

RACIONALNI MODEL UPRAVLJANJA EKSERGIJOM ZA EKOLOŠKI ODRŽIVE ZGRADE SA NAMENOM SMANJENJA SLOŽENIH EMISIJA CO₂

A RATIONAL EXERGY MANAGEMENT MODEL FOR SUSTAINABLE
BUILDINGS TO REDUCE COMPOUND CO₂ EMISSIONS

SIIR KILKIS,

Division of Building Technology, Royal Institute of Technology
(KTH), Stockholm, Sweden, i The Scientific and Technological
Research Council of Turkey, Ankara, Turkey

Ovaj rad razvija novi model, model za racionalno upravljanje eksergijom (Rational Exergy Management Model – REMM) sa ciljem da se odgovori na sve hitniju potrebu da se smanji količina CO₂ koju zgrade emituju. REMM obezbeđuje novu analitičku perspektivu za upotrebu energije i emisije zgrada sa međusistemskim obuhvatom i povezuje početno neslaganje ponude i potražnje eksergije sa uopštenijim uticajem na energetske sistem. Konkretno, na osnovu unakrsnih parametara, formuliše se faktor složene emisije CO₂, koji uključuje direktnu emisiju CO₂ koja se može izbeći u skladu sa stepenom eksergetskog neslaganja. Trenutno, osnovni modeli zgrada imaju vrednosti ispod optimalnih zbog strukturalno preteranih nivoa eksergije. Ovaj rad nudi primer niza strategija razvijenih za potrebe promene paradigmi usmerenih ka eksergetski zelenim sistemima. Te strategije uključuju hibridne pristupe, na osnovu ponude i potražnje, kao i ciljeve za zgrade sa nultim nivoom ukupne potrošnje eksergije, što se integriše u višestranu strategiju ublažavanja emisija

Aiming to respond to ever-urgent needs for strategies to curb buildings' CO₂ emissions at large, this paper develops a new model, the Rational Exergy Management Model (REMM). REMM provides a new analytical perspective on the energy usage and emissions of buildings with an intra-systems scope. It links the initial mismatch in the supply and demand of exergy to broader impacts in the energy system. Particularly, based on a cross-cutting parameter, it formulates the compound CO₂ emissions factor, which includes a direct and avoidable CO₂ emissions footprint according to the level of exergy mismatch. Presently, base-case buildings have sub-optimal values due to structural exergy overshoots. This paper thus exemplifies an array of strategies developed for exergy-green paradigm shifts. These include supply, demand-driven, and hybrid approaches, and net-zero exergy building targets, which integrate into multi-fold CO₂ mitigation strategies

ugljenika za zgrade. Nova tehnika sa mapiranjem eksergije dalje unapređuje pristup na osnovu potražnje za pakete obnovljive energije. Osim toga, analitički alat zasnovan na eksergetski-usmerenim scenarijima daje uštede u emisijama CO₂ u odnosu na osnovne modele, kako bi se proširili horizonti postojećih klinova CO₂. Rad zaključuje da je REMM u stanju da utvrdi ključne mogućnosti za održive zgrade za iskorišćenje ogromnog potencijala za smanjenje emisija CO₂ i učvrsti svoju predvodničku poziciju u pogledu rešavanja problema CO₂.

for buildings. A new, exergy-mapping technique furthers the demand-driven approach for bundles of renewable energy. Furthermore, an analysis tool based on exergy-centric scenarios formulates the CO₂ savings relative to the base-case to expand the horizon of existing CO₂ wedges. The paper concludes that REMM identifies key opportunities for sustainable buildings to capture their vast CO₂ reduction potential and increase their lead in CO₂ mitigation.

Ključne reči: *energija; održive zgrade; eksergija; emisije CO₂; zgrade sa nultim nivoom ukupne potrošnje; smanjenje emisija ugljenika*

Key words: *energy; sustainable buildings; exergy; CO₂ emissions; net-zero buildings; carbon mitigation*

1. Uvod

Na prirodne indikatore globalnih klimatskih promena, kao što su porast površinske temperature mora i topljenje glečera, u velikoj meri utiču emisije CO₂ koje potiču iz građevinskog sektora. Sa vrednošću od 8,8 gigatona (Gt) CO₂ tokom 2005. godine, što uključuje i neposredne i emisije CO₂ koje potiču iz prethodećih tačaka u lancu, građevinski sektor je odgovoran za najmanje 33% globalnih antropogenih emisija CO₂ koje narušavaju ravnotežu nivoa sunčevog zračenja na Zemlju [1]. Prema tome, da bi se globalne emisije CO₂ što hitnije, a pre 2050. godine, smanjile za 80% ispod nivoa iz 1990. godine, čime bi se stvorila prilika da se već u ovom veku stabilizuje koncentracija CO₂ u atmosferi, i to ne na nivou od 450 ppm, što je svojevremeno smatrano za bezbednu vrednost [2], već ispod 350 ppm [3] – neizbežna je promena modela upotrebe energije u građevinskom sektoru. Osim toga, neophodan je pokretački momenat koji poziva na bolju alokaciju energetske resursa u zgradama.

Ovaj rad predstavlja nov analitički model, koji ukazuje na to da su emisije CO₂ u građevinskom sektoru trenutno pogoršane, zbog toga što se energetske resursi ne alociraju na osnovu radnog potencijala i energije. Zapravo, sadašnji nivoi emisije CO₂ zgrada su visoki zbog neadekvatne usklađenosti ponude i potražnje za eksergijom kao merom korisnog radnog potencijala datog izvora energije. Na početku, ovaj rad formuliše emisije CO₂ koje su trenutno pogoršane proporcionalno sa stepenom preteranih nivoa ponude eksergije u odnosu na potražnju za eksergijom u zgradama. Potom, predstavlja strategije kojima održive zgrade mogu da smanje takav složen uticaj na energetske sistem. Na kraju, model se primenjuje na definisanje novog klina CO₂, zasnovanog na utvrđivanju bolje ravnoteže između ponude i potražnje za eksergijom, radi postizanja boljeg balansa sa planetom u cilju održivosti.

1.1. Kontekst istraživanja

Nezavisno od unakrsnih parametara za smanjenje emisija CO₂, polje istraživanja eksergije postalo je poznato kao koristan koncept za održive zgrade. Nekoliko autora istraživalo je njegove koristi, uključujući koristi za izgradnju i komponente zgrada sa niskim stepenom eksergije (npr. [4–6]), hibridne sisteme KGH (npr. [7]), analizu zgrada i usluga u izgradnji (npr. [8 i 9]), kao i sisteme za kontrolu zgrada uopšte (npr. [7]). Važne korake u tom smislu su učinila i dva aneksa IEA, konkretno aneksi 37 i 49 [11 i 12]. Šmit objašnjava kako drugi od ta dva aneksa u potpunosti usvaja niskoeksergetski pristup da bi optimizovao upotrebu energetske resursa i unapredio strukturu za snabdevanje energijom izgrađenog okruženja [13]. Osim toga, u okviru ASHRAE organizovana je radna grupa za eksergetsku analizu za održive zgrade.

Ovo polje u razvoju, međutim, tek treba u potpunosti da se primeni sa svojim ogromnim potencijalom za obezbeđivanje smernica za smanjenje emisija CO₂ u zgradama. Samim tim, saveti zasnovani na eksergiji tek treba da zauzmu svoje mesto u oblasti strategija za različite scenarije smanjenja emisija CO₂ u zgradama (npr. [14]). To takođe ukazuje da se polje mora kvalitetnije integrisati u oblast smanjenja emisija CO₂ kroz razvoj unakrsnih parametara. U kritičnom periodu globalnog zagrevanja i pregovora sa ciljem postavljanja ciljeva za period posle Kjota, ovaj rad nastoji da razreši ovu situaciju predstavljajući novi model unošenja nove dimenzije u formulisanju strategija smanjenja CO₂ za budućnost zidanih prostora. U njemu se nastoji na proširenju horizonta mogućnosti za održivost.

2. Metode

Kao odgovor na sve hitniju potreba za strategijama za smanjenje nivoa emisija CO₂ u zgradama, razvijen je novi model nazvan model za racionalno upravljanje eksergijom, odnosno REMM (*Rational Exergy Management Model* [15]). Ovaj model predstavlja strategiju upravljanja ponudom i potražnjom za eksergijom u zgradama kako bi se smanjili složeni uticaji na energetske sistem, kao što je ponovljeno dopremanje eksergije u drugi sistem i, neizbežno, posledice u pogledu emisije CO₂ [16]. Prvo definišemo parametar za modelovanje eksergetske ponude i potražnje u sistemu (*i*), što se uzima za sistem date zgrade. Potom se model proširuje kako bi se ocenili mogući uticaji zgrade na drugi podsistem u ukupnom energetske sistemu, što će se u daljem tekstu nazivati sistem (*j*). To razvija širi, međusistemski obuhvat modela kako bi se formulisao složeni uticaj emisija CO₂ na energetske potrošnju u zgradama izazvanu početnim neslaganjem između dovedene i zahtevane eksergije.

2.1. Definicija parametra modela

Za bilo koji dati sistem (*i*), jednačina (1) formuliše parametar ψ_{Ri} kao odnos potražnje za eksergijom, označene kao $\varepsilon_{dem(i)}$, i ponude eksergije, $\varepsilon_{sup(i)}$. Parametar ψ_{Ri} kao efikasnost racionalnog upravljanja eksergijom, ukazuje na nivo pri kome se ponuda energetske resursa za sistem (*i*) nalazi u ravnoteži sa potražnjom tog sistema u pogledu eksergetskih vrednosti. U ovom slučaju, eksergija je korisni radni potencijal date količine energije na osnovu razlike u temperaturi u odnosu na referentno okruženje. Veća razlika znači više eksergije, i obrnuto.

$$\Psi_{Ri} = \frac{\varepsilon_{dem(i)}}{\varepsilon_{sup(i)}} \quad (1)$$

Iz perspektive dodele resursa određenom sistemu (*i*), što više vrednost $\varepsilon_{sup(i)}$ premašuje vrednost $\varepsilon_{dem(i)}$, tim je niža vrednost parametra Ψ_{Ri} . Posledično, dodela u kojoj se upravlja ili vrednošću $\varepsilon_{sup(i)}$ i/ili vrednošću $\varepsilon_{dem(i)}$ kako bi se postigla bolja ravnoteža, imaće više vrednosti parametra Ψ_{Ri} . Prema tome, parametar Ψ_{Ri} predstavlja odnos zasnovan na vrednostima $\varepsilon_{sup(i)}$ i $\varepsilon_{dem(i)}$ kojima se može oceniti upotreba energetskih resursa u energetskom sistemu.

2.1.1. Sistem zgrade i međusistemi obuhvat

Za zgradu kao sistem (*i*) eksergetsku potražnju $\varepsilon_{dem(i)}$ definišemo kroz interakciju zgrade sa referentnim okruženjem. U praktičnom smislu, temperatura zemljišta T_g obezbeđuje stabilno toplotno okruženje za zgradu. U toku grejne sezone, temperatura vazduha unutar zgrade T_a veća je od referentnog okruženja T_g . Po definiciji, nepovratno oticanje toplote iz zgrade u tlo odvija se u iznosu P_i koji dovodi vrednosti T_a i T_g u ravnotežno stanje. Tvrdnja Klauzijusa o Drugom zakonu termodinamike time podrazumeva da je jedini način da takav sistem podigne vrednost T_a na početnu vrednost, vršenje nekog oblika spoljašnjeg rada. To predstavlja eksergetsku potražnju sistema zgrade (*i*) iz eksternih izvora energije, kao što je dato u sledećoj jednačini:

$$\varepsilon_{dem(i)} = \left(1 - \frac{T_g}{T_a}\right) \times P_i \quad (2)$$

Prema tome, kako bi se održala željena temperatura vazduha u zatvorenom prostoru T_a , zgradi mora da se obezbedi energetski izvor koji odgovara vrednostima jednačine 2. Na primer, ukoliko se doprema fosilno gorivo u iznosu P_i kako bi se zadovoljila eksergetska potražnja zgrade, u tom slučaju će eksergija zavisiti od vrednosti temperature sagorevanja T_f . U odnosu na referentno okruženje zgrade, dotok eksergije $\varepsilon_{sup(i)}$ dat je jednačinom 3:

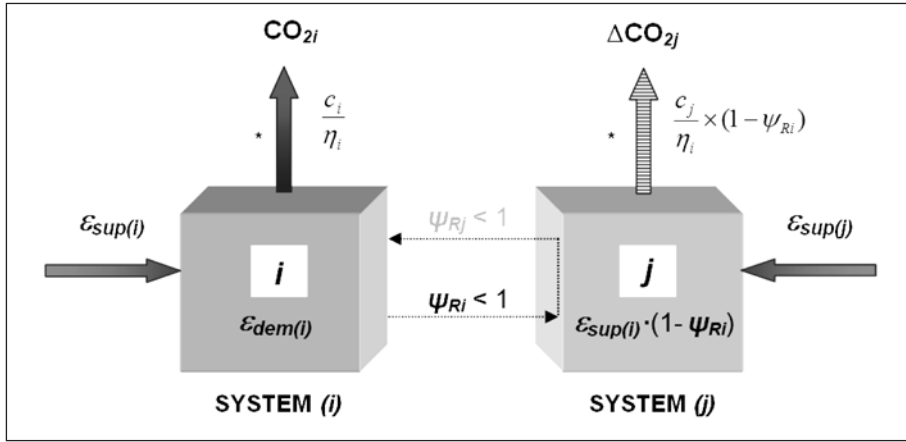
$$\varepsilon_{sup(i)} = \left(1 - \frac{T_g}{T_f}\right) \times P_i \quad \{\varepsilon_{sup(i)} > \varepsilon_{dem(i)}\} \quad (3)$$

Na osnovu jednačina (1)–(3), parametar Ψ_{Ri} modelira ponudu i potražnju eksergije zgrade kao sistema (*i*). Vrednosti parametra Ψ_{Ri} kreću se u rasponu između nula i jedan, što odgovara najslabijem i najjačem stepenu racionalnosti u održanju ravnoteže između ponude i potražnje za eksergijom. Osim toga, više vrednosti znače da se manje eksergije nepovratno troši zbog početnog neslaganja ponude i potražnje, što umanjuje uticaj zgrade na energetski sistem i okruženje. Takav analitički aspekt se dobija neposredno iz jednačine (4a), čija krajnja desna strana modelira vrednost potrošene eksergije $\varepsilon_{dst(i)}$ kao funkciju parametra Ψ_{Ri} . Jednačina 4b potom ukazuje na način na koji se potrošena eksergija $\varepsilon_{dst(i)}$ u sistemu (*i*) ponovo obezbeđuje na drugom mestu u okviru energetskog sistema u vrednosti jednakoj ili većoj od $\varepsilon_{sup(j)}$ u sistemu (*j*) [15].

$$\varepsilon_{dst(i)} = \varepsilon_{sup(i)} - \varepsilon_{dem(i)} = \varepsilon_{sup(i)}(1 - \varepsilon_{dem(i)} / \varepsilon_{sup(i)}) = \varepsilon_{sup(i)} \times (1 - \psi_{Ri}) \quad (4a)$$

$$\varepsilon_{sup(j)} \geq \varepsilon_{dst(i)} = \varepsilon_{sup(i)} \times (1 - \psi_{Ri}) \quad (4b)$$

Jednačina 4b time obezbeđuje osnovu za proširenje obuhvata modela kao što to prikazuje slika 1. U ovom slučaju, vrednost ψ_{Ri} manja od jedan u sistemu (*i*) određuje stepen uticaja dovoda eksergije u drugi sistem (*j*), $\varepsilon_{sup(j)}$. Takav međusistemske obuhvat obezbeđuje mogućnost za analizu složenih uticaja početnog neslaganja u ponudi i potražnji eksergije i uspostavljanje novog pogleda na emisije CO₂ na osnovu parametra ψ_{Ri} . Međusistemske obuhvat takođe postavlja obuhvat modela u kome se početno eksergetsko neslaganje vezuje za širi uticaj na energetske sistem.



Slika 1. Međusistemske obuhvat modela REMM

2.1. Metoda računanja za uticaj složene emisije CO₂

Kao što slika 1 pokazuje, emisije koje sistem (*i*) emituje neposredno kao CO_{2*i*} zavise od sadržaja CO₂ u resursu po kWh, c_i – što se izražava kao neto kalorijska vrednost (videti [17]), i energetske efikasnosti opreme koja koristi resurs η_i . Ova druga vrednost se javlja zbog toga što se u sistem dovodi količina P/η_i da bi se odgovorilo na energetske opterećenje P_i . Dok to ne uključuje neposredno parametar ψ_{Ri} , najbolje poklapanje u ponudi i potražnji eksergije omogućava se resursima sa nižim vrednostima c_i . Sa druge strane, emisije CO₂ koje se javljaju na slici 1 i u drugom sistemu (*j*) kao ΔCO_{2j} , mogu se neposredno redukovati uz više vrednosti ψ_{Ri} . Taj član, ΔCO_{2j} , predstavlja uticaj emisija CO₂ koje se mogu izbexi u sistemu (*i*) izazvane početnim neslaganjem u ponudi i potražnji eksergije, pri čemu:

$$\Delta CO_{2j} = \left(\frac{c_j}{\eta_j} \right) \times P_j = \left(\frac{c_j}{\eta_i} \times (1 - \psi_{Ri}) \right) \times P_i \quad \{P_j < P_i\} \quad (5)$$

Jednačina (5) se izvodi iz jednačine (4), pri čemu se $\varepsilon_{dst(i)}$ izjednačava sa $\varepsilon_{sup(j)}$ i podleže pojednostavljenju (videti aneks 1). Ona izražava vezu na osnovu koje je

posredna emisija CO₂ sistema (*i*) u drugom sistemu (*j*) ekvivalentna emisijama CO₂ koje se mogu izbeći u prvom sistemu zbog bilo koje neoptimalne vrednosti parametra ψ_{Ri} manje od jedan. U skladu sa tim, sistemu (*i*) se pripisuje posredna odgovornost za emisije CO₂ nakon što izgubi deo svoje eksergije date sa ψ_{Ri} . Takav uticaj se definiše bez obzira na to da li sistem (*i*) jeste ili nije zapravo vezan za drugi sistem (*j*), pošto je mogao da postigne bolje smanjenje ili čak izmeštanje ovih emisija u energetsom sistemu time što bi se upravljalo eksergetskom ponudom i potražnjom. Jednačina 6, prema tome, daje složeni faktor emisije CO₂ ΣCO_{2i} kao zbir obe neposredne emisije, označene sa CO_{2i} i uticaja emisija CO₂ koje se mogu izbeći, ΔCO_{2j} sistema (*i*), koji se nastoji smanjiti:

$$\Sigma CO_{2i} = CO_{2i} + \Delta CO_{2j} = \left(\frac{c_i}{n_i} + \left(\frac{c_j}{n_i} \times (1 - \psi_{Ri}) \right) \right) \times P_i \quad (6)$$

Jednačina (6) ukazuje na to da povećanje vrednosti parametra ψ_{Ri} mora da predstavlja preduslov u razvoju strategija za smanjenje emisija CO₂ u zgradama. Zapravo, podešavanje isključivo vrednosti n_i kako bi se smanjile neposredne emisije CO₂ imaće beznačajan uticaj u poređenju sa stepenom emisija CO₂ koje se mogu izbeći, a koje će ostati u energetsom sistemu zbog nepostojanja uravnotežavanja ponude i potražnje u eksergiji, na šta ukazuju vrednosti ψ_{Ri} daleko manje od jedan. Prema tome, za razliku od dominantnih strategija, parametar ψ_{Ri} postaje pokretački mehanizam za smanjenje emisija CO₂ energetskih sistema koji su složeni. Optimizacija vrednosti ψ_{Ri} kao prioritet može da izmesti složene emisije CO₂ sistema (*i*) kao ΣCO_{2i} .

2.2.1. Metoda računanja za uticaj osnovnog modela

Danas, zgrade najčešće karakteriše neravnoteža u ponudi i potražnji eksergije, što vodi ka niskim vrednostima ψ_{Ri} . To takođe važi i za zgrade koje poseduje veoma visoku efikasnost na nivou opreme, uključujući tu i toplotne pumpe. To se dešava prvenstveno zbog toga što je eksergija resursa koji se doprema u zgradu mnogo veća od eksergetske potražnje same zgrade. Za jedinicu P_i i opšte vrednosti T_g , T_a , i T_f od 283 K, 293 K i 2000 K, vrednost ψ_{Ri} iznosi tek 0,04 po jednačini (1):

$$\psi_{Ri} = \frac{\varepsilon_{dem(i)}}{\varepsilon_{sup(i)}} = \frac{0,03 \text{ kWh}}{0,86 \text{ kWh}} = 0,04 \quad \{P_i = 1 \text{ kWh}\} \quad (7)$$

Jednačina (7) dalje ukazuje na to da zgrade koje koriste fosilna goriva za zagrevanje prostorija imaju trenutni uticaj na drugi sistem (*j*). To se javlja zbog toga što će se potrošena količina eksergije nadoknaditi na drugom mestu u okviru energetskog sistema upotrebom dodatnih resursa $\varepsilon_{sup(j)}$ koji predstavljaju opipljiv uticaj u okviru modela REMM. Iz jednačine (4), eksergetski uticaj po jedinici P_i dat je u jednačini (8):

$$\varepsilon_{sup(j)} \geq 0,83 \text{ kWh} = 0,86 \text{ kWh} \times (1 - 0,04) \quad \{P_i = 1 \text{ kWh}\} \quad (8)$$

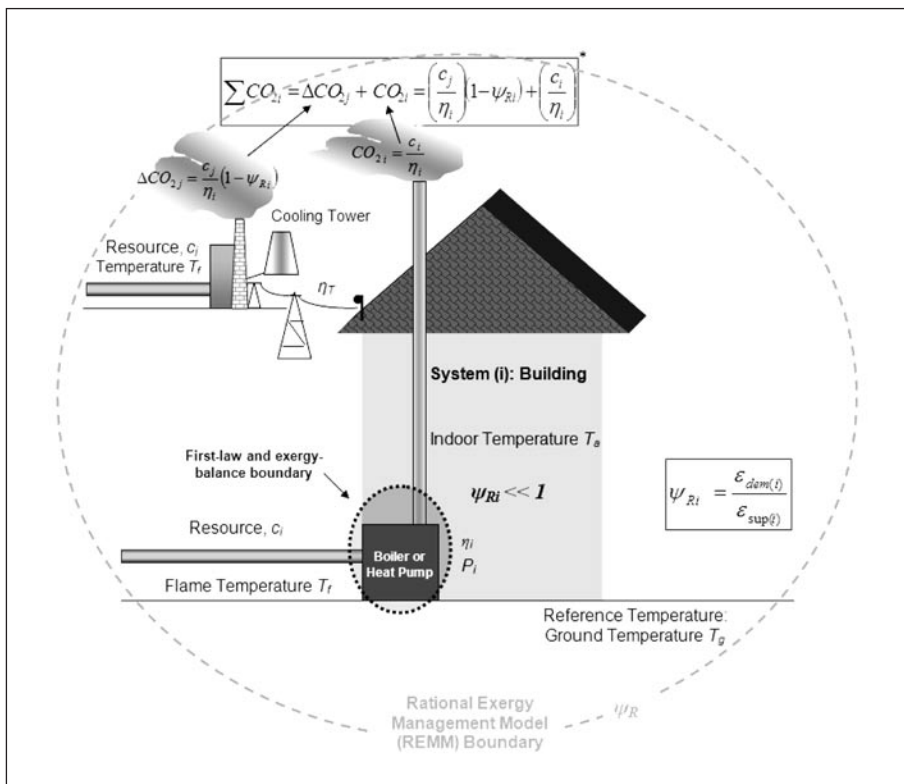
Takav eksergetski uticaj može se uporediti sa dodatnom upotrebom resursa u centralnoj elektrani kako bi se generisala električna energija iz iste vrste resursa kakve je zgrada potrošila. Kao rezultat toga, u ovom osnovnom modelu, sistem (*j*) može

biti određen kao centralna elektrana koja se snabdeva fosilnim gorivima $\varepsilon_{sup(j)}$. U praktičnom slučaju, zgrada ne mora da prima energiju iz centralne elektrane da bi bila odgovorna za taj uticaj. To se javlja zbog toga što je zgrada već svela količinu eksergije koja je mogla biti upotrebljena, da bi se generisala ekvivalentna količina električne energije. Osim toga, efikasnost energetskog sistema koji se nalazi između primarnog pokretača u elektrani i krajnjeg korisnika (npr. gubici u prenosu i parazitski gubici) n_T , takođe se moraju uključiti u jednačinu (9), da bi se u potpunosti objasnio uticaj CO_2 koji se može izbeći u osnovnom slučaju u okviru modela REMM:

$$\Sigma CO_{2i} = CO_{2i} + \Delta CO_{2j} = \left(\frac{c_i}{n_i} + \left(\frac{c_j}{n_i \times n_T} \times (1 - \psi_{Ri}) \right) \right) \times P_i \quad (9)$$

pri čemu je $\psi_{Ri} = 0,04$.

Slika 2 dalje ilustruje osnovni model u kome sistem zgrade (i) prima energetski resurs za korišćenje u kotlu ili toplotnoj pumpi, da bi se ispunila eksergetska potražnja za zagrevanje prostora. U ovom slučaju, neadekvatna dodela ulazne eksergije $\varepsilon_{sup(i)}$ za rezultat ima vrednost ψ_{Ri} daleko nižu od jedan ($\psi_{Ri} \ll 1$) i složene emisije



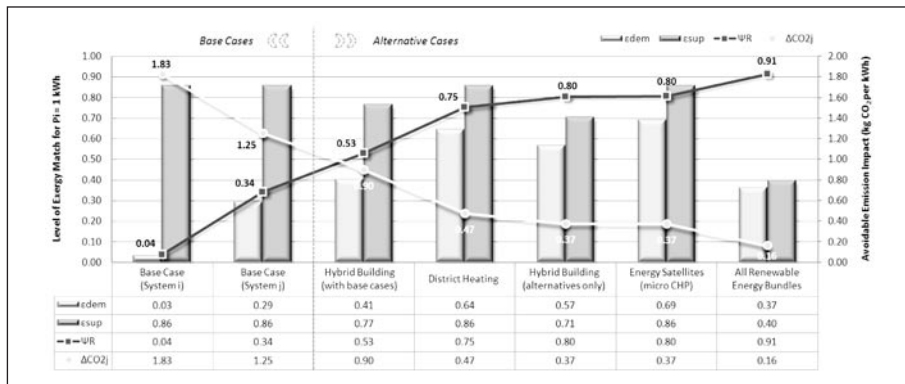
Slika 2. Prikaz uticaja osnovnog modela

je CO_2 na koje ukazuje ΣCO_{2i} . Ukoliko (na osnovu [18]) najboljim referentnim efikasnostima u proizvodnji električne energije i toplote damo istu težinu, vrednost n_i se računa tako da iznosi 0,70 i 0,75 za n_T (samo za prenos i distribuciju, videti [19]). U skladu sa tim, vrednost ΣCO_{2i} iz jednačine (9) iznosiće ukupno $3,28 \times c_i$ po jedinici energije, što se određuje kao jedinica faktora složene emisije CO_2 za osnovni model. Pored neposrednih emisija CO_2 , ovaj faktor uključuje i uticaj emisija CO_2 koji se može izbeći od $1,83 \times c_i$ po jedinici energije u sistemu (j) zbog niskog stepena eksergetske ravnoteže od 0,04 za ψ_{Ri} . U globalnoj energetskej mešavini prosečna vrednost c_i iznosi 0,27 kg CO_2 po kWh, na osnovu svetskih energetskej statistika [20]. Jasno je da se u izgradnji zgrada mora razmišljati dalje od osnovnih modela.

3. Strategije smanjenja emisija CO_2 sa REMM-om

3.1. Povećanje stepena eksergetske racionalnosti

Analize slučaja koje vršimo u ovom radu predstavljaju upotrebu energije u zgradama sa strategijama zasnovanim na REMM-u i bez njega. Za svaki od ovih slučajeva, slika 3 prikazuje njihov stepen eksergetske racionalnosti, odnosno nivoa poklapanja u ponudi i potražnji eksergije kao indikatoru uticaja emisija CO_2 koji se može izbeći u energetskej sistemu ΔCO_{2j} i samim tim faktora složenih emisija CO_2 ΣCO_{2i} .



Slika 3. Nivoi racionalnosti eksergije za osnovne i alternativne modele

Prve dve vertikalne vrednosti sa leve strane na slici 3 predstavljaju osnovni model zgrade kao sistema (i) u kojem eksergija resursa koji se dovodi u sistem kao fosilno gorivo premašuje eksergetsku potražnju za grejanje prostora. U ovom slučaju, eksergetska potražnja se vrednuje sa svega 0,03 kWh, dok se eksergetski ulaz vrednuje mnogo više, sa 0,86 kWh po energetskej opterećenju P_i . Kao što prvih nekoliko tačaka u svakom od redova pokazuje u odnosu na odgovarajuću osu, to neslaganje vodi do niskog stepena eksergetske racionalnosti uz približno nultu vrednost ψ_{Ri} od 0,04 i uticaj emisija koje se mogu izbeći ΔCO_{2j} od najmanje $1,83 \times c_i$ po jedinici energetskej opterećenja P_i . Takav „otisak“ dešava se u drugom sistemu (j) koji, ukoliko se ocenjuje kao centralna elektrana, ima sopstveno eksergetsko neslaganje (naredni slučaj). Prema tome, osnovni model pojačava ciklično lošu upotrebu eksergije, odnosno lošu upotrebu eksergije u oba sistema koji se potom međusobno pojača-

vaju. Kako se krećemo nadesno ka alternativnim modelima, energetska potrošnja u zgradama sve više predstavlja strategije koje usvajaju veću ravnotežu ponude i potražnje eksergije. Na osnovu bolje izbalansiranih vertikalnih vrednosti za svaki od modela, stepen eksergetske racionalnosti time raste i, kao što to prikazuju trendovi tamnih i svetlih linija, vrednost ψ_{Ri} raste, a uticaj emisija CO₂ koje se mogu izbeći u drugim sistemima (j), opada.

3.2. Alternativne verzije modela

Alternativni modeli REMM-a na levoj polovini slike 3 otelovljuju različite strategije usmerene na podizanje nivoa eksergetske racionalnosti. Jedna od tih strategija jeste da se upravlja eksergijom resursa koji se već dovodi u osnovnom modelu, odnosno pristup usmeren na ponudu kako bi se obezbedila bolja ravnoteža između ponude i potražnje za eksergijom. Još jedna strategija jeste ponovno usklađivanje eksergetske potražnje sa novom eksergetskom ponudom, odnosno pristup usmeren na ponudu da bi se izbalansirale ponuda i potražnja eksergije. Osim toga, postoji i hibridna strategija koja integriše navedene strategije da one postaju sve prominentnije, sa ciljem da se izmeni osnovni model u eri globalnih klimatskih promena.

3.2.1. Distribuirano generisanje kao pristup usmeren na ponudu

Distribuirano generisanje predstavlja primenu pristupa usmerenog na ponudu kako bi se strukturiralo balansiranje radi boljeg slaganja ponude i potražnje eksergije u sistemu (i). Ovim se smanjuje ciklično neispravno korišćenje eksergije osnovnih modela kako centralna elektrana preusmerava eksergiju otpadne toplote na ispunjenje potrebe grupe zgrada koje se nalaze na isplativo maloj udaljenosti. U slučajevima u kojima se električna energija generiše prvo kako bi prethodila dodeli eksergije istih resursa na zagrevanje prostora, vrednost ψ_{Ri} se računa iz jednačine (10) u skladu sa krajnjom desnom stranom jednačine (4a):

$$\psi_{Ri} = \left(1 - \frac{\epsilon_{dst(i)}}{\epsilon_{sup(i)}} \right) \text{ iz } \epsilon_{dst(i)} = \epsilon_{sup(i)} \times (1 - \psi_{Ri}) \quad (10)$$

Upotreba jednačine (10) neophodna je zbog činjenice da u opcijama za kombinovano grejanje i električnu energiju (CHP – *Combined Heat and Power*) količina potražnje eksergije prednjači u odnosu na deo ponude eksergije koji se gubi u odnosu na vrednosti temperature. To se javlja zbog toga što se eksergijom bolje upravlja pri višim vrednostima temperature, a troši se tek pošto se umanjuje na vrednost T_{app} , nakon što ispuni kombinovanu potražnju za eksergijom. Pošto se eksergija uvek definiše u odnosu na temperaturu referentnog okruženja, takav preokret sada čini da se $\epsilon_{dst(i)}$ nalazi u položaju u kome se definiše u odnosu na T_g , kao što je dato u jednačini (11):

$$\epsilon_{dst(i)} = \left(1 - \frac{T_g}{T_{app}} \right) \times P_i \quad (11)$$

Iz jednačina (10) i (11), vrednost ψ_{Ri} za distribuiranu energiju dostiže mnogo višu vrednost od 0,75 ukoliko se za vrednost povratne temperature vode u zatvore-

nom sistemu kao vrednost T_{app} uzima 360 K bez daljih kaskada. Prema tome, u odnosu na osnovni model, stepen eksergetске racionalnosti porastao je na „eksergetsko zeleni“ nivo, definisan eksergetskom ravnotežom koje daje vrednost od najmanje 0,70 za vrednost ψ_{Ri} [15]. Iz jednačine (5), to umanjuje uticaj emisija CO₂ koje se mogu izbeći u datom sistemu (j) na $0,47 \times c_i$ po jedinici energetske opterećenja P_i , što dalje utvrđuje prednosti distribuiranog grejanja u pogledu CO₂ u odnosu na osnovni model (radi poređenja, videti [21]). Osim toga, složene emisije CO₂ mogu se umanjiti kaskadom ka nižem stepenu potražnje ili upotrebom obnovljivih izvora energije, kao što su geotermalni izvori ili biogoriva (npr. Växjö [22]), ili oba.

3.2.2. Energetski sateliti kao pristup usmeren na ponudu

Energetski sateliti u pojedinim zgradama ili manjim grupama zgrada mogu dalje da izmene osnovni model sa pristupom usmerenim na ponudu kako bi se bolje upravljalo eksergetskom ravnotežom. Takav bi slučaj preusmerio dodelu resursa na opciju mikro-CHP koja bi smanjila premašene vrednosti dotoka eksergije u sistem (i) i potonji uticaj na energetski sistem. Takva distribuirana opcija za generisanje može se uskladiti sa upotrebom alternativnih goriva i/ili tehnologija sa smanjenim nivoom eksergije na strani krajnjeg korisnika. Primer za taj slučaj jeste opcija mikro-CHP u skladu sa upotrebom zračćih panela sa T_{app} od 340 K. Kao što se vidi na slici 3, stepen eksergetске racionalnosti za ove modele raste na osnovu vrednosti ψ_{Ri} od 0,80 i ΔCO_{2j} od $0,37 \times c_i$ po jedinici opterećenja energije P_i kao uticaj emisija CO₂ koji se može izbeći. Izvrstan primer energetskih satelita jeste projekat poligenerisanja u An-kari [23].

3.2.3. Paketi obnovljive energije kao pristup usmeren na potražnju

Integracija paketa obnovljive energije u sistemima zgrada nudi priliku za usvajanje pristupa usmerenog na potražnju kako bi se uskladile ponuda i potražnja eksergije i time postigla jedna od najvećih mogućih vrednosti ψ_{Ri} . U takvoj strategiji polazimo od eksergetске potražnje zgrade iz jednačine (2) i tražimo najniži dotok eksergije kako bi se ispunila potražnja. Geotermalna toplotna pumpa deluje kao kandidat za ispunjenje eksergetске potražnje, pošto radi između T_g i T_a . Međutim, njena zavisnost od električne energije iz centralne elektrane narušava početnu eksergetsku ravnotežu pošto je još uvek neophodan resurs sa visokim nivoom eksergije da bi se ispunile termalne potrebe zgrade uz vrednost od 0,04 za ψ_{Ri} . To nije prihvatljivo u pristupu usmerenom na potražnju u okviru REMM-a.

Jednačina (12) formuliše nov dotok eksergije koji bi trebalo svesti na minimum da bi se pronašla najniža vrednost temperature koja se može koristiti za proizvodnju električne energije, T_e . U tom slučaju T_e se ostavlja kao promenljiva dok obnovljivi izvor energije obezbeđuje odgovarajuću ravnotežu sa profilom:

$$\varepsilon_{sup(i)} = \left(1 - \frac{T_g}{T_e}\right) \times P_i \quad (12)$$

Vrednost T_e može se pronaći i tehnikom koju nazivamo mapiranje eksergije, odnosno ustanovljavanje delotvorne temperature za obnovljivi izvor energije, poput energije vetra, kao sredstvo za poređenje sa eksergijom drugih resursa [15]. Na primer, Betz-ov zakon postavlja teoretsko ograničenje za količinu kinetičke energije

je koju turbina na vetar može da pretvori u mehaničku energiju. U skladu sa tim, potrebno je u najboljem slučaju 27/16 kWh kinetičke energije da bi se proizveo 1 kWh mehaničke energije [24]. U stvarnim turbinama, ta vrednost se kreće bliže 5/2 kWh [25]. Ukoliko bilo koju od ovih vrednosti kinetičke energije uzmemo za vrednost P_w u jednačini (13), u tom slučaju možemo da je rešimo za ekvivalentnu vrednost T_e koja odgovara 1 kWh energije vetra, ε_w :

$$\varepsilon_w = \left(1 - \frac{T_g}{T_e}\right) \times P_w \quad (13)$$

Na osnovu tehnike mapiranja eksergije, vrednost T_e efektivne temperature energije vetra iznosi tek 471 K. Kada se ova vrednost primeni na jednačinu (12), dobijamo vrednost $\varepsilon_{sup(i)}$ od 0,40 po jedinici energije, umesto vrednosti od 0,86 za fosilna goriva. Time se za ovaj slučaj delotvorno smanjuje dotok eksergije dat na slici 3. Prema tome, jedna od strategija za pristup usmeren na potražnju vodi ka povezivanju geotermalne toplotne pumpe sa obnovljivom energijom, prvenstveno energijom vetra [26]. Pošto turbina za vetar obezbeđuje i električnu energiju i pokreće geotermalnu pumpu, takav paket deluje kao CHP. Prema tome, parametar ψ_{Ri} se računa iz jednačine (10). U tom slučaju, vrednost $\varepsilon_{dst(i)}$ jeste deo eksergije vetra koji se preklapa sa dotokom eksergije geotermalne toplotne pumpe između T_g i T_a , pošto se ona sada obezbeđuje dvaput:

$$\psi_{Ri} = \left(1 - \frac{\varepsilon_{dst(i)}}{\varepsilon_{sup(i)}}\right) = \left(1 - \frac{0,03 \text{ kWh}}{0,40 \text{ kWh}}\right) = 0,91 \quad \{P_i = 1 \text{ kWh}\} \quad (14)$$

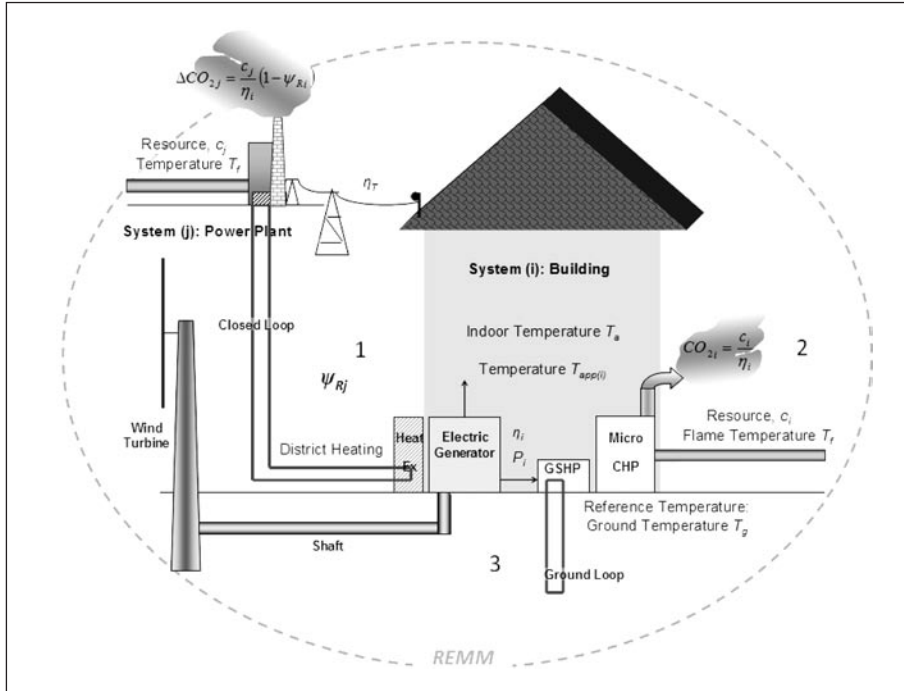
Po jednačini (14), vrednost ψ_{Ri} iznosi 0,91, što je veoma blizu maksimalne vrednosti. Na taj način se u ovom modelu može postići ravnoteža između ponude i potražnje eksergije, da bi se maksimalno uvećao stepen eksergetske racionalnosti. Osim toga, zgrada sa niskom eksergijom svodi na minimum svoj uticaj emisija CO₂ koji se može izbeći na $0,16 \times c_i$ po jedinici energetske opterećenja P_i zbog izuzetno malog preostalog eksergetskog neslaganja i praktično eliminiše složene emisije CO₂.

3.2.4. Pristup hibridne gradnje za eksergetsku ravnotežu

Slika 3 prikazuje dva hibridna modela zasnovana na mešavini navedenih modela. Pošto je skoro celokupan fond zgrada zasnovan na osnovnom modelu, hibridna rešenja postaju neophodna kako bi se na osnovu eksergetskih ravnoteža na postojeće zgrade u što više slučajeva ugradili neophodni sistemi i time umanjile postojeće složene emisije CO₂ u energetske sistemu.

Prvi hibridni model razmatra delimičnu ugradnju sistema u zgradu koja pojednako koristi svaki od alternativnih modela, kao i osnovni model. U skladu sa tim, svaki od modela će imati vrednost 0,53 za ψ_{Ri} i uticaj emisija CO₂ koji se može izbeći ΔCO_{2i} od $0,90 \times c_i$ po jedinici energetske opterećenja P_i . U tom slučaju, vrednost ψ_{Ri} za bilo koji hibridni model uzima se kao podjednako ponderisan prosek vrednosti svakog od modela. Pošto se hibridni model u osnovnom modelu javlja sa smanjenim nivoom eksergetske racionalnosti, to održava vrednost ψ_{Ri} ispod „eksergetski zelenog“ praga od 0,70. Nasuprot tome, hibridna zgrada koja je u stanju da eliminiše osnovni model i u podjednako meri koristi samo alternativne modele, u sta-

nju je da prevaziđe taj prag, dat na slici 3, čime ostaje svega $0,37 \times c_i$ po energetskom opterećenju P_i za vrednost ΔCO_{2i} . Prema tome, hibridni modeli nastoje da eliminišu osnovni model i da ga zamene nekim od alternativnih modela kao što je prikazano na slici 4.



Slika 4. Hibridna zgrada uključena isključivo u eksergetski zelenim slučajevima

3.3. Višestranu pristup za rešavanje problema CO₂

Alternativni modeli ističu neke od najprominentnijih strategija koje postoje u okviru REMM-a, kako bi se smanjila količina složenih emisija CO₂ u zgradama. U ovim strategijama, prednost parametra ψ_{Ri} može se dalje integrisati u razvoj višestranu strategija za rešavanje problema CO₂. Slika 5 prikazuje četvorodimenzionalni vektorski prostor u kome se strategije modeluju po vrednosti osnovnih procesnih indikatora na izvoru. U ovom slučaju, za svaku od četiri glavne ulazne vrednosti za jednačinu (6) dati su ciljni faktori u obliku porasta ili smanjenja procentnih poena koje treba postići u okviru datog strateškog vremenskog okvira y , i to H_c , H_η , $H_{\psi R}$, H_P . Dok su vrednosti ciljnih faktora nula u osnovnim procesnim indikatorima, vrednosti različite od nule određuju da li strategija napreduje na više nivoe smanjenja složene emisije CO₂ sa ciljem održivosti, odnosno nivoe održivosti. U tom slučaju, indikator napretka biće $\Sigma CO_{2i}[y]$ kao razlika u vrednostima u jednačini (15a), pri čemu su $\Sigma CO_{2i}[y]_B$ i $\Sigma CO_{2i}[y]_S$ složene emisije CO₂ osnovnog modela i strateških modela:

$$\Sigma CO_{2i}[y] = \Sigma CO_{2i}[y]_B - \Sigma CO_{2i}[y]_S \quad (15a)$$

$$\sum CO_{2i} [y]_S = \left(\frac{c_i - H_c}{\eta_i + H_\eta} + \left(\frac{c_i - H_c}{(\eta_i \times \eta_T) + H_\eta} \right) \times (1 - (\psi_R + H_{\psi_R})) \right) \times (P_i - (P_i \times H_p)) \quad (15b)$$

Jednačina (15b) je odgovarajuća za modelovanje četverostrane strategije za smanjenje složenih emisija CO₂ u zgradama na osnovu REMM-a i transformaciju blokova u eksergetske zelene blokove uz kritičnu masu novih zgrada i zgrada sa naknadno ugrađenim sistemima koji koriste odgovarajuće strategije. Takve strategije moraju se usmeriti na unapređenje sva četiri ciljna faktora ne bi li se postigao prelaz na više nivoe održivosti. Na primer, vizija koju predvodi ASHRAE jeste smanjenje potrošnje energije u zgradama za 30% po standardu 90.1-1999 [27]. Takav se cilj može vezati sa ciljem povećanja prosečne vrednosti parametra ψ_{Ri} za sve zgrade u datoj oblasti za 30 procentnih poena u odnosu na vrednost osnovnog modela. To bi dalje pokrenulo trajnu transformaciju u smeru održivih zgrada.

3.4. Novi ciljevi za zgrade sa nultim nivoom ukupne potrošnje

Zgrada sa nultim nivoom ukupne potrošnje energije je ona koja iz distributivne mreže na godišnjem nivou ne prima više energije nego što je proizvode obnovljivi izvori energije same zgrade [28 i 29]. Ta je definicija korisna da bi se zgrade usmerile na to da postanu decentralizovani proizvođači energije u najmanjoj meri do ukupnog nultog nivoa zbirne potrošnje na osnovu energetske vrednosti. Već sada za sve nove zgrade u Evropi važi obaveza da od 2019. godine imaju nulti nivo ukupne potrošnje [30]. Još jedan cilj koji vidimo jeste zgrada sa nultim nivoom eksergije (*net-zero exergy building* – ZEXB), odnosno zgrada koja svojim mogućnostima upravlja tako da izjednačuje eksergiju koju troši iz distributivne mreže za gas ili električnu energiju, sa eksergijom koju predaje mreži godišnje [31]. Time bi se takva zgrada usmerila na opcije koje u velikoj meri uravnotežuju ponudu i potražnju eksergije. Jednačina (15) formuliše nov cilj ZEXB:

$$\sum_{k=1}^m \varepsilon = \sum_{k=1}^m \varepsilon_{fg} - \sum_{k=1}^m \varepsilon_{to} \quad \text{ZEXB} \Leftrightarrow \sum_{k=1}^m \varepsilon = 0 \quad (15)$$

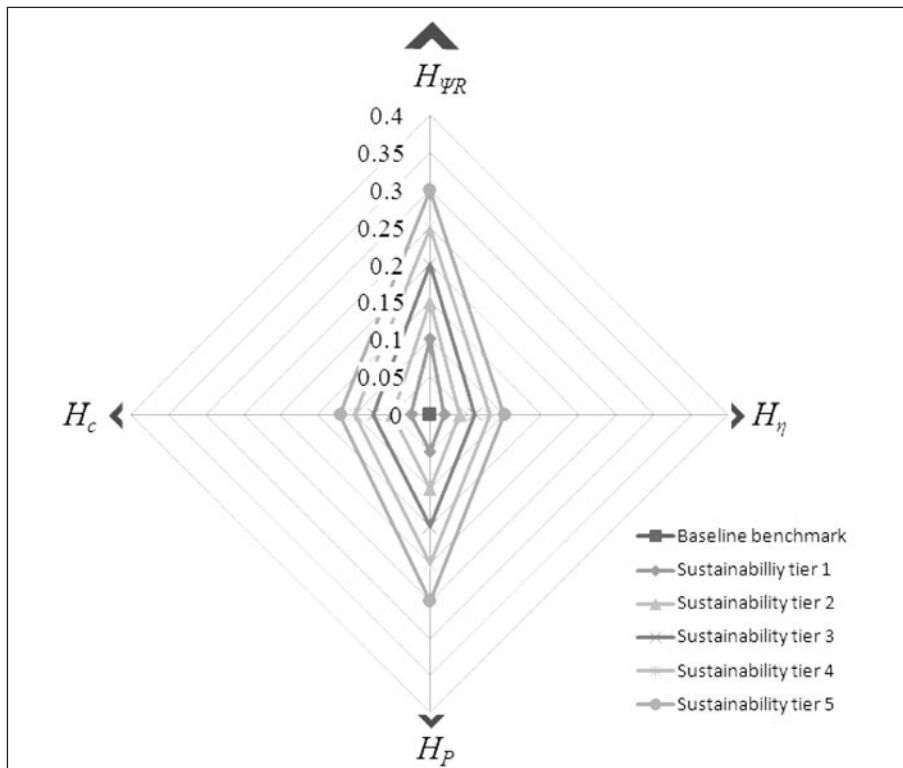
U jednačini (15), suma ε_{fg} i ε_{to} tokom svih inkremenata vremena k pokazuje eksergiju koju je zgrada primila sa mreže i eksergiju koju je zgrada predala mreži (i/ili termičku petlju korišćenjem obnovljivih izvora, npr. solarnih kolektora [32]), na godišnjem nivou. Zgrada se kvalifikuje kao ZEXB kada vrednost jednačine (15) postane nula na osnovu vrednosti ε_{fg} i ε_{to} . Prema tome, postavljeni cilj usmerava zgrade ka većoj autonomiji u odnosu na distributivne mreže za električnu energiju i gas (npr. smanjena upotreba izvora sa visokim stepenom eksergije) i ka tome da se predaje najmanje onoliko eksergije koliko se troši iz spoljašnjih izvora energije u odnosu na zgradu. U ovom slučaju, iako zgrada koja se kvalifikuje kao zgrada sa nultim nivoom ukupne potrošnje ne mora da se kvalifikuje i kao ZEXB, zgrada koja želi da postane ZEXB usmerava se da ispuni oba cilja u obostrano korisnoj situaciji. Razlog je to što cilj upotrebe opcija sa višim vrednostima parametra ψ_{Ri} umanjuje i rasipanje

eksergije i maksimalno uvećava šanse da zgrada postigne oba cilja za nultu potrošnju. Taj uslov dalje prikazuje koristi strateškog planiranja sa REMM-om kako bi se opisala budućnost zgrada na način koji smanjuje složene emisije CO₂.

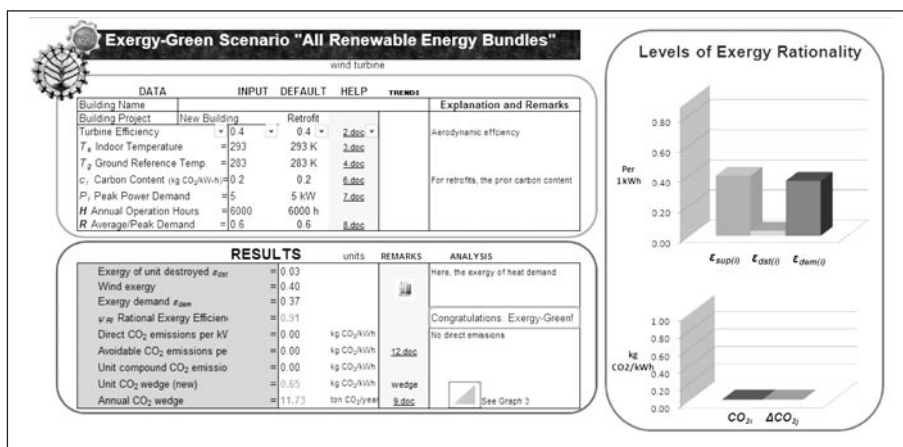
4. Scenariji za održive zgrade usmereni na eksergiju

4.1. Opis alata za analizu REMM-a

U ovom trenutku arhitekta i kreatori politike nisu u dovoljnoj meri obavešteni o neophodnosti usvajanja modela koji rešavaju uticaj zgrada opisanih u osnovnom modelu. Novi alat za analizu koji razvijamo predstavlja jedan od načina da se korisnicima ukaže na usvajanje strategija za zgrade koje imaju bolje uravnotežene eksergije i čime se smanjuju njihove složene emisije CO₂. Konkretno, alat za analizu REMM-a obezbeđuje delotvorno sredstvo za interakciju sa svakim od alternativnih modela i za optimizaciju načina na koji zgrade mogu da proizvedu opcije za nov klin CO₂, npr. smanjenje CO₂ u odnosu na karakteristike osnovnog modela. U celini, namena alata je da ispunjava obrazovnu ulogu za promenu paradigmi u pogledu osnovnih karakteristika zgrada. Prema tome, ne samo što se utvrđuje uticaj strukturalnih nedostataka u uravnotežavanju ponude i potražnje eksergije u zgradama u ukupnom zbiru, već se nude i mogući pristupi za rešavanje tih nedostataka.



Slika 5. Četvorodimenzionalni vektorski prostor za višestranе strategije smanjenja emisija CO₂



Slika 6. Snimak ekrana alata za analizu REMM-a

Slika 6 prikazuje snimak ekrana alata pri čemu se paket obnovljive energije sa vrednošću ψ_{Ri} od 0,91 ocenjuje kao eksergetska zelena strategija. U tom slučaju, korisnik je odabrao projekat izrade nacrtu nove zgrade koja bi koristila geotermalnu toplotnu pumpu i mikroturbinu na vetar. Zbog visokog stepena eksergetske ravnoteže, što takođe prikazuju grafikoni na ekranu, ova će opcija biti neutralna u ukupnom obračunu emisija CO₂ za taj skup zgrada ukoliko se sistem (j) fiksira kao elektrana iz osnovnog modela. Postojeća zgrada na koju se naknadno ugradi ova opcija, međutim, posedovaće negativan status emisija u obračunu za skup zgrada, zbog toga što će preuzeti zgradu osnovnog modela kao zgradu sa nultom emisijom ugljenika. Jednačina (16) prikazuje takav obračunski princip samo za ΔCO_{2j} , pri čemu se za ψ_{Ri} uzima da iznosi 0,04 za osnovni model koji se zamenjuje [15]:

$$-\Delta CO_{2j} = -\left(\frac{c_j}{n_i \times n_T} \times (1 - \psi_{Ri}) \right) \times P_i \quad (16)$$

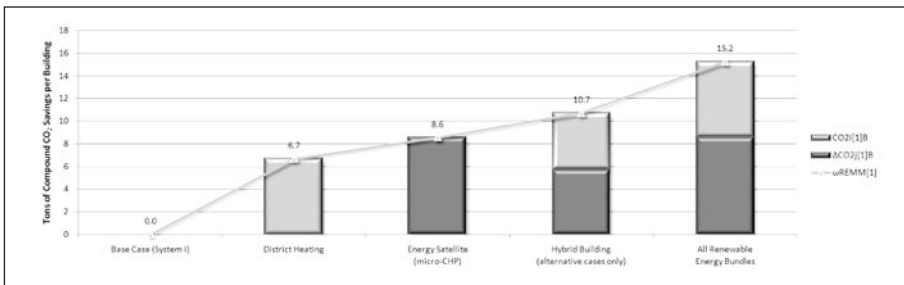
Osim jediničnih vrednosti za analizu nivoa eksergetske racionalnosti za bilo koji dati model, alat prihvata i stvarne vrednosti iznosa energetskog opterećenja P_i (što može da uključuje i opterećenje za električnu i grejnu energiju). Unapred podešene vrednosti su zasnovane na zgradi sa najvećim opterećenjem snage od 5 kW [33], prosečnim odnosom prosečnog i maksimalnog opterećenja od 0,6 i 6000 radnih časova godišnje, što daje vrednost od 18.000 kWh. Prema tome, zgrada po osnovnom modelu, sa jediničnim faktorom složenih emisija CO₂ od $3,28 \times c_i$ po jedinici energetskog opterećenja P_i , prvenstveno zbog vrednosti ψ_{Ri} od 0,04, posedovaće potonji uticaj na energetski sistem u iznosu od inicijalne vrednosti od 15,2 tona složenih emisija CO₂ godišnje, pošto c_i iznosi 0,26 kg CO₂ po kWh (za SAD). Iz jednačine (9) dobijamo da ova vrednost iznosi 6,7 tona direktnog (CO_{2i}) i 8,6 tona uticaja emisija CO₂ koji se može izbeći u energetskom sistemu (ΔCO_{2j}) godišnje. Takva vrednost ukazuje na hitnu potrebu da se naknadno ugrade sistemi u osnovni model zgrada koje i dalje imaju visok faktor složenih emisija CO₂ zbog niskog stepena eksergetskih ravnoteža, odnosno množilaca od $3,28 \times c_i$ po jedinici P_i .

4.2. Formulisanje novih klinova CO₂

Isprva, ugljenični klin zgrada je ponuđen kao jedan od sedam klinova koje vredi smanjiti za po jednu gigatonu ugljenika (1 GtC ≈ 3,67 Gt CO₂), što je neophodno da bi se globalna emisija ugljenika do 2055. godine stabilizovala na 7 GtC [34]. Međutim, kod takvog ugljeničnog klina za mere smanjenja CO₂ u zgradama pretpostavlja se da predstavljaju opcije usmerene na uštedu energije za krajnje korisnike. U našem slučaju dalje formulišemo novi klin CO₂ koji je zasnovan isključivo na strukturalnim promenama kako bi se ponovo uskladile ponuda i potražnja eksergije u skladu sa višom vrednošću parametra ψ_{Ri} u situaciji gde su sve druge vrednosti jednake [15]. Prema tome, osnovni model posmatramo kao meru „sve po starom“ za zgrade i razmatramo isključivo potencijal alternativnih modela za smanjenje složenih emisija CO₂. Jednačina (17) formuliše novi klin CO₂ za datu godinu y kao $\omega_{REMM}[y]$ na osnovu ukupnog broja zgrada tokom te godine $B[y]$ koje će poprimiti karakteristike alternativnog modela radi uštede u godišnjoj složenoj emisiji CO₂ osnovnog modela, $\Sigma CO_{2i}[y]_B$.

$$\omega_{REMM}[y] = (\Sigma CO_{2i}[y]_B - (CO_{2i}[y]_B + \Delta CO_{2j}[y]_B)) \times B[y] \quad (17)$$

Uzimajući da navedena vrednost $B[y]$ iznosi jedan, slika 7 daje vrednosti za jedinične klinove CO₂, npr. uštedu u CO₂ po zgradi godišnje u odnosu na složene emisije CO₂ za osnovni model. U ovom slučaju klin nije moguće primeniti za zgradu koja i dalje ima karakteristike osnovnog modela, odnosno za zgradu čija je ušteda CO₂ jednaka nuli. Sa druge strane, one zgrade sa modelima zasnovanim na višim vrednostima ψ_{Ri} u stanju su da eliminišu jednu ili obe neposredne i/ili emisije CO₂ koje se mogu izbeći u osnovnom modelu zgrade označene sa $CO_{2i}[y]_B$ i $\Delta CO_{2j}[y]_B$, sa unapred postavljenim vrednostima. Kao ušteda u CO₂ u odnosu na osnovni model, eliminacija bilo koje od ovih emisija obezbeđuje osnovu za jedinične klinove CO₂ kao što je prikazano u vrednostima na slici 7. U jediničnim klinovima CO₂ za hibridni model, ušteda u CO₂ u slučajevima od kojih se sastoji data je sa podjednakim vrednostima pondera. Ukoliko postoji plan za izvestan broj novih ili naknadno prerađenih zgrada koje bi svake godine trebalo da usvoje jedan od alternativnih modela, moguće je predvideti uštedu u složenim emisijama CO₂ kao novi klin CO₂.



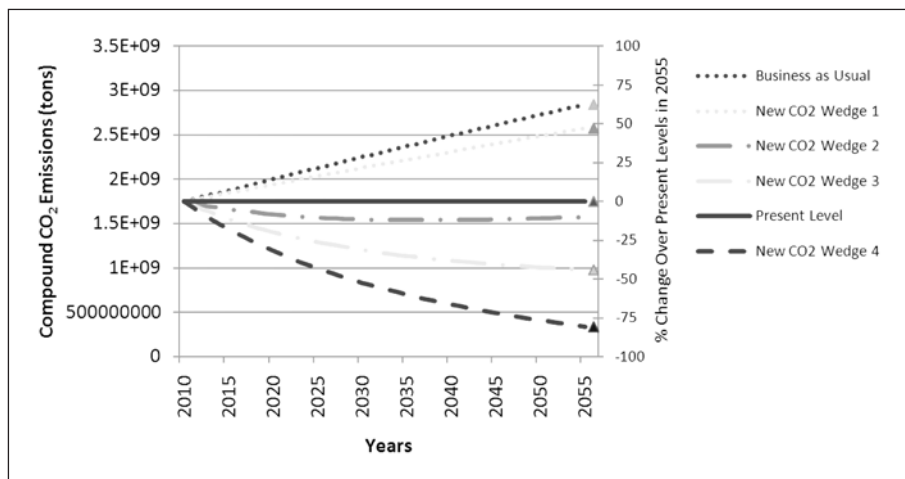
Slika 7. Jedinični klinovi CO₂ u odnosu na složene emisije CO₂ osnovnog modela

4.2.1. Primena novih klinova CO₂

Po unapred postavljenim vrednostima alat za analizu REMM-a smatra da će svake godine pet odsto postojećih zgrada i dvadeset odsto novih zgrada usvojiti alter-

nativne modele. Sa druge strane, po scenariju „sve po starom“ (*Business As Usual* – BAU), za te procenite pretpostavlja se da predstavljaju tek $\frac{1}{4}$ odnosno jedan odsto nakon date godine. U Sjedinjenim Državama, na primer, procenjuje se da će tokom desetogodišnjeg perioda koji se navršava 2010. godine 38 miliona novih zgrada biti pridodato skupu od 81 miliona zgrada [33]. Uzimajući u obzir aktuelnu ekonomsku krizu koja utiče na građevinski sektor, pretpostavljamo da će ukupan broj zgrada iznositi 115 miliona zgrada po osnovnom modelu (na osnovu [35]). Poređenja radi, to iznosi četiri puta više od ukupnog broja zgrada u Velikoj Britaniji od 25 miliona [1]. Počevši sa 2010, kao osnovnom godinom, izvodimo prosečne godišnje stope izgradnje novih zgrada sa smanjenim tempom od 2 miliona pre nego što primenimo raznovrsne trendove za formulisanje klinova CO₂.

Slika 8 daje četiri opcije za nove klinove CO₂ u kojima sve opcije uključuju tvrdnju da će svake godine nakon osnovne 2010. godine dvadeset odsto novih zgrada usvojiti alternativni model sa vrednošću ψ_{Ri} od 0,91. Ukoliko se ništa drugo ne izmeni, nove će zgrade izmeniti ukupne složene emisije CO₂ novih zgrada rađenih po osnovnom modelu za 15,2 tona. U prvoj opciji, međutim, ni jedna od postojećih zgrada ne biva naknadno prerađena u odnosu na osnovni model. Prema tome, prati se putanja bliska scenariju BAU i dopušta se da složene emisije CO₂ dostignu vrhunac daleko viši od aktuelnih nivoa sa 3 GtCO₂ tokom 2055. godine. To dalje afirmiše činjenicu da smanjenje emisija CO₂ ne sme da se fokusira isključivo na nove zgrade sa 2% ukupnog broja, već mora da uključuje naknadnu modifikaciju postojećih zgrada [36], naročito kako bi se smanjile emisije koje se trenutno sabiraju.



Slika 8. Četiri opcije za nove klinove CO₂ usmerene na eksergiju

Za razliku od prvog klina, ostale opcije dalje uključuju tvrdnju da će pet odsto postojećih zgrada biti naknadno modifikovano iz osnovnog modela u druge modele. Redom od drugog do četvrtog klina, takve će zgrade u ovim opcijama biti naknadno prerađene tako da svaka od zgrada izgubi 6,7 (distribuirano grejanje), 10,7 (hibridno samo sa alternativnim modelima) i 15,2 tona (svi paketi obnovljive energije) složenih emisija CO₂.

Kao što slika 8 prikazuje, četvrta opcija smanjuje složene emisije CO₂ zgrada 2055. godine za 81% manje od nivoa u 2010. godini i stvara novi klin CO₂ sa BAU od 2,5 gigatona složenih emisija CO₂, što može biti još i više ukoliko se ne koriste najbolji referentni nivoi efikasnosti. Na osnovu scenarija usmerenih na eksergiju, taj klin menja energetska sistem u odnosu na potrošnju energije u građevinskom sektoru ka sistemu koji je eksergetski zeleniji. Tako značajna ušteda u CO₂ može se preneti i izvesti na globalnom nivou i pomešati drugim merama, uključujući uštedu energije, radi još većeg smanjenja, reda veličine 80% niže od vrednosti iz 1990. godine.

5. Razmatranje: eksergetski zelena promena paradigme

U ovom radu je model REMM primenjen kako bi se generisao niz strategija zasnovanih na eksergiji koje su usmerene ka pokretanju promene paradigmi i da bi se izmenila potrošnja energije u zgradama rađenim po osnovnom modelu. Iz obuhvata REMM-a, zgrade sa karakteristikama osnovnog modela imaju visok faktor složene emisije CO₂ zbog uticaja strukturalne neodgovarajuće upotrebe eksergije u energetskom sistemu na osnovu neoptimalnih vrednosti parametra ψ_{Ri} koji su daleko niži od jedan. Prema tome, poboljšanje održivosti zgrada mora da uključuje postizanje racionalnije ravnoteže u ponudi i potražnji eksergije kao sredstva za smanjenje emisija CO₂, koje postaju složenije u energetskom sistemu. To takođe mora da učestvuje kao kriterijum u merenju karakteristika zgrada (npr. [37 i 38]), tako da se preteran dotok eksergije u građevinskom sektoru na mestima gde je potrebna niža eksergija razreši tog eksergetskog neslaganja radi bolje uravnoteženosti. Takvo usmerenje se takođe mora uključiti u vezane direktive za bolje iskorišćenje energetskih resursa u zgradama (za [39] videti [40]).

Ovaj rad iznosi prioritet „eksergetski zelene“ promene paradigmi za energetsku potrošnju održivih zgrada koje parametar ψ_{Ri} definiše sa vrednošću od 0,70 ili više. Strategije navedene kao strategije usmerene na ponudu ili potražnju, pored hibridnih i eksergetskih pristupa sa nultim nivoom ukupne potrošnje, predstavljene su da bi se pružilo predznanje o tome kako bi eksergetski zelena promena paradigme mogla da izgleda u budućnosti građevinskog sektora. U skladu sa tim, alat za analizu REMM-a, sa formulacijom novih klinova CO₂, kreiran je da bi se usmerila pažnja relevantnih učesnika u procesu ka eksergetski zelenim ciljevima i iskoristio ogroman potencijal za smanjenje emisija CO₂.

6. Zaključci o globalnoj održivosti

U periodu u kome svet mora da preduzme značajne aktivnosti mimo Protokola iz Kjota, model REMM utvrđuje ključne prilike za održive zgrade da učvrste predvodničku poziciju u rešavanju problema CO₂. Osim toga, implicira i da preterane emisije CO₂ čovečanstva [41], daleko veće od sposobnosti planete da apsorbuje CO₂, dalje pogoršava još jedna vrsta neslaganja, tj. preteran dotok eksergije u odnosu na eksergetsku potražnju energetskog sistema, naročito u građevinskom sektoru. Uzimajući emisiju ugljenika koja se može izbeći ΔCO_2 , a koja se neposredno može pripisati neusklađenoj eksergiji u zgradama na osnovu unakrsnog parametra ψ_{Ri} , zgrade imaju ogroman potencijal za smanjenje globalnih emisija CO₂ koje se trenutno procenjuju na 8,8 GtCO₂, a u koje su uključene složene emisije CO₂.

Zaključujemo da model REMM ima neophodne atribute da bi postao jedan od ključnih pokretača u smanjenju emisija CO₂ koje se trenutno sabiraju u energetskom

sistemu. Novi scenariji klinova CO₂ prikazuju taj potencijal u odnosu na osnovne modele zgrada na osnovu „eksergetski zelenih“ strategija sa vrednošću ψ_{Ri} od 0,70 i više. U celini, model služi cilju mobilizacije promene paradigmi u potrošnji energije u zgradama na osnovu mera usmerenih na podizanje nivoa eksergetske racionalnosti radi smanjenja složenih emisija CO₂. Osim toga, međusistemski obuhvat širi granice kojima se ocenjuje uticaj zgrada i razvijaju strategije za održive zgrade usmerene na eksergiju. Model REMM tako obezbeđuje sredstvo za iskorišćenje vizije eksergetski zelene budućnosti kao budućnosti izgrađenog okruženja i uspostavljanje bolje ravnoteže sa planetom, kako bi se usmeravala promena ka globalnoj održivosti.

Zahvalnica

Autor želi da zahvali na podršci dr Folkeu Bjorku i prof. dr Gudni Johanneson (KTH) u proširivanju okvira ovog istraživanja i prof. dr Čarlsu Vajsu (GU) na ranijim verzijama ovog istraživanja.

Aneks

Jednačina (5) se izvodi iz graničnog slučaja jednačine (4b) pri čemu se za $\epsilon_{dst(i)}$ uzima da je jednako $\epsilon_{sup(j)}$, tako da:

$$\epsilon_{sup(j)} = \epsilon_{sup(i)} \times (1 - \psi_{Ri}) \quad \{\epsilon_{sup(j)} < \epsilon_{sup(i)}\} \quad (A-1)$$

U ovom slučaju, na osnovu jednačine (3), izrazi $\epsilon_{sup(j)}$ i $\epsilon_{sup(i)}$ za sisteme (i) i (j), respektivno, pišu se kao:

$$\left(1 - \frac{T_g}{T_f}\right) \times P_j = \left(1 - \frac{T_g}{T_f}\right) \times P_i \times (1 - \psi_{Ri}) \quad \{P_j < P_i\} \quad (A-2)$$

Uz uslov upotrebe sličnih resursa u oba sistema (i) i (j), izrazi se poništavaju sa odnosima temperatura, koji se javljaju sa obe strane jednačine u jednačini (A-2):

$$P_j = P_i \times (1 - \psi_{Ri}) \quad \{P_j < P_i\} \quad (A-3)$$

Pre nego što dobijemo jednačinu (5), množimo jednačinu (A-3) faktorom c_j kao i faktorom $1/\eta_i$ ukoliko imamo slične sisteme (i) i (j) tako da $\eta_i = \eta_j$. U potonjem slučaju se podrazumeva da su P_i i P_j energetska opterećenja, a ne energija koju je neophodno dopremiti da bi se pokretali sami sistemi. Prema tome, jednačinu (5) izvodimo kako je već navedeno.

Nomenklatura

- B – broj zgrada [bez jedinice]
- c – CO₂ sadržan u resursu izražen kao neto kalorijska vrednost [kg CO₂ po kWh]
- CO_{2i} – neposredne emisije CO₂ sistema (i) [kg CO₂ po kWh]
- H – ciljni faktori; koriste se u višestranjoj strategiji smanjenja emisija CO₂ [bez jedinice]
- η – energetska efikasnost [bez jedinice]
- P – energetska opterećenje [kWh]

T	– vrednost temperature [K]
y	– godine u vremenskom okviru strategije [bez jedinice]
ΔCO_{2j}	– uticaj emisija CO ₂ sistema (i) koje se mogu izbeći [kg CO ₂]
ε	– eksergija [kWh]
ΣCO_{2i}	– faktor složenih emisija CO ₂ za sistem (i) [kg CO ₂]
ψ_R	– efikasnost racionalnog upravljanja eksergijom [bez jedinice]
ω_{REMM}	– CO ₂ klin zasnovan na REMM [kg CO ₂]

Indeksi

a	– ambijentalni vazduh
app	– primena
B	– osnovni model
dem	– potražnja
dst	– istrošeno
e	– električna energija (iz obnovljivih izvora)
f	– plamen sagorevanja
fg	– sa mreže
g	– zemljište (referentno okruženje)
i	– sistem (i)
j	– sistem (j)
k	– vremenski koraci; korišćeni u zgradama sa ukupnom potrošnjom nula
S	– strategija (za alternativne modele)
sup	– ponuda
T	– gubici u prenosu i drugi parazitski gubici
to	– ka mreži
W	– vetar

Skraćenice

BAU	– „Sve po starom“ (<i>Business as usual</i>)
CHP	– kombinovano grejanje i električna energija (<i>Combined heat and power</i>)
GSHP	– geotermalna pumpa (<i>Ground-source heat pump</i>)
GtC	– gigatona ugljenika (<i>Gigaton of carbon</i>)
GtCO ₂	– gigatona ugljen-dioksida
ppm	– čestica u milion (<i>Parts per million</i>)
REMM	– model racionalnog upravljanja eksergijom (<i>Rational Exergy Management Model</i>)
ZEXB	– zgrada bez imalo potrošnje eksergije (<i>Net-zero Exergy Building</i>)

Literatura

- [1] *** IEA, *Energy Technologies Perspectives: Scenarios to 2050, Chapter 2 Scenarios*, International Energy Agency, Paris, France (2008) 99.
- [2] **Monastersky, R.**, *Climate crunch: A burden beyond bearing*, Nature 458 (2009) 1091–1094.
- [3] **Hansen, J., M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner et al**, Target Atmospheric CO₂: *Where Should Humanity Aim?*, The Open Atmospheric Science Journal 2 (2008) 217–231.

- [4] **Schmidt, D.**, *Design of low exergy buildings – method and a pre-design tool*, International Journal of Low Energy and Sustainable Buildings 3 (1) (2004) 1–47.
- [5] **Johannesson, G.**, *Development of various low-ex system components and their integration*, in: 6th Int. Conference on Indoor Air-Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings, Sendai (2007).
- [6] **Schmidt, D.**, *Benchmarking of low “exergy” buildings*, in: Proc. 8th Nordic Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Vol. 2, Copenhagen (2008) 621–628.
- [7] **Kilkis, B.**, *Cost optimization of a hybrid HVAC system with composite radiant wall panels*, Applied Thermal Engineering, 26 (1) (2006) 10–17.
- [8] **Sakulpipatsin, P., L. C. M. Itard, H. J. van der Kooi, E. C. Boelman, P. G. Luscuere**, An exergy application for analysis of buildings and HVAC systems, Energy and Buildings (2008), doi: 10.1016/j.enbuild.2009.07.015.
- [9] **Balta, Y. Kalinci, A. Hepbasli**, *Evaluating a low exergy heating system from the power plant through the heat pump to the building envelope*, Energy and Buildings 40 (2008) 1799–1804.
- [10] **Shukuya, M.**, *Exergy concept and its application to the built environment*, Building and Environment 44 (2009) 1545–1550.
- [11] *** ECBCS Annex 37: Low Exergy Systems for Heating and Cooling, International Energy Agency, 2003, <http://www.ecbcs.org/annexes/annex37.htm>.
- [12] *** ECBCS Annex49: Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities, International Energy Agency, 2009, <http://www.annex49.com/background.html>.
- [13] **Schmidt, D.**, *Low exergy systems for high-performance buildings and communities*, Energy and Buildings 41 (2009) 331–336.
- [14] *** IEA, How the Energy Sector can Deliver on a Climate Agreement in Copenhagen: Special early excerpt of the World Energy Outlook 2009 for the Bangkok UNFCCC meeting, Paris, France (2009).
- [15] **Kilkis, S.**, *A Rational Exergy Management Model to Reduce CO₂ Emissions by Global Exergy Matches*, Honors Thesis, Georgetown University, Washington. D. C., 2007.
- [16] **Kilkis, S.**, *A Rational Exergy Management Model for Curbing Building CO₂ Emissions*, in: ASHRAE Transactions, Vol. 113, part 2 (2007) 113–123.
- [17] ***TFI-IPCC, 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy, Intergovernmental Panel on Climate Change, Hayama, Japan (2006) 2.16.
- [18] *** Directive 2007/74/EC, Establishing harmonized efficiency reference values for separate production of electricity and heat in application of Directive 2004/8/EC, Brussels, 2007.
- [19] *** Climate Change Technology Program, Technology Options for the Near and Long Term (2005) 1.3:4–5, available at: <http://www.climatechange.gov/library/2005/tech-options/index.htm>.
- [20] *** IEA Energy Statistics, International Energy Agency, 2006, <http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>.
- [21] **Thyholt, M., A. Hestnes**, *Heat supply to low-energy buildings in district heating areas: Analyses of CO₂ emissions and electricity supply security*, Energy and Buildings 40 (2008) 131–139.

- [22] *** Energie-Cities, Imagine Exhibition Virtual Tour – Växjö, <http://www.imagineyouenergyfuture.eu/exhibition/>.
- [23] **Anzioso, F.**, *High Efficiency Polygeneration Applications (HEGEL)*, in: Proc. 1st European Conference on Polygeneration, Tarragona (2007) 297–312.
- [24] *** *Betz' law and proof of Betz' law*, in: Wind energy reference manual, Danish Wind Turbine Manufacturers Association, (2006) 71–2, 262–3.
- [25] **Campbell, P., K. Adamson**, *Estimation of Energy Yield from Wind Turbine Generators*, in: Proc. PowerCON (2003).
- [26] **Kilkis, S., B. Kilkis**, *Optimization of Heat-Pump Applications for Net-Zero Exergy Buildings*, in: Proc. 9th IEA Heat Pump Conference, Zurich (2008).
- [27] *** ASHRAE et al., *Advanced Energy Design Guide for Small Retail Buildings: Achieving 30% energy savings over ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1999*, Atlanta, USA, 2008.
- [28] *Crawley, D., S. Pless, P. Torcellini, Getting to Net Zero*, ASHRAE Journal, Sept. (2009) 18–25.
- [29] *** The Zero Energy Buildings Database, Building Technologies Program, Department of Energy, USA, 2008 <http://zeb.buildinggreen.com>.
- [30] *** European Parliament, *All new buildings to be zero energy from 2019*, Press Release 2009.
- [31] **Kilkis, S.**, *A new-metric for net-zero carbon buildings*, in: Proc. ASME Energy Sustainability Conference, Long Beach (2007).
- [32] **Church, K.**, *Community Case Study II: Okotoks Solar Demonstration Project*, Canada, ECBCS Annex 49 Newsletter 4 (2008) 6–7.
- [33] *** EERE, Building Technologies Program, Department of Energy, USA, 2004, <http://www.eere.energy.gov/buildings/tech>.
- [34] **Pacala, S., R. Socolow**, *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the next 50 Years with Current Technologies*, Science (2004) 968–972.
- [35] *** BEDB, *2008 Building Energy Data Book*, Building Technologies Program, Department of Energy, USA (2009) 2–1.
- [36] **Holness, G.** *Sustaining our Future by Rebuilding our Past*, ASHRAE Journal Aug. (2009) 16–21.
- [37] *** Japan Sustainable Building Consortium (JSBC), Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency (CASBEE), 2009, <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/index.htm>.
- [38] *** US Green Building Council, Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) v3, 2009.
- [39] *** *Directive 2004/8/EC on the promotion of cogeneration based on a useful heat demand in the internal energy market*, European Parliament, Brussels, 2004.
- [40] **Kilkis, B., S. Kilkis**, *Upgrading EU Directive with Rational Exergy Management*, in: ASHRAE Transactions, Vol. 113, part 2 (2007) 181–191.
- [41] **Moran, D., M. Wackernagel, J. Kitzes, S. Goldfinger, A. Boutaud**, *Measuring sustainable development – Nation by nation*, Ecological Economics 64 (2008) 470–474.

kgb