utjecaj promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. U tablicama 15 i 16 prikazane su brojčane vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje, kao i postotne promjene ulaznih i izlaznih varijabli u odnosu na referentni slučaj.



Slika 18. Utjecaj promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta i koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

Tablica 15. Utjecaj promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskih zidova na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

C_{zid} [J/(m ² K)]	ΔC_{zid}	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
50.000	-80%	139,4	-3,9%	92,7	+12,7%	232,1	+2,1%
75.000	-70%	140,9	-2,9%	89,7	+9,2%	230,6	+1,5%
125.000	-50%	142,7	-1,7%	85,8	+4,4%	228,5	+0,5%
250.000	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
400.000	+60%	146,2	+0,8%	80,8	-1,7%	227	-0,1%

Tablica 16. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

U_{zid} [W/(m ² K)]	ΔU_{zid}	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,1	-88,9%	95,6	-34,1%	87,1	+6%	182,7	-19,6%
0,3	-66,7%	107	-26,2%	85,5	+4,1%	192,5	-15,3%
0,5	-44,4%	119	-18%	84,1	+2,4%	203,2	-10,6%
0,9	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
1,3	+44,4%	174,8	+20,5%	81,6	-0,6%	256,4	+12,8%
1,7	+88,9%	210,5	+45,1%	85,4	+3,9%	295,9	+30,2%
2	+122,2%	240	+65,4%	96,8	+17,8%	336,8	+48,2%

Sa Slike 18 a) vidljivo je da promjena vrijednosti koeficijenta prolaza topline vanjskog zida ima puno veći utjecaj na potrebnu energiju za grijanje nego vrijednost toplinskog kapaciteta vanjskog zida. Primjerice, povećanje vrijednosti koeficijenta prolaza topline za 50% uzrokuje povećanje potrebne energije za grijanje za 20%, dok promjena vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskog zida ne uzrokuje vidljivu promjenu potrebne energije za grijanje.

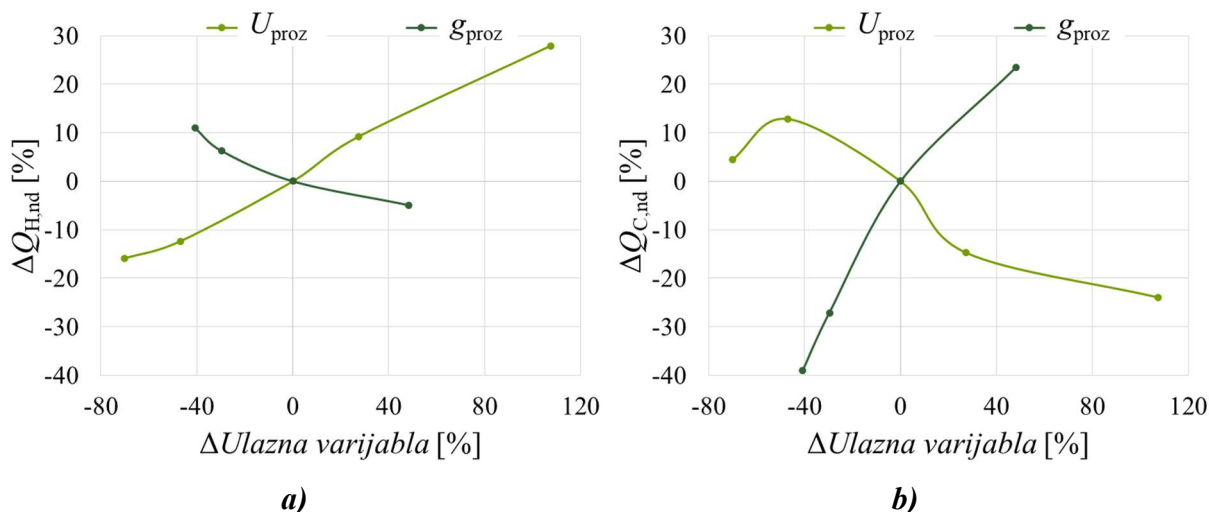
S druge strane, utjecaj koeficijenta prolaza topline nije toliko izražen kod potrebne energije za hlađenje. Promjena vrijednosti koeficijenta prolaza topline od -100% do +100% u odnosu na referentnu vrijednost uzrokuje promjenu potrebne energije za hlađenje na razini manjoj od 20%. Također, zavisnost potrebne energije za hlađenje i koeficijenta prolaza topline pokazuje nelinearne karakteristike, pri čemu je na dijagramu vidljiva točka minimalne potrebne energije za hlađenje (između 0% i +50% promjene koeficijenta prolaza topline). Povećanjem koeficijenta prolaza topline dolazi do sve većih toplinskih dobitaka provođenjem kroz zid što uzrokuje povećanje potrebne energije za hlađenje. Međutim, sniženje koeficijenta prolaza topline ispod određene vrijednosti također povećava potrebnu energiju za hlađenjem. Najveće toplinsko opterećenje kod hlađenja predstavljaju unutarnji toplinski dobici i toplinski dobici od Sunca, dok su toplinski dobici provođenjem kroz zidove prisutni samo ukoliko je vanjska temperatura zraka viša od unutarnje. Za grad Zagreb u režimu hlađenja vanjska je temperatura često niža od unutarnje postavne (Slika 9 a)) te izmjena topline kroz zidove smanjuje potrebnu energiju za hlađenje. Ukoliko je zgrada dobro izolirana (malen koeficijent prolaza topline) ovaj je efekt sve manje izražen što dovodi do povećanja potrebne energije za hlađenje. Dodatan razlog povećanja potrebne energije za hlađenjem smanjenjem koeficijenta prolaza topline jest

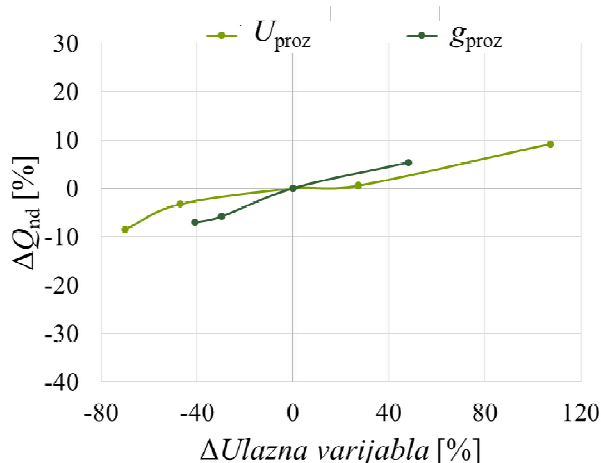
nemogućnost pasivnog hlađenja noću. Što su zgrade bolje izolirane, to je efekt noćnog pasivnog hlađenja sve manje izraženiji. Utjecaj promjene toplinskog kapaciteta na potrebnu energiju za hlađenje izraženiji je nego kod grijanja: smanjenjem toplinskog kapaciteta za 80% povećava se potrebna energija za hlađenje za oko 13%. Međutim, pri većim vrijednostima toplinskog kapaciteta od referentnog, promjena njegove vrijednosti ne uzrokuje vidljive promjene potrebne energije za hlađenje.

Utjecaj toplinskog kapaciteta na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje također nije zamjetan. Bez obzira na nelinearan karakter utjecaja koeficijenta prolaza topline na potrebnu energiju za hlađenje, karakteristika utjecaja na ukupnu potrebnu energiju sličnija je onoj za grijanje: smanjenjem koeficijenta prolaza topline dolazi do smanjenja ukupne potrebne energije i obratno.

6.2. Analiza utjecaja koeficijenta prolaza topline prozora i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora

Na Slici 19 prikazan je utjecaj promjene koeficijenta prolaza topline prozora i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. U Tablicama 17 i 18 prikazane su brojčane kao i postotne vrijednosti promjene ulaznih varijabli i potrebne energije za grijanje i hlađenje u odnosu na referentni slučaj.





c)

Slika 19. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

Tablica 17. Utjecaj promjene vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

U_{proz} [W/(m ² K)]	ΔU_{proz}	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,84	-70,1%	122,1	-15,9%	85,8	+4,4%	207,9	-8,5%
1,49	-47%	127,1	-12,4%	92,7	+12,8%	219,9	-3,3%
2,81	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
3,58	+27,4%	158,5	+9,2%	70,1	-14,7%	228,5	+0,6%
5,83	+107,5%	185,6	+27,9%	62,5	-23,9%	248,1	+9,2%

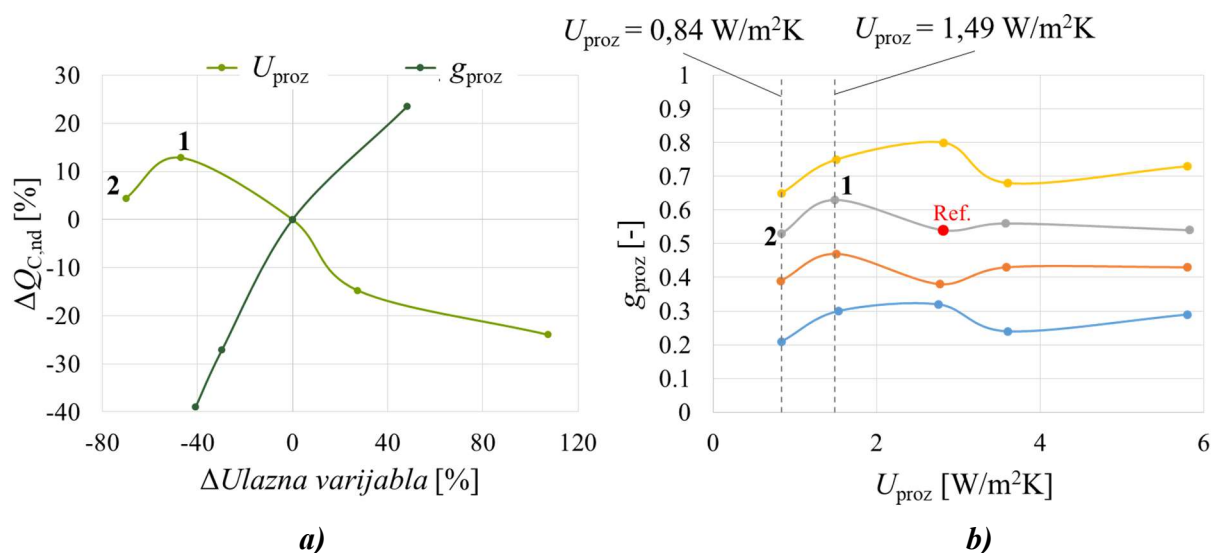
Tablica 18. Utjecaj promjene vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

g_{proz} [-]	Δg_{proz}	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,32	-40,7%	161	+11%	50,1	-39	211,2	-7,1
0,38	-29,6%	154,2	+6,2%	59,9	-27,1	214,1	-5,8
0,54	0%	145,1	0%	82,2	0	227,3	0
0,8	+48,2%	138	-4,9%	101,5	+23,5	239,4	+5,4

Povećanjem vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora dolazi do povećanja potrebne energije za grijanje iz razloga što se povećavaju toplinski gubici kroz prozor. Pri tome, porastu vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora za 108% u odnosu na referentni slučaj odgovara porast potrebne energije za grijanje za 28%. S druge strane, povećanjem stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora dolazi do smanjenja potrebne energije za grijanje budući da se na taj način povećavaju toplinski dobici od Sunca. Međutim, utjecaj promjene vrijednosti stupnja propuštanja prozora puno je više izraženiji kod potrebne energije za hlađenje budući da toplinski dobici od Sunca, uz unutarnje toplinske dobitke, predstavljaju najveće opterećenje sustavu hlađenja. Smanjenju stupnja propuštanja Sunčevog zračenja za 40% odgovara smanjenje potrebne energije za hlađenje za gotovo jednak postotak. Smanjenjem koeficijenta prolaza topline prozora dolazi do povećanja potrebne energije za hlađenje iz razloga što je vanjska temperatura u režimu hlađenja često niža od unutarnje postavne temperature čime provođenje topline kroz prozore povoljno djeluje na odvođenje unutarnjih toplinskih dobitaka i toplinskih dobitaka od Sunca. Također, kod viših vrijednosti koeficijenata prolaza topline dolazi do izraženijeg efekta pasivnog hlađenja noću. Budući da su utjecaji koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora suprotni ovisno o tome radi li se o grijanju ili hlađenju, njihov je utjecaj na ukupnu potrebnu energiju manje zamjetan te se kreće u razini od -10% do +10%.

Kod određene vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora postiže se maksimum potrebne energije za hlađenje koji se može objasniti visokim utjecajem stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Prilikom generiranja prozora (Tablica 14) za svaki je prozor definirana nazivna vrijednost stupnja propuštanja i koeficijenta prolaza topline. Pri tome bi svaki stupac tablice trebao predstavljati konstantnu vrijednost stupnja propuštanja Sunčevog zračenja, a svaki redak konstantnu vrijednost koeficijenta prolaza topline. Međutim, vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja za određenu vrijednost koeficijenta prolaza topline samo su približno konstantne kao što je prikazano na Slici 20 b). Svaka krivulja predstavlja približno konstantnu vrijednost stupnja propuštanja prozora za različite vrijednosti koeficijenta prolaza topline preuzetih iz Tablice 14. Referentni slučaj prikazan je crvenom točkom i predstavlja vrijednost koeficijenta prolaza topline od $2,81 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ i vrijednost stupnja propuštanja Sunčevog zračenja 0,54. Prilikom provedbe lokalne analize, za svaku vrijednost koeficijenta prolaza topline vrijednost stupnja propuštanja trebala bi biti jednaka onoj u referentnom slučaju, odnosno 0,54. Međutim, u točki 1 stupanj propuštanja prozora povećava se za 17% u odnosu na referentni slučaj (na vrijednost 0,63). Pomakom iz točke 1 u točku 2, odnosno smanjenjem koeficijenta prolaza topline s $1,49 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ na $0,84 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ stupanj

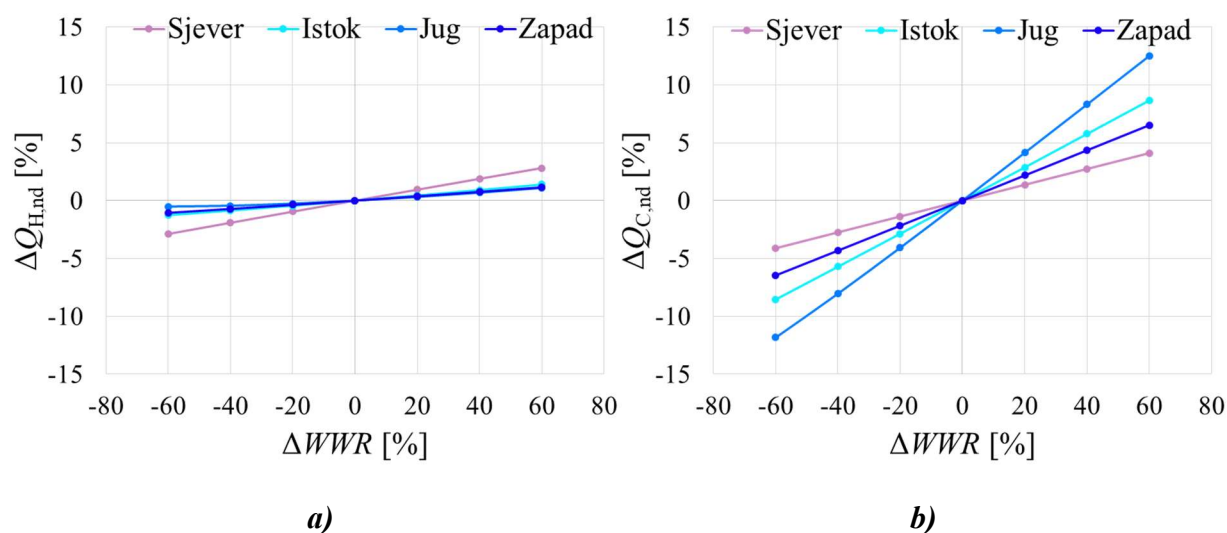
propuštanja vraća se na vrijednost bliskoj referentnoj, odnosno 0,53. Budući da povećanje stupnja propuštanja prozora povećava potrebnu energiju za hlađenje više nego smanjenje koeficijenta prolaza topline za isti postotak (što je vidljivo po strmijem nagibu krivulje utjecaja stupnja propuštanja) povećanje potrebne energije za hlađenje u točki 1 više je od samostalnog utjecaja smanjenja vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora (Slika 20 a)).

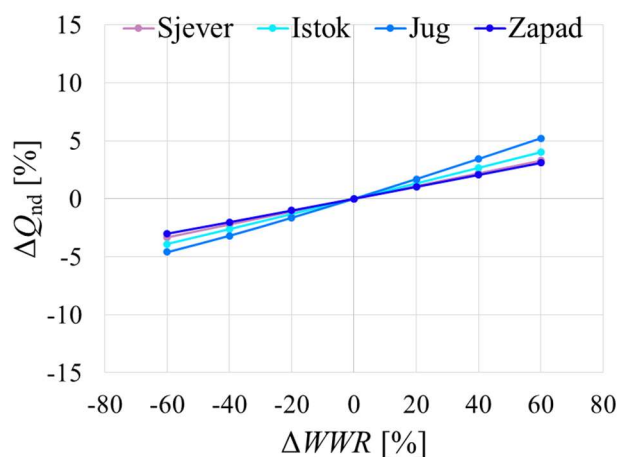


Slika 20. Slika uz objašnjenje maksimuma potrebne energije za hlađenje u ovisnosti o koeficijentu prolaza topline prozora

6.3. Analiza utjecaja udjela površine prozora u fasadi

Na Slici 21 prikazan je utjecaj promjene vrijednosti udjela površine prozora u fasadi za sjever, istok, jug i zapad na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. U tablicama 19 do 22 prikazane su brojčane vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje, kao i postotne promjene ulaznih i izlaznih varijabli u odnosu na referentni slučaj.





c)

Slika 21. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u fasadi na potrebnu godišnju energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

Tablica 19. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u sjevernoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

WWR_s [-]	ΔWWR_s	$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{H,nd}$	$Q_{C,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{C,nd}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,2	-60%	140,9	-2,9%	78,8	-4,1%	219,7	-3,3%
0,3	-40%	142,3	-1,9%	79,9	-2,7%	222,2	-2,2%
0,4	-20%	143,7	-1%	81	-1,4%	224,8	-1,1%
0,5	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
0,6	+20%	146,5	+0,9%	83,3	+1,4%	229,8	+1,1%
0,7	+40%	147,8	+1,9%	84,4	+2,7%	232,2	+2,2%
0,8	+60%	149,2	+2,8%	85,5	+4,1%	234,7	+3,3%

Tablica 20. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u istočnoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

WWR_I [-]	ΔWWR_I	$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{H,nd}$	$Q_{C,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{C,nd}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,2	-60%	143,3	-1,3%	75,1	-8,5%	218,4	-3,9%
0,3	-40%	143,9	-0,9%	77,5	-5,7%	221,3	-2,6%
0,4	-20%	144,5	-0,4%	79,8	-2,9%	224,3	-1,3%
0,5	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
0,6	+20%	145,8	+0,5%	84,5	+2,9%	230,3	+1,3%
0,7	+40%	146,4	+0,9%	86,9	+5,8%	233,3	+2,7%
0,8	+60%	147,1	+1,4%	89,3	+8,7%	236,4	+4%

Tablica 21. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u južnoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

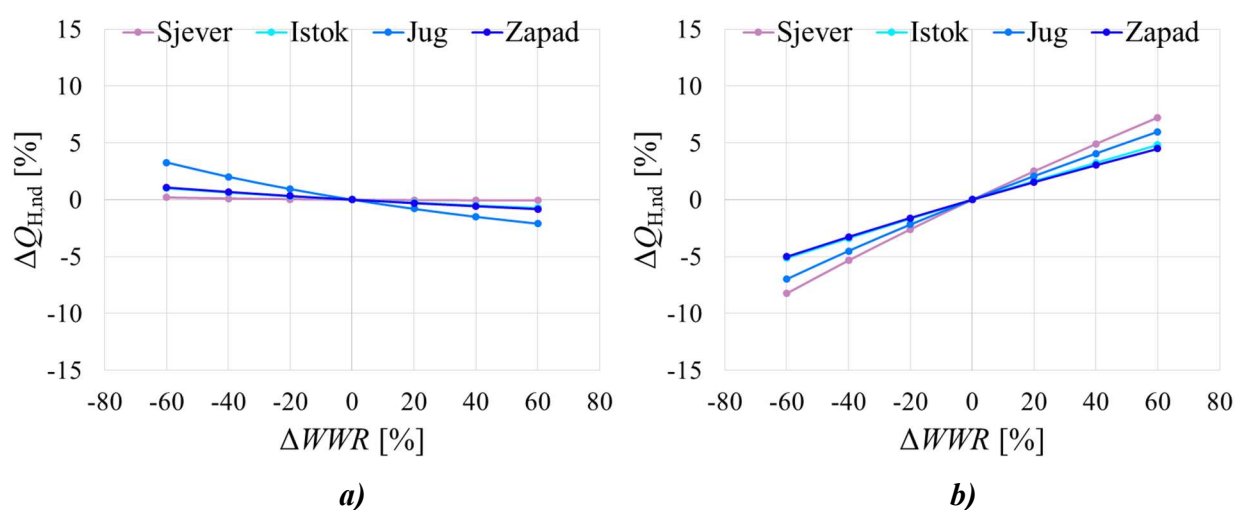
WWR_J [-]	ΔWWR_J	$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{H,nd}$	$Q_{C,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{C,nd}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,2	-60%	144,4	-0,5%	72,4	-11,8%	216,8	-4,6%
0,3	-40%	144,5	-0,4%	75,6	-8%	220	-3,2%
0,4	-20%	144,7	-0,3%	78,8	-4,1%	223,5	-1,6%
0,5	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
0,6	+20%	145,6	+0,3%	85,6	+4,1%	231,1	+1,7%
0,7	+40%	146,1	+0,7%	89	+8,3%	235,1	+3,4%
0,8	+60%	146,7	+1,1%	92,4	+12,5%	239,1	+5,2%

Tablica 22. Utjecaj promjene vrijednosti udjela prozora u zapadnoj fasadi na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

WWR_Z [-]	ΔWWR_Z	$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{H,nd}$	$Q_{C,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{C,nd}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0,2	-60%	143,6	-1,1%	76,9	-6,5%	220,4	-3%
0,3	-40%	144,1	-0,7%	78,6	-4,3%	222,7	-2%
0,4	-20%	144,6	-0,4%	80,4	-2,2%	225	-1%
0,5	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
0,6	+20%	145,6	+0,4%	83,9	+2,2%	229,6	+1%
0,7	+40%	146,2	+0,8%	85,7	+4,3%	231,9	+2,1%
0,8	+60%	146,8	+1,2%	87,5	+6,5%	234,3	+3,1%

Sa Slike 21 a) ne primjećuje se značajniji utjecaj udjela površine prozora u fasadi na potrebnu energiju za grijanje. Najveći utjecaj predstavlja smanjenje ili povećanje površine prozora na sjevernoj strani, dok je za preostale tri orijentacije utjecaj gotovo jednak. Pri tome se promjenom udjela površine prozora u sjevernoj fasadi za 60% u odnosu na referentni slučaj povećava ili smanjuje potrebna energija za grijanje za oko 3%. Najmanji utjecaj na promjenu potrebne energije za grijanje predstavlja udio površine prozora na južnoj strani iz razloga što povećanjem površine prozora rastu toplinski gubici provođenjem kroz staklo, ali istovremeno rastu i toplinski dobici od Sunca. Ovaj primjer ukazuje i na jedan od nedostataka lokalne metoda, a to je ovisnost o odabranom referentnom slučaju. Primjerice, ukoliko bi se kao referentni slučaj prozora odabrao onaj s niskim vrijednostima koeficijenta prolaza topline i visokim vrijednostima stupnja propuštanja Sunčevog zračenja, karakteristika promjene potrebne energije za grijanje i udjela površine prozora u južnoj fasadi imala bi negativan nagib, kao što je prikazano na Slici 22 a). U tom bi slučaju toplinski dobici zbog veće površine prozora

bili izraženiji od toplinskih gubitaka, te bi se povećanjem površine prozora na južnoj strani smanjivala potrebna energija za grijanje. Bez obzira na odabrani referentni slučaj, oba primjera pokazuju veoma malen utjecaj površina prozora neovisno o orijentaciji na potrebnu energiju za grijanje. Promjenom udjela površine prozora u vanjskoj fasadi od -60% do +60% potrebna energija za grijanje mijenja se na razini manjoj od 10%. Iako je koeficijent prolaza topline prozora veći od onog za vanjski zid ($U_{\text{zid}} = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}) < U_{\text{proz}} = 2,81 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$) promjenom udjela površine prozora ne mijenja se znatno potrebna energija za grijanje iz razloga što promjena površine prozora djeluje dvojako. S jedne strane povećava toplinske gubitke provođenjem, dok s druge strane povećava toplinske dobitke od Sunca. U ovisnosti o kombinaciji vrijednosti koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja, jedan od ovih utjecaja prevlada te zakreće krivulju utjecaja u pozitivnom ili negativnom smjeru. Primjerice, povećanjem stupnja propuštanja Sunčevog zračenja i smanjenjem koeficijenta prolaza topline, krivulja utjecaja zakreće se u smjeru kazaljke na satu kao na Slici 22 a). Međutim, povećanjem koeficijenta prolaza topline i smanjenjem stupnja propuštanja krivulja se zakreće u smjeru suprotnom od kazaljke na satu kao na Slici 19 b). Dodatan mogući razlog za malen utjecaj udjela površine prozora je relativno visoka vrijednost koeficijenta prolaza topline zida u referentnom slučaju. Što je koeficijent prolaza topline zida niži to bi udio prozora u fasadi trebao imati veći utjecaj na potrebnu energiju za grijanje budući da se povećava udio površine s puno većim koeficijentom prolaza topline. Također, kod lokalne metode varirana je vrijednost udjela površine prozora za samo jednu orijentaciju te stoga postoji mogućnost da samostalan utjecaj površine prozora na samo jednoj orijentaciji nema zapaženi učinak na potrebnu energiju za cijelu zgradu.



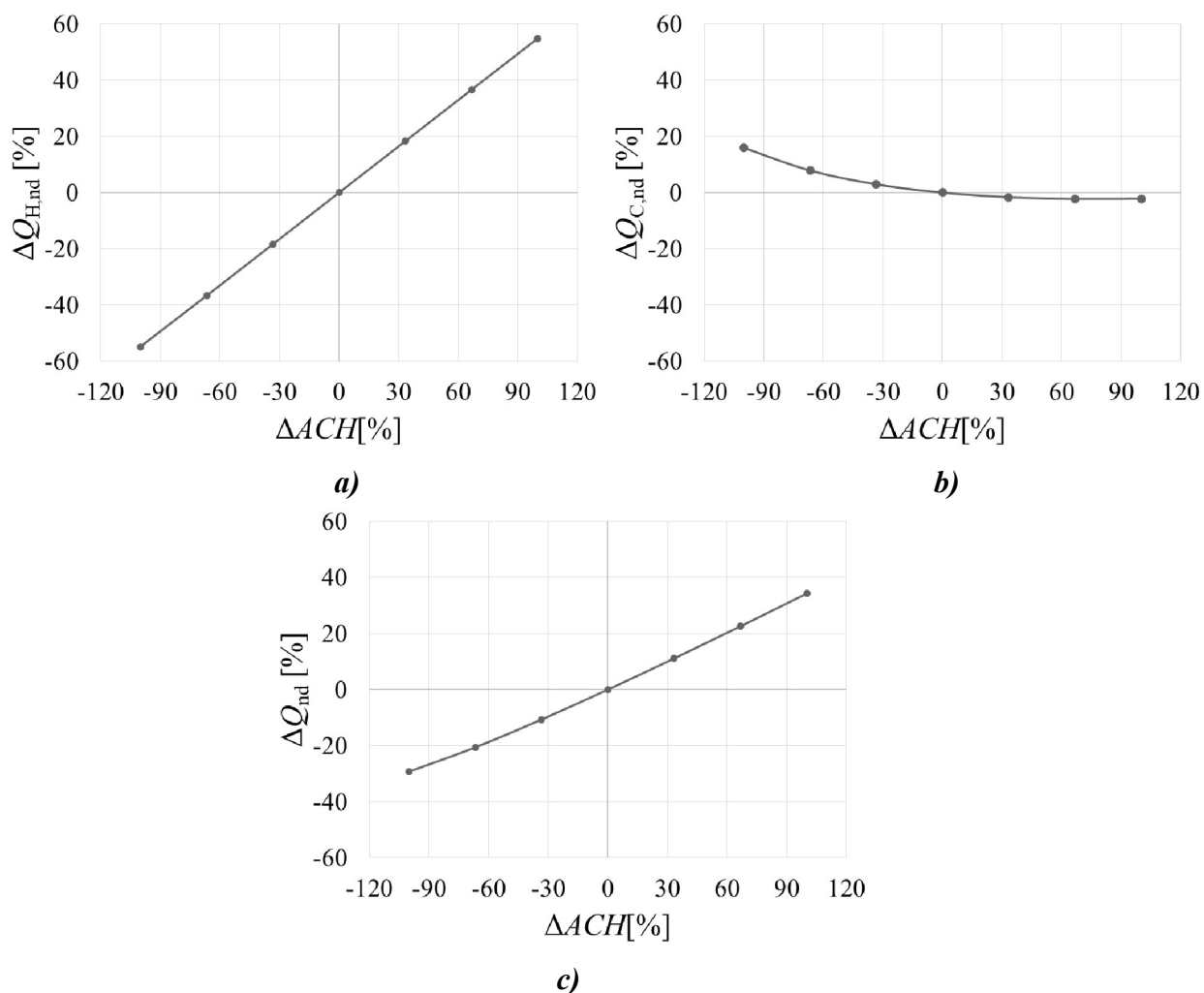
Slika 22. Utjecaj promjene vrijednosti udjela površine prozora u fasadi na potrebnu energiju za grijanje kod prozora s a) $U_{\text{zid}} = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $U_{\text{proz}} = 0,84 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $g_{\text{proz}} = 0,65$
b) $U_{\text{zid}} = 0,2 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $U_{\text{proz}} = 5,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$; $g_{\text{proz}} = 0,29$

S druge strane, utjecaj udjela površina prozora u fasadi ima puno veći utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje. Pri tome najveći utjecaj ima površina prozora na južnoj strani, budući da se mijenjanjem njene vrijednosti najviše mijenjaju toplinski dobici od Sunca, pa se tako promjenom udjela površine prozora na južnoj fasadi za 20% mijenja potrebna energija za hlađenje za oko 5%. Najmanji utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje predstavljaju prozori na sjevernoj fasadi, budući da se veći toplinski dobici zbog povećanja površine kompenziraju izraženijim pasivnim hlađenjem tijekom noći ili periodima hlada na sjevernoj strani.

Zbog većeg apsolutnog iznosa potrebne energije za grijanje od potrebne energije za hlađenje, karakteristike ovisnosti ukupne potrebne energije bliže su onoj za grijanje. Najveće se promjene postižu varijacijom površina prozora na južnoj strani, pri čemu se promjenom od 60% postiže promjena ukupne potrebne energije za oko 5%. Iz dijagrama na Slici 21 također se primjećuje izrazita linearna promjena potrebnih energija za grijanje i hlađenje u ovisnosti o promjeni udjela površine prozora u fasadi za sve četiri orijentacije.

6.4. Analiza utjecaja infiltracije

Na Slici 23 prikazan je utjecaj infiltracije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje u odnosu na referentni slučaj. U Tablici 23 prikazane su brojčane vrijednosti kao i postotne promjene infiltracije i potrebne energije za grijanje i hlađenje. Vrijednost infiltracije varirana je od -100% do +100% u odnosu na referentni slučaj. Iz dijagrama se primjećuje veliki utjecaj vrijednosti infiltracije na potrebnu energiju za grijanje. Primjerice, povećanjem vrijednosti infiltracije za 30% povećava se potrebna energija za grijanje za 20%. S druge strane, utjecaj infiltracije na potrebnu energiju za hlađenje je puno manji, a također je i drugačijeg predznaka. Prilikom smanjenja vrijednosti infiltracije, vrijednost potrebne energije za hlađenje se povećava. Kod viših vrijednosti infiltracije utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje je praktički zanemariv. Visok utjecaj infiltracije na potrebnu energiju za grijanje javlja se iz razloga što je vanjski zrak u periodu grijanja puno niže temperature od unutarnje postavne temperature zraka. Iz tog razloga visoke vrijednosti infiltracije predstavljaju velike toplinske gubitke koji uzrokuju visoke vrijednosti potrebne energije za grijanje. U periodu hlađenja, vanjski je zrak tijekom dana više temperature od unutarnje postavne temperature, ali je temperaturna razlika puno manja nego kod grijanja. Također, tijekom noći, vanjski je zrak u periodu hlađenja često niže temperature od unutarnjeg te infiltracija pogoduje efektu pasivnog hlađenja. Iz tog razloga povećanjem vrijednosti infiltracije dolazi do smanjenja potrebne energije za hlađenje.



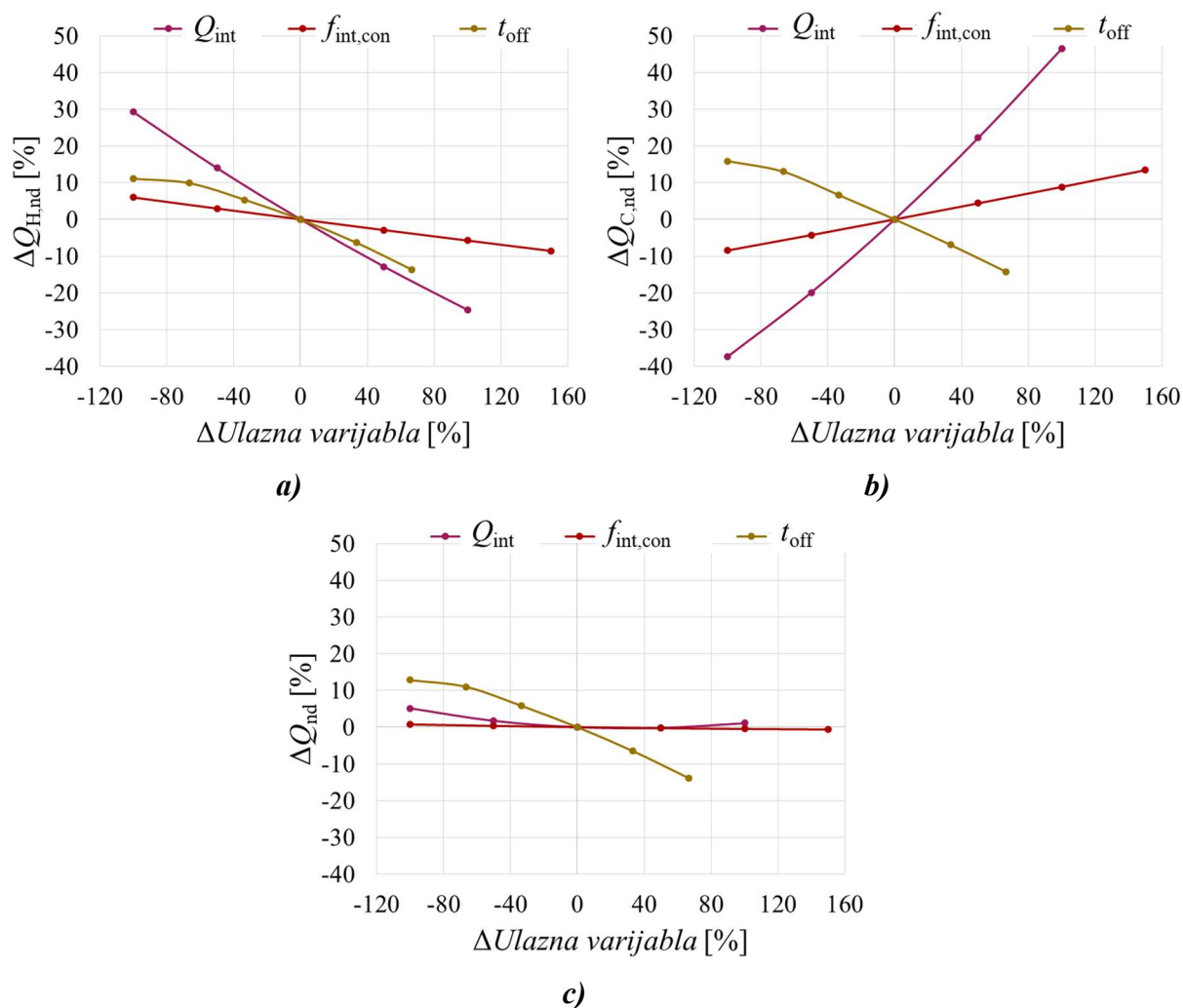
Slika 23. Utjecaj promjene vrijednosti infiltracije na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

Tablica 23. Utjecaj promjene vrijednosti infiltracije na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

ACH [h ⁻¹]	ΔACH	$Q_{H,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{H,nd}$	$Q_{C,nd}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{C,nd}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0	-100%	65,6	-54,8%	95,2	+15,9%	160,8	-29,2%
0,5	-66,7%	91,9	-36,7%	88,6	+7,8%	180,5	-20,6%
1	-33,3%	118,5	-18,4%	84,6	+2,9%	203	-10,7%
1,5	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
2	+33,3%	171,7	+18,3%	80,8	-1,6%	252,5	+11,1%
2,5	+66,7%	198,2	+36,6%	80,3	-2,3%	278,6	+22,6%
3	+100%	224,8	+54,9%	80,4	-2,1%	305,2	+34,3%

6.5. Analiza utjecaja unutarnjih toplinskih dobitaka, udjela konvektivnih toplinskih dobitaka te vremena prekida grijanja i hlađenja

Na Slici 24 prikazana je promjena vrijednosti potrebne energije za grijanje i hlađenje u ovisnosti o unutarnjim toplinskim dobitcima, udjelu konvektivnih toplinskih dobitaka i vremenu prekida grijanja i hlađenja. U tablicama 24 do 26 prikazane su brojčane i postotne promjene ulaznih vrijednosti i potrebnih energija za grijanje i hlađenje u odnosu na referentni slučaj.



Slika 24. Utjecaj promjene vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka, udjela konvektivnih toplinskih dobitaka i vremena prekida grijanja i hlađenja na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

Tablica 24. Utjecaj promjene vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

Q_{int} [W/m ²]	ΔQ_{int}	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0	-100%	187,5	+29,2%	51,5	-37,4%	238,9	+5,1%
11	-50%	165,4	+14%	65,8	-19,9%	231,2	+1,7%
22	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
33	+50%	126,4	-12,9%	100,4	+22,2%	226,8	-0,2%
44	+100%	109,4	-24,6%	120,4	+46,5%	229,7	+1,1%

Tablica 25. Utjecaj promjene vrijednosti udjela konvektivnih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

$f_{\text{int,con}}$ [-]	$\Delta f_{\text{int,con}}$	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0	-100%	153,7	+6%	75,2	-8,5%	229	+0,8%
0,2	-50%	149,4	+3%	78,6	-4,3%	228	+0,3%
0,4	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
0,6	+50%	140,9	-2,9%	85,8	+4,4%	226,6	-0,3%
0,8	+100%	136,7	-5,8%	89,4	+8,8%	226,2	-0,5%
1	+150%	132,7	-8,6%	93,2	+13,4%	225,8	-0,6%

Tablica 26. Utjecaj promjene vrijednosti vremena prekida grijanja i hlađenja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

t_{off} [h]	Δt_{off}	$Q_{\text{H,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{H,nd}}$	$Q_{\text{C,nd}}$ [kWh/m ²]	$\Delta Q_{\text{C,nd}}$	Q_{nd} [kWh/m ²]	ΔQ_{nd}
0	-100%	161,1	+11,1%	95,2	+15,9%	256,3	+12,8%
2	-66,7%	159,4	+9,9%	92,8	+13%	252,2	+11%
4	-33,3%	152,8	+5,3%	87,6	+6,6%	240,4	+5,8%
6	0%	145,1	0%	82,2	0%	227,3	0%
8	+33,3%	135,9	-6,3%	76,5	-6,9%	212,4	-6,5%
10	+66,7%	125,2	-13,7%	70,4	-14,3%	195,7	-13,9%

Iz Slike 24 a) i b) vidljivo je da najveći utjecaj na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje imaju unutarnji toplinski dobici, budući da je krivulja koja opisuje njihovu promjenu najstrmija. Međutim, kod potrebne energije za grijanje krivulja je padajuća, dok je kod potrebne energije za hlađenje rastuća. Povećanje unutarnjih toplinskih dobitaka u režimu grijanja uzrokuje smanjenje potrebne energije za grijanje, budući da je određeni udio toplinskih gubitaka zgrade pokriven od strane unutarnjih toplinskih dobitaka. S druge strane, u režimu hlađenja unutarnji toplinski dobici predstavljaju dodatno toplinsko opterećenje te se njihovim povećanjem povećava i potrebna energija za hlađenje. Povećanjem unutarnjih toplinskih dobitaka za 50% povećava se potrebna energija za hlađenje za 20% i smanjuje se potrebna energija za grijanje za 12%. Međutim, s obzirom da unutarnji toplinski dobici predstavljaju izravan toplinski dobitak za zonu koji je jednak bez obzira radi li se o grijanju ili hlađenju, njihov se suprotan utjecaj poništava ukoliko se promatra ukupna godišnja potrebna energija za grijanje i hlađenje (Slika 24 c)).

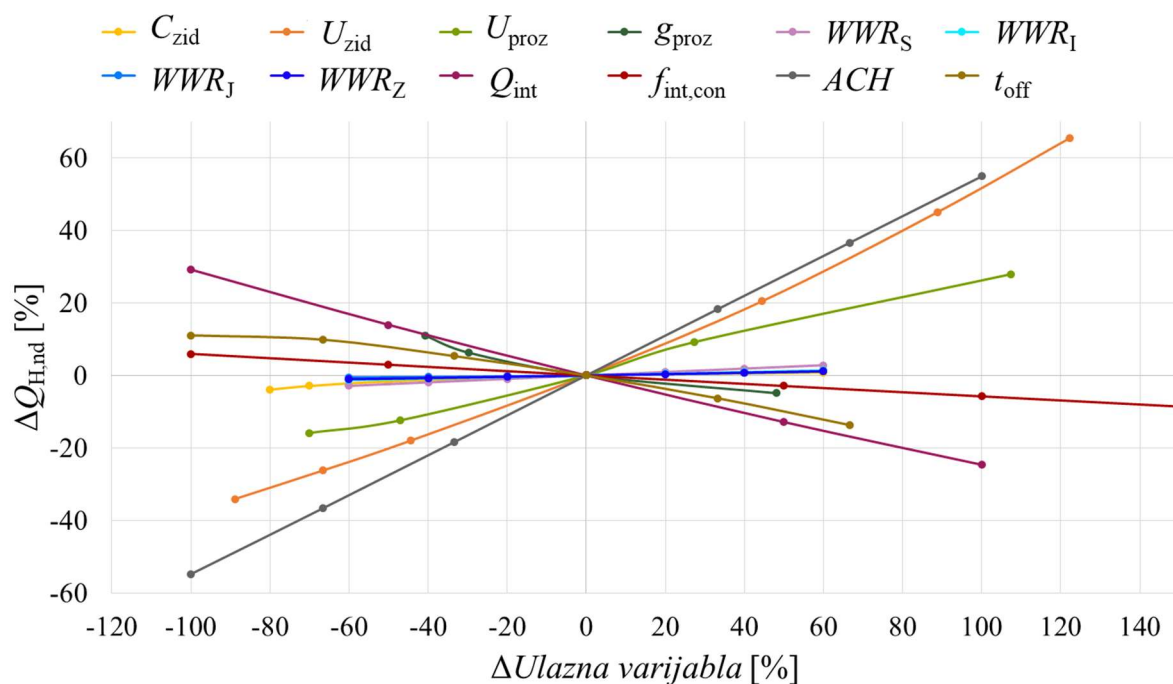
Utjecaj udjela konvektivnih toplinskih dobitaka na potrebnu energiju za grijanje također je suprotnog predznaka u odnosu utjecaja na potrebnu energiju za hlađenje. Pri tome povećanjem udjela konvektivnih toplinskih dobitaka kod grijanja dolazi do smanjenja potrebne energije za grijanje, dok kod potrebne energije za hlađenje dolazi do povećanja. Konvektivni unutarnji toplinski dobici dovode do izravnog zagrijavanja zraka u zoni i što je njihov udio veći, to je i više toplinske energije izravno predano zraku. Međutim, ukoliko prevladava udio unutarnjih toplinskih dobitaka zračenjem, ta će se energija prvo predati ostalim plohama u zoni, kao što su zidovi, prozori i namještaj te kasnije konvekcijom preći na zrak u zoni. Odnosno, kod zračećih unutarnjih toplinskih dobitaka dio se energije akumulira u zidovima i namještaju, a tek preostali dio konvekcijom prelazi na zrak u zoni. Povećani udio konvektivnih toplinskih dobitaka pogoduje potrebnoj energiji za grijanje, budući da je tada manje energije potrebno kako bi se zagrijao zrak u zoni. S druge strane, povećani udio toplinskih dobitaka zračenjem pogoduje potrebnoj energiji za hlađenje budući da je tada toplinsko opterećenje zraka u prostoriji sniženo. Ovisno o promjeni udjela konvektivnih toplinskih dobitaka, njihov utjecaj na potrebnu energiju za grijanje ili hlađenje varira od -10% do +10%. S obzirom na suprotan utjecaj udjela konvektivnih toplinskih dobitaka kod grijanja i hlađenja, njihov utjecaj na ukupnu godišnju potrebnu energiju nije zamjetan, jednako kao što je bio slučaj i kod utjecaja unutarnjih toplinskih dobitaka.

Vrijeme prekida grijanja i hlađenja predstavlja vrijeme kada nije potrebno održavati zadanu postavnu unutarnju temperaturu. U referentnom slučaju vrijeme prekida iznosi 6 sati, svakoga dana od 21 h do 3 h u noći. Povećanjem vremena prekida smanjuje se potrebna

energija i za grijanje i za hlađenje, kao i ukupna potrebna energija za grijanje i hlađenje. Nešto je veći utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje, pri čemu se smanjenje vremena prekida hlađenja za 100% potrebna energija za hlađenje poveća za oko 16%, dok se za grijanje poveća oko 11%.

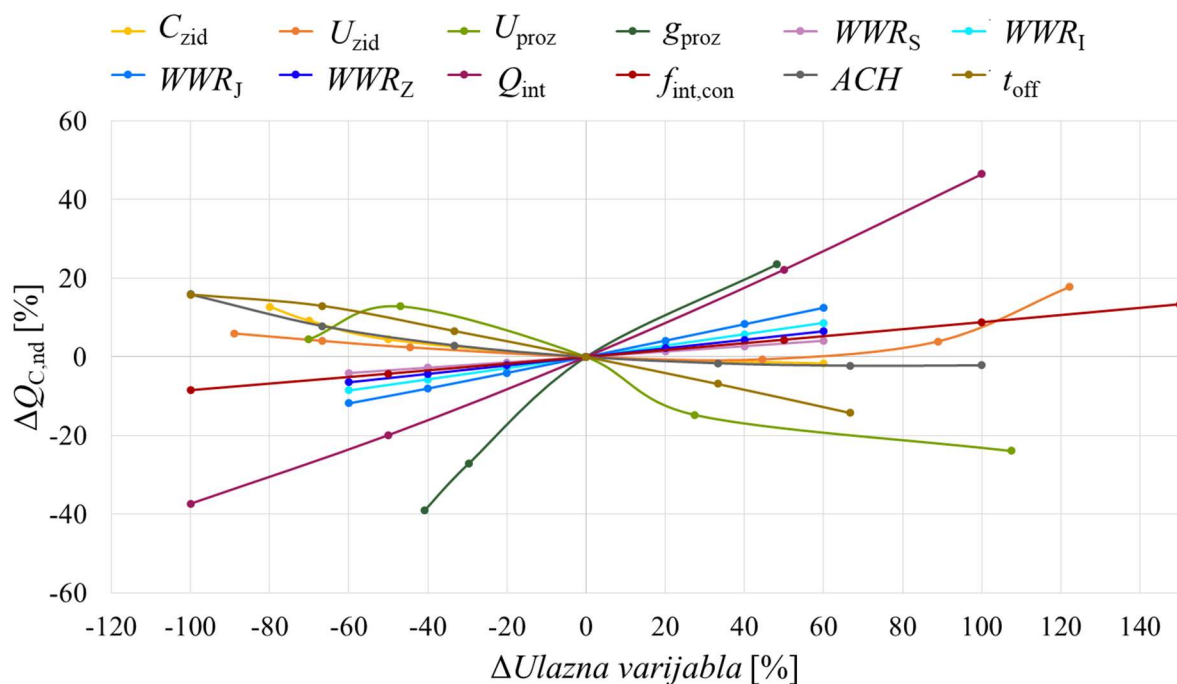
6.6. Sumarni prikaz rezultata lokalne analize

U nastavku su prikazani objedinjeni rezultati lokalne analize osjetljivosti za tri izlazne varijable: potrebnu energiju za grijanje, potrebnu energiju za hlađenje i ukupnu potrebnu energiju. Ulazne varijable koje imaju najveći utjecaj na vrijednost potrebnih energija prikazani su krivuljama koje su najstrmije, dok su krivulje bliže horizontalnom položaju krivulje ulaznih varijabli manjeg utjecaja. Na Slici 25 prikazan je utjecaj varijacije vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje. Ulazne varijable koje povećanjem svojih vrijednosti najviše utječu na prirast vrijednosti potrebne energije za grijanje su infiltracija, koeficijent prolaza topline zida i koeficijent prolaza topline prozora. Ulazna varijabla koja povećanjem svoje vrijednosti najviše utječe na smanjenje potrebne energije za grijanje je unutarnji toplinski dobitak. Preostale ulazne varijable u manjoj mjeri utječu na vrijednost potrebne energije za grijanje, bilo u pozitivnom ili negativnom smjeru. Zanimljiv utjecaj na potrebnu energiju za grijanje imaju udjeli površine prozora. Promjena površine prozora na potrebnu energiju za grijanje s jedne strane djeluje na toplinske gubitke provođenjem zbog višeg koeficijenta prolaza topline prozora, a s druge strane na povećane toplinske dobitke od Sunca. Također, utjecaj ovih varijabli ovisi o odabranom referentnom slučaju, pogotovo o odabranim vrijednostima koeficijenta prolaza topline zida i prozora te stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora, kao što je prikazano u poglavlju 6.3.



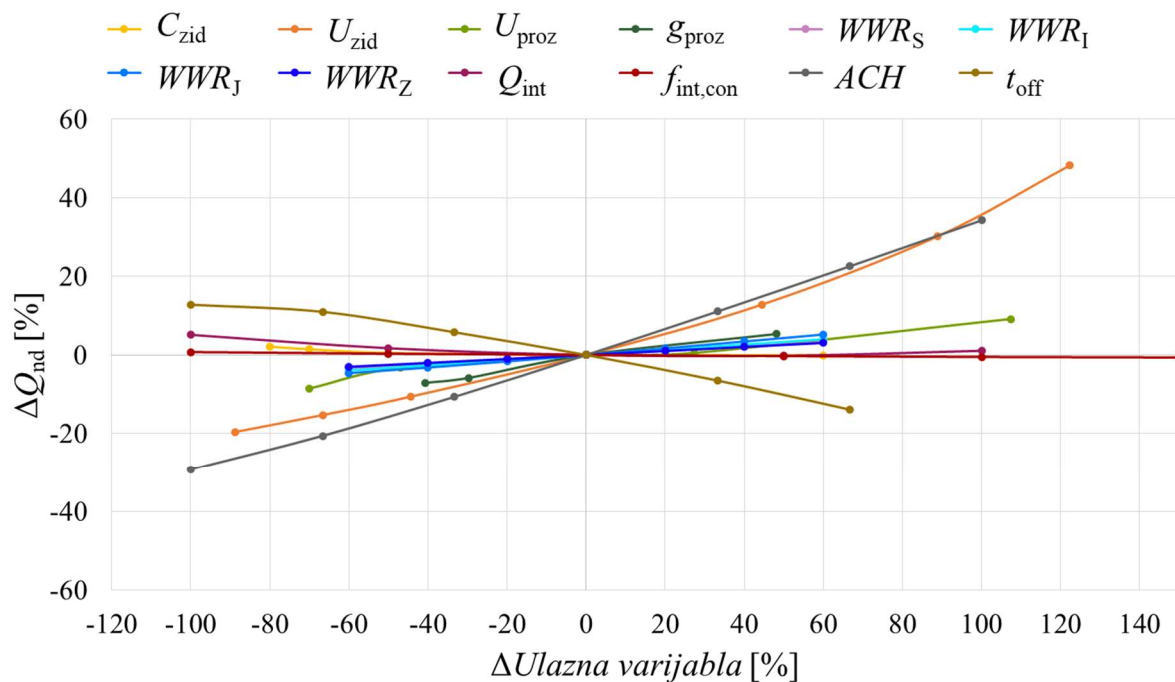
Slika 25. Objedinjeni prikaz utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje

Na Slici 26 prikazani su sumarni rezultati utjecaja varijacije vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za hlađenje. Ulazne varijable s najvećim pozitivnim nagibom krivulje utjecajnosti su stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora i unutarnji toplinski dobici, dok su varijable s najizraženijim negativnim nagibom koeficijent prolaza topline prozora i vrijeme prekida hlađenja. Za razliku od utjecaja ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje, utjecaj nekih od ulaznih varijabli na potrebnu energiju za hlađenje pokazuje izraženije nelinearnosti kod, primjerice, koeficijenta prolaza topline zidova i prozora. Nelinearnosti prisutne kod koeficijenta prolaza topline prozora prisutne su zbog istodobne promjene stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora, kao što je pokazano u poglavlju 6.2. Pri određenim vrijednostima koeficijenta prolaza topline prozora stupanj propuštanja nije jednak onom u referentnom slučaju, a njegov je utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje vrlo izražen. Nelinearnosti kod utjecaja koeficijenta prolaza topline zida na potrebnu energiju za hlađenje javljaju se zbog često niže vanjske temperature od unutarnje postavne te mogućnosti korištenja pasivnog hlađenja noću, pri čemu niske vrijednosti koeficijenta prolaza topline predstavljaju otpor hlađenju zgrade te povećavaju potrebnu energiju za hlađenje.



Slika 26. Objedinjeni prikaz utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za hlađenje

Budući da varijacije vrijednosti pojedinih ulaznih varijabli imaju suprotan utjecaj ovisno o tome radi li se o grijanju ili hlađenju, utjecaj ulaznih varijabli na ukupnu potrebnu energiju pokazuje položeniji karakter nego kod samo grijanja ili samo hlađenja, kao što je prikazano na Slici 27. Iako utjecaj koeficijenta prolaza topline vanjskog zida i infiltracije nije izražen kod potrebne energije za hlađenje, zbog viših apsolutnih vrijednosti potrebne energije za grijanje, ove dvije varijable imaju najveći utjecaj na ukupnu potrebnu energiju. Također, budući da vrijeme prekida grijanja i hlađenja djeluje jednako i u slučaju hlađenja i u slučaju grijanja, utjecaj te varijable predstavlja najveći utjecaj s negativnim nagibom karakteristike. Odnosno, povećanjem vremena prekida, očekivano se smanjuje ukupna potrebna energija za grijanje i hlađenje. Preostale varijable imaju zanemariv utjecaj na vrijednost ukupne potrebne energije za grijanje i hlađenje, što uključuje i udjele površine prozora u fasadi za svaku od četiri orijentacije. Veći utjecaj površina prozora javlja se kod potrebne energije za hlađenje; međutim, budući da je potrebna energija za grijanje po apsolutnom iznosu veća od one za hlađenje, karakteristike utjecaja površine prozora na ukupnu energiju bliže su onoj za grijanje.



Slika 27. Objedinjeni prikaz utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

6.7. Rangiranje ulaznih varijabli po utjecaju na temelju lokalne metode

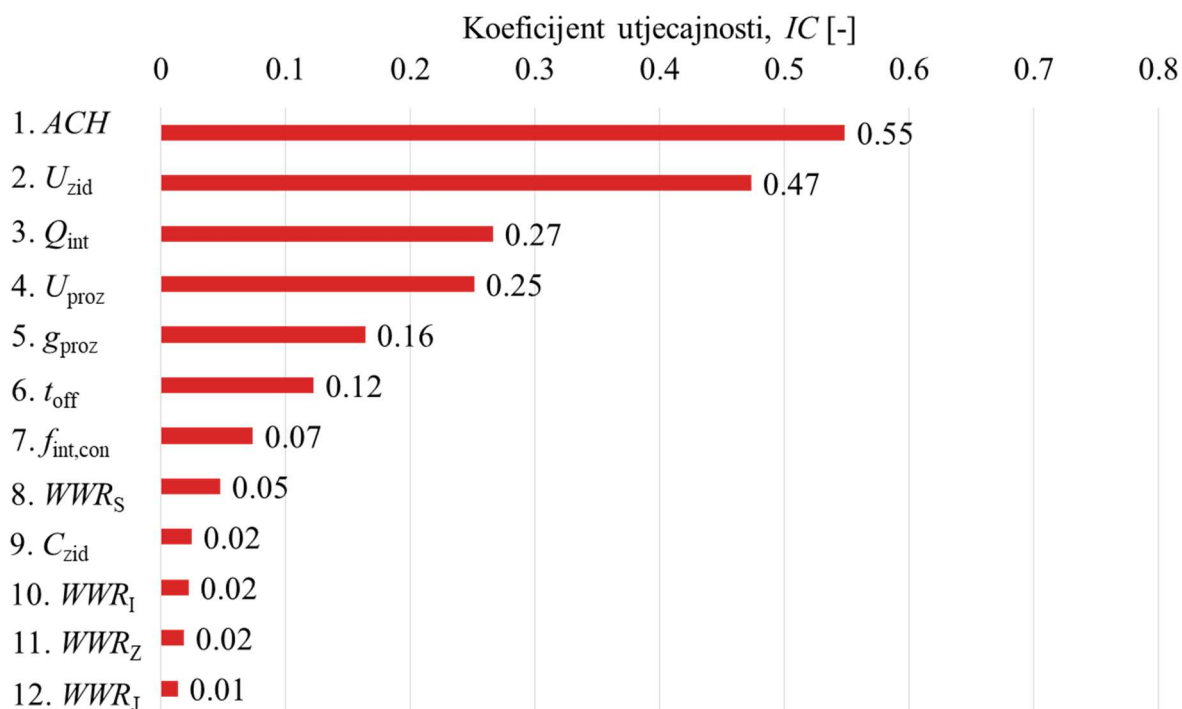
Korištenjem vrijednosti prikazanih u tablicama 15 do 18 izračunati su indeksi utjecajnosti pojedine ulazne varijable za potrebnu energiju za grijanje, potrebnu energiju za hlađenje te potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Indeksi utjecajnosti izračunati su korištenjem jednadžbe (32). Pri izračunu se koriste krajnje točke svake od krivulja utjecajnosti za izračun razlika, dok se za izračun prosječnih vrijednosti koriste sve točke određene za pojedinu ulaznu varijablu. Na temelju vrijednosti indeksa utjecajnosti za svaku su izlaznu varijablu rangirane ulazne varijable po njihovom utjecaju na potrebne energije (Slika 28 do Slika 30). Indeks utjecajnosti predstavlja postotak promjene vrijednosti izlazne varijable za 1% promjene vrijednosti ulazne varijable u odnosu na prosjek vrijednosti izlazne, odnosno ulazne varijable.

$$IC = \frac{\Delta Y / \bar{Y}}{\Delta X / \bar{X}} \quad (32)$$

pri čemu su:

$\Delta Y, \Delta X$ razlika krajnjih vrijednosti izlazne, odnosno ulazne varijable

$\bar{Y}, \bar{X}$ prosječna vrijednost izlazne, odnosno ulazne varijable

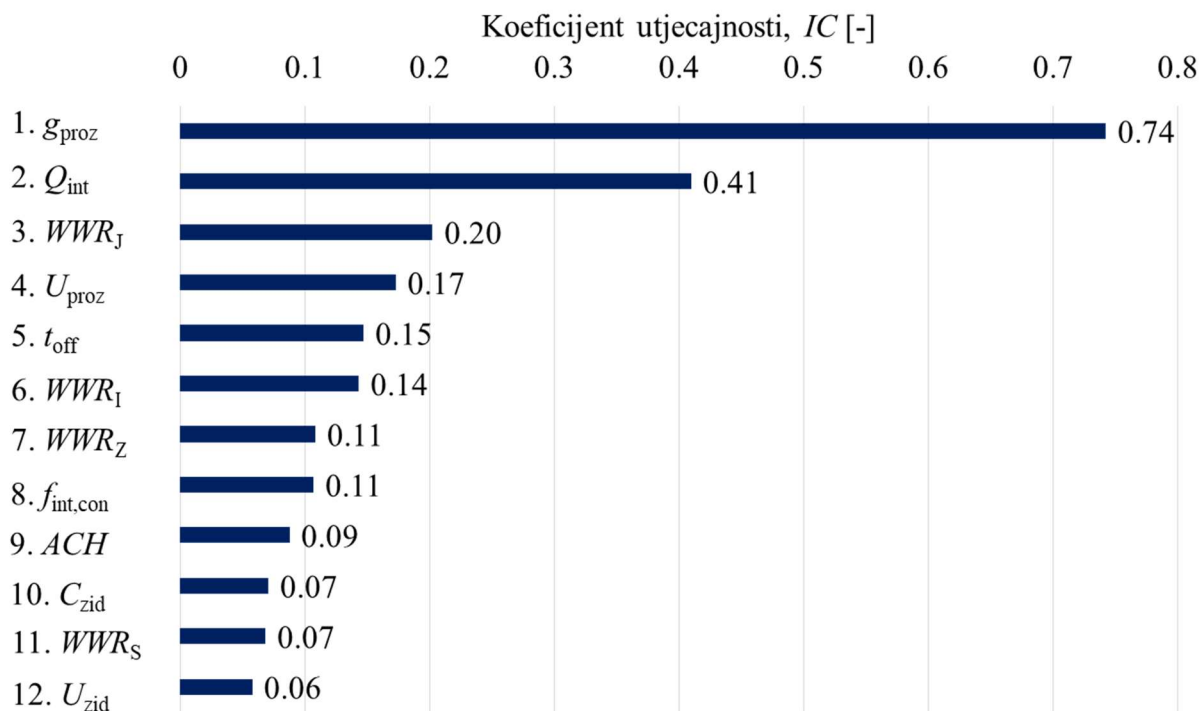


Slika 28. Rangiranje ulaznih varijabli i indeksi utjecajnosti za potrebnu energiju za grijanje

Prema Slici 28 najutjecajnija ulazna varijabla na potrebnu energiju za grijanje je infiltracija čijom se promjenom vrijednosti od 1% mijenja vrijednost potrebne energije za grijanje za 0,55%. Nakon infiltracije, po utjecajnosti slijede koeficijent prolaza topline zida, unutarnji toplinski dobici i koeficijent prolaza topline prozora. Najmanje utjecajne varijable na potrebnu energiju za grijanju su udjeli površine prozora u fasadi, od kojih najveći utjecaj imaju prozori na sjevernoj strani zgrade, dok najmanji utjecaj imaju prozori na južnoj strani zgrade.

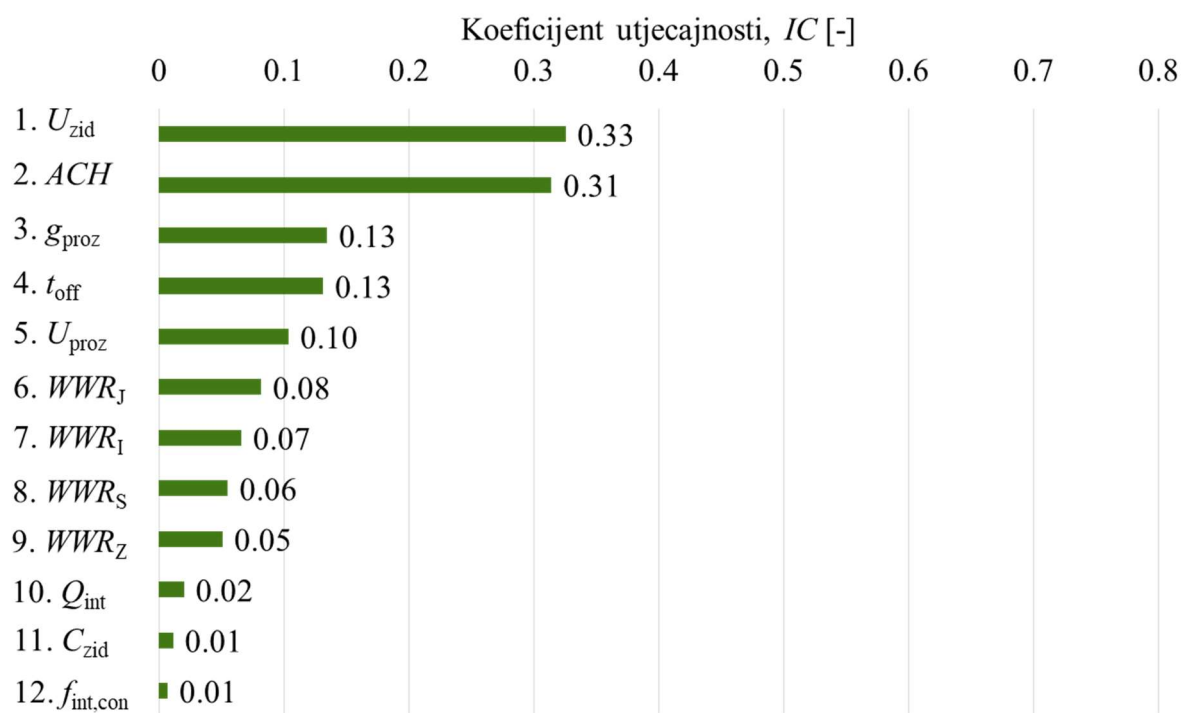
Daleko najveći utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje ima stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora što je prikazano na Slici 29. Promjenom vrijednosti stupnja propuštanja prozora za 1% mijenja se potrebna energija za hlađenje za 0,74%. Na drugom mjestu nalaze se unutarnji toplinski dobici s gotovo upola manjom vrijednošću koeficijenta utjecajnosti. Za razliku od potrebne energije za grijanje, kod potrebne energije za hlađenje više je izražen utjecaj udjela površina prozora u fasadi, pri čemu je najutjecajnija površina prozora na južnoj strani s pripadajućim indeksom utjecajnosti od 0,2. Najmanje utjecajna površina prozora je ona na sjevernoj strani. Za razliku od grijanja gdje je koeficijent prolaza topline zida druga po redu najutjecajnija varijabla, u slučaju hlađenja ona se nalazi na posljednjem mjestu. Razlog za ovako nizak indeks utjecajnosti jest mala razlika potrebne energije za hlađenje za minimalnu i maksimalnu vrijednost koeficijenta prolaza topline. Mala razlika proizlazi iz

postojanja nelinearnosti utjecaja koeficijenta prolaza topline na potrebnu energiju za hlađenje što je prikazano na Slici 18 b).



Slika 29. Rangiranje ulaznih varijabli i indeksi utjecajnosti za potrebnu energiju za hlađenje

Na Slici 30 prikazani su rezultati izračuna indeksa utjecajnosti i rangiranja utjecaja ulaznih varijabli na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Indeksi utjecajnosti na ukupnu potrebnu energiju manjeg su iznosa od onih za samo grijanje ili samo hlađenje iz razloga što neke varijable utječu na potrebnu energiju za grijanje suprotno od utjecaja na hlađenje. Bez obzira što je utjecaj koeficijenta prolaza topline zida na potrebnu energiju za hlađenje najmanji, zbog visokih apsolutnih vrijednosti energije za grijanje, on predstavlja ulaznu varijablu od najvećeg utjecaja na ukupnu energiju za grijanje i hlađenje. Gotovo jednak utjecaj predstavlja infiltracija, nakon čega slijede stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora i vrijeme prekida grijanja i hlađenja. Najmanji utjecaj imaju varijable koje poništavaju svoj utjecaj zbog zbroja energija za grijanje i hlađenje, a to su udio konvektivnih toplinskih dobitaka, unutarnji toplinski dobici i toplinski kapacitet zida.

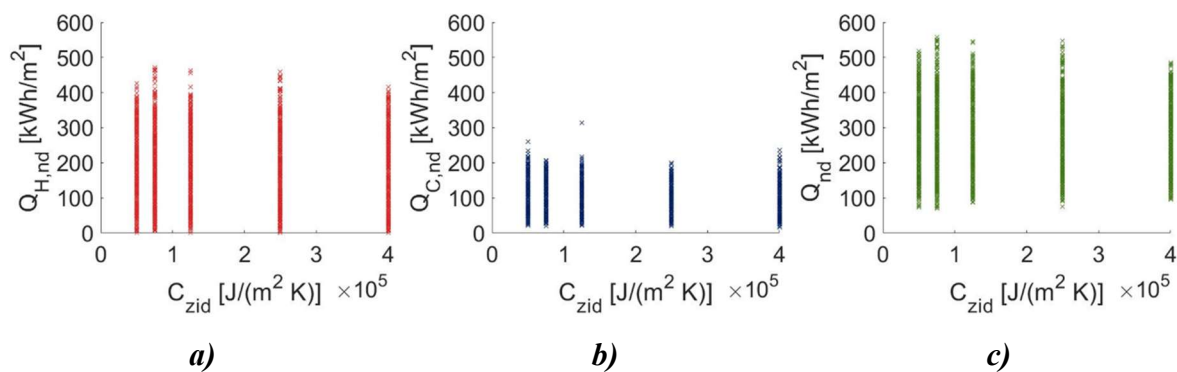


Slika 30. Rangiranje ulaznih varijabli i indeksi utjecajnosti za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

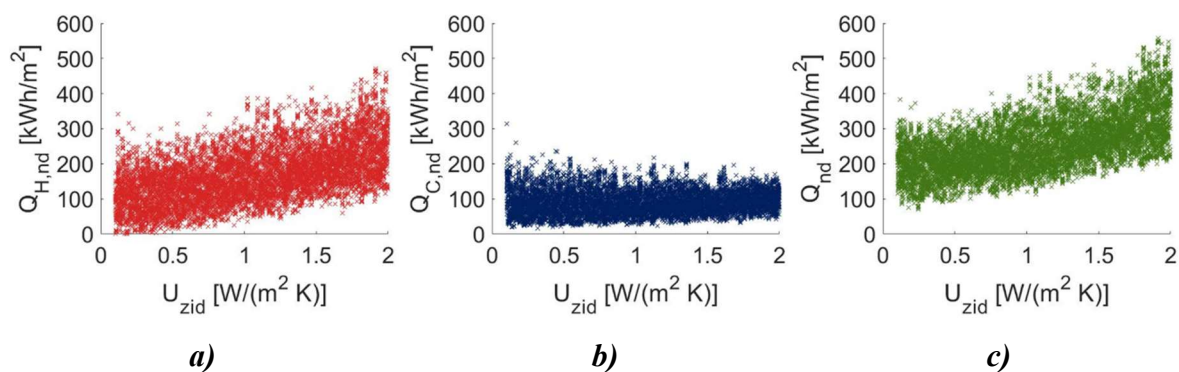
7. REZULTATI GLOBALNE ANALIZE OSJETLJIVOSTI

Na Slici 32 do Slici 34 prikazani su rezultati provedbe 13.312 simulacija u svrhu izračuna indeksa osjetljivosti globalnom Sobol metodom. Rezultati potrebne energije za grijanje (crveno), hlađenje (plavo) te ukupnu energiju (zeleno) prikazani su u ovisnosti o svakoj od ulaznih varijabli. Prije izračuna indeksa osjetljivosti ovakve se vrste dijagrama mogu koristiti za okvirnu procjenu o tome koje ulazne varijable najviše utječu na rezultat, a koje najmanje. Ukoliko točke razasute po dijagramu pokazuju trend rasta ili pada, promjena vrijednosti te ulazne varijable ima utjecaj na rezultat. Ovakav se slučaj javlja, primjerice, na Slici 32 a) i c) gdje se primjećuje trend porasta potrebne energije za grijanje i ukupne energije povećanjem koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova. S druge strane, promjenom vrijednosti koeficijenta prolaza topline zida ne dolazi do trenda rasta ili pada potrebne energije za hlađenje, te se može zaključiti da ta varijabla nema velikog utjecaja na potrebnu energiju za hlađenje, što je i potvrđeno lokalnom metodom u prethodnom poglavlju. Trend porasta potrebne energije vidljiv je prilikom porasta vrijednosti infiltracije na Slici 41 a) i c), dok je utjecaj infiltracije na hlađenje manje zamjetan. Trend porasta potrebne energije za hlađenje javlja se prilikom povećanja vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka (Slika 39 b)) iz čega se može zaključiti da unutarnji toplinski dobici imaju veliki utjecaj na izračun potrebne energije za hlađenje.

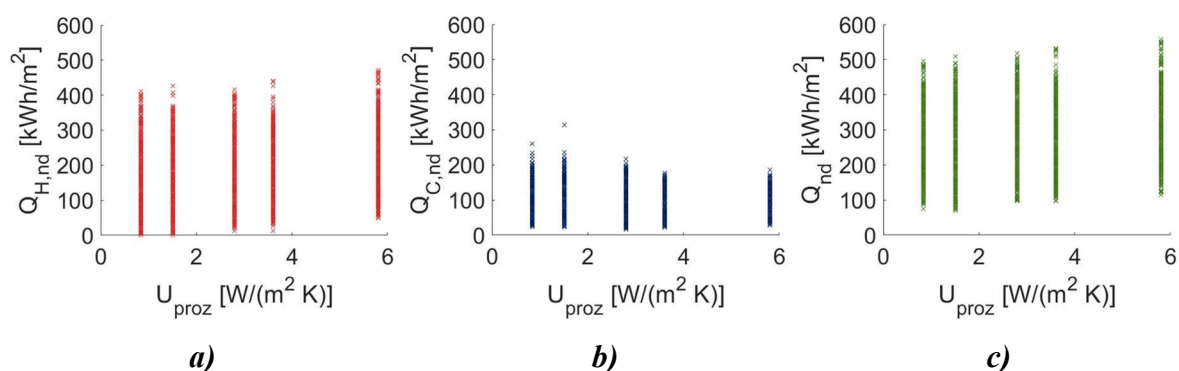
Neke ulazne varijable nisu zadane kontinuirano, već kao diskretne vrijednosti. I kod ovako definiranih vrijednosti može se primijetiti trend rasta ili pada uspoređivanjem maksimalne i minimalne vrijednosti potrebnih energija pri svakoj od diskretno zadanih vrijednosti. Tako je, primjerice, vidljiv utjecaj stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za hlađenje (Slika 34 b)) budući da se maksimumi potrebne energije za hlađenje za svaku od diskretno zadanih vrijednosti stupnja propuštanja povećavaju povećanjem vrijednosti te ulazne varijable. Za četiri diskretno zadane vrijednosti stupnja propuštanja prozora, maksimalna vrijednost potrebne energije za hlađenje se gotovo udvostručila povećanjem stupnja propuštanja s minimalne na maksimalnu vrijednost. Sličan je trend prisutan i na Slici 42 gdje se povećanjem vremena prekida grijanja i hlađenja smanjuju potrebne energije i za grijanje i za hlađenje.



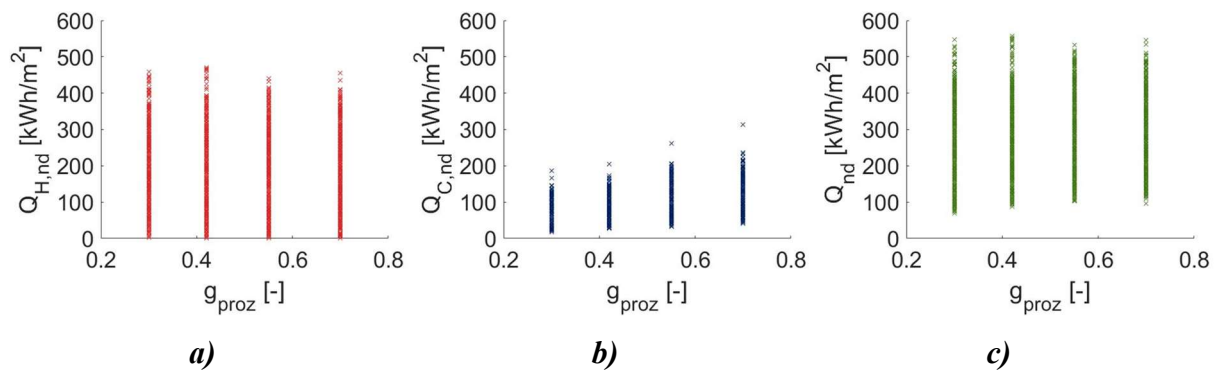
Slika 31. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskog zida



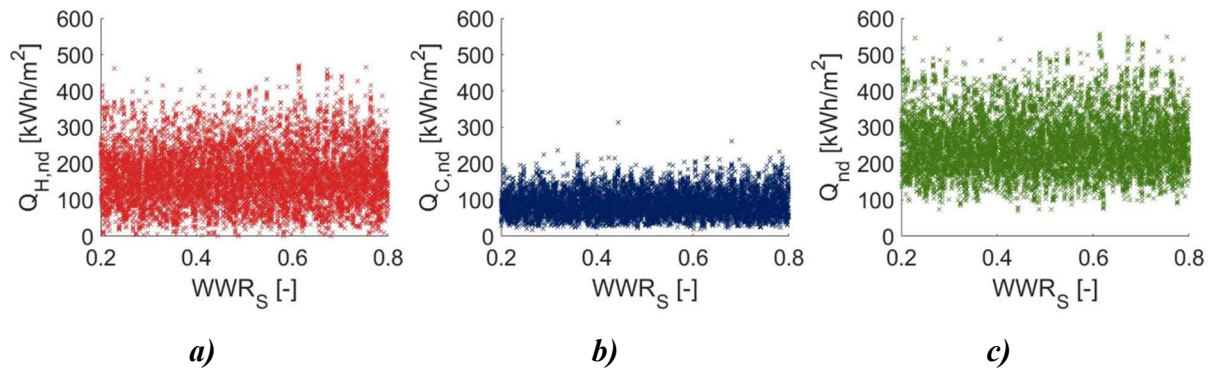
Slika 32. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti koeficijenta prolaza topline vanjskog zida



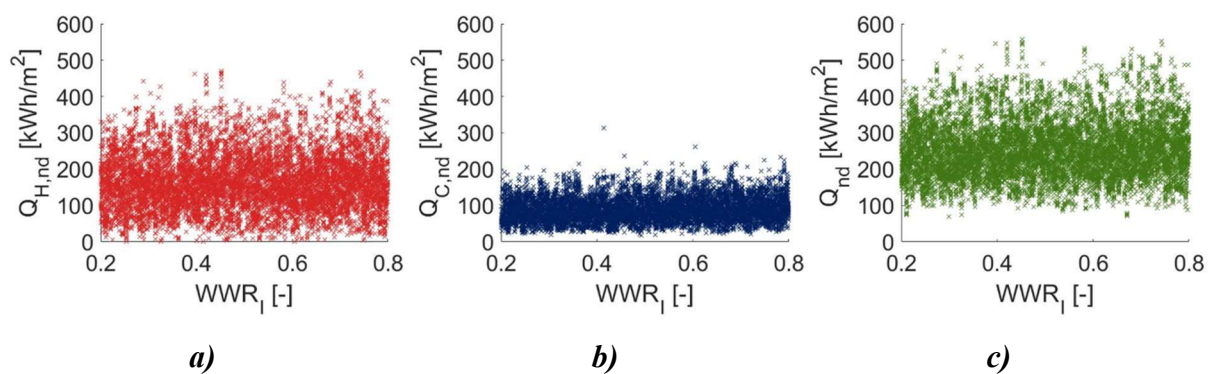
Slika 33. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti koeficijenta prolaza topline prozora



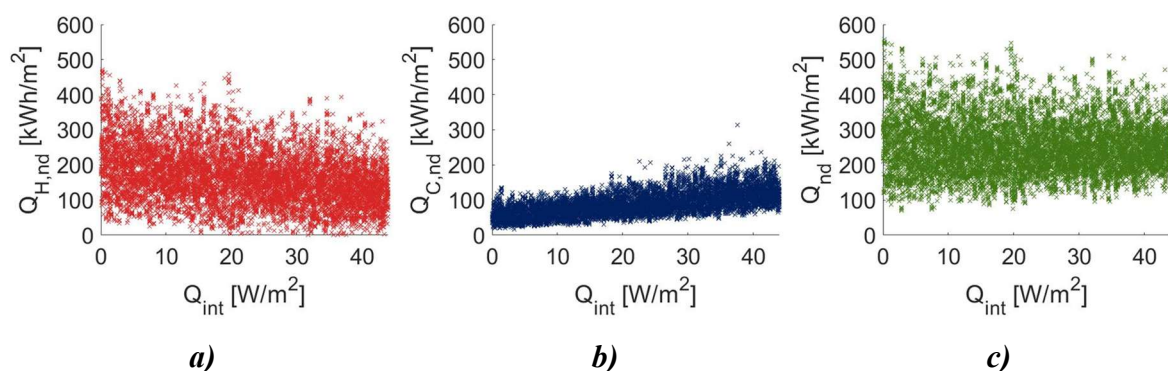
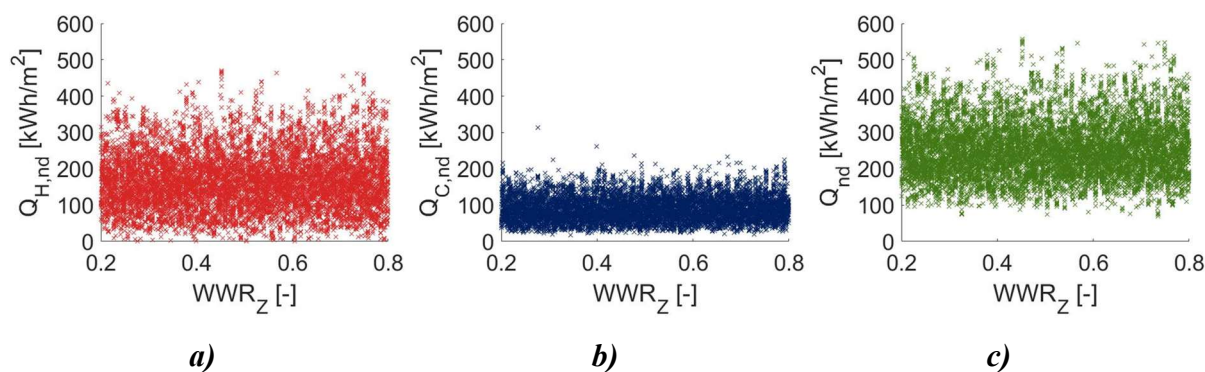
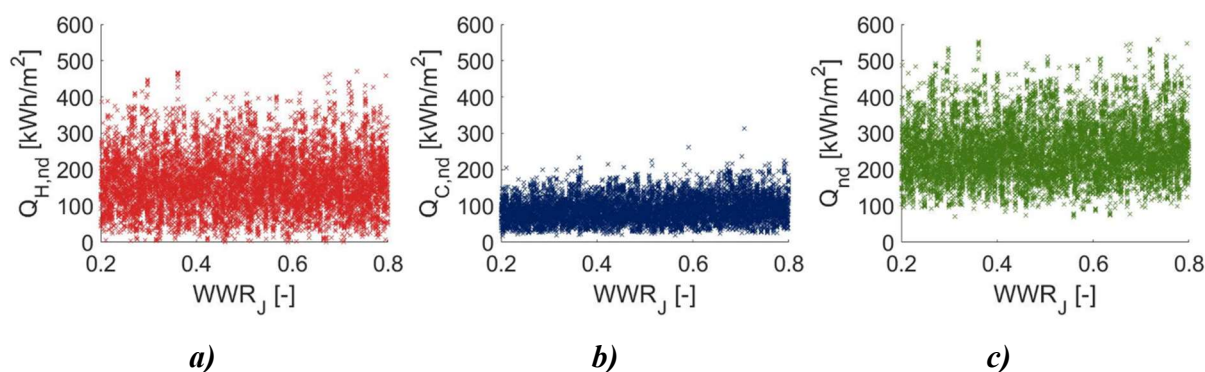
Slika 34. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora

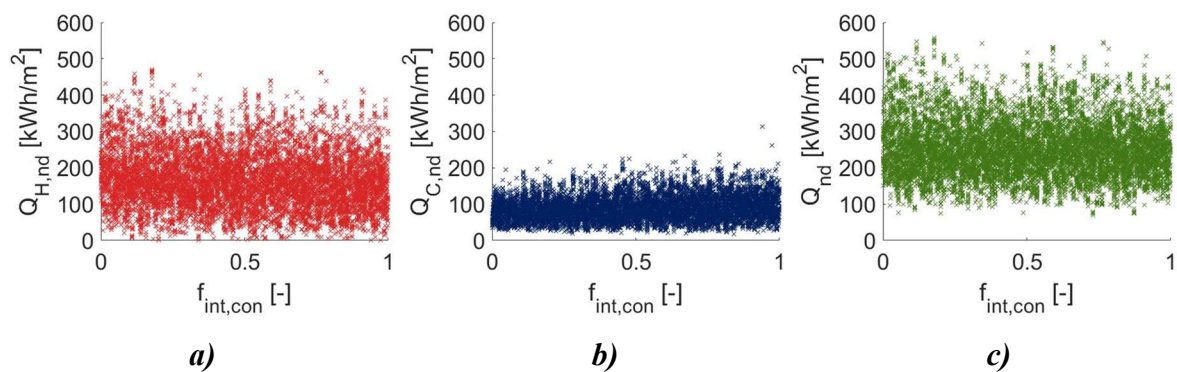


Slika 35. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela površine prozora na sjevernoj fasadi

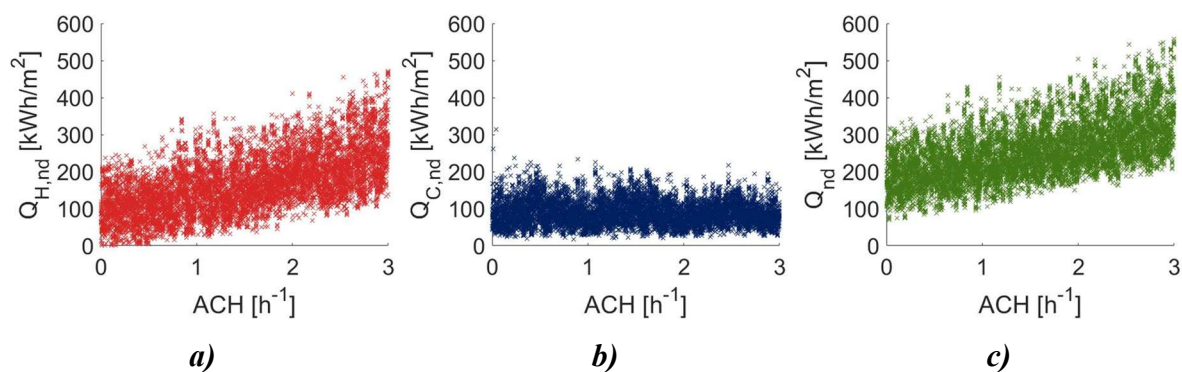


Slika 36. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela površine prozora na istočnoj fasadi

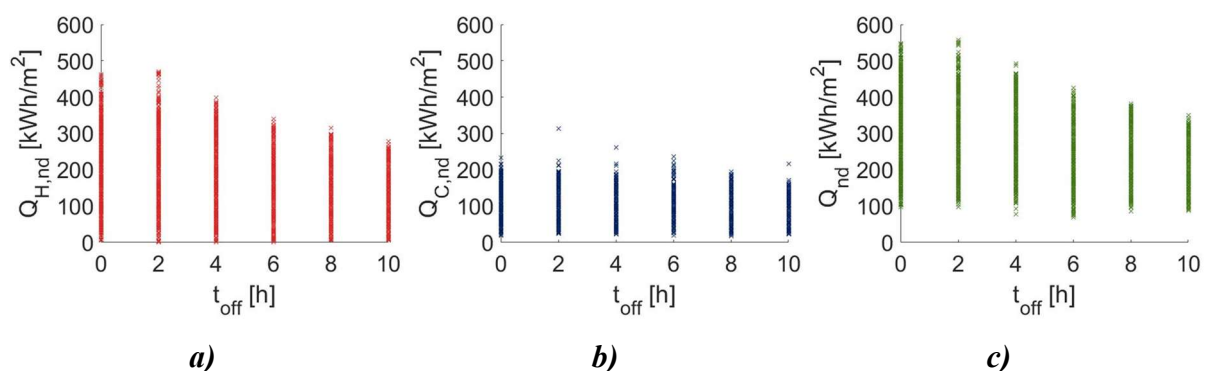




Slika 40. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti udjela konvektivnih toplinskih dobitaka



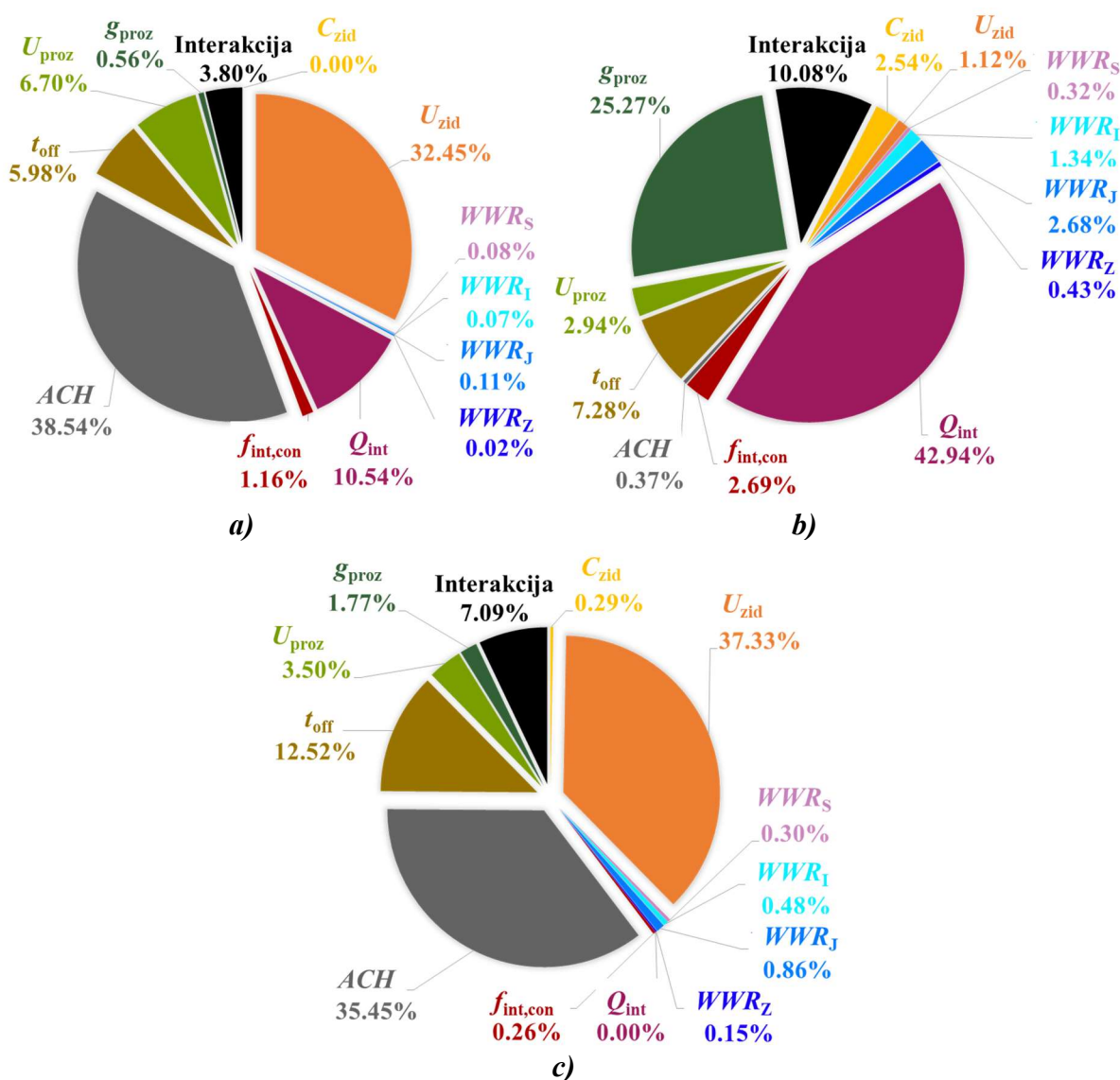
Slika 41. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti infiltracije



Slika 42. Ovisnost potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje o promjeni vrijednosti vremena prekida grijanja i hlađenja

7.1. Indeksi osjetljivosti prvog reda i raščlamba varijance

Koristeći dobivene rezultate simulacije prikazane na slikama 31 do 42 izračunati su indeksi osjetljivosti prvog reda za svaku od ulaznih varijabli, a prema matematičkom modelu Sobol metode opisanom u poglavlju 4.2. Indeks osjetljivosti prvog reda opisuje udio varijance vrijednosti izlazne varijable koji je posljedica varijacije vrijednosti ulazne varijable, ali bez utjecaja interakcija. Kod neaditivnih modela suma indeksa osjetljivosti prvog reda manja je od jedinice, a razlika predstavlja sumu utjecaja viših redova, odnosno utjecaja interakcija između ulaznih varijabli. U nastavku je prikazana raščlamba varijance vrijednosti potrebne energije za grijanje (Slika 43 a)), potrebne energije za hlađenje (Slika 43 b)) i ukupne potrebne energije za grijanje i hlađenje (Slika 43 c)).



Slika 43. Raščlamba varijance potrebne energije za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

Indeksi prvog reda svake ulazne varijable predstavljeni su kao postotak varijance koji je posljedica varijacije vrijednosti svake od ulaznih varijabli. Iz Slike 43 a) vidljivo je da većina varijance vrijednosti potrebne energije za grijanje proizlazi iz variranja vrijednosti koeficijenta prolaza topline vanjskog zida i infiltracije. Variranje vrijednosti ove dvije ulazne varijable odgovorno je za oko 70% varijance potrebne energije za grijanje. Prema definiciji indeksa osjetljivosti prvog reda to znači da ukoliko bi vrijednost infiltracije bila fiksirana, varijanca vrijednosti potrebne energije za grijanje smanjila bi se za 38,54%. Najmanji udio varijance potrebne energije za grijanje posljedica je promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta vanjskog zida, a zatim slijede promjene površine prozora za sve četiri orijentacije fasade. Udio varijance potrebne energije za grijanje čija se pojava ne može opisati indeksima prvog reda predstavlja interakciju između varijabli, odnosno sumu svih indeksa viših redova. Kod potrebne energije za grijanje 3,8% varijance posljedica je interakcije između ulaznih varijabli.

Najveći udio varijance vrijednosti potrebne energije za hlađenje posljedica je varijacije vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka te iznosi oko 43%. Za otprilike četvrtinu varijance potrebne energije za hlađenje odgovorna je varijacija vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora budući da o njegovoj vrijednosti direktno ovisi propušteno Sunčevo zračenje kroz prozore što, izuzevši unutarnje toplinske dobitke, predstavlja najveće toplinsko opterećenje zgrade u režimu hlađenja. Za razliku od grijanja gdje je koeficijent prolaza topline zida druga po redu najutjecajnija varijabla, kod hlađenja je njegov utjecaj neznatan te iznosi 1,12%. Razlog za ovako nizak utjecaj koeficijenta prolaza topline jest manja izmjena topline provođenjem kroz zidove zbog manje razlike vanjske i unutarnje temperature nego u režimu grijanja. Utjecaj infiltracije se drastično smanjio u odnosu na vrijednosti potrebne energije za grijanje, te iznosi zanemarivih 0,37%. Razlog za ovako niski utjecaj varijacije vrijednosti infiltracije može se objasniti suprotnim učinkom infiltracije tijekom perioda dana i noći. Tijekom dana, u periodima kada je vanjska temperatura viša od postavne, infiltracija predstavlja toplinsko opterećenje, dok tijekom noći i jutra, kada je vanjska temperatura niža od postavne, predstavlja mogućnost pasivnog hlađenja. Iz tog razloga u konačnici apsolutna vrijednost infiltracije ne utječe znatno na potrebnu energiju za hlađenje. Kod potrebne energije za hlađenje primjećuje se i porast utjecaja površina prozora, najviše prozora na južnoj fasadi gdje se javljaju i najveći toplinski dobitci od Sunca. Udio varijance koji otpada na utjecaj interakcija također je veći nego kod grijanja te iznosi oko 10%.

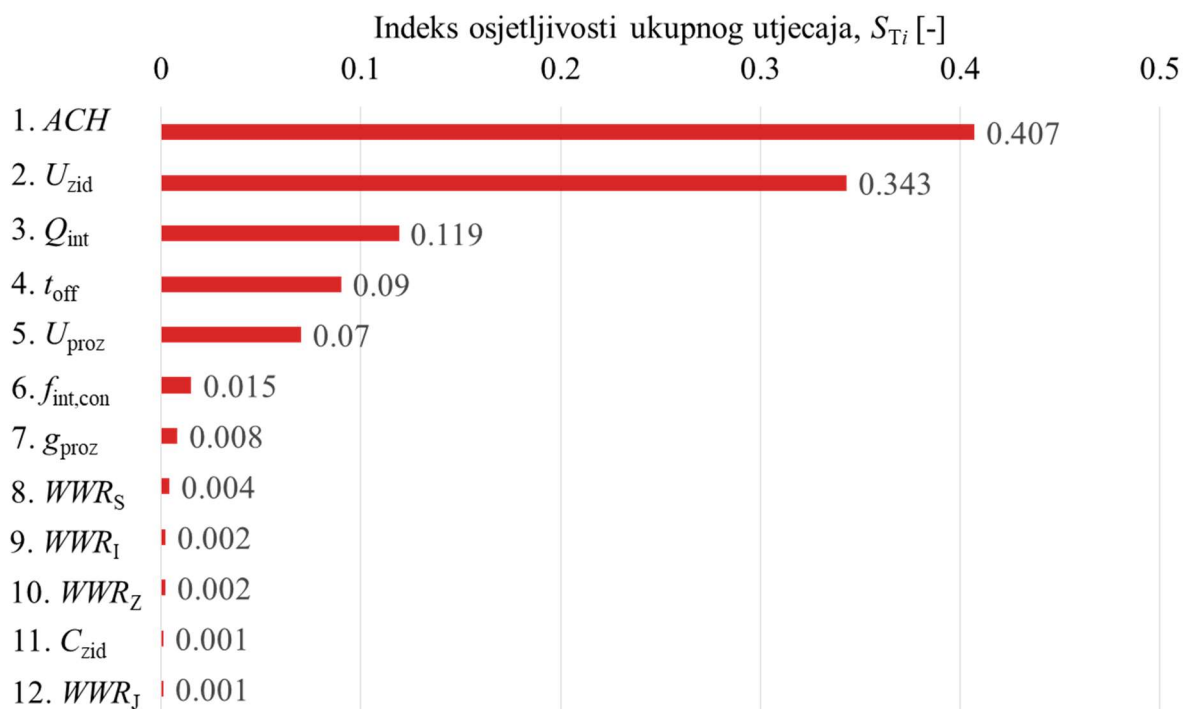
Bez obzira na malen utjecaj koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova i infiltracije na varijancu vrijednosti potrebne energije za hlađenje, kod ukupne potrebne energije za grijanje i hlađenje ove dvije varijable predstavljaju najutjecajnije varijable i zajedno su odgovorne za

73% varijance (Slika 43 c)). Razlog za ovako visoke vrijednosti utjecaja ove dvije varijable jest viša apsolutna vrijednost potrebne energije za grijanje u odnosu na energiju za hlađenje. Također, zbog suprotnog utjecaja pojedinih ulaznih varijabli na grijanje i hlađenje, utjecaj ostalih varijabli se smanjio. Primjerice, unutarnji toplinski dobici kod grijanja predstavljaju smanjenje potrebne energije za grijanje, dok kod hlađenja predstavljaju veći dio toplinskog opterećenja, tako da se kod ukupne energije za grijanje i hlađenje poništava i njihov utjecaj na varijancu, te iznosi 0%. Jednako vrijedi i za udio konvektivnih toplinskih dobitaka čiji je utjecaj prisutan i kod grijanja i kod hlađenja, ali kod ukupne energije postaje zanemariv. Ulazna varijabla čiji se utjecaji kod grijanja i kod hlađenja zbrajaju u veći utjecaj kod ukupne energije jest vrijeme prekida rada grijanja i hlađenja. Ova varijabla i u režimu grijanja i u režimu hlađenja djeluje jednako na izlazne varijable te stoga njen utjecaj na varijancu vrijednosti ukupne energije iznosi 12,5%. Utjecaj interakcija iznosi oko 7% i po vrijednosti se nalazi između vrijednosti utjecaja interakcija kod grijanja i kod hlađenja.

7.2. Indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja

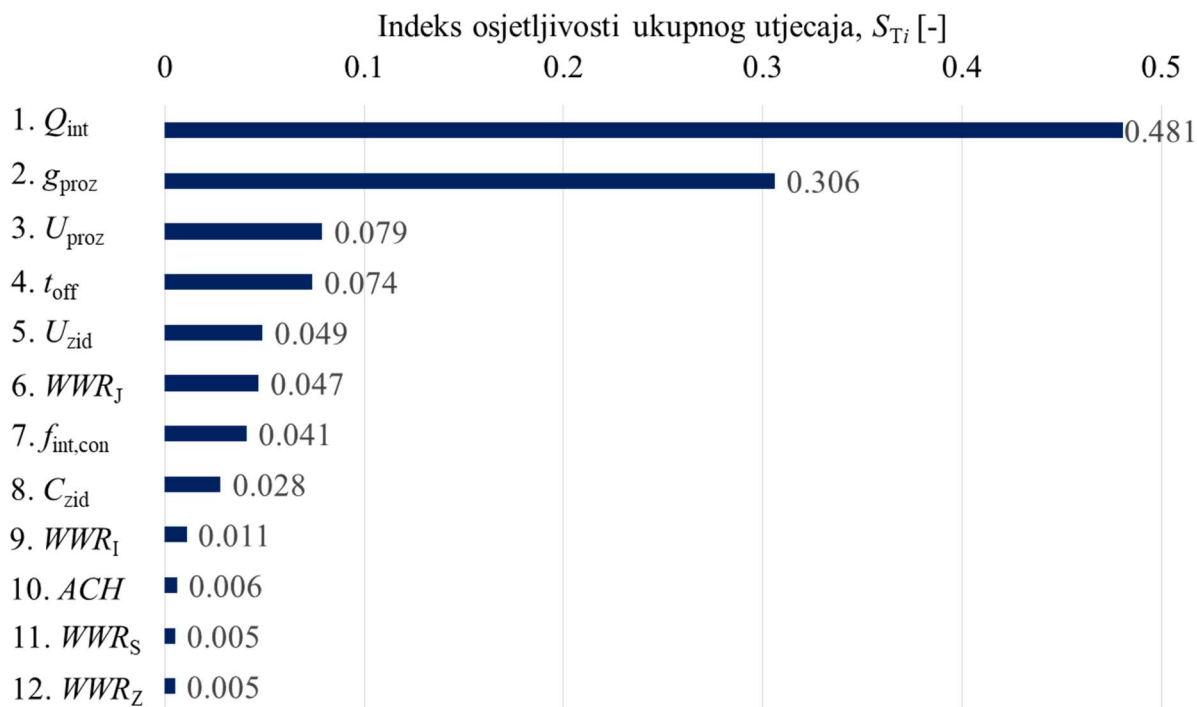
Indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja opisuju ukupan utjecaj varijacije vrijednosti ulaznih varijabli na izlaznu varijablu te osim indeksa prvog reda sadrže i utjecaje viših redova, odnosno interakcija. Izračunati su na način objašnjen u poglavlju 4.2. Vrijednost indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja predstavlja očekivani udio varijance koji bi preostao ukoliko bi vrijednosti svih ostalih ulaznih varijabli bile fiksirane, te bi preostao utjecaj varijacije vrijednosti samo jedne varijable.

Indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja definirani na ovakav način omogućuju rangiranje ulaznih varijabli s obzirom na njihov ukupan utjecaj na rezultat. Na Slici 44 prikazane su ulazne varijable s izračunatim indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za grijanje te rangirane s obzirom na izračunate vrijednosti indeksa. Kao što su pokazali i indeksi osjetljivosti prvog reda, dvije najutjecajnije ulazne varijable na potrebnu energiju za grijanje su infiltracija i koeficijent prolaza topline vanjskog zida. Njihov zajednički utjecaj na varijancu potrebne energije za grijanje, uključujući interakcije, iznosi gotovo 75%. Nakon te dvije varijable slijede unutarnji toplinski dobici, vrijeme prekida grijanja i koeficijent prolaza topline prozora kao varijable čiji je utjecaj u varijanci na razini od 10%. Utjecaj svih preostalih ulaznih varijabli manji je od 2%, te se stoga te varijable mogu proglasiti neutjecajnim s obzirom na potrebnu energiju za grijanje.



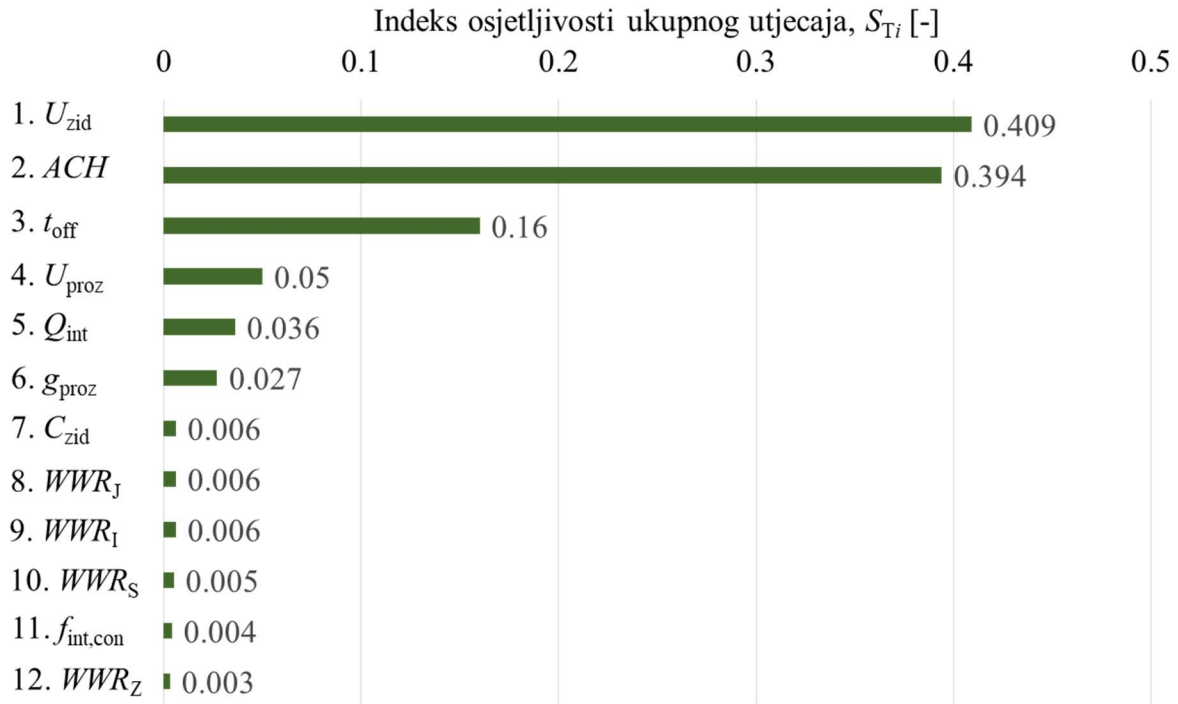
Slika 44. Rangiranje ulaznih varijabli prema indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za grijanje

Slika 45 prikazuje izračunate indekse ukupnog utjecaja za ulazne varijable s obzirom na njihov utjecaj na varijancu vrijednosti potrebne energije za hlađenje. Dvije ulazne varijable dominiraju s obzirom na njihove vrijednosti indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja: unutarnji toplinski dobitci i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Ukoliko bi se vrijednosti svih ulaznih varijabli održavale konstantnima, a varirala se vrijednost samo toplinskih dobitaka, vrijednost varijance bila bi 48% vrijednosti varijance pri kojoj su vrijednosti svih varijabli varirane. To znači da je promjena vrijednosti unutarnjih toplinskih dobitaka odgovorna za gotovo 50% varijacije vrijednosti potrebne energije za grijanje. Po utjecajnosti na potrebnu energiju za hlađenje druga po redu varijabla je stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora s indeksom osjetljivosti ukupnog utjecaja 0,3. Indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja svih ostalih ulaznih varijabli na razini su manjoj od 10%. Ulazne varijable čiji je utjecaj veći od 4% su koeficijent prolaza topline prozora i vanjskih zidova, vrijeme prekida hlađenja te udio površine prozora na južnoj strani zgrade. Varijable koje nemaju gotovo nikakav utjecaj na varijaciju vrijednosti potrebne energije za hlađenje su infiltracija te udio površine prozora na zapadnoj i sjevernoj strani.



Slika 45. Rangiranje ulaznih varijabli prema indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za hlađenje

Na Slici 46 prikazano je rangiranje ulaznih varijabli s obzirom na vrijednosti indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Kao i kod potrebne energije za grijanje, dvije najutjecajnije varijable su koeficijent prolaza topline vanjskih zidova i infiltracija. Ukoliko bi vrijednosti svih ulaznih varijabli bile fiksirane, promjenom vrijednosti koeficijenta prolaza topline zida ili promjenom vrijednosti infiltracije preostalo bi oko 40% vrijednosti varijance potrebne energije za grijanje i hlađenje. Iako ove dvije varijable nemaju veliki utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje, imaju veliki utjecaj na sumu grijanja i hlađenja, budući da je potrebna energija za grijanje višeg apsolutnog iznosa od potrebne energije za hlađenje. Vrijeme prekida rada sustava grijanja i hlađenja ulazna je varijabla koja i u režimu grijanja i u režimu hlađenja svojim porastom smanjuje vrijednost potrebne energije. Iz tog razloga, njen je utjecaj na ukupnu potrebnu energiju jednak sumi utjecaja na samo grijanje i samo hlađenje te se vrijeme prekida rada sustava nalazi na trećem mjestu s 16% preostale varijance. Ulazne varijable s ukupnim utjecajem na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje između 2% i 5% su koeficijent prolaza topline prozora, unutarnji toplinski dobici i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Utjecaj svih preostalih ulaznih varijabli zanemariv je s obzirom na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje.



Slika 46. Rangiranje ulaznih varijabli prema indeksima ukupnog utjecaja na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

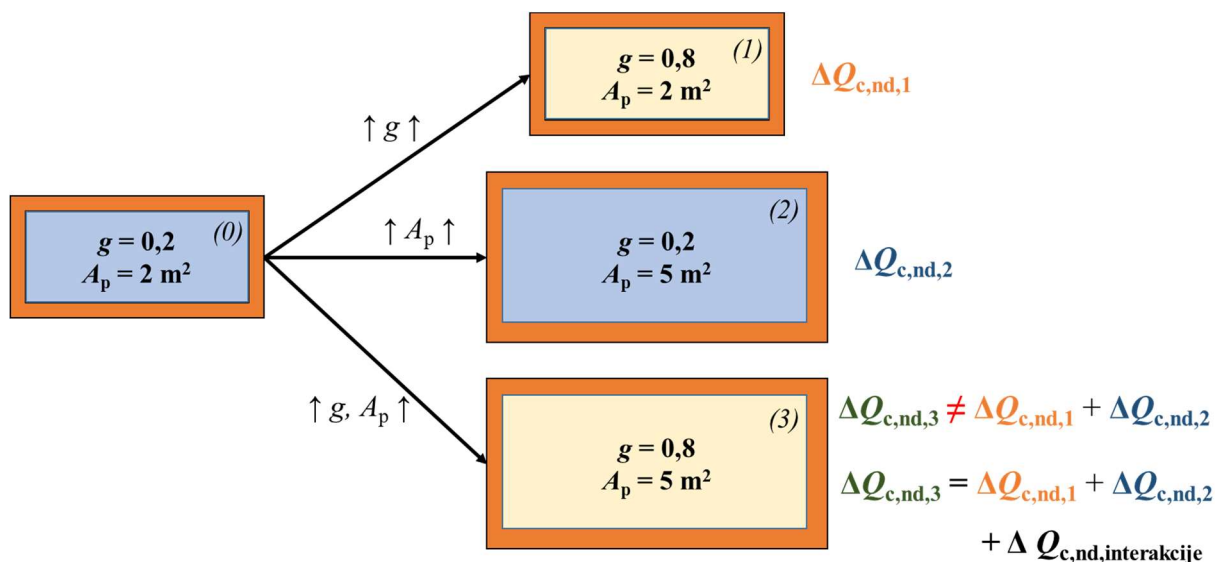
7.3. Utjecaj interakcija

Jedna od prednosti globalne analize osjetljivosti Sobol metodom jest mogućnost određivanja utjecaja interakcija između ulaznih varijabli na varijaciju vrijednosti izlazne varijable. Interakcije između varijable postoje ukoliko je promatrani model neaditivan, odnosno ukoliko se model ne može prikazati kao zbroj k funkcija od kojih je svaka funkcija samo varijable X_i . Utjecaj interakcija moguće je odrediti koristeći jednadžbu (33), odnosno oduzimanjem vrijednosti indeksa prvog reda od indeksa ukupnog utjecaja za svaku ulaznu varijablu. Vrijednost dobivena ovakvim načinom predstavlja sumu vrijednosti svih indeksa viših redova koji se odnose na promatranu varijablu X_i .

$$\text{Interakcije}_i = S_{T,i} - S_i = \sum_{j>i} S_{ij} + \sum_{l>j>i} S_{ijl} + \dots + S_{12\dots k} \quad (33)$$

Fizikalno objašnjenje utjecaja interakcija objašnjeno je na primjeru prozora na južnoj strani zgrade u režimu hlađenja, a prema oznakama na Slici 47. Povećanjem stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora s vrijednosti 0,2 na vrijednost 0,8 uz istu površinu prozora, potrebna energija za hlađenje povećati će se za iznos $\Delta Q_{c,nd,1}$. Ukoliko bi se istom prozoru povećala vrijednost površine s 2 m² na 5 m², uz nepromijenjenu vrijednost stupnja propuštanja Sunčevog zračenja, potrebna energija za hlađenje povećala bi se za $\Delta Q_{c,nd,2}$ zbog

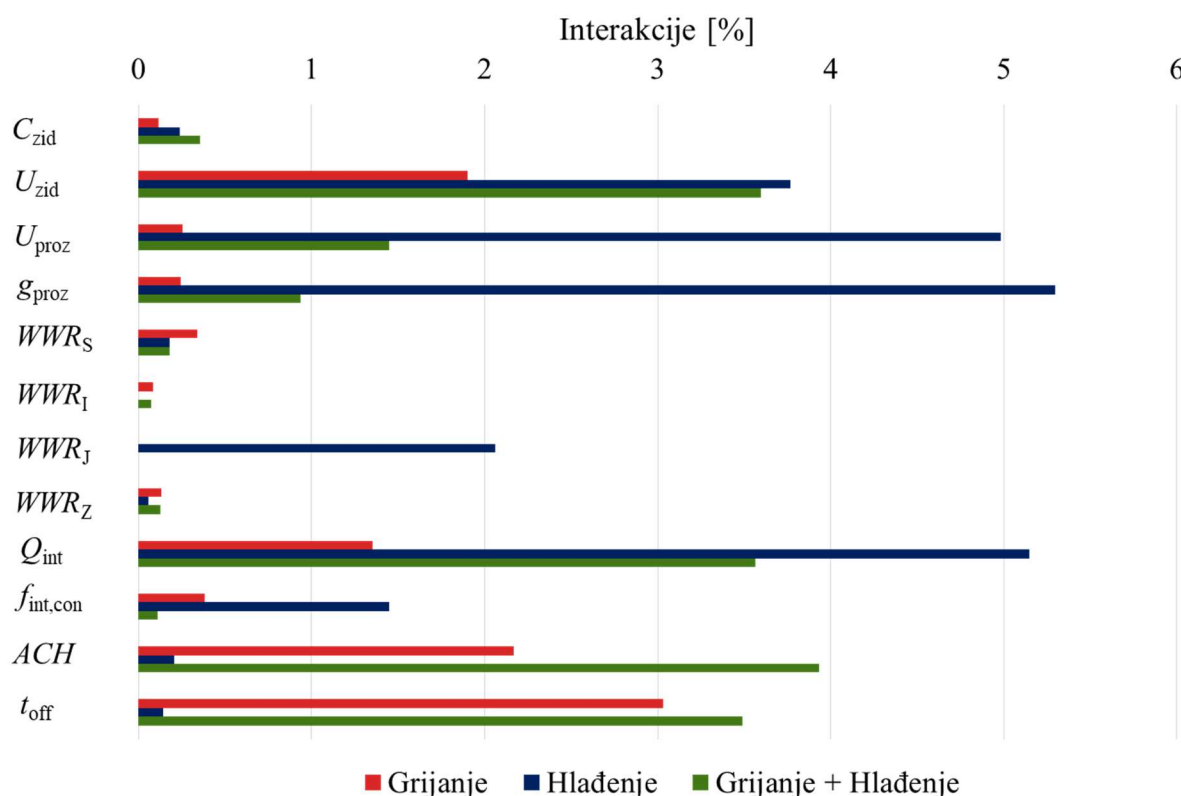
većih toplinskih dobitaka od Sunca. Međutim, ukoliko bi se i stupanj propuštanja i površina povećali za navedene iznose, ukupno povećanje potrebne energije za hlađenje ne bi iznosilo sumu povećanja energije koja su posljedica promjene vrijednosti samo jedne varijable, već bi sadržavala i dodatan član (pozitivan ili negativan) koji je posljedica promjene vrijednosti obje varijable istovremeno, odnosno utjecaja interakcija između te dvije varijable.



Slika 47. Primjer utjecaja interakcija za promjenu vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja i površine prozora

Na Slici 48 prikazani su rezultati izračuna interakcija za svaku ulaznu varijablu prema jednadžbi (33), pri čemu su crvenom bojom prikazane vrijednosti za potrebnu energiju za grijanje, plavom bojom za hlađenje te zelenom bojom za ukupnu potrebnu energiju. Na horizontalnoj osi dijagrama prikazane su postotne vrijednosti interakcija, te označavaju postotak varijance vrijednosti izlazne varijable koji je posljedica interakcija u kojim sudjeluje pojedina ulazna varijabla. Kao što je pokazano raščlambom varijance, najveći utjecaj interakcija vidljiv je kod potrebne energije za hlađenje (oko 10%). Pri tome u interakcijama najviše sudjeluju stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora, koeficijent prolaza topline prozora, unutarnji toplinski dobici i koeficijent prolaza topline zida. Udio varijance vrijednosti potrebne energije za hlađenje od 2% može se pripisati interakcijama u kojima sudjeluje površina prozora na južnoj strani. Također, interakcije u kojima sudjeluje koeficijent prolaza topline zida (oko 3,8%) veće su od samostalnog utjecaja koeficijenta prolaza topline zida na potrebnu energiju za hlađenje (oko 1%). Zanimljiv rezultat predstavlja vrijeme prekida rada sustava u režimu hlađenja, budući da su značajnije interakcije prisutne kod grijanja i kod

ukupne energije, dok su kod hlađenja interakcije minimalne. Vrijeme prekida rada sustava prisutno je noću kada nema toplinskih dobitaka od Sunca niti toplinskih dobitaka od unutarnjih izvora koji predstavljaju najveće toplinsko opterećenje pri hlađenju. Iz tog razloga vrijeme prekida hlađenja ne može značajnije sudjelovati u interakcijama s ostalim varijablama čije su interakcije uglavnom vezane s toplinskim dobicima od Sunca, kao što su stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora, koeficijent prolaza topline zida i prozora te površina prozora na južnoj strani.



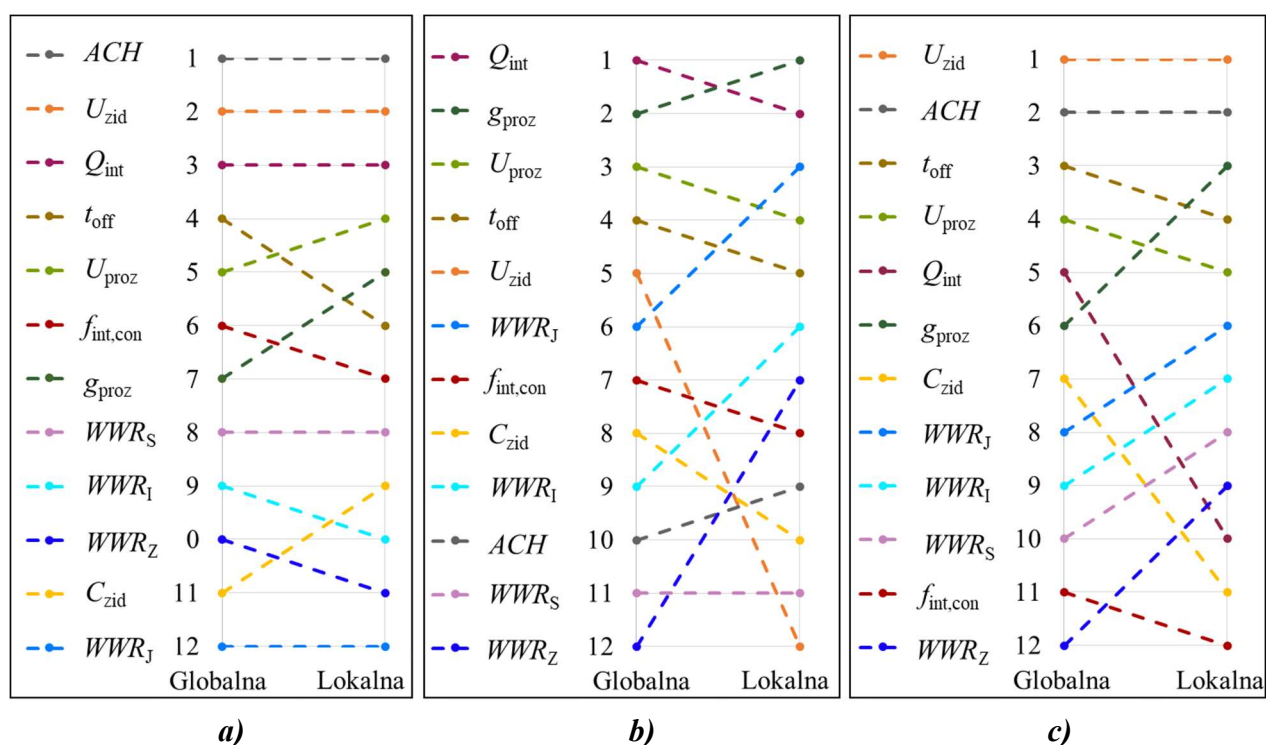
Slika 48. Utjecaj interakcija između ulaznih varijabli na varijancu vrijednosti potrebne energije za grijanje, hlađenje te grijanje i hlađenje zajedno

Najmanji utjecaj interakcija na izlazne varijable prisutan je kod potrebne energije za grijanje (3,8%) pri čemu najveći utjecaj ima vrijeme prekida grijanja (3%). U donekle značajnijem smislu u interakcijama također sudjeluju infiltracija, koeficijent prolaza topline vanjskih zidova i unutarnji toplinski dobici, dok utjecaj preostalih varijabli nije značajan. Najveći zajednički utjecaj na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenja imaju infiltracija, koeficijent prolaza topline vanjskog zida, unutarnji toplinski dobici i vrijeme prekida grijanja i hlađenja.

8. USPOREDBA REZULTATA ANALIZE OSJETLJIVOSTI LOKALNOM I GLOBALNOM METODOM

8.1. Usporedba s obzirom na rangiranje ulaznih varijabli po utjecaju

U prethodnim su poglavljima rangirane ulazne varijable s obzirom na njihov utjecaj na potrebnu energiju za grijanje, hlađenje i ukupnu potrebnu energiju korištenjem lokalne i globalne metode. Za rangiranje varijabli lokalnom metodom korištene su vrijednosti izračunatih indeksa utjecajnosti, dok su za globalnu metodu korišteni indeksi osjetljivosti ukupnog utjecaja. Na Slici 49 prikazana je usporedba rangiranja ulaznih varijabli po njihovom utjecaju na potrebnu energiju za grijanje, hlađenje te ukupnu potrebnu energiju. Na ordinati svakog dijagrama označeni su brojevi 1 do 12, pri čemu 1 označava najutjecajniju varijablu, a 12 zanemarivu varijablu. Na lijevoj osi dijagrama rangirane su ulazne varijable s obzirom na globalnu Sobol metodu, a na desnoj osi s obzirom na lokalnu metodu.



Slika 49. Usporedba rangiranja ulaznih varijabli lokalnom i globalnom metodom po utjecaju na potrebnu energiju za a) grijanje, b) hlađenje, c) grijanje i hlađenje

S obzirom na utjecaj ulaznih varijabli na potrebnu energiju za grijanje, i kod lokalne i kod globalne metode tri najutjecajnije varijable su redom infiltracija, koeficijent prolaza topline zida i unutarnji toplinski dobici. Međutim, kod lokalne metode podcijenjen je utjecaj vremena prekida grijanja i udjela konvektivnih toplinskih dobitaka, dok je utjecaj koeficijenta prolaza

topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora precijenjen. Rangiranje ulaznih varijabli s obzirom na utjecaj na potrebnu energiju za hlađenje između lokalne i globalne metode razlikuje se više nego kod grijanja. Dvije najutjecajnije varijable zamijenile su mjesta, pri čemu je kod globalne metode najutjecajnija varijabla unutarnji toplinski dobici, dok je kod lokalne to stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Utjecaj udjela površine prozora u južnoj fasadi također je precijenjen kod lokalne metode, dok je najveća pogreška lokalne metode zanemarivanje utjecaja koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova koji je s petog mjesta kod globalne metode pao na posljednje mjesto po utjecaju kod lokalne metode. Razlog za pogrešku kod koeficijenta prolaza topline zida jest nemogućnost obuhvaćanja utjecaja interakcija kod lokalne metode. Većinski dio indeksa osjetljivosti ukupnog utjecaja koeficijenta prolaza topline zida sastoji se od interakcija (3,8%), a manji dio od utjecaja prvog reda (1%). Budući da lokalna metoda obuhvaća samo utjecaje prvog reda i to samo oko definiranog referentnog slučaja, utjecaj ove varijable kod lokalne metode je daleko podcijenjen. Prve dvije varijable kod utjecaja na ukupnu potrebnu energiju za grijanje i hlađenje jednake su u slučaju lokalne i globalne metode: koeficijent prolaza topline zida i infiltracija. Međutim, kod varijabli manjeg utjecaja također dolazi do određenih grešaka kod rangiranja varijabli lokalnom metodom.

Razlog za postojanje razlika pri rangiranju utjecaja varijabli posljedica je nemogućnosti otkrivanja interakcija između varijabli kod lokalne metode, kao i ovisnost o odabranom referentnom slučaju. Također, računanjem indeksa utjecajnosti lokalnom metodom nemoguće je obuhvatiti utjecaj nelinearne ovisnosti potrebne energije o promjenama vrijednosti ulaznih varijabli. Ovaj se nedostatak najviše očituje kod potrebne energije za hlađenje, gdje neke od ulaznih varijabli djeluju suprotno na potrebnu energiju u različita doba dana. Primjerice, nizak koeficijent prolaza topline može uzrokovati povećanje potrebne energije za hlađenje zbog smanjenja efekta pasivnog hlađenja, dok s druge strane visok koeficijent prolaza topline također povećava potrebnu energiju za hlađenje zbog povećanih toplinskih dobitaka tijekom dana. Također, globalnom metodom uprosječeni su utjecaji varijabli s obzirom na različite referentne slučajeve. Primjerice, utjecaj stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora na potrebnu energiju za hlađenje može biti različit u ovisnosti o vrijednostima ostalih varijabli kao što su površine prozora, koeficijent prolaza topline prozora ili unutarnji toplinski dobici. Iz tog razloga postoji zamjena dvije najutjecajnije varijable kod potrebne energije za hlađenje između lokalne i globalne metode. Ovakvi utjecaji unose nepouzdanost u izračun indeksa utjecajnosti lokalnom metodom.

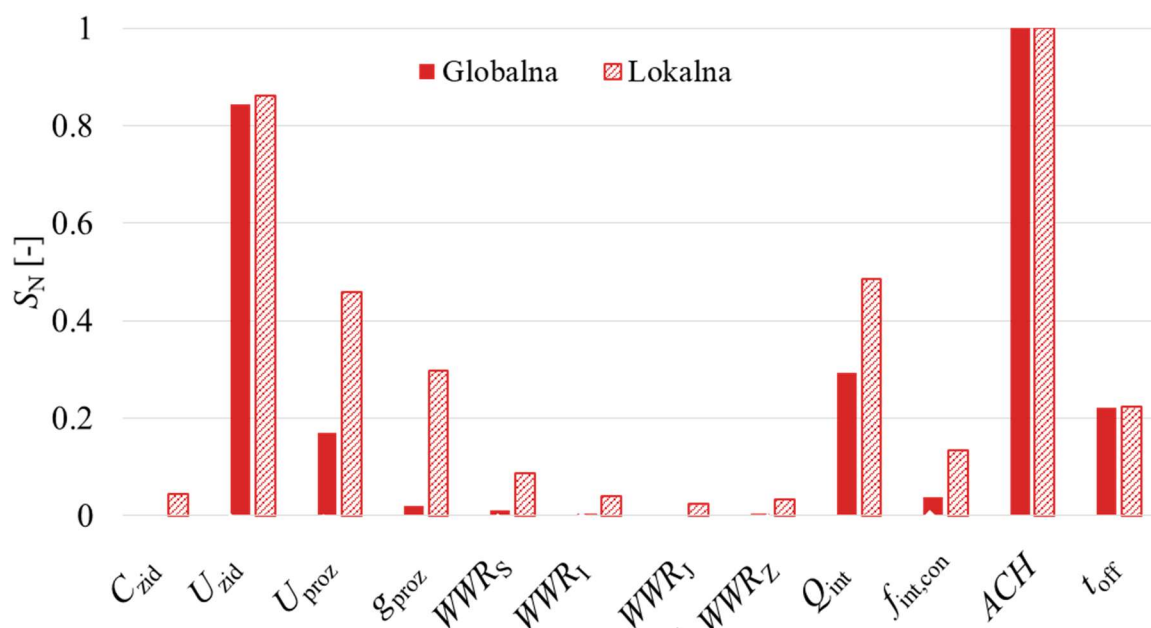
8.2. Usporedba s obzirom na vrijednosti normaliziranih indeksa osjetljivosti

Indeksi utjecajnosti izračunati lokalnom metodom izražavaju postotnu promjenu izlazne varijable za 1% promjene ulazne varijable u odnosu na prosječnu vrijednost izlazne, odnosno ulazne varijable. S druge strane, indeksi ukupnog utjecaja kod globalne metode definirani su kao varijanca vrijednosti izlazne varijable koja bi preostala ukoliko bi vrijednosti svih ulaznih varijabli, osim one na koju se indeks odnosi, bile fiksirane. Ovako definirani indeksi utjecajnosti i indeksi ukupnog utjecaja nisu međusobno usporedive veličine. Sa svrhom usporedbe indeksa izračunatih lokalnom i globalnom metodom za svaku su varijablu izračunati normalizirani oblici indeksa; za globalnu metodu prema jednadžbi (34) te za lokalnu metodu prema jednadžbi (35). Vrijednosti ovako definiranih indeksa nalaze se u rasponu između 0 i 1, pri čemu je vrijednost normaliziranog indeksa jednaka jedinici za varijablu koja ima najveći utjecaj na rezultat. Budući da su indeksi svedeni na maksimalnu vrijednost za globalnu i za lokalnu metodu, ovako definirani indeksi su međusobno brojčano usporedivi.

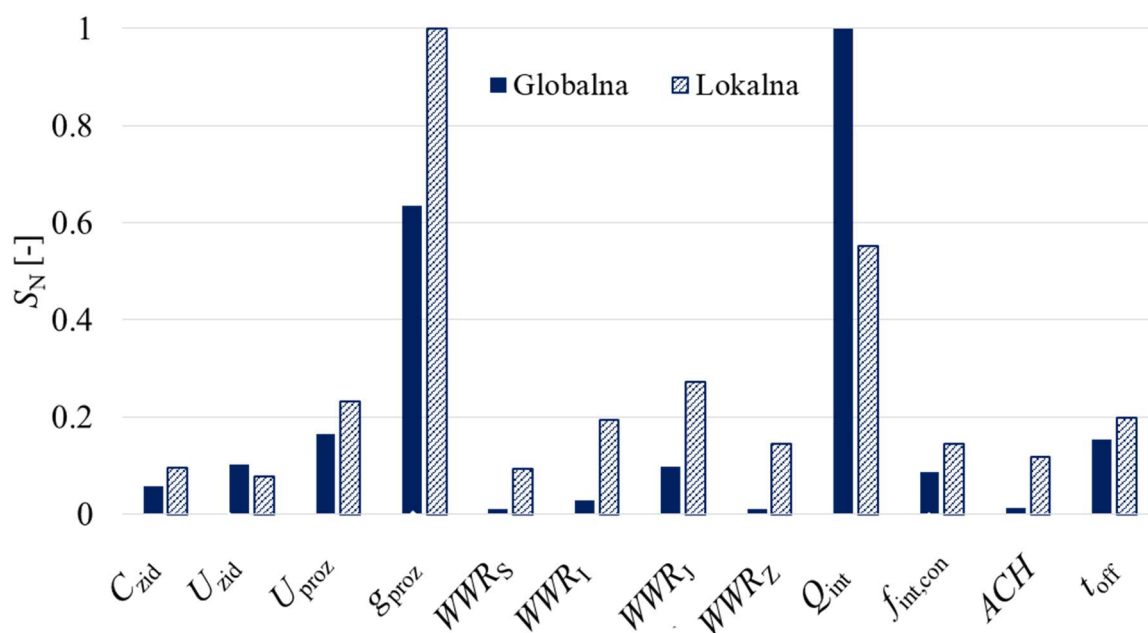
$$S_{N,i} = \frac{S_{T,i}}{\max \{S_{T,1}, S_{T,2}, \dots, S_{T,k}\}} \quad (34)$$

$$S_{N,i} = \frac{IC_i}{\max \{IC_1, IC_2, \dots, IC_k\}} \quad (35)$$

Na Slici 50 prikazane su vrijednosti normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za grijanje. Najutjecajnija ulazna varijabla je infiltracija, te njen normalizirani indeks poprima vrijednost 1 u obje metode. Utjecaj koeficijenta prolaza topline zida kao druge varijable po redu utjecajnosti također je gotovo jednak kod obje metode. Međutim, utjecaj svih ostalih varijabli osim vremena prekida grijanja precijenjen je kod lokalne metode ukoliko se globalna analiza smatra referentnom. Najveće razlike prisutne su kod koeficijenta prolaza topline prozora i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora.



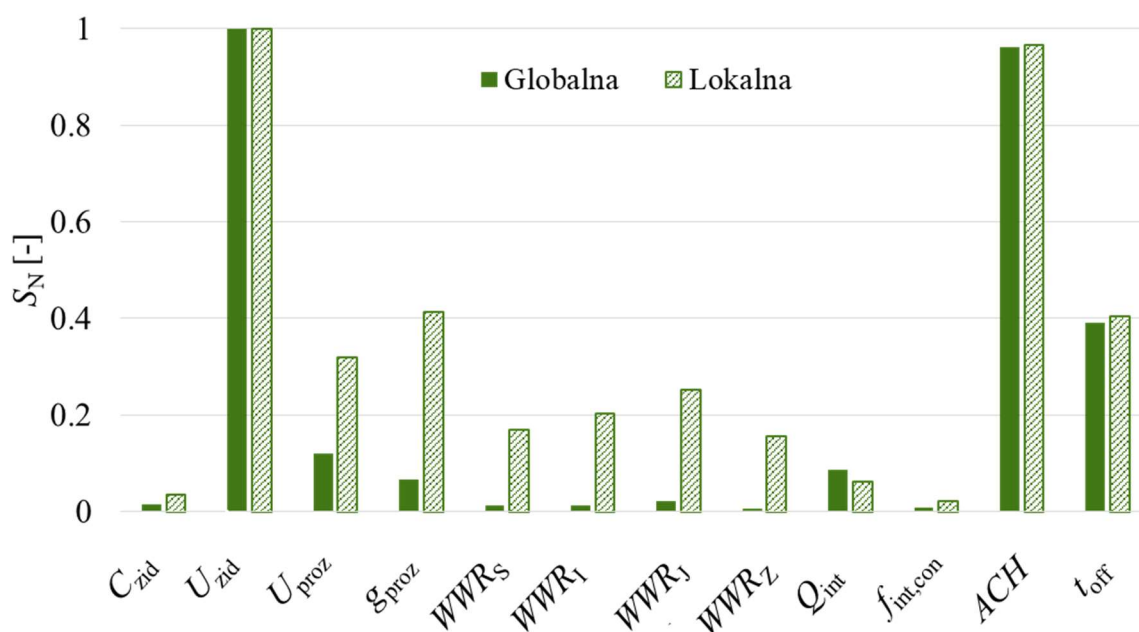
Slika 50. Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za grijanje



Slika 51. Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za hlađenje

Na Slici 51 prikazana je usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti lokalne i globalne metode za potrebnu energiju za hlađenje. U odnosu na globalnu metodu, utjecaj unutarnjih toplinskih dobitaka podcijenjen je lokalnom metodom, dok je utjecaj stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora precijenjen. Utjecaj svih ostalih varijabli također je precijenjen kod lokalne metode osim utjecaja koeficijenta prolaza topline vanjskih zidova. Njegov je utjecaj podcijenjen lokalnom metodom zbog postojanja interakcija koje su potvrđene globalnom metodom.

Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti izračunatih lokalnom i globalnom metodom provedena je i za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje što je prikazano Slikom 52. Tri varijable čiji je utjecaj jednako kvantificiran kod lokalne i globalne metode su koeficijent prolaza topline zida, infiltracija i vrijeme prekida rada sustava. Sve ostale varijable precijenjene su lokalnom metodom osim unutarnjih toplinskih dobitaka čiji je utjecaj blago podcijenjen.



Slika 52. Usporedba normaliziranih indeksa osjetljivosti globalne i lokalne metode za potrebnu energiju za grijanje i hlađenje

8.3. Konačni zaključci usporedbe lokalne i globalne metode analize osjetljivosti

Kod lokalne metode analize osjetljivosti varirana je vrijednost jedne ulazne varijable dok su vrijednosti svih ostalih varijabli jednaki onima u referentnom slučaju. Ovisnost rezultata analize osjetljivosti o odabranom referentnom slučaju jedan je od nedostataka lokalne metode, kao što je pokazano na primjeru površine prozora na južnoj strani. U ovisnosti o različito

odabranim vrijednostima koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora u referentnom slučaju, promjena vrijednosti površine prozora na južnoj strani različito utječe na potrebnu energiju za grijanje (Slika 21 i Slika 22). Dodatan nedostatak lokalne metode je variranje vrijednosti samo jedne varijable, što onemogućuje saznanja o međudjelovanju različitih ulaznih varijabli. Ovaj nedostatak se, na primjer, očituje u zanemarivanju utjecaja koeficijenta prolaza topline zida na potrebnu energiju za hlađenje lokalnom metodom budući da je globalnom metodom pokazano da većina utjecaja te varijable proizlazi iz interakcija s drugim varijablama (Slika 48). Međutim, rezultate lokalne analize osjetljivosti moguće je vrlo jednostavno i pregledno vizualizirati dijagramima (Slika 18 do Slika 27) koje se može koristiti za određivanje trenda rasta ili pada potrebne energije i ovisnosti o povećanju ili smanjenju određene ulazne varijable. Iz tog je razloga lokalna analiza osjetljivosti primjenjivija od globalne na već postojećim zgradama za, primjerice, odabir mjera poboljšanja energetske učinkovitosti ili optimizacije parametara zgrade.

Globalna Sobol metoda provedena u okviru ovog rada temeljena je na raščlambi varijance te uključuje variranje vrijednosti svih ulaznih varijabli istovremeno i određivanje udjela utjecaja pojedinih ulaznih varijabli na varijancu vrijednosti izlazne varijable. Za izračun indeksa osjetljivosti ovom metodom potreban je znatno veći broj simulacija u odnosu na lokalnu metodu (13.312 naspram 73), što predstavlja glavni nedostatak ove metode. Međutim, Sobol metoda neovisna je o modelu te uključuje postupak izračuna interakcija između ulaznih varijabli i kvantificiranja njihovog utjecaja. Pri tome globalna analiza ne daje informacije o rastu ili padu potrebne energije promjenom ulaznih varijabli, već samo kvantificira utjecaj variranja pojedine varijable na variranje vrijednosti izlazne varijable, odnosno varijancu. Dodatno, rezultati Sobol metode predstavljaju statistički uprosječene rezultate, odnosno predstavljaju očekivan utjecaj pojedine varijable neovisno o odabranom referentnom slučaju. Iz tog je razloga globalna metoda primjenjiva za dobivanje saznanja o samom modelu izračuna potrebne energije za grijanje i hlađenje. Također, zbog pouzdanosti rezultata dobivenih Sobol metodom, primjenjiva je kao referentna metoda s obzirom na koju se rezultati drugih metoda analize osjetljivosti mogu uspoređivati i verificirati.

9. ZAKLJUČAK

Analiza osjetljivosti predstavlja matematički postupak kvantifikacije utjecaja promjene vrijednosti ulaznih varijabli na varijaciju vrijednosti izlazne varijable modela. Metode analize osjetljivosti najčešće se dijele na lokalne i globalne, pri čemu je kod lokalne varirana vrijednost samo jedne od ulaznih varijabli, dok su kod globalne varirane vrijednosti svih ulaznih varijabli istovremeno. Lokalna je metoda stoga računalno manje zahtjevn, ali ovisi o odabranom referentnom modelu te ne može detektirati utjecaje međudjelovanja različitih ulaznih varijabli. Iz tog se razloga lokalna metoda smatra manje pouzdanom metodom od globalne. S druge strane, globalna metoda uključuje variranje svih ulaznih varijabli istovremeno za što je potreban znatno veći broj simulacija. Međutim, smatra se pouzdanijom i sveobuhvatnijom metodom od lokalne jer uključuje utjecaje interakcija između ulaznih varijabli, ne ovisi o odabranom referentnom modelu te predstavlja statistički uprosječene vrijednosti utjecaja pojedinih ulaznih varijabli. U okviru ovog rada provedene su dvije metode analize osjetljivosti na energijskom modelu zgrade s ciljem usporedbe dobivenih rezultata godišnje potrebne energije za grijanje i hlađenje: globalna Sobol metoda bazirana na raščlambi varijance te lokalna metoda.

Analiza je provedena na referentnoj zgradi škole za kontinentalnu klimu u Republici Hrvatskoj pri čemu su varirane vrijednosti 12 ulaznih varijabli: toplinski kapacitet i koeficijent prolaza topline vanjskih zidova, udio površine prozora u sjevernoj, istočnoj, južnoj i zapadnoj fasadi, unutarnji toplinski dobici, udio konvektivnih unutarnjih toplinskih dobitaka, vrijeme prekida grijanja i hlađenja, infiltracija te koeficijent prolaza topline i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Dinamički odzivi energijskih tokova zgrade provedeni su korištenjem detaljnog računalnog programa za energijske simulacije, TRNSYS. U korisničkom sučelju TRNEdit automatiziran je proces pokretanja višestrukog broja simulacija, pri čemu svaka simulacija predstavlja jedan model zgrade s različitim vrijednostima ulaznih varijabli. Modeli zgrade izrađeni su na temelju matrice uzorka dobivene računalnim programom za analizu osjetljivosti i nesigurnosti, SIMLAB. Automatizirana izrada različitih modela zgrada omogućena je skriptom izrađenom u računalnom programu PYTHON, dok je čitanje i obrada rezultata simulacija automatizirana u računalnom programu MATLAB. Izračun indeksa osjetljivosti Sobol metodom proveden je u računalnom programu SIMLAB. Osjetljivost ulaznih varijabli ispitana je s obzirom na tri izlazne varijable: potrebnu energiju za grijanje, potrebnu energiju za hlađenje te ukupnu potrebnu energiju. Za globalnu metodu provedeno je ukupno 13.312 simulacija, dok su za lokalnu provedene 73 simulacije. Pri tome, kvantifikacija

utjecaja lokalnom metodom provedena je izračunom koeficijenta utjecajnosti za svaku ulaznu varijablu. Koeficijent utjecajnosti predstavlja postotak promjene izlazne varijable za 1% promjene ulazne varijable u odnosu na referentni slučaj. Rezultati globalne metode predloženi su indeksima osjetljivosti, pri čemu indeks osjetljivosti prvog reda opisuje samostalan utjecaj jedne ulazne varijable, dok indeks osjetljivosti ukupnog utjecaja uključuje i utjecaje interakcija s drugim ulaznim varijablama.

Za obje metode najutjecajnije varijable na potrebnu energiju za grijanje su infiltracija, koeficijent prolaza topline vanjskih zidova i unutarnji toplinski dobici. Međutim, s obzirom na potrebnu energiju za hlađenje, lokalnom metodom definiran je stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora kao najutjecajnija varijabla, dok je prema Sobol metodi najutjecajnija varijabla unutarnji toplinski dobici. Razlog pogrešnog rangiranja kod lokalne metode predstavlja ovisnost o referentnom slučaju. Na primjer, za različite vrijednosti stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora u referentnom slučaju dobili bi se različiti utjecaji na vrijednost potrebne energije za hlađenje. Budući da globalna metoda statistički uprosječi utjecaj pojedine varijable s obzirom na različite vrijednosti ostalih ulaznih varijabli, utjecaj stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora manji je kod globalne nego kod lokalne metode. Kod ukupne potrebne energije obje metode prepoznaju koeficijent prolaza topline zida i infiltraciju kao dvije najutjecajnije varijable. Međutim, utjecaj ostalih ulaznih varijabli na sve tri izlazne varijable netočno je određen lokalnom metodom zbog ovisnosti o referentnom slučaju kao i nemogućnosti promjene više vrijednosti ulaznih varijabli u istoj simulaciji.

Udjeli površina prozora u fasadi za sve četiri orijentacije kod obje su metode varijable s malim utjecajem na potrebnu energiju za grijanje i hlađenje. Pri tome je najveći utjecaj prisutan kod potrebne energije za hlađenje, pogotovo za južnu fasadu. Međutim, kod potrebne energije za grijanje promjena površine prozora djeluje dvojako: mijenja toplinske gubitke provođenjem zbog većeg koeficijenta prolaza topline prozora u odnosu na koeficijent prolaza topline zida, ali mijenja i toplinske dobitke od Sunca zbog povećanja površine prozora. Prevladavajući utjecaj jednog od dvaju spomenutih efekata ovisi o vrijednostima koeficijenta prolaza topline prozora i zida te stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Prema tome, povećanje površine prozora može djelovati pozitivno ili negativno na potrebnu energiju za hlađenje. Budući da globalna metoda uprosječi utjecaj ulazne varijable za sve moguće slučajeve, očekivani utjecaj udjela površine prozora u fasadi na potrebnu energiju za grijanje je neznatan.

Globalnom su metodom izračunati indeksi osjetljivosti prvog reda i ukupnog utjecaja. Koeficijent prolaza topline i infiltracija varijable su odgovorne za 70% varijance vrijednosti

potrebne energije za grijanje. Kod potrebne energije za hlađenje unutarnji toplinski dobici i stupanj propuštanja Sunčevog zračenja prozora zajedno su odgovorni za 68% vrijednosti varijance. Međusobnom razlikom indeksa ukupnog utjecaja i indeksa prvog reda određen je utjecaj interakcija između varijabli. Najveći utjecaj interakcija prisutan je kod potrebne energije za hlađenje te iznosi 10% varijance vrijednosti izlazne varijable od čega se najveći dio odnosi na međudjelovanje unutarnjih toplinskih dobitaka te koeficijenta prolaza topline i stupnja propuštanja Sunčevog zračenja prozora. Najmanji je utjecaj interakcija prisutan kod potrebne energije za grijanje i iznosi oko 4%.

Usporedba kvantifikacije rezultata globalnom i lokalnom metodom provedena je korištenjem normaliziranih indeksa osjetljivosti, pri čemu najutjecajnije varijable imaju normalizirani indeks jednak jedinici, a sve ostale u rasponu od 0 do 1. S obzirom na globalnu metodu, lokalna metoda precjenjuje utjecaj većine ulaznih varijabli. Razlog za veći utjecaj pojedinih varijabli kod lokalne predstavlja povezanost s referentnim slučajem budući da je kod globalne metode indeks osjetljivosti uprosječen s obzirom na sve moguće kombinacije vrijednosti ulaznih varijabli.

Rezultati dobiveni lokalnom metodom vrlo su jednostavni za tumačenje te otkrivaju trend rasta ili pada potrebne energije za grijanje i hlađenje u ovisnosti o promjeni pojedine ulazne varijable u odnosu na referentni slučaj. Stoga je lokalna metoda korisna prilikom analize utjecaja mjera poboljšanja ili optimizacije parametara na, primjerice, već postojećim zgradama gdje je referentni slučaj jednostavniji za definiranje. S druge strane, globalna analiza omogućuje saznanja o varijablama koje svojim promjenama najviše utječu na varijancu vrijednosti rezultata modela. Stoga je globalna metoda primjenjiva prilikom istraživanja novih modela, odnosno računalnih programa, normi ili algoritama za proračun potrebne energije u zgradama. Detaljan opis i znanje stečeno provedbom analize osjetljivosti globalnom metodom u ovome radu koristit će se kao osnova za buduća istraživanja energijskih modela zgrada.

10. LITERATURA

- [1] Mara T.A., Tarantola S. (2008). Application of Global Sensitivity Analysis of Model Output to Building Thermal Simulations. *Building Simulation*, 1, str. 290-302.
- [2] Ruiz R. et al. (2012). Global Sensitivity Analysis Applied to Total Energy Use in Buildings. *International High Performance Buildings Conference*, Paper 78.
- [3] Lam J.C., Hui S.C.M. (1996). Sensitivity Analysis of Energy Performance of Office Buildings. *Building and Environment*, 31(1), str. 27-39.
- [4] Hamby D.M. (1994). A Review of Techniques for Parameter Sensitivity Analysis of Environmental Models. *Environmental Monitoring and Assessment*, 32, str. 135-154.
- [5] Heiselberg P. et al. (2009). Application of Sensitivity Analysis in Design of Sustainable Buildings. *Renewable Energy*, 34, str. 2030-2036.
- [6] Frey H.C. et al. (2003). Recommended Practice Regarding Selection, Application, and Interpretation of Sensitivity Analysis Methods Applied to Food Safety Process Risk Models. Raleigh, NC, North Carolina State University.
- [7] Rocquigny, E. de., et al. (2008). *Uncertainty in Industrial Practice: A Guide to Quantitative Uncertainty Management*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- [8] Tian W. (2012). A Review of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, str. 411-419.
- [9] Pang Z., et al. (2019). The Role of Sensitivity Analysis in Building Energy Analysis: A Critical Review. *Energy and Buildings*, 209, str. 1-52.
- [10] Iooss B., Lemaître P. (2015). A Review on Global Sensitivity Analysis Methods. u: Dellino G., Melon C. (ur.). *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems*. Boston, Springer, str. 101-122.
- [11] Song X. et al. (2015). Global Sensitivity Analysis in Hydrological Modeling: Review of Concepts, Methods, Theoretical Framework, and Applications. *Journal of Hydrology*, 523, str. 739-757.
- [12] Saltelli A., Bolado R. (1998). An Alternative Way to Compute Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST). *Computational Statistics & Data Analysis*, 26(4), str. 445-460.
- [13] Frey H.C., Patil S.R. (2002). Identification and Review of Sensitivity Analysis Methods. *Risk Analysis*, 22(3), str. 553-578.
- [14] Nguyen A.T., Reiter S. (2015). A Performance Comparison of Sensitivity Analysis Methods for Building Energy Models. *Building Simulation*, 8(6), str. 651-664.

- [15] Yang S. et al. (2016). Comparison of Sensitivity Analysis Methods in Building Energy Assessment. *Procedia Engineering*, 146, str. 174-181.
- [16] Spitz C. et al. (2012). Practical Application of Uncertainty Analysis and Sensitivity Analysis on an Experimental House. *Energy and Buildings*, 55, str. 459-470.
- [17] Delgarm N. et al (2018). Sensitivity Analysis of Building Energy Performance: A Simulation-based Approach Using OFAT and Variance-based Sensitivity Analysis Methods. *Journal of Building Engineering*, 15, str. 181-193.
- [18] Kristensen M. H., Petersen S. (2016). Choosing the Appropriate Sensitivity Analysis Method for Building Energy Model-based Investigations. *Energy and Buildings*, 130, str. 166-176.
- [19] Hou L. et al. (2017). The Impacts of Energy Efficiency Design Parameters on Office Buildings Energy Consumption in Different Climate Zones in China. *Procedia Engineering*, 205, str. 2478-2484.
- [20] Zhang C., Ong L. (2017). Sensitivity Analysis of Building Envelop Elements Impact on Energy Consumptions Using BIM. *Open Journal of Civil Engineering*, 7, str. 488-508.
- [21] Tian W. et al. (2017). Building Energy Assessment Based on a Sequential Sensitivity Analysis Approach. *Procedia Engineering*, 205, str. 1042-1048.
- [22] Mosteiro-Romero M. et al. (2017). Seasonal Effects of Input Parameters in Urban-scale Building Energy Simulation. *Procedia Engineering*, 122, str. 433-438.
- [23] Žakula T. et al. (2019). Comparison of Dynamic Simulations and the ISO 52016 Standard for the Assessment of Building Energy Performance. *Applied Energy*, 254, str. 113553.
- [24] International Organization for Standardization. (2017). Energy Performance of Buildings – Energy Needs for Heating and Cooling, Internal Temperatures and Sensible and Latent Heat Loads – Part 1: Calculation Procedures (ISO Standard No. 52016-1:2017).
- [25] Schnieders J. et al. (2019). Design and Realisation of the Passive House Concept in Different Climate Zones. *Energy Efficiency*, published online 2.9.2019.
- [26] Pilkington Windows Catalogue.
- [27] Butcher K., Craig B. (2006). *Environmental Design: CIBSE Guide A*. London, United Kingdom, The Chartered Institution of Building Services Engineers London.
- [28] Soldo V. et al. (2017). Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prostora zgrade prema HRN EN ISO 13790.
- [29] Saltelli A., et al. (2004). *Sensitivity Analysis in Practice: A Guide to Assessing Scientific Models*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.

- [30] Sobol I.M. (1993). Sensitivity Estimates for Nonlinear Mathematical Models. *Mathematical Modelling in Civil Engineering*, 1(4) str. 407-414.
- [31] Saltelli A., et al. (2008). *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- [32] Klein S.A., et al, (2010). TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA. dostupno na <https://sel.me.wisc.edu/trnsys/>
- [33] TRNSYS 17 Documentation (2012 cop.). Multizone Building Modeling with Type56 and TRNBuild (Volume 5). Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.
- [34] Giglioli N., Saltelli A. (2011). SIMLAB – Software Package for Uncertainty and Sensitivity Analysis. Ispra, Italy: Institute for Systems Informatics and Safety (Joint Research Centre, European Commission).

PRILOZI

- I. CD-R disc