

Utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na energijsko svojstvo zgrada

Sanjin Gumbarević¹, doc.dr.sc. Bojan Milovanović²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, sgumbarevic@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, bmilovanovic@grad.hr

Sažetak

Utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na energijsko svojstvo zgrade nije dovoljno istican i ne pridaje mu se važnost koju svakako ima. Hrvatski propisi zahtijevaju određenu razinu zrakopropusnosti koja bi se trebala kontrolirati ispitivanjem prije tehničkog pregleda zgrade, ali se ispitivanje u velikom broju slučajeva ne provodi. Parametarskom analizom energetske modele dviju zgrada u programskom paketu EnergyPlus prikazan je utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na potrebnu godišnju energiju za grijanje, gdje taj utjecaj posebno dolazi do izražaja u zgradama koje su kvalitetno toplinski izolirane.

Ključne riječi: zrakopropusnost, infiltracija, modeliranje energije zgrade, EnergyPlus, simulacija ponašanja zgrade

The impact of envelope airtightness on energy performance of buildings

Abstract

The impact of airtightness of buildings on energy performance is not adequately presented if we observe its true impact on the building energy demand. The Republic of Croatia requires a certain level of building airtightness, which should be controlled before technical inspection of the building. However, in many cases this airtightness is not controlled at all. Parametric analysis of energy models of two buildings in EnergyPlus shows the impact of airtightness on the annual heating energy demand, where this impact is more significant for well-insulated buildings.

Key words: airtightness, infiltration, Building Energy Modelling, EnergyPlus, Building Performance Simulation

1 Uvod

Europska unija je s ciljem ostvarenja ušteda u potrošnji primarne energije i smanjenja emisije stakleničkih plinova prepoznala sektor zgradarstva kao glavnu ciljanu skupinu u kojoj bi se te uštede mogle ostvariti na najučinkovitiji način [1]. Iz tog je razloga Europska komisija svojim direktivama ([2]-[5]) propisala obvezu gradnje novih zgrada niske potrošnje energije te obvezu dubinske energetske obnove postojećeg građevinskog fonda s istim ciljem. Uštede se ostvaruju ugradnjom učinkovitijih sustava i uređaja te obnavljanjem ovojnice zgrade ugradnjom nove stolarije te toplinske izolacije. Osim ugradnje materijala boljih toplinskih svojstava čime smanjujemo transmisijske gubitke, velik utjecaj na potrebnu toplinsku energiju za grijanje prema [6] ima infiltracija zraka kroz nenamjerne otvore na ovojnici nastale prilikom nepažnje u procesu gradnje. Kontrola zrakopropusnosti ovojnice po dovršetku građenja je propisana Tehničkim propisom [7] i mora se izvršiti prije tehničkog pregleda zgrade metodom razlike tlaka između unutarnjeg i vanjskog okoliša koja je definirana propisom *HRN EN ISO 9972:2015*. Metoda je također i dobar alat za kontrolu građenja uz potencijalni brz popravak loše izvedenih detalja, a ispitivanjem dobijemo broj izmjene zraka na razlici tlaka od 50 Pa (n_{50}). Algoritam [6] (izrađen prema normi *HRN EN ISO 13790:2008*) dopušta odabir proračunske vrijednosti za n_{50} na način da se odabere ili izmjerena vrijednost ispitivanja prema *HRN EN ISO 9972:2015* ili tablično prema kategoriji s obzirom na to planira li se ugradnja mehaničke ventilacije ili ne te se ispitivanjem zrakopropusnosti potvrđuju zadani kriteriji. U inženjerskoj se praksi uvriježilo da se vrijednost n_{50} u proračunu građevinske fizike uzima u intervalu $0,5 - 0,6 \text{ h}^{-1}$. Problem nastaje kada ispitivanjem metodom razlike tlaka treba dokazati tu vrijednost. Naime, potrebna je vrlo kvalitetna gradnja da bi se izvela zgrada takve zrakopropusnosti što nije čest slučaj u praksi. U radu je prikazana analiza utjecaja zrakopropusnosti na energijsko svojstvo zgrade usporedbom različitih razina zrakopropusnosti u programskom paketu za simuliranje energetskog ponašanja zgrade *EnergyPlus* [8] koji zadovoljava provjeru prema američkoj normi *ASHRAE Standard 140* [9]. Analizirane su dvije zgrade na kojima je provedena parametarska analiza utjecaja zrakopropusnosti ovojnice na potrebnu godišnju energiju za grijanje.

2 Zrakopropusnost ovojnice zgrade

Infiltracija zraka kroz ovojnicu zgrade je vrlo važan parametar u određivanju potrebne godišnje energije za grijanje. Infiltracija je fizikalni fenomen koji nastaje prilikom razlike tlaka između okoliša zgrade i vanjskog okoliša, a odvija se kroz nenamjerne otvore na ovojnici zgrade. Ona ovisi o brzini vjetra, temperaturi i lokaciji [10]. Infiltracija se izravno može odrediti metodom “*tracer gas*” prema normi *HRN EN ISO*

12569:2017, gdje se prati koncentracija karakterističnog plina u normalnim uporabnim uvjetima zgrade pa se rezultati moraju i interpretirati u skladu s parametrima o kojima ovisi. Plinovi koji se unose u promatranu zonu i čija se koncentracija prati u vremenu, moraju prema [11] zadovoljavati sljedeće uvjete:

- *sigurnost*: mora biti nezapaljiv, neotrovan i hipoalergijski
- *inertnost*: ne smije reagirati ni s kakvim elementom u području ispitivanja niti izvan njega
- *neosjetljivost*: ne smije utjecati na karakteristike koje se žele odrediti
- *unikatnost*: ne smije biti plin koji se inače nalazi u zraku
- *mjerljivost*: koncentracija mora biti mjerljiva postojećim uređajima.

Rezultati mjerenja metodom “*tracer gas*” prikazuju količinu zraka koja se infiltrirala u zonu za koju se provodi mjerenje u promatranom vremenu. Kako infiltracija, pa tako i metoda “*tracer gas*”, uvelike ovise o dodatnim parametrima uz samu zrakopropusnost ovojnice, tome se pokušalo doskočiti razvijanjem metode koja ih neutralizira nametanjem razlike tlaka između unutarnjeg i vanjskog okoliša ovojnice - metoda razlike tlaka.

2.1 Ispitivanje zrakopropusnosti ovojnice metodom razlike tlaka

Kako bi se uklonio utjecaj klimatskih uvjeta na određivanje zrakopropusnosti ovojnice zgrade, razvijena je metoda koja je opisana normom *HRN EN ISO 9972:2015*. Metoda minimalno ovisi o klimatskim uvjetima jer se određuje zrakopropusnost ovojnice zgrade kontroliranim razlikom tlaka (promatra se razlika u temperaturi između unutarnjeg prostora i vanjskog okoliša, brzina vjetera, relativna vlažnost zraka i vanjski tlak te su normom definirani granični uvjeti). Razlika tlaka se realizira ventilatorom koji je povezan s tlakomjerom i računalom (slika 1.a). Za određenu se razliku tlaka mjeri i bilježi protok zraka kroz ventilator. Mjerenje se odvija za dva slučaja:

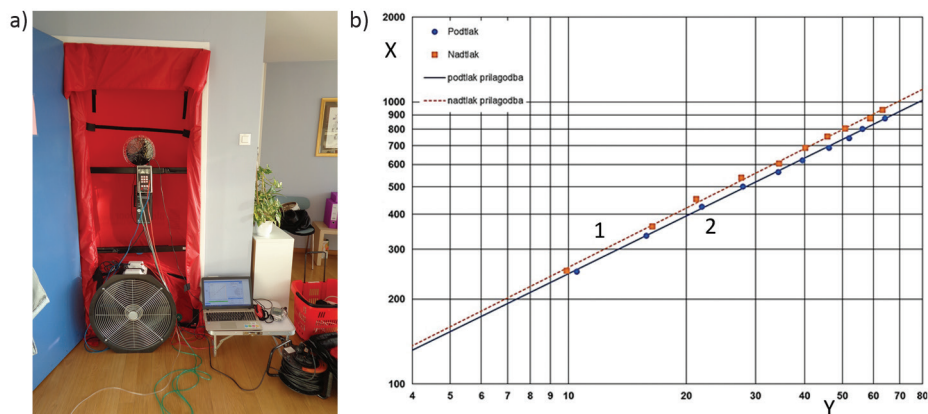
- *povišeni tlak* u zgradi u odnosu na vanjski
- *manji tlak* u zgradi u odnosu na vanjski.

Primjer bilježenja rezultata prema *HRN EN ISO 9972:2015* prikazuje slika 1.b. Za svaku se postavljenu razliku tlaka, Δp_r , bilježi protok zraka kroz ventilator, q_r , i iscrtaava graf (1) u logaritamskom mjerilu kako i prikazuje slika 1.b:

$$q_{pr} = C_L (\Delta p)^n \quad (1)$$

Koeficijenti C_L (koeficijent propusnosti zraka) i n (koeficijent strujanja zraka) računaju se prema *HRN EN ISO 9972:2015* (Annex C), odnosno oni su izlazni podaci mjerenja. Izraz (1) je bitan u određivanju zrakopropusnosti ovojnice pri razlici tlaka od 50 Pa te pri pravilnoj procjeni protoka infiltriranog zraka u zonu. Prvi je put upo-

trijebljen u radu M. H. Shermana i M. T. Grimsruda [12], a u istom je radu predložena i projektirana infiltracija kao izmjena zraka pri razlici tlaka od 4 Pa , što se i danas često koristi u Sjedinjenim Američkim Državama.



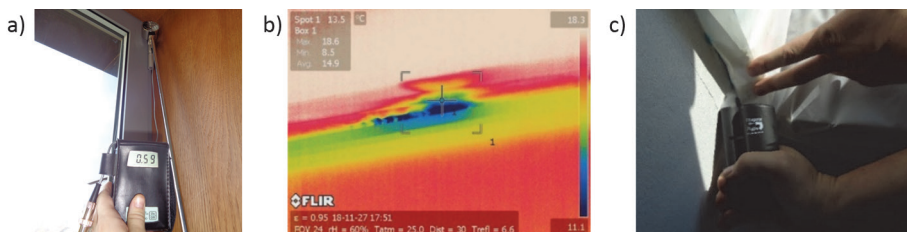
Slika 1. a) Oprema za ispitivanje zrakopropusnosti metodom kontrolirane razlike tlaka. b) Rezultati ispitivanja zrakopropusnosti metodom kontrolirane razlike tlaka prema *HRN EN ISO 9972:2015* (legenda: 1 - ispitivanje nadtlakom, 2 - ispitivanje podtlakom, X - razlika tlakova u Pa, Y - izmjena zraka u m³/h)

Nakon što je graf ovisnosti protoka zraka kroz ventilator o razlici tlakova između unutarnjeg i vanjskog okoliša iscrtan, može se odrediti srednji protok zraka za razliku tlaka od 50 Pa (2) jer se na osnovi njega preko izraza (3) odredi broj izmjena zraka prilikom razlike tlaka od 50 Pa , n_{50} . Broj izmjene zraka prilikom razlike tlaka od 50 Pa se određuje kao kvocijent protoka zraka na istoj razlici tlaka, q_{50} , i unutarnjeg volumena, V , ispitivane zone:

$$q_{50} = C_t(50)^n \quad (2)$$

$$n_{50} = \frac{q_{50}}{V} \quad (3)$$

Koeficijent n_{50} je važan jer se koristi kao referentan za usporedbu i dokazivanje zrakopropusnosti ovojnice kada je potrebno zadovoljiti određeni propis. Ako imamo izmjerenu vrijednost n_{50} , prema *HRN EN ISO 13789:2017* možemo grubo procijeniti broj izmjene zraka infiltracijom kao $n_{\text{inf}} = n_{50}/20$.



Slika 2. Metode otkrivanja nedostataka na ovojnici prilikom ispitivanja metodom razlike tlaka: a) provjera strujanja anemometrom, b) pregled ovojnice infracrvenom kamerom prilikom stvaranja podtlaka (mora postojati razlika u temperaturi između vanjskog i unutarnjeg okoliša), c) praćenje kretanja dima prilikom nadtlaka

Dodatak normi *HRN EN ISO 9972:2015 (Annex E)* preporuča nekoliko metoda pronalaska nenamjernih otvora na ovojnici, što ispitivanje zrakopropusnosti ovojnice metodom razlike tlaka dodatno čini i alatom za kontrolu kvalitete izvođenja ovojnice zgrade (uključujući ugradnju stolarije i bravarije što su najčešće slaba mjesta na ovojnici). Slika 2 prikazuje i opisuje metode pronalaska mjesta infiltracije.

2.2 Zrakopropusnost ovojnice u hrvatskim propisima

U hrvatskim se propisima broj izmjena zraka pri razlici tlaka od 50 Pa primjenjuje za dokazivanje propisane zrakopropusnosti ovojnice prema Tehničkom propisu [7] u slučaju kada se projektiraju zgrade gotovo nulte energije ili zgrade koje se projektiraju na:

- $Q''_{Hn,d} \leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, kada srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade jest $\leq 3^\circ\text{C}$;
- $Q''_{Hn,d} \leq 25 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, kada srednja mjesečna temperatura vanjskog zraka najhladnijeg mjeseca na lokaciji zgrade jest $> 3^\circ\text{C}$, gdje je $Q''_{Hn,d}$ godišnja potrebna toplinska energija za grijanje po jedinici ploštine korisne površine zgrade.

Kriteriji koje n_{50} mora zadovoljiti odnose se na dva slučaja s obzirom je li u zgradi ugrađena mehanička ventilacija ili nije:

- $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$, za zgrade koje nemaju mehanički uređaj za ventilaciju;
- $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$ za zgrade s mehaničkim uređajem za ventilaciju.

U algoritmu [6] koji je u uporabi iako je norma po kojoj je izrađen povučena, n_{50} se koristi za izračun potrebne toplinske energije uslijed infiltracije (4) preko koeficijenta izmjene topline uslijed infiltracije (5) s tim da se uzima procijenjena vrijednost izmjene zraka uslijed infiltracije (6) koja je bazirana na n_{50} :

$$Q_{Ve,inf} = \frac{H_{Ve,inf} (g_{init} - g_e)}{1000} t \text{ [kWh]} \quad (4)$$

$$H_{Ve,inf} = n_{inf} V_{\varrho_a} c_{p,a} \quad [W/K] \quad (5)$$

$$n_{inf} = e_{wind} n_{50} \quad [h^{-1}] \quad (6)$$

Sva tri izraza (4) - (6) su preuzeta iz njemačke norme *DIN 18599-2* [13], a ostali koeficijenti u izrazima koji nisu do sada opisani su:

- ϑ_{init} - unutarnja temperatura grijane zone [°C]
- ϑ_e - srednja vanjska temperatura za proračunski period [°C]
- t - proračunsko vrijeme
- ϱ_a - gustoća zraka
- $c_{p,a}$ - specifični toplinski kapacitet zraka
- e_{wind} - faktor zaštićenosti zgrade od vjetra.

U izrazu (6), vrijednost n_{50} se može odrediti na dva načina, može se uzeti mjerena vrijednost zrakopropusnosti zgrade pa se ona kao takva mora i dokazati ispitivanjem metodom razlike tlaka, ili se može uzeti ovisno o tome ima li zgrada ugrađen mehanički uređaj za ventilaciju:

- 1) zgrade bez mehaničkog uređaja za ventilaciju, $n_{50} = 2$ (zahtjev zrakopropusnost i $n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$);
- 2) zgrade s mehaničkim uređajem za ventilaciju, $n_{50} = 1$ (zahtjev zrakopropusnosti $n_{50} \leq 1,5 \text{ h}^{-1}$).

3 Simulacija energetskog ponašanja zgrade s različitim slučajevima zrakopropusnosti

Radi prikazivanja utjecaja zrakopropusnosti ovojnice na energetsko ponašanje zgrade korišten je programski paket *EnergyPlus* s dodatkom *OpenStudio*. Programski paketi su otvorenog koda. *EnergyPlus* je programsko rješenje koje izvršava simulaciju na osnovi zadanih ulaznih parametara u obliku *.idf* datoteke analogno "*solverima*" numeričkih metoda (primjerice *Elmer* ili *Code_Aster* za metodu konačnih elemenata). Programski paket *OpenStudio* se koristi za pomoć pri oblikovanju ulazne *.idf* datoteke. Učinkovitost programskih paketa za energetske simulacije zgrada ocjenjuje se američkom normom *ASHRAE Standard 140* [9] gdje su pripremljeni testovi koje svaka verzija programskog paketa mora zadovoljiti kako bi on bio prihvaćen u struci. Nakon što je u potpunosti razvijen i testiran, programski paket *EnergyPlus* je objavljen u utjecajnom časopisu [8] od kada i kreće njegova značajnija uporaba. Svi ugrađeni matematički simulacijski modeli su razumljivo opisani u dokumentaciji [14], a upućuju korisnika i na detaljnije istraživanje modela s uputama na radove iz kojih su preuzeti ili na opsežan i koristan priručnik Američkog društva *ASHRAE (The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)* [15]. Kako se

u radu proučava utjecaj zrakopropusnosti ovojnice, odnosno toplinski gubici infiltracijom, korišten je model infiltracije koji povezuje koeficijente dobivene ispitivanjem zrakopropusnosti metodom razlike tlaka, a baziran je na izrazu (1). Model su razvili *Walker i Wilson*, a jednostavno je opisan u [15] te detaljno s razvojem i validacijom modela u [16]. Opisani model infiltracije u *EnergyPlusu* se koristi preko izraza (7):

$$Infiltration = (F_{Schedule}) \sqrt{\left(c C_s \Delta T^n \right)^2 + \left[c C_w (s \cdot WindSpeed)^{2n} \right]^2} \quad (7)$$

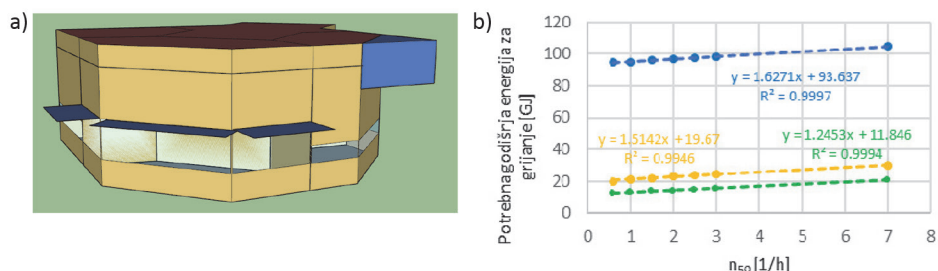
gdje su:

- $F_{Schedule}$ - bezdimenzijski koeficijent rasporeda korištenja toplinske zone
- c - koeficijent strujanja zraka dobiven ispitivanjem [$m^3/(s \cdot Pa)$]
- C_s - koeficijent infiltracije uzrokovane efektom dimnjaka [(Pa/K)ⁿ]
- n - eksponent iz ispitivanja ovisan o razlici tlaka;
- C_w - koeficijent infiltracije uzrokovane vjetrom [($Pa \cdot s^2/m^2$)ⁿ]
- s - faktor zaklona zgrade.

Osim opisanog modela, programski paket sadrži još dva modela infiltracije (bazirani su na radovima [17, 18]) koji su jednostavniji i nisu prikladni za usporedbu kakva je planirana u ovom istraživanju.

3.1 Zgrada 1

Za početak je analiziran model koji je pokazni primjer programskog paketa otvorenog koda *OpenStudio*. Slika 3.b daje grafički prikaz modela. Korisna površina zgrade je $82 m^2$, a volumen grijanog zraka je $275 m^3$. Materijali ovojnice (U vrijednosti su opisane u nastavku) i raspored korištenja zgrade ostavljeni su kao u primjeru (uredi s najvećim intenzitetom korištenja $7 h - 17 h$). Model zrakopropusnosti prema [16] koji je opisan u ovom radu te definiran jednadžbom (7) trebalo je definirati preko *IDFEditor*-a (programskog paketa *EnergyPlus*) jer programsko rješenje *OpenStudio* podržava unos samo prema jednom od jednostavnija dva modela zrakopropusnosti ([17, 18]). Zgrada je simulirana za klimatske podatke austrijskog grada Graza, a izvršena je izravno u programskom paketu *EnergyPlus* nakon prepravljanja ulazne *.idf* datoteke izvezeno iz programskog paketa *OpenStudio*. Analizirani su rezultati za razine zrakopropusnosti kako prikazuje tablica 1. Dodatno je na modelu zamijenjen materijal ovojnice (vanjski zidovi, krov i pod) betonom debljine $20 cm$ ($U = 2,860 W/m^2 \cdot K$) te kombinacijom slojeva toplinske izolacije jedne zgrade gotovo nulte energije (*NZEB izolacija* u nastavku: $U = 0,162 W/m^2 \cdot K$). Prozori u svim slučajevima imaju $U_w = 2,5 W/m^2 \cdot K$ i $g_{\perp} = 0,375$. Za primjer iz programskog paketa *OpenStudio* materijali ovojnice imaju sljedeće parametre: vanjski zidovi $U = 0,382 W/m^2 \cdot K$, krov $U = 0,178 W/m^2 \cdot K$ i pod na tlu $U = 2,24 W/m^2 \cdot K$.



Slika 3. Zgrada 1: a) shematski prikaz ; b) rezultati: plavo - beton, žuto - izolacija prema primjeru, zeleno - NZEB izolacija

Tablica 1. prikazuje rezultate simulirane potrebne godišnje energije za grijanje za zadani slučaj zrakopropusnosti i za različite sustave toplinske izolacije vanjske ovojnice.

Tablica 1. Ovisnost simulirane potrebne godišnje energije za grijanje o zrakopropusnosti i toplinskim karakteristikama ovojnice za *zgradu 1*

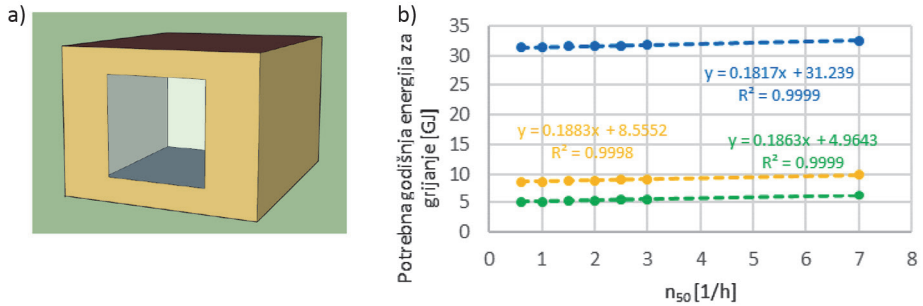
n_{50}	Zgrada 1 (beton)		Zgrada 1 (primjer OpenStudio)		Zgrada 1 (NZEB izolacija)	
	GJ	kWh/m ²	GJ	kWh/m ²	GJ	kWh/m ²
0,6	94,66	320,66	20,08	68,02	12,69	42,99
1,0	95,13	322,26	21,37	72,42	13,14	44,51
1,5	96,11	325,58	22,09	74,83	13,7	46,41
2,0	96,92	328,32	22,82	77,30	14,29	48,41
2,5	97,73	331,06	23,54	79,74	14,89	50,44
3,0	98,54	333,81	24,28	82,25	15,51	52,54
7,0	105,01	355,72	30,16	102,17	20,62	69,85

Ako rezultate simulacije prikazemo na grafikonu, primjećuje se kvazilinearna ovisnost potrebne energije za grijanje o zrakopropusnosti (slika 3.b). Koeficijent koji je variran jest koeficijent protoka zraka, c , iz izraza (7), odnosno C_L iz izraza (1) uz pretpostavku da je eksponent iz oba izraza konstantan ($n = 0,67$ prema [16]). Koeficijent c je definiran preko izraza (1) tako da zadovolji određenu razinu zrakopropusnosti na razlici tlaka od 50 Pa . Ostali koeficijenti modela (7) su definirani prema [15] i konstantni su prilikom svih simulacija.

3.2 Zgrada 2

Nakon provedene 21 energetske simulacije na *zgradi 1*, izrađen je jednostavan model korisne površine 12 m^2 i volumena grijanog zraka 60 m^3 s prozorom $2 \times 2 \text{ m}$ na

jugu (slika 4.a). Materijali, klimatski podaci i raspored korištenja *zgrade 2* su analogni *zgradi 1* kako bi se mogli uspoređivati. Ponovno je izvršena parametarska analiza s obzirom na zrakopropusnost ovojnice na novih 21 modela analognih modelima *zgrade 1*.



Slika 4. Zgrada 2: a) shematski prikaz; b) rezultati: plavo - beton, žuto - izolacija prema primjeru, zeleno - NZEB izolacija

Rezultate energetskih simulacija prikazuje tablica 2. te grafikon (slika 4.b) gdje možemo vidjeti da je ovisnost simulirane potrebne godišnje energije za grijanje ponovno kvazilinearno ovisna o zrakopropusnosti ovojnice.

Tablica 2. Ovisnost simulirane potrebne godišnje energije za grijanje o zrakopropusnosti i toplinskim karakteristikama ovojnice za *zgradu 2*

n_{50}	Zgrada 2 (beton)		Zgrada 2 (primjer OpenStudio)		Zgrada 2 (NZEB izolacija)	
	GJ	kWh/m ²	GJ	kWh/m ²	GJ	kWh/m ²
0,6	31,35	725,69	8,66	200,46	5,08	117,59
1,0	31,42	727,31	8,74	202,31	5,15	119,21
1,5	31,51	729,39	8,84	204,63	5,24	121,29
2,0	31,6	731,48	8,94	206,94	5,34	123,61
2,5	31,69	733,56	9,03	209,03	5,43	125,69
3,0	31,79	735,88	9,12	211,11	5,52	127,78
7,0	32,51	752,55	9,87	228,47	6,27	145,14

4 Rasprava

Rezultati energetske simulacije za analizirane zgrade donose nekoliko korisnih informacija. Na grafikonima (slike 3.b i 4.b) možemo vidjeti da je odnos između zrakopropusnosti pri razlici tlaka od 50 Pa i potrebne godišnje energije za grijanje kvazilinearan. Štoviše, u tablicama (tablice 1. i 2.) možemo vidjeti da za obje zgrade potrebna godišnja energija za grijanje raste kako raste i zrakopropusnost. Ako se usporede vrijednosti zrakopropusnosti (tablica 3.) na koje se najčešće projektiraju zgrade ($n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$) s čestim vrijednostima u praksi ($n_{50} \geq 30 \text{ h}^{-1}$) (može se primijetiti da se ta razlika manje osjeti za loše toplinski izoliranu zgradu (zgrada 1 4,1 %, zgrada 2 1,4 %), u odnosu na zgradu koja je dobro toplinski izolirana (zgrada 1 22,22 %, zgrada 2 8,66 %). Kako bi se prikazalo koliko su te razlike značajne, izrađena su dodatna dva modela energetskog ponašanja za zgradu 1. Za model s NZEB izolacijom u kojemu je zrakopropusnost $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ određena je izolacija krova i zidova da pokrije razliku u toplinskim gubicima. Za analiziranu razliku između $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ i $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ (2,82 GJ, odnosno 22,22 %) pokazalo se da je potrebno izvesti 34 cm kamene vune u odnosu na 10 cm kako je projektirano, odnosno dodatnih 24 cm toplinske izolacije. Za razliku između $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ i $n_{50} = 1,5 \text{ h}^{-1}$ (1,81 GJ, odnosno 14,26 %) potrebno je 20 cm kamene vune što je 10 cm više, odnosno upravo dvostruko veći sloj izolacije.

Tablica 3. Utjecaj izolacije zgrade na ovisnost potrebne godišnje energije za grijanje o zrakopropusnosti

$n_{50} [\text{h}^{-1}]$	Zgrada 1 (beton) [GJ]	Zgrada 1 (NZEB izolacija) [GJ]	Zgrada 2 (beton) [GJ]	Zgrada 2 (NZEB izolacija) [GJ]
0,6	94,66	12,69	31,35	5,08
3,0	98,54	15,51	31,79	5,52
Razlika [%]	4,1 %	2,2%	1,4%	8,66 %

Analizom rezultata je također utvrđena ovisnost između utjecaja količine grijanog volumena zraka i zrakopropusnosti ovojnice. Kako bi se dodatno ispitao taj utjecaj, izrađeno je novih 6 energetskih simulacija na modelima koji su nastali dvostrukim povećanjem geometrije analiziranih modela uz zadržavanje svih ostalih postavki kao u prethodnim slučajevima. Modeli su analizirani za slučajeve zrakopropusnosti $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ i $n_{50} = 0,6 \text{ h}^{-1}$ i NZEB izolaciju te jedan slučaj za izolaciju kao u primjeru programskog paketa *OpenStudio* (zgrada 1 primjer *OpenStudio*). Rezultati koji dodatno potvrđuju dosadašnja razmatranja prikazuje tablica 4.

Tablica 4. Potrebna godišnja energija za grijanje ovisna o zrakopropusnosti i grijanom volumenu

Analizirani volumen	Zgrada 1 (NZEB izolacija)		Zgrada 1 (primjer OpenStudio)		Zgrada 2 (NZEB izolacija)	
	1 x V	2 x V	1 x V	2 x V	1 x V	2 x V
$n_{50}=0,6h^{-1}$	12,69 GJ	19,59 GJ	20,08 GJ	26,73 GJ	5,08 GJ	5,78 GJ
$n_{50}=3,0h^{-1}$	15,51 GJ	46,32 GJ	24,28 GJ	55,56 GJ	5,52 GJ	9,46 GJ
Razlika	22,22 %	136,45 %	20,92 %	107,86 %	8,66 %	63,67 %

5 Zaključak

Analizom 50 energetskih modela programskim paketom *EnergyPlus* na kojima je provedena parametarska analiza moguće je iskazati nekoliko zaključaka. Prvi i najvažniji jest taj da utjecaj zrakopropusnosti raste kako je zgrada bolje toplinski izolirana, što neizravno prikazuju tablice 1. i 2. te izravno uz prikaz utjecaja u postocima, tablica 3. Nadalje, analizom u poglavlju *Rasprava* može se zaključiti da je uvelike isplativije povećati zrakopropusnost ovojnice nego dodavati novi sloj toplinske izolacije koji bi pokrio razliku u potrebnoj energiji za grijanje. Usporedimo li utjecaj koji možemo ostvariti toplinskom izolacijom ovojnice s utjecajem poboljšanja zrakopropusnosti ovojnice na uštede u energiji za grijanje, možemo zaključiti da za analizirane slučajeve značajnije uštede ostvarujemo toplinskim izoliranjem zgrade, dok utjecaj smanjenja zrakopropusnosti ovojnice dobiva na važnosti tek kada je zgrada adekvatno toplinski izolirana. Iz tablice 1. možemo zaključiti da se učinak toplinske izolacije kakav je definiran u modelu (zgrada 1) ostvaruje u obliku uštede, odnosno smanjenja potrebne godišnje energije za grijanje za 86,5 % ($n_{50} = 0,6$) odnosno 84,3 % ($n_{50} = 3,0$) dok se utjecaj zrakopropusnosti ovojnice ostvaruje tek za adekvatno izoliranu građevinu (za iste slučajeve zrakopropusnosti): 4,1 % (neizolirana), 22,2 % (izolirana). Analogni zaključci se mogu dobiti analizom tablice 2. (zgrada 2) - utjecaj toplinske izolacije: 83,8 % ($n_{50} = 0,6$); 82,6 % ($n_{50} = 3,0$); utjecaj zrakopropusnosti: 1,4 % (neizolirana); 8,7 % (izolirana). Analizom koju prikazuje tablica 4. može se također primijetiti da se utjecaj zrakopropusnosti povećava kako se i povećava grijani volumen.

Pregledom stanja područja, teorijskih postavki i normativnih okvira fenomena zrakopropusnosti ovojnice zgrade, može se zaključiti da ona ima veliku ulogu u ostvarenju ušteda u smislu racionalizacije potrošnje energije u zgradama. Osim toga, metode mjerenja zrakopropusnosti ovojnice pomažu u kontroli kvalitete izvođenja zgrade s mogućnošću otklanjanja nedostataka na ovojnici prilikom ispitivanja. Postavlja se pitanje zašto je ovaj segment kontrole izvođenja ovojnice zgrade zapostavljen iako je i reguliran pravnim aktima Republike Hrvatske. Kada se promotre rezultati simulacija energetskih modela, može se vidjeti golem utjecaj zrakopropusnosti ovojnice na potrebnu godišnju energiju za grijanje što je još jedna činjenica koja ide u prilog postavljanju prethodnog pitanja.

Zahvala

Autor Sanjin Gumbarević zahvaljuje Hrvatskoj zakladi za znanost i Europskom socijalnom fondu na podršci preko projekta ESF DOK-01-2018.

Literatura

- [1] Europska komisija: Energy Efficiency Plan 2011, Brussels, 2011.
- [2] Europska komisija: Direktiva 2010/31/EU Europskog parlamenta i vijeća od 19. svibnja 2010. o energetskej učinkovitosti zgrada, *Službeni list Europske unije*, pp. 124-146, 2010.
- [3] Europska komisija: Direktiva (EU) 2018/844 Europskog parlamenta i vijeća od 30. svibnja 2018. o izmjeni Direktive 2010/31/EU o energetskej svojstvima zgrada i Direktive 2012/27/EU o energetskej učinkovitosti, *Službeni list Europske unije*, pp. 75-91, 2018.
- [4] Europska komisija: Direktiva 2012/27/EU Europskog parlamenta i vijeća od 25. listopada 2012. o energetskej učinkovitosti, izmjeni direktiva 2009/125/EZ i 2010/30/EU i stavljanju izvan snage direktiva 2004/8/EZ i 2006/32/EZ, vol. 004, *Službeni list Europske unije*, pp. 202-257, 2012.
- [5] Europska komisija: Direktiva (EU) 2018/2002 Europskog parlamenta i vijeća od 11. prosinca 2018. o izmjeni Direktive 2012/27/EU o energetskej učinkovitosti, no. 3, *Službeni list Europske unije*, pp. 210-230, 2018.
- [6] Soldo, V., Novak, S., Horvat, I.: Algoritam za proračun potrebne energije za grijanje i hlađenje prema HRN EN 13790, Zagreb, 2017.
- [7] Ministarstvo graditeljstva i prostornog uređenja Republike Hrvatske: Tehnički propis o racionalnoj uporabi energije i toplinskej zaštiti u zgradama, *Narodne novine* (2015), OG 128/15, 70/18, 73/18, 86/18.
- [8] Crawley, D. B. et al.: EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program, *Energy and Buildings*, vol. 33, no. 4, pp. 319-331, 2002.
- [9] ASHRAE: Standard 140-2017 -- Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs (ANSI Approved), approved by American National Standards Institute 2017.
- [10] Sherman, M. H., Chan, R.: *Building Airtightness: Research and Practice*, LBNL, Berkeley 2004.
- [11] Sherman, M. H.: Tracer-gas techniques for measuring ventilation in a single zone, *Building and Environment*, vol. 25, no. 4, pp. 365-374, 1990.

- [12] Sherman, M. R., Grimsrud, D. T.: *Measurement of infiltration using fan pressurization and weather data*, LBNL, Berkeley, 1980.
- [13] Deutsches Institut für Normung: DIN 18599-2 -- Energy efficiency of buildings - Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting - Part 2: Net energy demand for heating and cooling of building zones, 2018.
- [14] U.S. Department of Energy: *Engineering Reference*, EnergyPlus™ Version 9.1.0 Documentation, 2019.
- [15] ASHRAE: *Handbook - Fundamentals (SI Edition)*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2017.
- [16] Walker, I. S., Wilson, D. J.: Field validation of algebraic equations for stack and wind driven air infiltration calculations, *ASHRAE Transactions*, vol. 104, no. 2, p. 118, 1998.
- [17] Sherman, M. H. Grimsrud, D. T.: *Infiltration-Pressurization Correlation: Simplified Physical Modeling*, LBNL, Berkeley, 1980
- [18] Coblenz, C. W., Achenbach, P. R.: Field Measurement of Ten Electrically-Heated Houses, *ASHRAE Transactions*, pp. 358-365, 1963.