

**VI NAUČNO-
STRUČNI
SIMPOZIJUM
ENERGETSKA
EFIKASNOST
ENEF
BANJA LUKA**

12. - 13. jun 2025.

Zbornik radova

Zbornik radova VI naučno - stručnog simpozijuma

Energetska efikasnost ENEF Banja Luka

Izdavač

Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci

Za izdavača

dr Darko Knežević, redovni profesor, dekan

Urednici

dr Petar Gvero, redovni profesor, predsjednik programskog odbora
dr Milovan Kotur, vanredni profesor, predsjednik organizacionog odbora

Tehnički urednici i grafičko oblikovanje

Milan Pupčević ma, dipl. inž. maš.
Dragan Erceg ma, dipl. inž. maš.

Tiraž 50 primjeraka

ISBN 978-99976-11-10-9

COBISS.RS-ID 142706689

Banja Luka, jun, 2025. Organizatori simpozijuma

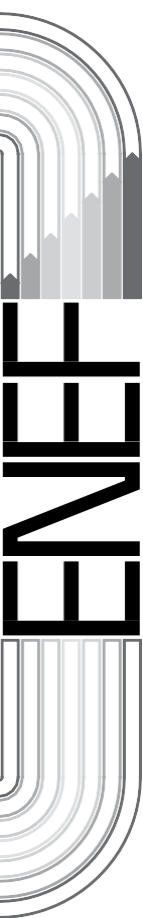
Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Arhitektonsko - građevinsko - geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Savez energetičara Republike Srbije

Programski odbor simpozijuma

Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Prof. dr Petar Gvero, predsjednik; prof. dr Milovan Kotur; prof. dr Goran Janjić; prof. dr Bojan Knežević; prof. dr Zorana Tanasić; doc. dr Đorđe Vojinović

Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Prof. dr Branko Dokić - emeritus profesor; prof. dr Tatjana Pešić - Brđanin; prof. dr Branko Blanuša; prof. dr Čedomir Zeljković; prof. dr Petar Matić; prof. dr Miloš Ljubojević;

Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Prof. dr Darija Gajić; prof. dr Biljana Antunović; prof. dr Saša Čvoro; prof. dr Malina Čvoro; prof. dr Ljubiša Preradović; prof. dr Gordana Broćeta



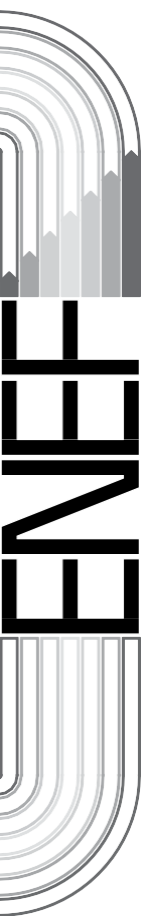
Članovi programskog odbora izvan Univerziteta u Banjoj Luci

Prof. dr Srđan Vasković, Mašinski fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Prof. dr Sanda Midžić - Kurtagić, Mašinski fakultet, Univerzitet u Sarajevu
Prof. dr Vladimir Jovanović, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
Prof. dr Igor Šešo, Mašinski fakultet, Univerzitet u Skoplju
Prof. dr Edin Berberović, Mašinski fakultet, Univerzitet u Zenici
Prof. dr Uroš Karadžić, Mašinski fakultet Podgorica, Univerzitet Crne Gore
Prof. dr Jakov Baleta, Metalurški fakultet, Univerzitet u Zagrebu
Prof. dr Slobodan Lubura, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Prof. dr Milomir Šoja, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu
Prof. dr Darko Marčetić, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu
Prof. dr Aleksandar Rakić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Prof. dr Živko Kokolanski, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Skoplju
Prof. dr Budimir Sudimac, Arhitektonski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Prof. dr Aleksandar Rajčić, Arhitektonski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Prof. dr Aleksandar Savić, Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija
Prof. dr Slobodan Šupić, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija
dr Aleksandar Janković, Norveški univerzitet za nauku i tehnologiju, Trondhjem, Norveška
Prof. art. Ljubomir Mišćević, Arhitektonski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Hrvatska

Organizacioni odbor simpozijuma

Mašinski fakultet Univerziteta u Banjoj Luci
Prof. dr Milovan Kotur, predsjednik i član
Prof. dr Petar Gvero
Prof. dr Bojan Knežević
Prof. dr Goran Janjić
Prof. dr Zorana Tanasić
Milan Pupčević, ma
Danijela Kardaš Ančić, ma
Zoran Grahovac, ma
Dragan Erceg, ma
Goran Jotić, ma
Maja Vuković, ma





ORGANIZZATORI, PARTNERI E SPONSORI

ZLATNI
SPONZOR



Enhancing Scientific Capacity for
Energy Poverty



SREBRNI
SPONZOR



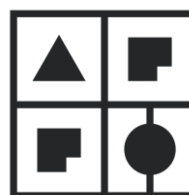
STANDARDNI
SPONZOR

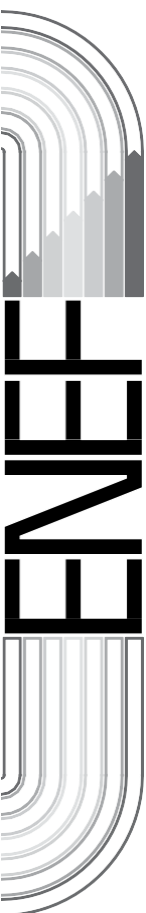


PARTNERI



ORGANIZATORI





SADRŽAJ

- 09 **SOLARNO GRIJANJE PRIMJENOM TERMoeLEKTRIČNOG EFEKTA I PRINUDNE KONVEKCIJE KAO DIO RJEŠENJA IMPLEMENTACIJE PARISKOG SPORAZUMA**
MILAN B. PUPČEVIĆ, GORAN TRBIĆ, PETAR GVERO, MILOVAN KOTUR, DANIJELA KARDAŠ ANČIĆ
- 14 **THE RELATION BETWEEN INDOOR AND OUTDOOR AIR TEMPERATURES IN MEMBRANE - COVERED BUILDING**
VUK MILOŠEVIĆ, MARIJA JEVRIĆ, OLGA ČALASAN, NEMANJA RANĐELOVIĆ
- 19 **USER'S PERCEPTION ON THERMAL COMFORT IN EDUCATIONAL BUILDING BEFORE ENERGY RENOVATION OF THE BUILDING ENVELOPE**
SLOBODAN PEULIĆ, LJUBIŠA PRERADOVIĆ, DARIJA GAJIĆ, BILJANA ANTUNOVIĆ, JELENA KLJAKIĆ, MILOVAN KOTUR, MILAN PUPČEVIĆ, SAŠA ČVORO
- 25 **ENERGETSKI JAZ U POTROŠNJI TOPLINSKE ENERGIJE ŠKOLSKIH ZGRADA U REGIJI SJEVER FEDERACIJE BIH**
DRAGAN KATIĆ, HRVOJE KRSTIĆ
- 30 **UPOTREBA ZELENIH STRUKTURA MODULARNOG TIPa PRI OBNOVI STAMBENIH ZGRADA; SIMULACIJA STUDIJE SLUČAJA NA PODRUČJU GRADA BANJA LUKA**
MILANA RADUJKOVIĆ, DARIJA GAJIĆ, BUDIMIR SUDIMAC
- 36 **EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE UTICAJA KLIMATOLOŠKIH PARAMETARA NA TEMPERATURU PV MODULA**
DANIJELA KARDAŠ ANČIĆ, MIRKO KOMATINA, PETAR GVERO, BOJAN KNEŽEVIĆ, MILAN PUPČEVIĆ
- 40 **ANALIZA PRIMJENE MJERA ENERGETSKE EFIKASNOSTI NA SMANJENJE ZAGAĐENJA ČESTICAMA (PM_{2,5})**
SARA RADIŠIĆ, PETAR GVERO, MILOVAN KOTUR, MILAN PUPČEVIĆ, ĐORĐE VOJINOVIĆ
- 46 **PERFORMANCE AND AESTHETIC EVALUATION OF BUILDING-INTEGRATED PHOTOVOLTAICS WITH MORPHOCOLOR® AND ANTISOILING COATINGS IN A LIVING LAB ENVIRONMENT**
ALEKSANDAR JANKOVIĆ, BEHNAM ROSTI, FRANCESCO GOIA, RUTH WOODS, THOMAS BERKER, SOPHIE GLEDHILL, BRUNO BUENO, GUANGYU CAO
- 52 **OPTIMALNA ORIJENTACIJA SOLARNIH PANELA U CILJU MAKSIMIZACIJE PRIHODA NA TEMELJU TRŽIŠNIH CIJENA**
EMILIJA MRĐEN, PREDRAG MRŠIĆ, ČEDOMIR ZELJKOVIĆ
- 57 **ANALIZA ISPLATIVOSTI IZGRADNJE SOLARNE ELEKTRANE NA KROVU INDUSTRIJSKOG OBJEKTA**
BOJAN LAZIĆ, PREDRAG MRŠIĆ, ČEDOMIR ZELJKOVIĆ
- 64 **POVEĆANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI U PROIZVODNJI PRIMJENOM LEAN METODA**
MAJA VUKOVIĆ, NEMANJA SREMČEV, ZORANA TANASIĆ, GORAN JANJIĆ, RADE REPARIĆ
- 69 **MONITORING FOTONAPONSKIH ELEKTRANA KROZ EVALUACIJU TEMPERATURE MODULA I PROIZVEDENE SNAGE**
NIKOLINA GAJIĆ
- 75 **UTICAJ UGRADBENE POZICIJE POLIVINILHLORIDSKIH PROZORSKIH ELEMENATA FASADNOG OMOTAČA STAMBENIH ZGRADA NA TEMPERATURU UNUTRAŠNJE POVRŠINE ZIDA**
STEFAN PETROVIĆ, BILJANA ANTUNOVIĆ, DARIJA GAJIĆ

- 81 **UTICAJ PRIMJENE RECIKLIRANOG BETONSKOG AGREGATA NA OTPORNOST BETONA PREMA DEJSTVU MRAZA**
GORDANA BROĆETA, MARINA LATINVIĆ KRNDIJA, ANĐELKO CUMBO, ALEKSANDAR SAVIĆ, SLOBODAN ŠUPIĆ, ŽARKO LAZIĆ
- 87 **THE EFFECT OF POLYPROPYLENE FIBERS ON THE MECHANICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF FOAM CONCRETE**
MOHSEN KIANA, ALEKSANDAR SAVIĆ, GORDANA BROĆETA, ALEKSANDAR RADEVIĆ, EHSAN KIANA, MARINA AŠKRABIĆ, NENAD IVANIŠEVIĆ
- 92 **WATER AS A SPATIAL AND TEMPORAL ELEMENT IN ARCHITECTURAL DESIGN**
UNA OKILJ, SAŠA ČVORO, MALINA ČVORO
- 98 **ANALIZA DISPERZIJE ONEČIŠĆUJUĆIH TVARI IZ NEPOKRETNIH INDUSTRIJSKIH IZVORA U URBANOJ SREDINI PRIMJENOM NUMERIČKIH METODA**
DOMINIK PAVLOVIĆ, JAKOV BALETA
- 104 **THE ROLE OF LIVING LABS IN ACCELERATING SMART AND ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS**
ZIVKO KOKOLANSKI, DIMITAR TASHKOVSKI, VLADIMIR ATANASOVSKI, NIKOLCE MOJANCEVSKI, VANE MITEV

Solarno grijanje primjenom termoelektričnog efekta i prinudne konvekcije kao dio rješenja implementacije Pariskog sporazuma

Milan B. Pupčević¹, Goran Trbić², Petar Gvero¹, Milovan Kotur¹, Danijela Kardaš Ančić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Banjoj Luci, Prirodno-matematički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

milan.pupcevic@mf.unibl.org, goran.trbic@pmf.unibl.org, petar.gvero@mf.unibl.org, milovan.kotur@mf.unibl.org, danijela.kardas@mf.unibl.org

Sažetak - Svjetska privreda se trenutno suočava sa mnogobrojnim izazovima, ali svakako jedan od vodećih je rješavanje problema klimatskih promjena i zagađenja životne sredine. Dosadašnja neracionalna upotreba neobnovljivih resursa, oštećenje ozonskog omotača kao i zagađenje životne sredine, zahtijeva nova rješenja na primjeni obnovljivih izvora energije. Mnogobrojna naučna istraživanja dokazuju da obnovljivi izvori energije pružaju perspektivu smanjenja ekološke ugroženosti i predstavljaju jednu od ključnih komponenti koncepta održivog razvoja. Trenutno na planeti Zemlji živi više od 7 milijardi ljudi, a očekivanja su da će se taj broj do kraja vijeka udvostručiti. Eksplozivnim rastom stanovništva nastaju zahtjevi za ubrzanom razvojem industrije i za eksplozivnim rastom materijalnih dobara i proizvodnih sirovina. Conference of the Parties – COP se održava u cilju rješavanja navedenih problema i očekuje se donošenje konkretnih odluka o klimatskim promjenama. Jedan od usvojenih ciljeva Pariskog sporazuma COP21 je razvoj i napredak tehnologija u svrhu smanjenja štetnih emisija. Sistem solarnog grijanja objekata primjenom termoelektričnog efekta, koji radi bez freona i bez sagorijevanja fosilnih goriva, može biti mali korak u rješavanju problema zagađenja životne sredine. U ranijem radu je analitički i eksperimentalno dokazano da se navedeni sistem može koristiti, ali sa malim vrijednostima koeficijenta performansi COP (Coefficient of Performance). U ovom radu će biti analitički prikazano poboljšanje sistema grijanja sa prirodnom konvekcijom primjenom prinudne konvekcije na izmjenjivaču toplote. Sa ovim poboljšanjem KGH sistema dolazi do značajnog povećanja koeficijenta grijanja COP, u nadi da ovaj sistem može biti dio rješenja koja se postavljaju pred predstojeći Conference of the Parties – COP30.

Ključne riječi - *Coefficient of Performance; Conference of the Parties; Izmjenjivač toplote; Termoelektrični efekat*

I. UVOD

Na Zemlji je početkom XX vijeka emisija CO₂ iznosila oko 1,3 gigatona godišnje, odnosno 0,65 tona po osobi, dok je početkom ovoga vijeka emisija CO₂ godišnje bila veća od 6300 Gt [1]. Ukoliko se želi postići nezavisnost od fosilnih goriva potrebno je ulagati u tehnologije koje su trenutno u fazi istraživanja ili prototipa.

Iako je Prva deklaracija konferencije Ujedinjenih nacija o životnoj sredini usvojena u Stokholmu 1972. godine [2], a zatim 1985. godine i 1988. u Torontu sastanak više od 300

naučnika, političara i privrednika [3], do 1992. godine nije bilo ozbiljnijeg djelovanja po pitanju štetnih emisija. Porast temperature na Zemlji je bio inicijativa da se 1992. godine u Rio de Žaneiro održi konferencija Ujedinjenih nacija poznata i kao „Earth Summit”, pri čemu je 155 država potpisalo UN-ovu Okvirnu konvenciju o promjeni klime, kojom je 2000. godina označena kao rok za smanjenje emisija na nivo iz 1990. godine [3]. Sve države su postale ugovorene strane (engl. Party to the Convention), a skupovi u budućnosti koje su zemlje potpisnice održavale nazvani su Conference of the Parties (COP).

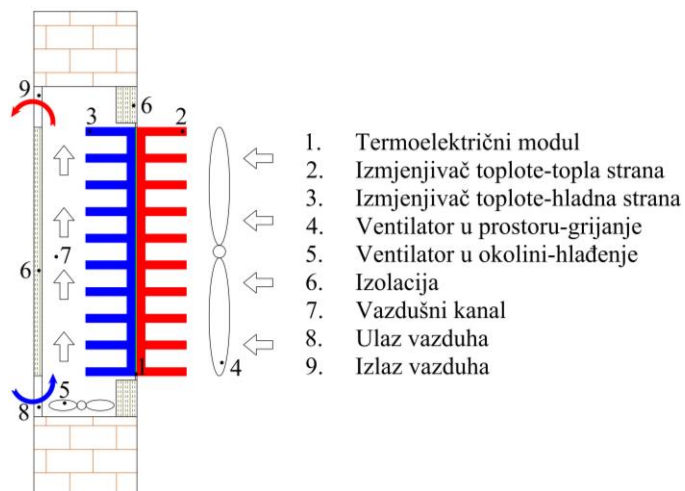
Najviše citiran je COP21, koji je održan u Parizu 2015. godine, a postavio je ozbiljne ciljeve za globalno smanjenje emisija stakleničkih gasova [3]. Da bi se ostvario razvoj i napredak tehnologija u svrhu smanjenja emisija, prema COP21, u sklopu Sporazuma su osnovani Izvršni odbor za tehnologiju (engl. Technology Executive Committee) i Centar za klimatsku tehnologiju (engl. Climate Technology Centre and Network), čija je uloga provođenje istraživanja, razvoj tehnologija i povećanje kapaciteta tehnologija u svrhu smanjenja emisija. COP26 konferencija je održana u Glazgovu 2021. godine [4], sa najvećim očekivanjima ikada. Učestvovalo je 197 stranaka Okvirne konvencije UN-a o promjeni klime (UNFCCC). Ujedinjeno Kraljevstvo, kao predsjedništvo COP-a, usvojilo je ambiciozan zadatak da zadrži povećanje zagrijavanja od 1,5 °C, a kao konačnica pregovora usvojen je Glazgovski klimatski pakt. Na konferenciji COP27, održanoj 2022. godine, usvojena su četiri glavna cilja [5]:

- **ublažavanje:** osigurati ostvarenje cilja da se globalno zagrijavanje zadrži na 1,5 °C u odnosu na predindustrijski nivo,
- **prilagodavanje:** učestvovati u poboljšanom globalnom programu djelovanja u području prilagodavanja,
- **finansiranje:** preispitati napredak u pogledu osiguravanja 100 milijardi američkih dolara godišnje do 2025. godine kako bi se zemljama u razvoju pomoglo da se suoče sa negativnim učincima klimatskih promjena i
- **saradnja:** osigurati odgovarajuću zastupljenost svih relevantnih zainteresovanih strana na konferenciji COP27, a posebno ugroženih zajednica.

U ranijem radu [6] dokazano je eksperimentalno i analitički da sistem koji radi na principu termoelektričnog efekta može biti korišten za grijanje stambenog prostora. Ukoliko sistem radi bez ventilatora, to jeste nije osigurana prinudna cirkulacija ambijentalnog vazduha preko aluminijumskog zagrijača, mora se obratiti pažnja na geometriju izmjenjivača toplote. Ukoliko izmjenjivač toplote sa pločastim rebrima nema odgovarajući razmak između rebara, cirkulacija vazduha prirodnom konvekcijom između rebara ne obezbjeđuje odgovarajući prenos toplote. U tom slučaju je koeficijent performansi sistema COP veoma mali i iznosi manje od 0,3 [6]. Optimalni razmak između rebara na izmjenjivaču toplote osigurava COP i veći od 1, ali tokom samog zagrijavanja je ta vrijednost ispod 1, što nije energetska efikasno. Korišćenje navedenog režima je opravdano isključivo ukoliko sistem radi i sa prinudnom konvekcijom i ima mogućnost regulacije i gašenja ventilatora u noćnom režimu rada kada se postavljaju zahtjevi za niskom bukom [7]. U nastavku rada će biti prikazano analitičko rješenje poboljšanja prenosa toplote primjenom prinudne konvekcije.

II. SOLARNO GRIJANJE PRIMJENOM TERMoeLEKTRIČNOG EFEKTA SA PRIRODNOM I PRINUDNOM KONVEKCIJOM

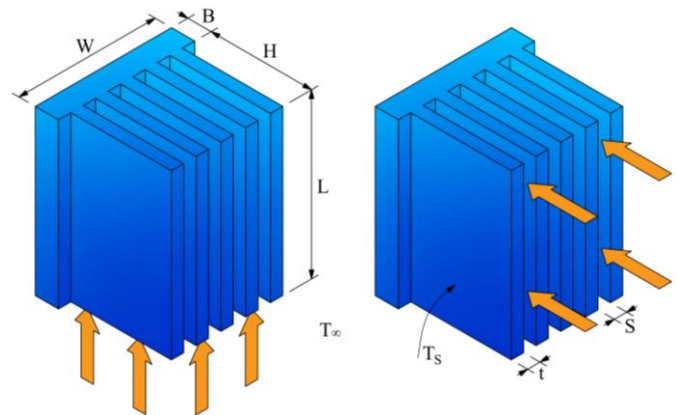
Cilj ovog rada je napraviti detaljan matematički model prenosa toplote prinudnom konvekcijom, za sistem prikazan na Sl. 1, a zatim izvršiti uporednu analizu sa ranije analitički i eksperimentalno dobijenim rezultatima primjenom prirodne konvekcije.



Sl. 1. Sistem grijanja sa TEM pozicioniranim u zidu

Prenos toplote se analizira za izmjenjivače toplote sa uskim rebrima i malim razmakom između rebara. Svi parametri su usvojeni identični kao prilikom analize prirodne konvekcije, temperatura površine $T_s = 90$, a temperatura vazduha u prostoru $T_\infty = 20$ °C. Karakteristične dimenzije prvog analiziranog izmjenjivača toplote u radu [6] su dužina rebara tj. visina $L = 40$ mm, širina izmjenjivača $W = 40$ mm i visina rebara od baze $H = 25,1$ mm. Razmak između rebara iznosi $S = 1,5$ a debljina rebara $t = 1,2$ mm, Sl. 2. Površina izmjenjivača A_s definiše se preko broja rebara $n = 15$.

Na Sl. 2. prikazana su dva tipa nastujavanja fluida preko izmjenjivača toplote, kao i karakteristične dimenzije.



Sl. 2. Prinudna konvekcija na orebrenom izmjenjivaču toplote (cirkulacija vazduha odozdo - slika lijevo i cirkulacija vazduha bočno - slika desno)

U radu [7] je izvršena optimizacija izmjenjivača toplote sa paralelnim rebrima, za sistem grijanja prostora sa Peltierovim termoelektričnim modulima kao generatorima toplote. Urađen je detaljan matematički model prenosa toplote sa prirodnom konvekcijom za postojeći komercijalni izmjenjivač toplote (model slika 3.a), a zatim urađena optimizacija izmjenjivača toplote to jeste definisan optimalni razmak između rebara ili širina kanala (model slika 3.b). Za komercijalni izmjenjivač toplote je nažalost zbog uskih razmaka između rebara i nemogućnosti idealnog strujanja vazduha između dva rebra ostvarena mala vrijednost koeficijenta prelaza toplote h , što implicira i malu količinu toplotnog toka, definisanog jednačinom (1):

$$Q_{con} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_\infty) = h \cdot (n \cdot 2 \cdot L \cdot H) \cdot (T_s - T_\infty). \quad (1)$$

Optimalni razmak između rebara definisan je pomoću jednačine (2):

$$S_{opt} = 2,714 \cdot \left(\frac{S^3 \cdot L}{Ra_s} \right)^{0,25} = 2,714 \cdot \frac{L}{Ra_L^{0,25}}, \quad (2)$$

na osnovu hipoteze da Nuseltov broj za $S = S_{opt}$ mora biti konstantna vrijednost:

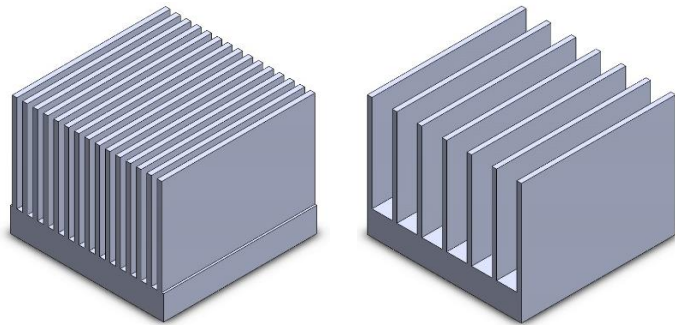
$$Nu = \frac{h \cdot S_{opt}}{\lambda} = 1,307. \quad (3)$$

Matematički model prenosa toplote obuhvata i zračenje, koje ostaje nepromijenjeno u oba razmatrana slučaja konvekcije. Zračenje koje se dobija sa izmjenjivača konstante temperature T_s može se podijeliti na zračenje izloženih površina i zračenje u kanal [8]-[10], prema jednačini (4):

$$Q_{rad} = (n-1) \cdot Q_{r, ch} + [2 \cdot L \cdot H + n \cdot t \cdot (L + 2 \cdot H) + 2 \cdot B \cdot (L + W)] \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_\infty^4), \quad (4)$$

pri čemu su: $Q_{r, ch}$ zračenje kanala, ε emisivnost površine, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴ Štefan-Bolcmanova (Stefan-Boltzmann) konstanta.

Optimalni razmak između rebara dovodi do povećanja prenosa toplote prirodnom konvekcijom sa $Q_{con} = 1,026$ W, na $Q_{con,opt} = 9,477$ W. Toplotni tok koji se dobije u vidu zračenja ima približne vrijednosti i iznosi 1,664 W za izmjenjivač toplote sa prinudnom konvekcijom, kada je zagrijan do temperature 90 °C. Optimizacijom izmjenjivača toplote sa prirodnom konvekcijom povećao se ukupni toplotni tok na 11,1 W.



a - postojeći komercijalni

b - optimalni

Sl. 3. Modelovani izmjenjivači toplote za sistem grijanja prostora

III. MATEMATIČKI MODEL PRENOSA TOPLOTE PRINUDNOM KONVEKCIJOM

Karakteristike fluida su definisane kao i kod prirodne konvekcije za srednju temperaturu prema jednačini (5):

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (5)$$

Za izmjenjivače toplote sa paralelnim rebrima Reynoldsov broj se definiše prema širini kanala S [11], prikazanoj na Sl. 2. Uzevši u obzir brzinu strujanja w i kinematsku viskoznost ν , Reynoldsov broj definiše se prema jednačini (6) kao:

$$Re_s = \frac{w \cdot S}{\nu} \quad (6)$$

Za kanal sa paralelnim pločama, ukoliko se razmatra slučaj prinudne cirkulacije vazduha dužinom izmjenjivača L odozdo na gore prema Sl. 2, Nusseltov broj Nu_s u kanalu širine S je zavistan od idealne vrijednosti Nusseltovog broja Nu_i . Ukoliko bi stepen efikasnosti rebra imao maksimalnu vrijednost, tada bi realni Nusseltov broj za kanal bio jednak idealnoj vrijednosti Nusseltovog broja:

$$\eta = \frac{Nu_s}{Nu_i} \quad (7)$$

Idealna vrijednost Nusseltovog broja definiše se prema jednačini (8):

$$Nu_i = \left[\left(\frac{Re_s^* \cdot Pr}{2} \right)^{-3} + \left(0,664 \cdot \sqrt{Re_s^*} \cdot Pr^{1/3} \cdot \sqrt{1 + \frac{3,65}{\sqrt{Re_s^*}}} \right)^{-3} \right]^{-1/3} \quad (8)$$

Ukoliko je prema [11] stepen efikasnosti rebra definisan kao:

$$\eta = \frac{\tanh \sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left(\frac{t}{L} + 1 \right)}}{\sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left(\frac{t}{L} + 1 \right)}}, \quad (9)$$

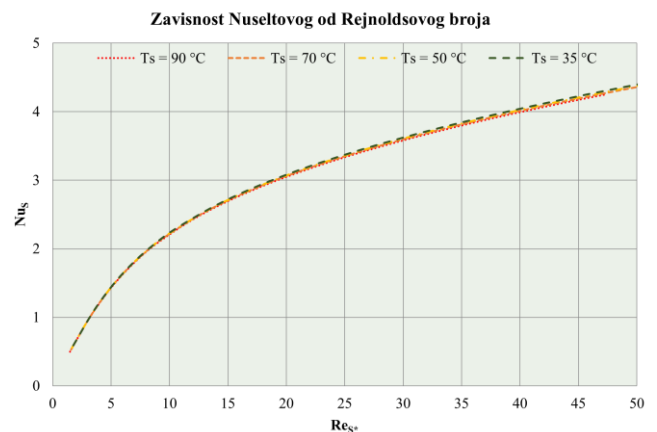
slijedi da je realna vrijednost Nusseltovog broja:

$$Nu_s = \frac{\tanh \sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left(\frac{t}{L} + 1 \right)}}{\sqrt{2 \cdot Nu_i \cdot \frac{k_f}{k} \cdot \frac{H}{S} \cdot \frac{H}{t} \cdot \left(\frac{t}{L} + 1 \right)}} \cdot Nu_i \quad (10)$$

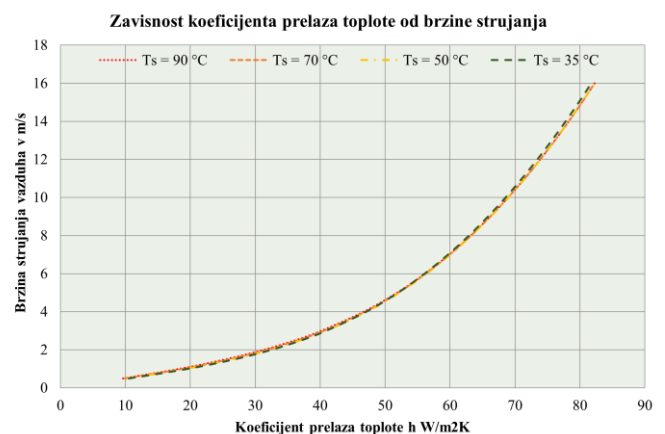
Na osnovu izloženog, dijagramom prikazanom na Sl. 4, definisana je zavisnost Nusseltovog broja u kanalu Nu_s od korigovanog Reynoldsovog broja u kanalu između dvije ploče Re_s^* , prema jednačini (11):

$$Re_s^* = Re_s \cdot \frac{S}{L} \quad (11)$$

Uočava se da su promjene Nusseltovog broja u zavisnosti od temperaturnog režima na grijaču, to jeste razmatranom izmjenjivaču toplote, minimalne, a može se reći i zanemarive.



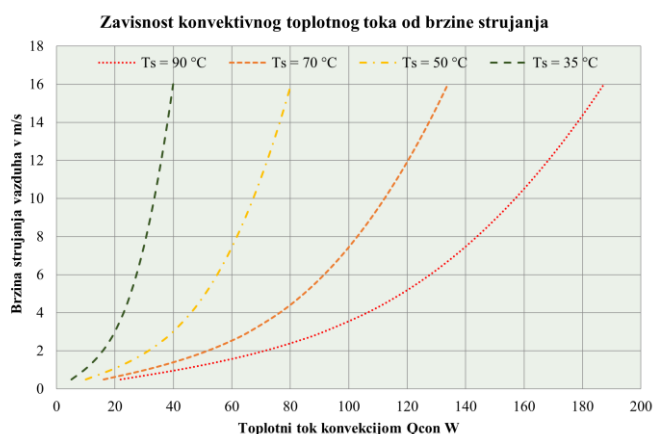
Sl. 4. Zavisnost Nusseltovog od Reynoldsovog broja



Sl. 5. Zavisnost koeficijenta prelaza toplote od brzine strujanja

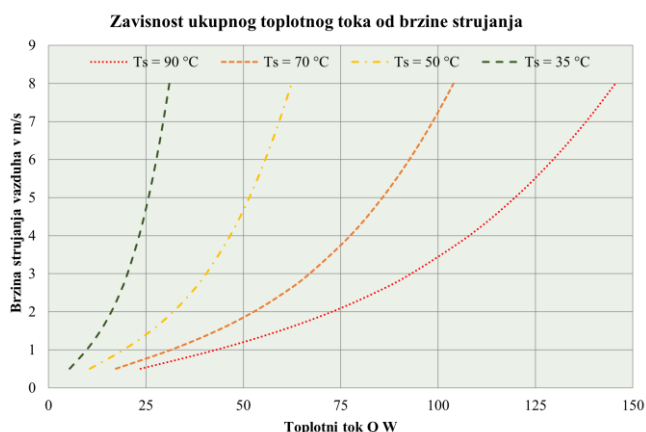
Koeficijenti prelaza toplote na izmjenjivaču toplote sa paralelnim pločastim rebrima, prikazani na Sl. 5, takođe imaju mala odstupanja u zavisnosti od temperature površine T_s . Temperature površine izmjenjivača razmatrane tokom analize, 90, 70, 50 i 35 °C, usvojene su prema pravilima projektovanja u KGH tehnici.

Zavisnost konvektivnog toplotnog toka Q_{con} od brzine strujanja vazduha w preko izmjenjivača toplote prikazan je na Sl. 6. Uočava se da su promjene mnogo veće pri malim brzinama, a upravo te brzine do 8 m/s je opravdano razmatrati. Na sistemima ventilator konvektora brzine nisu veće od 6 m/s, jer bi uzrokovala preveliki napor za ventilatore, veliku buku u prostoru, kao i eventualno odnošenje kapljica kondenza sa izmjenjivača u procesu hlađenja.



Sl. 6. Zavisnost konvektivnog toplotnog toka od brzine strujanja

Prema izloženom, na Sl. 7. su prikazane vrijednosti ukupnog toplotnog toka, koji pored konvekcije uzima u obzir i zračenje sa zagrijača definisano jednačinom (4), u zavisnosti od brzine strujanja vazduha do 8 m/s.



Sl. 7. Zavisnost ukupnog toplotnog toka od brzine strujanja

Uočava se da su odstupanja vrijednosti ukupnog toplotnog toka velika u zavisnosti od temperaturnog režima na koji je zagrijan grijač, kao i od brzine strujanja vazduha preko izmjenjivača toplote, to jeste grijača u prostoru.

Ukoliko se analizira brzina strujanja vazduha od 4-5 m/s, očitava se toplotni tok od 25 W srednje vrijednosti za grijač temperature 35 °C, dok isti taj grijač zagrijan na 90 °C isporučuje toplotni tok veći od 110 W.

Treba naglasiti da je veoma mala površina izmjenjivača toplote koji je korišten kao model tokom eksperimentalne analize. Realne dimenzije zagrijača vazduha bi osigurale i odgovarajuće vrijednosti toplotnog toka, u zavisnosti od potreba u prostoru. Regulacija sistema je moguća na nekoliko načina, željena količina toplote se može obezbijediti različitim dimenzijom izmjenjivača toplote, različitom temperaturom na koju je grijač zagrijan, kao i različitim brzinom strujanja vazduha preko izmjenjivača toplote koja se koriguje promjenom broja obrtaja lopatica na ventilatoru.

IV. ZAKLJUČAK

Ranijim istraživanjem se došlo do zaključka da je na termoelektričnom modulu sa izmjenjivačem toplote moguće dostići temperaturu u iznosu od 90 °C, pri ulaznoj električnoj snazi od 9,03 W. S obzirom da je sistem prvobitno u prostor isporučivao 2,7 W toplotnog toka, došlo se do zaključka da je stepen korisnosti COP 0,3. Optimalni izmjenjivač toplote za prirodnu cirkulaciju vazduha je obezbijedio toplotni tok u prostor u iznosu od 11,1 W, što za istu količinu ulazne električne energije kao u prvom slučaju definiše COP veći od 1. Sistem sa ovim vrijednostima COP nije konkurentan toplotnim pumpama, ali su svakako jedna od opcija za zamjenu freonskih sistema. Upravo to je i bio razlog analize opravdanosti primjene sistema sa prinudnom cirkulacijom vazduha u ovom radu.

Povećanja vrijednosti koeficijenta prelaza toplote i ukupnog toplotnog toka sa izmjenjivača sa paralelnim rebrima, primjenom prinudne umjesto prirodne konvekcije, daju obećavajuće rezultate. Koeficijent prelaza toplote prilikom grijanja sa izmjenjivačem optimalnog razmaka između rebra i prirodnom konvekcijom iznosi 8,7 W/m²K. U ovom radu se došlo do zaključka da koeficijent prelaza toplote prilikom prinudne cirkulacije, pri brzinama vazduha od 3 do 6 m/s, ima mnogo veće vrijednosti, koje se kreću između 40 i 56 W/m²K.

Prema navedenim koeficijentima prelaza toplote, vrijednosti ukupnog toplotnog toka se povećavaju sa skromnih 11 W na vrijednosti od 93 do 130 W, za brzine strujanja od 3 do 6 m/s. Treba naglasiti da povećanje toplotnog toka ne utiče srazmjerno na povećanje koeficijenta grijanja COP jer će sistem prilikom korištenja prinudne cirkulacije zahtijevati i trošiti više električne energije. Bez eksperimentalnih mjerenja je teško reći da li bi potrošnja električne energije bila veća od dobijene toplotne energije. Na osnovu dosadašnjih istraživanja koeficijent grijanja COP za ove sistema ima vrijednosti između 0,5 i 3 [12].

Dalja istraživanja imaju za cilj analizu sistema za hlađenje vazduha u prostoru sa optimizacijom broja modula po površini izmjenjivača, to jeste raspored manjeg broja modula na veću površinu izmjenjivača, a samim tim i povećanje COP.

U radu je prezentovano da sistem grijanja prostora primjenom termoelektričnog efekta može biti jedno od rješenja Pariskog sporazuma i očekivanih dugoročnih ciljeva.

LITERATURA

- [1] Republička strategija zaštite vazduha sa akcionim planom upravljanja kvalitetom vazduha, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju, Vlada Republike Srpske, Banja Luka, (2007)
- [2] Jokšić, I., *et al.*, Međunarodni i nacionalni okviri zaštite životne sredine, *Vojno delo*, 7 (2019)
- [3] Sabo, S., *Klimatski ciljevi konferencije COP26*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Završni rad, Zagreb, Hrvatska, (2023)
- [4] Medović, V., *et al.*, *Primena evropskih vrednosti u politikama Republike Srbije*, Univerzitet Privredna akademija u Novom Sadu, Novi Sad, Srbija, 2023, ISBN: 978-86-86121-69-1
- [5] Gu, X., *et al.*, Natural resources extraction and green finance: Dutch disease and COP27 targets for OECD countries, *Resources Policy*, 81 (2023)
- [6] Pupčević, M., *et al.*, Experimental analysis of the justification of using a space heating system using a Peltier thermoelectric generator, *IEEP Industrial Energy and Environmental Protection in the Countries of Southeast Europe*, 8 (2022)
- [7] Pupčević, M., *et al.*, Optimizacija izmenjivača toplote sa prirodnom konvekcijom za sistem grijanja prostora primjenom Peltierovog termoelektričnog generatora, *Energetska efikasnost - ENEF*, 5 (2023)
- [8] Yong, K.K., *et al.*, On the role of radiation view factor in thermal performance of straight-fin heat sinks, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37 (2010), 8, pp. 1087-1095, <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.012>
- [9] Shabany, Y., Radiation heat transfer from plate-fin heat sinks, *IEEE SEMI-THERM Symposium*, 24 (2008), pp. 132-136
- [10] Rea, S.N., West, S.E., Thermal radiation from finned heat sinks, *IEEE Transactions on parts, hybrids, and packaging*, 12 (1976), 2, pp. 115-117
- [11] Teertstra, P., *et al.*, Analytical Forced Convection Modeling of Plate Fin Heat Sinks, *Journal of Electronics Manufacturing*, 10 (2000), 4, pp. 253-261
- [12] Moria, H., *et al.*, Experimental Study of Solar Based Refrigerator Using Thermoelectric Effect, *Energy Procedia*, 158 (2019), pp. 198-203

The Relation between Indoor and Outdoor Air Temperatures in Membrane-Covered Building

Measurements in Winter Conditions

Vuk Milošević¹, Marija Jevrić², Olga Čalasan², Nemanja Randelović¹

¹University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Niš, Serbia

²University of Montenegro, Faculty of Civil Engineering, Podgorica, Montenegro
vukamer@yahoo.com, marijaj@ucg.ac.me

Abstract—Membrane-covered sports buildings have become increasingly common and widely used over the past decades. The primary reasons for selecting membrane covers are twofold: they are more cost-effective than the alternatives and they provide excellent natural illumination. Additionally, they offer protection from direct sunlight, wind, rain, and snow. However, it is well known that single-layer membranes do not provide sufficient thermal insulation. This research aims to investigate the relationship between indoor and outdoor air temperatures in a membrane-covered buildings. It is well established that in warm conditions, the indoor air temperature tends to be higher than the outdoor temperature. However, it remains unclear whether, in cold conditions, the indoor temperature can drop below the outdoor temperature.

To explore this question, a field study was conducted on a selected building in Montenegro, which is entirely enclosed by a membrane structure. Indoor and outdoor air temperatures were recorded simultaneously over a 10-hour period during a winter day. The building was unoccupied during the measurement period, and no temperature control systems were in operation. The results showed that indoor temperatures rose significantly during daylight hours but dropped well below outdoor temperatures during the night. This unexpected nighttime temperature drop calls for further investigation to understand the underlying causes and potential implications for the thermal performance of membrane-covered buildings.

Key words—Membrane structures; air temperature; measurements; winter conditions.

I. INTRODUCTION

The need for energy efficiency in buildings has become a top priority. Engineers are continuously seeking ways to reduce energy consumption and integrate innovative approaches utilizing renewable energy sources. At the same time, financial constraints are a significant consideration, urging designers to develop cost-efficient buildings. Membrane structures meet the demand for affordability well but are known for their low thermal insulation properties. In these structures, the membrane serves both as a covering material and, in many cases, as a load-bearing element. However, membranes are very thin and offer minimal thermal resistance. Therefore, additional improvements are necessary to reduce the energy required to maintain optimal indoor conditions.

This research focuses on the problem of indoor air temperature in a membrane-covered building during winter conditions. Specifically, it aims to confirm or refute claims from users of such buildings that, under certain circumstances, the indoor temperature drops below the outdoor temperature. This phenomenon seems counterintuitive and required scientific verification. If the claim is proven correct, further research will be necessary to identify the factors contributing to this behavior. Conversely, if the claim is proven false, the study will investigate why occupants perceive the indoor temperature as lower than it actually is.

Membrane structures possess unique properties compared to other building materials and structural systems. Their thermal performance has been the subject of multiple studies. Harvie's doctoral thesis [1] was a pioneering work in this field. Since then, various aspects have been analyzed in detail, though a definitive solution to the low thermal resistance of membranes has yet to be developed. One proposed solution is to install insulation on the membrane. Aerogels have been suggested as a potential insulation material [2], while other studies have explored double or multi-layered membrane structures as an alternative [3]. Recent advancements have enabled the installation of photovoltaic systems on membrane surfaces [4], [5]. Although PV systems do not directly reduce energy loss, they contribute to energy generation, albeit at a high initial cost, limiting widespread adoption.

Several studies have examined the thermal behavior of membrane-covered buildings. He and Hoyano analyzed the thermal environment under a semi-enclosed membrane structure in summer conditions [6], [7]. Another study investigated the thermal characteristics and comfort levels in large membrane-enclosed stadiums [8]. A comparison of single and double-membrane configurations has also been conducted [9], and the thermal behavior of the air layer between membrane layers has been analyzed [10]. Researchers from the University of Tokyo have published multiple studies on membrane structures. One paper explored the impact of retractable membranes on the indoor environment of a residential building [11], while another examined the effects of a retractable membrane ceiling in a large swimming hall on energy performance [12] and its long-term performance [13]. Additionally, a review of indoor thermal environments in membrane structures has been presented [14], along with an

analysis of solar radiation heat transfer through membranes [15].

This paper presents research investigating the relationship between indoor and outdoor air temperatures in a membrane-covered building. Measurements were conducted during winter conditions in a single-layer membrane structure. The results will help guide further research and contribute to a better understanding of how membranes affect indoor environments. Understanding this relationship can aid in developing strategies to improve the thermal performance of membrane-covered buildings and reduce their energy consumption.

II. METHODOLOGY

The methodology for this study follows the approach proposed in [16]. This section provides a detailed explanation of the measurement setup used in the research.

A. Selected building

A single membrane-covered building was selected for this study. The building is located in Podgorica, Montenegro, in the western part of the city, in an area called Tološi, situated along Partizanski put street. The building is oriented approximately along a north-south axis. An aerial view of the structure is provided in Figure 1.

The building has a footprint of approximately 24x42 m, with a maximum height of 10.5 m. The supporting structure consists of an arched steel truss framework, with 11 arches spaced 4.2 m apart. The trusses have a height of 0.9 m. The membrane, made of PVC/polyester, serves as the primary covering material. The thickness of the membrane is approximately 1 mm. The north and south facades are also enclosed with the same membrane, without additional structural support.



Fig.1. Aerial view of the analyzed building in Podgorica



Fig.2. Exterior view of the analyzed building in Podgorica



Fig.3. Interior view of the analyzed building in Podgorica

The building is intended for sports activities and is currently used for indoor football. The flooring consists of artificial turf. The structure is a standalone building with no annexes for changing rooms or restrooms. There are no adjacent high-rise buildings, though a large tree is located near its southern side. The building lacks heating, cooling, or ventilation systems. While the membrane had some minor damage, all detected issues were repaired before the study, ensuring there were no unintended openings. The building has only one entrance/exit, located on the northern section of the western wall. Figures 2 and 3 show the exterior and interior views of the building, respectively.

B. Measurements

To investigate whether the indoor temperature could drop below the outdoor temperature, a measurement methodology was established. A simple setup with two air temperature sensors was used. One sensor was placed outside the building, while the other was positioned inside. Both sensors were mounted at a height of 1.5 m. The sensors are very close one to another, as they are placed symmetrically with respect to

the eastern wall, in the middle of the building. The outdoor sensor was shielded from direct sunlight and wind, while the indoor sensor was positioned near the eastern wall. The measurements were recorded using a Testo 735 device. The accuracy of the used sensors is $\pm 0.2^\circ\text{C}$. As no automatic data collection system was available, manual readings were taken. The recording interval was set to 15 minutes, as air temperature fluctuations over shorter intervals were not expected to be significant.

Due to limited resources, measurements could not be conducted over multiple days. Therefore, a single day was selected for data collection, based on the criterion that the expected outdoor temperature range should be significant – ideally fluctuating by at least 10°C throughout the day. In contrast, some expected daily fluctuations were as low as 2°C , which would not provide sufficient data for analysis.

It was hypothesized that during nighttime, the indoor temperature would match the outdoor temperature due to the low insulation properties of the membrane, allowing rapid thermal equilibrium between the two environments. As the sun rises and outdoor temperatures increase, it was expected that the membrane would absorb solar radiation, becoming warmer than the outdoor air. Consequently, it was assumed that the indoor air temperature would rise above the outdoor temperature but remain lower than the membrane surface temperature.

and outdoor air temperatures would be equal before this point. While the official sunrise time was estimated at 7:08, the actual sunrise at the site occurred at 7:40 due to the valley's topography.

For safety reasons, the measuring equipment could not be installed the previous day and was set up upon arrival at the site on the morning of the measurement. However, an oversight occurred when the research team failed to account for the initial temperature of the measuring equipment. Since the devices had been stored indoors at a warm temperature, they were significantly warmer than the air at the measurement site. The time required for the equipment to adapt to the ambient temperature was underestimated, resulting in the first reliable measurement occurring at 8:30. From that point onward, measurements were manually recorded every 15 minutes over a period of 10 hours. The recorded results are presented in Figure 4, showing the temperatures of both indoor and outdoor air.

During the measurement period, the building was not in use, eliminating interference from additional heat sources. The only people present were two research team members who recorded the temperature values. Their presence inside the structure was brief and occurred only at 15-minute intervals, making their influence negligible considering the building's size.

A deciduous tree is located on the south side of the building, casting a shadow on the southern façade. This

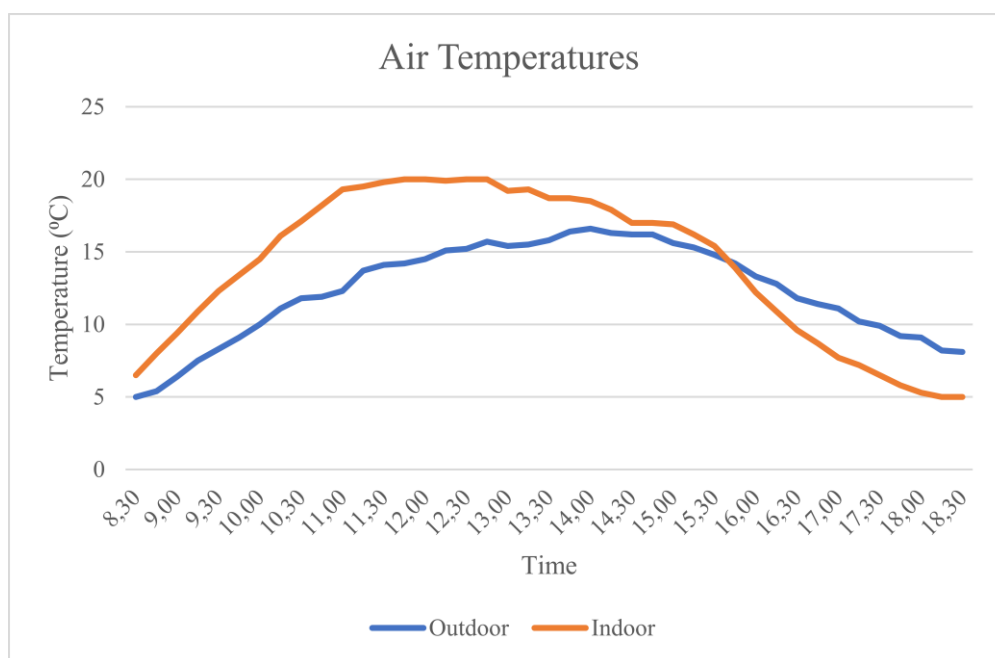


Fig.4. Measured air temperatures at the analyzed building in Podgorica

III. RESULTS

The measurement was conducted in December 2024 at the selected location in Podgorica. The measurement process was intended to begin at sunrise, as it was expected that the indoor

shading effect could influence temperature readings during daylight hours; however, since the measurements were taken in winter when the tree had shed its leaves, its impact was minimal. The building has no heating, ventilation, or air

conditioning systems, meaning that the indoor air temperature was passively controlled by environmental factors alone.

IV. DISCUSSION

The obtained results are presented in the graph in Figure 4, allowing for better comparison and analysis. The first reliable measurement at 8:30 showed that the indoor temperature was already slightly higher than the outdoor air temperature. This was expected, as the sun had already been shining for approximately 50 minutes, warming the membrane and consequently increasing the indoor air temperature.

The outdoor air temperature gradually increased until 14:00, reaching a maximum of 16.6°C. After this point, the temperature began to decline. Minor fluctuations can be observed in the graph, likely caused by wind or cloud cover, but these are not significant to the study's primary focus. The largest increase between two consecutive measurements of outdoor air temperature was 1.4°C. Between 8:30 and 14:00, the temperature decreased only once, by 0.3°C at 13:00. After 14:00, no further increases in outdoor temperature were recorded. The lowest recorded outdoor temperature was 5°C at 8:30.

The indoor air temperature followed a somewhat different pattern. From 8:30 to 11:00, the temperature increased almost linearly. Between 11:00 and 12:45, it remained relatively constant before beginning to decrease. Initially, the decline was slow until 15:30, after which the temperature dropped more rapidly, reaching its lowest point at 18:15. The highest indoor air temperature recorded was 20°C, occurring multiple times between 11:45 and 12:45. Minor fluctuations were recorded, but only one instance of an increase was observed after 14:00, rising by just 0.1°C, which is not significant. The difference between the highest and lowest recorded indoor air temperatures was 15°C.

The temperature of the indoor air shows somewhat different behavior. From 8.30 to 11.00 the temperature increases almost in a linear fashion. Then, until 12.45 it stays relatively constant. Afterwards, it starts decreasing, at first slowly until 15.30, and then more rapidly until it reaches minimum at 18.15. The highest temperature of the indoor air is 20°C, and it is achieved several times between 11.45 and 12.45. Here also some minor fluctuations are recorded. Once the temperature starts to decrease, it increases only once and only by 0.1°C, therefore it is not significant. Difference between the highest and the lowest indoor recorded temperature is 15°C.

The comparison between indoor and outdoor air temperatures is the central focus of this study, and the findings were unexpected. Initially, the temperature trends followed the anticipated pattern, with both temperatures rising due to solar radiation, though the indoor air temperature increased at a faster rate. The earlier peak of indoor air temperature can be attributed to the sun's incident angle, which resulted in the membrane reaching its highest temperature around noon, thereby transferring the most heat to the indoor air. Following this peak, the indoor air temperature began to decline. While the outdoor air was still warming, it slowed the rate of indoor cooling. However, as the outdoor temperature started to

decrease, the indoor air temperature also dropped more rapidly.

What came as a surprise was that the indoor air temperature eventually fell below the outdoor air temperature, which occurred at 15:45. All subsequent measurements confirmed this trend, with the indoor temperature consistently remaining lower than the outdoor temperature.

The difference between the two temperatures reached its maximum at 11:00, with the indoor temperature being 7°C higher than the outdoor air temperature. From that point on, the gap decreased, except for two minor increases. The maximum temperature difference where the outdoor temperature was higher than the indoor temperature occurred at 18:00, with a difference of 3.8°C. This significant difference cannot be attributed to minor fluctuations. The graph provides strong evidence that the indoor temperature dropped below the outdoor temperature, confirming the claims made by users of such buildings.

The scope of this study was not extensive enough to determine the precise reasons for this behavior. It is evident that other factors influence indoor air temperature beyond the initial hypothesis. The assumption was that indoor air temperature would follow outdoor air temperature with a slight lag due to the membrane providing minimal thermal resistance. During the day, this relationship was disrupted by solar radiation, which heated the membrane and, in turn, the indoor air. However, this hypothesis was disproven during nighttime observations. In this research, thermal properties of membrane were not considered, as the goal was to just to compare the air temperatures inside and outside of the building.

V. CONCLUSION

This study investigated the temperature relationship between indoor and outdoor air in a membrane-covered building. The primary objective was to test the claim made by building users that indoor air temperature falls below outdoor temperature at night. It was initially hypothesized that after sunset, indoor and outdoor temperatures would equalize and remain the same until sunrise when the indoor air temperature would rise more rapidly due to membrane heating. The expectation was that the subsequent research will be aimed at identifying the reasons why users perceived indoor air as colder than outdoor air, with a follow-up study planned to analyze influencing factors.

Measurements were conducted in a selected building in Podgorica, chosen for its lack of HVAC systems, absence of occupants during the study, agreement from the owners, intact membrane (preventing unintended ventilation), and status as a typical representative of this type of structure. Data collection was performed using two sensors measuring indoor and outdoor air temperatures, recorded every 15 minutes over a 10-hour period on a winter day.

Unexpectedly, the results confirmed that indoor air temperature did indeed drop below outdoor air temperature at night, with a maximum recorded difference of 3.8°C. During the day, results followed expectations, with indoor

temperatures significantly higher, reaching a maximum difference of 7°C. However, the study did not determine why the indoor air temperature dropped below outdoor temperature at night.

Further research is required to identify the factors responsible for this phenomenon. This study's value, despite limited resources, lies in its unexpected findings, which have prompted a follow-up study to explain this behavior and potentially develop solutions to improve comfort for users of such buildings.

ACKNOWLEDGEMENT

This research is funded by the European Union.

LITERATURE

- [1] G. N. Harvie, An Investigation into the Thermal Behaviour of Spaces Enclosed by Fabric Membranes, PhD thesis, Cardiff University of Wales, Cardiff, UK, 1995.
- [2] J. Hu, W. Chen, Y. Qu, and D. Yang, "Safety and serviceability of membrane buildings: A critical review on architectural, material and structural performance," *Eng. Struct.*, vol. 210, 110292, 2020.
- [3] H. Suo, A. Angelotti, and A. Zanelli, "Thermal-physical behavior and energy performance of air-supported membranes for sports halls: A comparison among traditional and advanced building envelopes," *Energy Build.*, vol. 109, pp. 35-46, Dec. 2015.
- [4] Q. Li and A. Zanelli, "A review on fabrication and applications of textile envelope integrated flexible photovoltaic systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 139, 110678, 2021.
- [5] V. Milošević and J. Marchwiński, "Photovoltaic technology integration with tensile membrane structures: A critical review," *Tech. Gaz.*, vol. 29, pp. 702-713, 2022.
- [6] J. He and A. Hoyano, "Measurement and simulation of the thermal environment in the built space under a membrane structure," *Build. Environ.*, vol. 44, no. 6, pp. 1119-1127, 2009.
- [7] J. He and A. Hoyano, "Measurement and evaluation of the summer microclimate in the semi-enclosed space under a membrane structure," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 1, pp. 230-242, 2010.
- [8] J. Hu, W. Chen, S. Zhang, Y. Yin, Y. Li, and D. Yang, "Thermal characteristics and comfort assessment of enclosed large-span membrane stadiums," *Appl. Energy*, vol. 229, pp. 728-735, 2018.
- [9] D. Kostic, V. Milosevic, V. Bogdanovic, M. Vasov, and A. Vucur, "Influence of single and double membrane roofs on thermal behaviour of enclosed space," *Tehnički vjesnik*, vol. 25, Suppl. 1, pp. 188-196, 2018.
- [10] D. Kostic, V. Bogdanovic, M. Ilic, M. Vasov, and V. Milosevic, "The thermal behaviour of a cylindrical air layer enclosed between double fabric roof membranes," *Tehnički vjesnik*, vol. 28, no. 5, pp. 1727-1734, 2021.
- [11] J. Hu, K. Kawaguchi, and J. Ma, "Retractable membrane ceilings for indoor thermal environment of residential buildings," *Build. Environ.*, vol. 146, pp. 289-298, 2018.
- [12] J. Hu, K. Kawaguchi, and J. Ma, "Retractable membrane ceilings for enhancing building performance of enclosed large-span swimming stadiums," *Eng. Struct.*, vol. 186, pp. 336-344, 2019.
- [13] J. Hu, K. Kawaguchi, and J. Ma, "Long-term building thermal performance of enclosed large-span swimming stadiums with retractable membrane ceilings," *Energy Build.*, vol. 207, 109363, 2020.
- [14] G. Tian, Y. Fan, X. Zhang, H. Wang, W. Xie, and K. Peng, "Analysis of solar radiation heat transfer of architectural fabric membrane material," *J. Eng. Fibers Fabr.*, vol. 15, 2020.
- [15] G. Tian, Y. Fan, M. Gao, H. Wang, H. Zheng, J. Liu, and C. Liu, "Indoor thermal environment of thin membrane structure buildings: A review," *Energy Build.*, vol. 234, 110704, 2021.
- [16] V. Milošević, M. Jevrić, O. Čalasan, and N. Randelović, "Testing membrane structures as thermal barriers in winter conditions: A step towards a sustainable built environment," *International Conference on Urban Planning ICUP 2025*, Niš.

SAŽETAK

Sportske hale prekrivene membranom veoma su česte i intenzivno korišćene u poslednjim decenijama. Razlozi zbog kojih se membrana bira kao material za pokrivanje su dvostruki: jeftinija je od alternativnih rešenja i obezbeđuje odlično prirodno osvetljenje. Pored toga, pruža dobru zaštitu od direktne sunčeve svetlosti, vetra, kiše i snega. Međutim, poznato je da membrane sa jednim slojem ne omogućavaju dovoljnu toplotnu zaštitu. Ovo istraživanje ima za cilj da utvrdi odnos između unutrašnje i spoljašnje temperature vazduha u objektima prekrivenim membranom. Poznato je da se u toplim spoljašnjim uslovima vazduh unutar objekta zagreva više nego spoljašnji. Ipak, nije jasno da li temperatura vazduha unutar objekta može biti niža od spoljašnje temperature u hladnim spoljašnjim uslovima.

Kako bi se odgovorilo na ovo pitanje, sprovedeno je istraživanje na odabranom objektu u Crnoj Gori, koji je u potpunosti zatvoren membranskom strukturom. Unutrašnja i spoljašnja temperatura vazduha beležene su istovremeno tokom perioda od 10 sati u jednom zimskom danu. Tokom merenja objekat nije bio u upotrebi, a sistemi za regulaciju temperature ne postoje. Rezultati su pokazali da se unutrašnja temperatura značajno povećava tokom dana, ali tokom noći opada znatno ispod spoljašnje temperature. Ovaj neočekivani noćni pad temperature ukazuje na potrebu za dodatnim istraživanjima kako bi se razumeli uzroci i moguće posledice po toplotne karakteristike objekata prekrivenih membranama.

ODNOS IZMEĐU UNUTRAŠNJE I SPOLJAŠNJE TEMPERATURE VAZDUHA HALE POKRIVENE MEMBRANOM

Vuk Milošević, Marija Jevrić, Olga Čalasan, Nemanja Randelović

User's Perception on Thermal Comfort in Educational Building Before Energy Renovation of the Building Envelope

Slobodan Peulić¹, Ljubiša Preradović¹, Darija Gajić¹, Biljana Antunović¹, Jelena Kljakić¹, Milovan Kotur², Milan Pupčević², Saša Čvoro¹

¹University of Banja Luka, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina

² University of Banja Luka, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, Republic of Srpska, Bosnia and Herzegovina
slobodan.peulic@aggf.unibl.org, ljubisa.preradovic@aggf.unibl.org, darija.gajic@aggf.unibl.org,
biljana.antunovic@aggf.unibl.org, jelena.kljakic@aggf.unibl.org, milovan.kotur@mf.unibl.org, milan.pupcevic@mf.unibl.org,
sasa.cvoro@aggf.unibl.org

Abstract— The research analyzes the subjective thermal comfort perception of the Faculty of Physical Education and Sport users at the University of Banja Luka. The survey was designed in accordance with the review and requirements of the EN ISO 7730 and BAS EN 16798-1 standards to provide insight into the structure and behavior of the users (length of stay at the institution, work habits, position, and nature of workplace use, clothing level, etc.) and to determine the thermal comfort levels in the workplace during winter and summer. The survey included a total of 64 respondents (42 employees and 22 students) to identify key issues related to indoor thermal comfort before the energy renovation, which would later serve as a basis for reassessment after the renovation. In addition to the survey, the existence of mechanical air conditioning appliances was assessed, along with their usage frequency and temperature variations during the workday. The research results indicated greater user satisfaction during the winter season compared to the summer, where it was evident that the majority of users perceived workplace conditions as fairly warm to excessively warm during the summer months.

Key words—*thermal comfort, Indoor environmental quality, users perception, workplace conditions*

I. INTRODUCTION

Understanding how spatial characteristics and environmental conditions affect the comfort and energy-related behavior of building occupants is important for improving the performance of educational building. This study focuses on identifying differences in thermal comfort between university staff and students, with the aim of gathering the data before energy renovation measures in the building of the Faculty of Physical Education and Sport at the University of Banja Luka and compare it after the renovation is done. According to the EN 16798-1 standard, indoor air quality is determined by air temperature, relative humidity, ventilation rate, and CO₂ concentration, which are influenced by the quality and sealing of the building envelope, the number of occupants in the room (occupancy), user behavior, air exchange rate, and, of course, the quality of outdoor air [1-2]. Compared to residential and office buildings, educational

buildings have 3-4 times higher user density [3]. Indoor environmental quality is primarily determined by thermal comfort and indoor air quality [4].

The analysis of parameters affecting building energy efficiency is conducted within a broader study in Case Study 1 – Energy-Efficient Renovation of Public Buildings at University of Banja Luka (UNIBL), as part of the ENPOWER project – Strengthening Scientific Capacity for Energy Poverty, coordinated by the University of Banja Luka. These Analyses are carried out on representative examples of public educational university buildings constructed and renovated in different periods, aligning with previous European projects that emphasize building renovation as key to addressing energy poverty [5-7]. Thermal comfort is based on six key parameters: environmental factors (air temperature, air velocity, mean radiant temperature, and relative humidity) and personal factors (metabolic activity and thermal resistance of clothing). Beyond measurable thermal comfort parameters, conducting surveys is essential to gain insights into user satisfaction with the indoor environment, as well as to consider physiological and subjective parameters such as the sense of thermal comfort at ankle height, head height, clothing level, etc.

Previous research by Wang and Norbäck on subjective indoor air quality (SIAQ) and thermal comfort indicates that complaints related to room temperature may reflect a suboptimal thermal environment, while factors such as excessive indoor humidity, insufficient thermal insulation, window condensation, and the presence of dampness or mold can significantly impair SIAQ. [8] Complementing these findings, another study suggests that student thermal comfort during periods of natural ventilation is primarily influenced by operative temperature and perceived air movement, with relatively low sensitivity to humidity levels or objective indicators of indoor air quality. [9]

The methodology used to create the survey was based on the EN ISO 7730 standard. This standard defines two parameters for quantifying thermal comfort – PMV and PPD.

PMV (Predicted Mean Vote) predicts the average response of a group of people exposed to the same environment; however, since individual responses may vary significantly around the average value, it is also useful to predict the number of people who will adequately assess thermal comfort. PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) is an index that provides a quantitative estimate of thermally dissatisfied individuals, i.e., those who feel either too warm or too cold. According to this standard, the assessment is conducted on a seven-point scale (from -3 to +3) of thermal comfort, encompassing factors of warmth, cold, and neutral perception (0). PMV and PPD express the overall sense of thermal comfort, but thermal discomfort may also arise from unwanted cooling or heating of specific body parts. The most common cause of local discomfort is draught, but it may also be triggered by a large temperature difference between the head and ankles, overly warm or overly cold floors, or excessive temperature gradients within the room's height [10].

II. SURVEYING USERS IN THE BUILDING OF THE FACULTY OF THE PHYSICAL EDUCATION AND SPORT AT THE UNIVERSITY OF BANJA LUKA

The research was conducted in the premises of the Faculty of Physical Education and Sport at the University of Banja Luka, including students (20) and employees (42). The building housing the Faculty of Physical Education and Sport is a freestanding structure with two floors (ground floor + 1) and a storage area in the basement. It was built in 1968, lacks thermal insulation on the envelope, and has original wooden-framed windows with ordinary double glass in single-hung frames.



Fig. 1. Faculty of Physical Education and Sport at UNIBL

It is representative of the construction of such buildings during the period from World War II until the introduction of the first thermal regulations related to building envelopes (1945–1970). Examining the building's functional layout reveals that it is a three-tract structure, horizontally divided into an administrative section and a section designated for classrooms (Figure 2). Administrative offices are predominantly oriented to the north, with fewer rooms on the south side. Additionally, the building contains larger halls used by permanent staff and occasional users. The left part of the building is designated for training halls and lecture rooms. Figure 1 shows the locations of the rooms where user surveys were conducted.

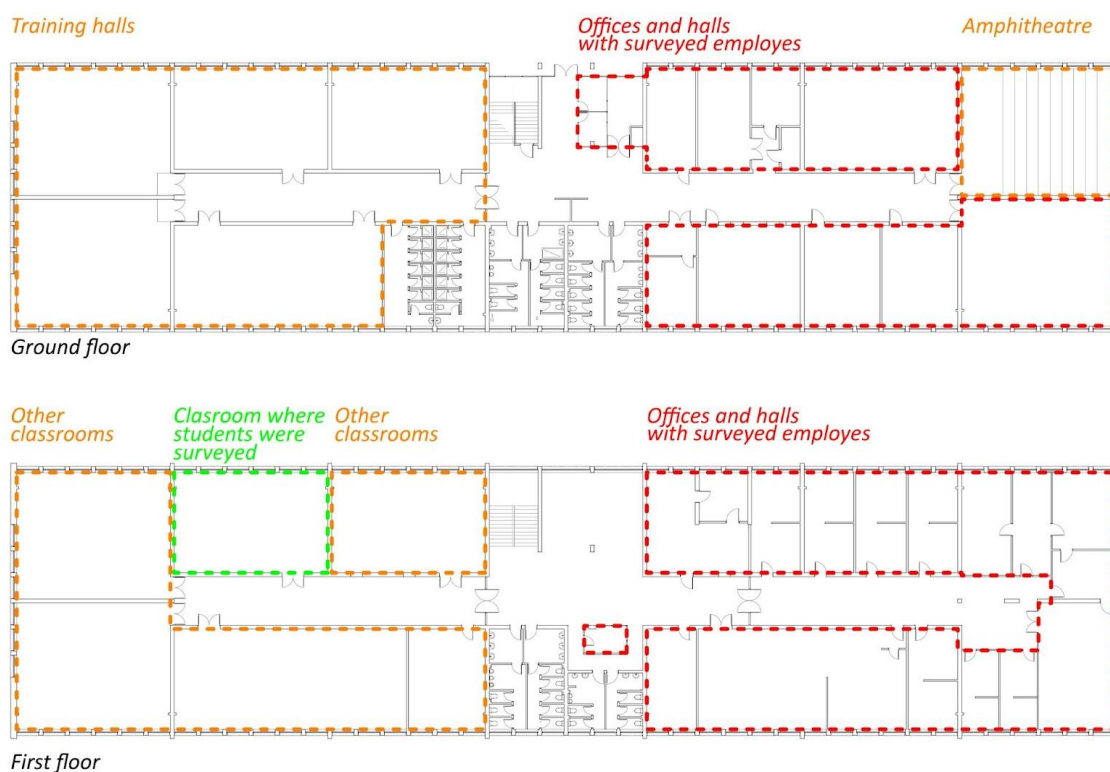


Fig. 2. Faculty of Physical Education and Sport at UNIBL – floor plans

III. RESEARCH METHODOLOGY

Previous research has defined three approaches to assessing thermal comfort: subjective perception, measurement of thermal comfort parameters using devices, and digital simulations of physical parameters. This research is based on a combination of user survey data and analysis of specific physical parameters of the workspace. Surveys were conducted among students and employees, with respondents divided into two groups to enable analysis of differences between permanent and occasional users of the space, as well as between age-differentiated categories of respondents. The research covered various parts of the building to ensure data representativeness. In addition to subjective assessments of thermal comfort, physical characteristics of the workplace were analyzed, including the distance from windows and heating elements, the presence and frequency of use of air conditioning and ventilation systems, and temperature variations during the workday. This data provided a more detailed understanding of the factors influencing users' thermal comfort. Descriptive statistical methods were used for data analysis. The comparison of mean variable values was performed using the Independent Samples t-test. The relationship between categorical variables, presented in contingency tables, was examined using the χ^2 test with Yates' correction. Fisher's Exact Test was used for frequencies less than five (5) in an individual table. A significance level of $p = 0.05$ was applied. Data analysis and statistical processing were carried out using SPSS (Statistical Product and Service Solutions), version 22.

The average age for employees was 47.5 years, while students averaged 23.75 years. In terms of Body Mass Index (BMI), employees had an average BMI of 25.08, while students had an average BMI of 23.76. Employees had spent an average of 14.14 years in the faculty premises, whereas students had spent an average of 1.82 years. Regarding daily presence in the building, 92.86% of employees spend between 4 and 8 hours daily, while students generally stay for 1-4 hours daily (13.64%). During summer, lightweight clothing was predominantly worn by students (81.82%), whereas employees typically wore normal clothing (57.14%). In winter, students often wore winter clothing indoors (71.43%), while employees mostly wore normal work clothing (52.38%). Physical activity levels during work tasks showed that static activities like reading and writing were most common for both employees (47.37%) and students (72.72%). Very light physical activity was recorded in 34.21% of employees and 13.64% of students; light physical activity was recorded in 2.63% of employees, while moderate to heavy physical activity was recorded in 15.79% of employees and 13.64% of students. When it comes to body position during work, 72.73% of students work while sitting relaxed, and 27.27% sit upright. Employees reported working in the following positions: sitting activity (58.33%), sitting relaxed (25%), leaning forward (13.89%), and sitting light activity (2.78%).

A statistically significant difference ($p < 0.001$) was found in the duration of time spent in the building by employees and students during the day, as well as in clothing levels during the summer ($p = 0.004$) (Table 1).

TABLE I. SURVEY ANALYSIS

		employees	students	p
Gender	Male	22 (52,38%)	14 (63,64%)	0,551 ^Δ
	Female	20 (47,62%)	8 (36,36%)	
Age	Mean	47,5	22,23	
	St. Deviation	9,136	3,116	
Body Mass Index(kg/m ²)	Mean	25,0761	23,7552	0,135 [§]
	St. Deviation	3,3938	2,96949	
Stay in the premises of the faculty (years)	Mean	14,139	1,818	
	St. Deviation	7,3294	1,1807	
Stay in the faculty premises during the day	1 - 4 hours	3 (7,14%)	19 (86,36%)	< 0,001 [▽]
	more than 4 hours	39 (92,86%)	3 (13,64%)	
level of clothing in summer	light summer clothing	18 (42,86%)	18 (81,82%)	0,004 [▽]
	normal clothing	24 (57,14%)	4 (18,18%)	
Level of clothing in winter	winter clothing inside room	20 (47,62%)	15 (71,43%)	0,128 ^Δ
	normal work clothing	22 (52,38%)	6 (28,57%)	
The degree of activity when performing the work task	static activities such as reading and writing	18 (47,37%)	16 (72,72%)	
	very light physical activity	13 (34,21%)	3 (13,64%)	
	light physical activity	1 (2,63%)	0	
	moderate to heavy physical activity	6 (15,79%)	3 (13,64%)	
Body position at the workplace	leaning forward	5 (13,89%)	0	
	sitting relaxed	9 (25%)	16 (72,73%)	
	sitting activity	21 (58,33%)	6 (27,27%)	
	sitting light activity	1 (2,78%)	0	

^Δ χ^2 test with correction according to Yates, [§] Independent Samples t test, [▽] Fisher's Exact Test

In the analysis of thermal comfort, in addition to subjective parameters of thermal comfort, physical characteristics of the workplace were also considered (Table 2). These characteristics include:

- Distance of the workplace from the radiator – being too close can lead to overheating, while being too far can result in a feeling of cold, especially in the winter months. The average distance of the workplace from the radiator is

238.21 cm for employee workplaces, while it is 467.14 cm for places in lecture halls.

- Distance of the workplace from the window – workplaces near windows may be exposed to drafts, and if the window sealing is poor, users may feel slight infiltration of external air. The average distance of the workplace from the window for employee workplaces is 259.23 cm, while it is 486.23 cm for places in lecture halls.
- Distance of the workplace from the door – this can cause more direct exposure to the air temperature in the hallway, while more distant places may have more stable conditions. The average distance of the workplace from the door for employee workplaces is 346.43 cm, while it is 520.82 cm for places in lecture halls. This parameter shows that in most rooms, workplaces are positioned closer to windows than to doors.

Testing the positions of workplaces in employee rooms and student lecture halls resulted in highly statistically significant differences ($p < 0.0001$) both in relation to the radiator, window, and door (Table 2). This can be attributed to the key characteristics of the spaces where students and employees predominantly spend their time. Faculty staff typically spend the majority of their working hours in smaller offices, where their workstations are positioned closer to windows, radiators, and/or air conditioning units. In contrast, students primarily occupy larger lecture halls, with opposite spatial and environmental features than offices.

TABLE II. POSITION OF WORKPLACES IN EMPLOYEE ROOMS AND STUDENT LECTURE HALLS IN RELATION TO THE RADIATOR, WINDOW, AND DOOR

		employees	students	p
The distance of the workplace from the radiator (cm)	Mean	238.21	467.14	< 0,001 [§]
	St. Deviation	170.336	241.679	
The distance of the workplace from the window (cm)	Mean	259,23	486,23	< 0,001 [§]
	St. Deviation	145,970	241,662	
Distance from the workplace to the door (cm)	Mean	346,43	520,82	< 0,001 [§]
	St. Deviation	156,717	179,126	

[§]Independent Samples t test

Since the rooms do not have a centrally regulated ventilation and cooling system, it was interesting to analyze the presence of individual devices in offices and lecture halls used to regulate these conditions. Table 3 shows the data from surveys regarding the use of these devices, and it was concluded that the use of cooling devices is more pronounced during the summer months – 18 employees reported using such devices, while 22 do not; it was also found that the temperature in the room changes significantly during the workday in the summer months – 21 employees and 6 students reported temperature changes, while 20 employees and 16 students claimed there were no significant changes (Table 3).

Testing the responses of employees and students regarding the use of heating and cooling devices and temperature changes revealed a highly statistically significant difference in the use of additional heating devices during the winter ($p = 0.002$) and for cooling devices in the summer ($p < 0.0001$), while ventilation with mechanical devices in the summer showed a statistically significant difference ($p = 0.043$) – Table 3. This can be explained by the fact that only a limited number of offices are equipped with air conditioning units, whereas none of the classrooms have such systems. As a result, a statistically significant difference has emerged.

TABLE III. THERMAL COMFORT – USE OF HEATING AND COOLING DEVICES AND TEMPERATURE CHANGES

		employees	students	p
Ventilation of the room with mechanical devices - in winter	yes	3 (7,5%)	0	0,546 [▽]
	no	37 (92,5%)	22 (100%)	
Ventilation of the room with mechanical devices - in summer	yes	8 (19,05%)	0	0,043 [▽]
	no	34 (81,04%)	22 (100%)	
Using additional devices to heat the room in winter	yes	13 (31,71%)	0	0,002 [▽]
	no	28 (68,29%)	22 (100%)	
Using additional devices to cool the room in summer	yes	18 (42,86%)	0	0,0001 [▽]
	no	24 (57,14%)	22 (100%)	
The temperature changes significantly during the working day - in winter	yes	13 (32,5%)	6 (33,33%)	1,000 ^Δ
	no	27 (67,5%)	12 (66,66%)	
The temperature changes significantly during the working day - in the summer	yes	21 (51,22%)	5 (23,81%)	0,072 ^Δ
	no	20 (48,78%)	16 (76,19%)	

[▽] Fisher's Exact Test, ^Δ χ^2 test with correction according to Yates

IV. DISCUSSION

As previously explained, EN ISO 7730 defines the analysis of thermal comfort through PMV and PPD, taking into account factors related to the feeling of thermal comfort at ankle height and at head height, in both summer and winter seasons.

The analysis of the conducted survey led to the following conclusions (the answers with the highest percentage of respondents are explained) – Table 4 and Graph 1.

Most employees rated thermal comfort at ankle height during the winter months as neutral or quite cool, while students gave similar responses, mostly neutral or cool. When analyzing the feeling of thermal comfort at head height in winter, the responses were somewhat more uniform – 21 employees and 14 students rated this parameter as neutral/comfortable. Thermal comfort at ankle height in the summer – employees rated it with 10 votes as neutral/comfortable and 12 votes as warm, while 11 students

also rated it as neutral/comfortable and 5 as quite warm. The last parameter that is thermal comfort at the head height in the summer – both employees and students rated it outside the

neutral zone. Fifteen employees stated that the thermal comfort feeling was too warm, and 12 said it was warm, while 7 students found it warm and 6 quite warm

TABLE IV. THERMAL COMFORT FEELING IN THE WORKPLACE – RESULTS OF THE SURVEY

		too warm	warm	quite warm	Neutral / pleasant	Quite cool	cool	cold	Total
A feeling of thermal comfort at the height of the ankle - in winter	employees	1	3	3	13	14	5	2	41
	students	0	2	0	11	2	4	2	21
Feeling of thermal comfort at head height - in winter	employees	1	5	3	21	6	4	1	41
	students	1	2	0	14	4	1	0	22
A feeling of thermal comfort at the height of the ankle - in summer	employees	9	12	7	10	0	1	2	41
	students	1	4	5	11	1	0	0	22
Sensation of thermal comfort at head height - in summer	employees	15	12	5	8	0	1	0	41
	students	3	7	6	5	1	0	0	22

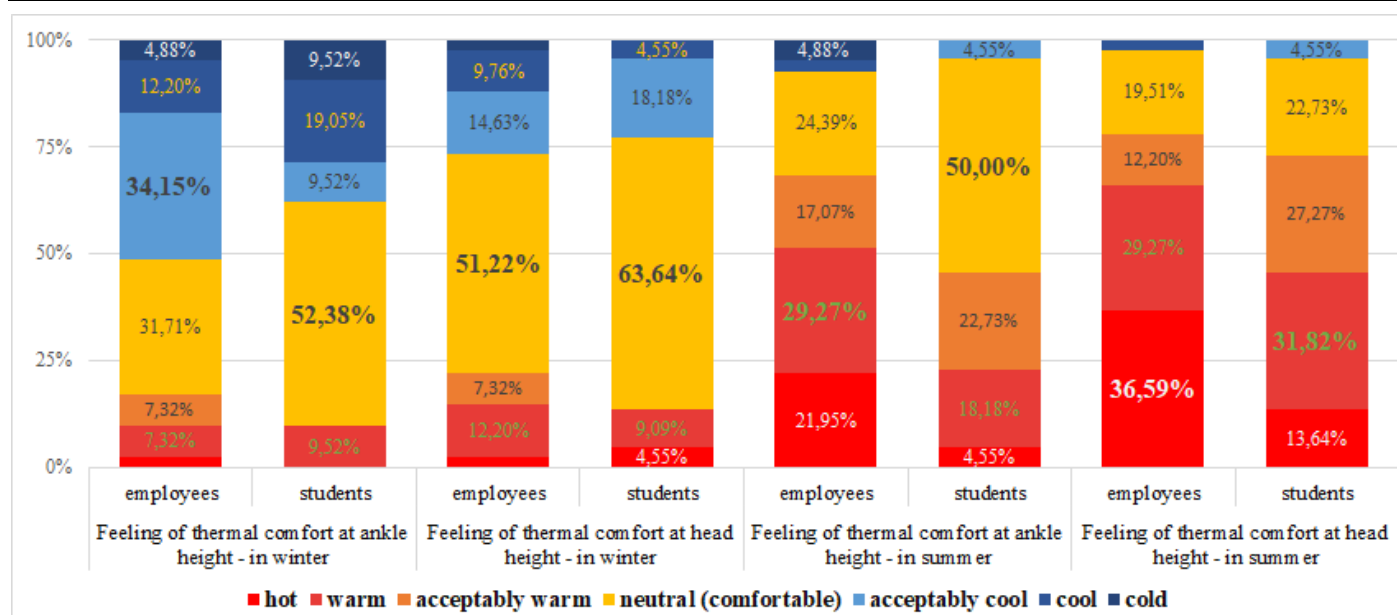


Fig. 3. Thermal comfort feeling in the workplace – results of the survey

Distribution of responds is shown in Table V and Figure 4. It is noticeable how employees showed worse thermal perception in summer period with values ranging from acceptably warm to warm, what does not fit to comfort zone.

TABLE V. FEELING OF THERMAL COMFORT IN THE WORKPLACE

	employees	students
ankle height - winter	-0,44	-0,57
head height - winter	-0,02	0,05
ankle height - summer	1,22	0,68
head height - summer	1,76	1,27

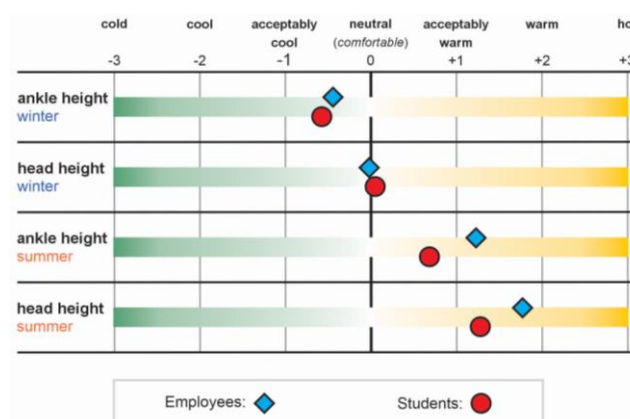


Fig. 4. Feeling of Thermal Comfort in the workplace

V. CONCLUSION

A survey on users' subjective feeling of thermal comfort in the educational building (FPES) covered 64 respondents (42 employees and 22 students), achieving a sample that includes different age groups and users who spend varying amounts of time in the building. For the purposes of the study, a survey was conducted in accordance with the EN ISO 7730 standard, along with space mapping to determine the position of workspaces in relation to key parameters influencing thermal comfort.

The survey revealed differences in thermal comfort perceptions between employees and students, with seasonal and height-related variations. In winter, both groups rated thermal comfort at ankle height as neutral to cool, while at head height, most found it neutral or comfortable. In summer, employees felt warmer, especially at head height, where many rated it as too warm. Overall, employees reported more discomfort than students, particularly in the summer months. These findings suggest the need for targeted adjustments to improve thermal comfort in the workplace, especially during warmer seasons.

The results showed that users perceive their subjective comfort better during the winter months, while in the summer months, responses tended to indicate feelings of warm and excessively warm indoor conditions. This research will be extended to include the measurement of physical parameters of indoor comfort, allowing for a comparison between these two methods. Additionally, the study will be repeated after the building renovation process to assess the impact of the renovation and improvement of comfort on both the subjective feeling of comfort and the real physical parameters of thermal comfort.

LITERATURE

- [1] International Standardisation Organisation, EN 16798-1 Energy performance of buildings - Ventilation for buildings
- [2] Antunović, B., Janković A., Gajić D., Antović N., Rašović J., Čurguz Z., Popović M., The First Test of Indoor Air Quality in Kindergartens ... *Thermal science*, 2024, Vol. 28, No. 3B, pp. 2565-2578
- [3] Chithra, VS., Nagendra, Shiva SM. 2012. "Indoor air quality investigations in a naturally ventilated school building located close to an urban roadway in Chennai, India", *Building and Environment*, 54, 159-167.
- [4] Antunović B., Gajić D., Stupar D., Energetska efikasnost predškolskih ustanova u Banjoj Luci, University of Banja Luka, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Geodesy, Banja Luka, 2020
- [5] Longo, Danila, Giulia Olivieri, Rossella Roversi, Giulia Turci, Beatrice Turillazzi. 2020. "Energy Poverty and Protection of Vulnerable Consumers. Overview of the EU Funding Programs FP7 and H2020 and Future Trends in Horizon Europe" *Energies*, 13(5), 1030; <https://doi.org/10.3390/en13051030>
- [6] Gangale, Flavia, and Anna Maria Mengolini. 2019. "Energy poverty through the lens of EU research and innovation projects", EUR 29785 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-08676-5, doi:10.2760/972106, JRC113953
- [7] Toleikyte, A., Bointner R., Energy Efficient Design in Shopping Centres - a pathway towards lower energy consumption
- [8] Wang J., Norbäck D., Subjective indoor air quality and thermal comfort among adults in relation to inspected and measured indoor environment factors in single-family houses in Sweden-the BETSI study, *Science of The Total Environment*, 2022, Vol. 802
- [9] Miao S., Gangoelle M., Tejedor B., Investigating students' subjective comfort with window-airing during the cold season: Thermal sensation, humidity, air movement, and perceived air quality, *Building and Environment*, 2025, Vol. 278
- [10] International Standardisation Organisation, ISO 7730:2005 - Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria

САЖЕТАК

Истраживање анализира субјективни осјећај топлотног комфора корисника Факултета физичког васпитања и спорта Универзитета у Бањој Луци. Анкета је осмишљена у складу са прегледом и захтјевима стандарда *EN ISO 7730* и *BAS EN 16798-1* на начин да се изврши увид у структуру и понашање корисника (дужину боравка у институцији, радне навике, позицију и карактер кориштења радног мјеста, степен одјевености и др.); те да се утврди осјећај топлотне угодности на радном мјесту зими и лјети. Сprovedена анкета обухватила је укупно 64 испитаника (42 запослена и 22 студената) како би се идентификовали кључни проблеми везани за унутрашњи осјећај топлотне угодности прије енергетске обнове нетранспарентног И транспарентног омотача зграде, а што би касније служило и као ослонац за поновно испитивање након спроведене обнове зграде. Поред спроведене анкете, извршено је и утврђивање постојања механичких уређаја за климатизацију и вентилацију, учесталост њиховог коришћења и промјене температуре током радног дана. Резултати истраживања показали су веће задовољство корисника у зимској сезони поредећи са лјетном, гдје је видљиво да већина корисника сматра услове на радном мјесту прилично топлим до сувише топлим у лјетним мјесецима.

ИСПИТИВАЊЕ КОРИСНИКА О ОСЈЕЋАЈУ ТОПЛОТНОГ КОМФОРА У ЗГРАДИ ОБРАЗОВНЕ НАМЈЕНЕ ПРИЈЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ОБНОВЕ ОМОТАЧА ЗГРАДЕ

Слободан Пеулић, Љубиша Прерадовић, Дарија Гајић, Биљана Антуновић, Јелена Кљакић, Милован Котур, Милан Пупчевић, Саша Чворо

Energetski jaz u potrošnji toplinske energije školskih zgrada u regiji sjever Federacije BiH

Dragan Katić¹, Hrvoje Krstić²

¹ Sveučilište u Mostaru, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Mostar, BiH

² Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet, Osijek, Hrvatska
dragan.katic@fgag.sum.ba, hrvoje.krstic@gfos.hr

Sažetak—U ovom radu se prikazuju rezultati istraživanja energetskog jaza ili razlike između stvarne i izračunate potrošnje toplinske energije za postojeće stanje školskih zgrada (osnovne i srednje škole) u regiji sjever Federacije Bosne i Hercegovine (RS FBiH). Istraživanje je provedeno prikupljanjem podataka iz dokumenata detaljnih energetskih audita na uzorku od 138 školskih zgrada u RS FBiH i dio je šireg istraživanja čija je svrha analiza energetskih karakteristika školskih zgrada u FBiH i određivanje njihove povezanosti sa troškovima toplinske energije kroz razvoj novih modela koji omogućavaju jednostavniju i bržu procjenu troškova toplinske energije. Rezultati analize potrošnje isporučene toplinske energije za grijanje pokazuju kako stvarna potrošnja iznosi 64% od proračunski potrebne i ukazuje na energetski jaz ili odstupanje između stvarnih i proračunskih (izračunatih) vrijednosti potrošnje toplinske energije.

Ključne riječi—energetske karakteristike; energetski jaz; isporučena toplinska energija za grijanje; detaljni energetski audit;

I. UVOD

Da bi se procijenile energetske karakteristike (engl. Energy Performance) zgrada, potrebno je usporediti izračunate ili izmjerene performanse zgrade s nekom referentnom vrijednošću ili okvirom (dopuštenom vrijednošću sukladno važećim propisima). Te vrijednosti mogu predstavljati karakteristike građevinskih dijelova ovojnice zgrada (poput U-vrijednosti) ili potrošnje energije pojedinih sustava zgrada [1]. Problem ocjene energetskih karakteristika zgrada može se promatrati kroz dva glavna pristupa, ocjenu potreba i ocjenu stvarne potrošnje. Potrebe se mogu definirati kao proračun koji se temelji na energiji kroz energetski model zgrade. Stvarne potrebe povezane su sa svakodnevnom uporabom i korištenjem zgrade [2]. Ocjena energetskih karakteristika zgrade je mjerilo kvalitete zgrade u odnosu na energetske efikasnost. Što je niži energetski razred to je zgrada lošija u smislu postignutih toplinskih karakteristika, ali isto tako veća je prilika za smanjenje emisije ugljika i poboljšanje energetskih karakteristika zgrade. Međutim, ocjena ne daje informacije o tome kako zgrada funkcionira u stvarnim uvjetima uporabe jer je energetski razred određen prema standardiziranim uvjetima korištenja zgrade i proračunskim vrijednostima potrošnje energije [3].

Način korištenja zgrade, ponašanje korisnika u smislu režima rada sustava grijanja zgrade i njegovih postavki i drugi čimbenici utječu na to da dolazi do značajnih razlika između stvarne potrošnje toplinske energije i očekivane ili izračunate sukladno važećim propisima i standardima.

Energetski jaz (engl. Energy Performance Gap) se definira kao razlika između stvarne (izmjerene) potrošnje energije i očekivane (izračunate) potrošnje energije [4]. Stvarna potrošnja energije može biti niža ili viša od izračunate potrošnje. Glavni čimbenici koji doprinose pojavi energetskog jaza su neuzimanje u obzir način ponašanja korisnika i aproksimacije koje se provode prilikom izrade modela za izračun energetskih karakteristika. U literaturi se energetski jaz izračunava kao razlika u potrošnji stvarne i izračunate energije u odnosu na izračunatu potrošnju energije [5].

Na energetski jaz između stvarne i izračunate potrošnje toplinske energije upućuje i niz istraživanja diljem svijeta i najvećim dijelom ukazuju na veću potrošnju stvarne od izračunate. Međutim, provedena istraživanja rijetko su se fokusirala na obrazovne zgrade. Van Dronkelaara i ostali utvrdili su da je veličina razlike u odstupanju + 34%, uz standardno odstupanje od 55% na temelju analize 62 zgrade. Isto istraživanje ukazuje na prosječni energetski jaz od 67 % za škole i za zgrade sveučilišta. Ovaj rad utvrđuje da su dominantni uzroci odstupanja specifična nesigurnost u modeliranju, ponašanje korisnika, i loša operativna praksa [1]. Istraživanje provedeno u Ujedinjenim Arapskim Emiratima pokazalo je da stvarna potrošnja energije u školama može biti veća za 60-70 % od izračunate, a do 85 % veća za sveučilišne zgrade [6]. Istraživanje provedeno na 32 sveučilišne zgrade u Španjolskoj pokazalo je da je stvarna potrošnja energije za oko 30 % veća od one prikazane u energetskim certifikatima [7]. Istraživanje 15 školskih zgrada u UK pokazuje kako postoji značajan jaz između proračunskih i stvarnih energetskih karakteristika zgrada, uglavnom zbog nedostatka razumijevanja čimbenika koji utječu na potrošnju energije. Čimbenici koji prema ovom istraživanju imaju najveći utjecaj na jaz ili odstupanje u potrošnji energije su pojednostavljeni modeli proračuna, promjene između projektirane i izgrađene zgrade, korisnici (imaju veliki utjecaj na energetske karakteristike zgrada jer kontroliraju unutarnju temperaturu, ventilaciju, rasvjetu, opremu i toplu vodu), uporaba, održavanje i kontrola zgrade [8]. Istraživanje provedeno na pet srednjih škola u Engleskoj koje su trebale biti zgrade s niskom potrošnjom energije je pokazalo da 80% tih zgrada koristi više energije nego što se očekivalo [9]. Prema podacima Instituta za energiju u UK iz 2013. godine pokazuje se kako je stvarna potrošnja toplinske energije u školskim zgradama za 48% veća od proračunski potrebne toplinske energije [10].

Iz pregleda literature može se zaključiti da je stvarna potrošnja energije potrošnja veća od proračunske uz pozitivan energetski jaz u rasponu od 60 % do 85 %.

Među svim javnim zgradama, zbog svoje obrazovne svrhe, školske zgrade imaju veliku društvenu važnost. Stoga su energetske karakteristike ovih zgrada od velikog značaja, zajedno s odgovarajućim razinama kvalitete unutarnjeg okoliša [11]. Toplinska udobnost važan je preduvjet u školama. Kada se postigne toplinsko zadovoljstvo korisnika zgrade, kaže se da je postignuta toplinska udobnost [12].

U ovom radu prikazani su rezultati istraživanja energetske karakteristike za postojeće stanje školskih zgrada (osnovne i srednje škole) u regiji sjever Federacije Bosne i Hercegovine (RS FBiH), koja predstavlja kontinentalni dio BiH, i koje se odnose na usporedbu stvarne i izračunate potrošnje isporučene toplinske energije. Istraživanje je provedeno prikupljanjem podataka iz dokumenata detaljnih energetske audita (DEA) na uzorku od 138 školskih zgrada u RS FBiH i dio je šireg istraživanja čija je svrha analiza energetske karakteristike školskih zgrada u FBiH i određivanje njihove povezanosti sa troškovima toplinske energije kroz razvoj novih modela koji omogućavaju jednostavniju i bržu procjenu troškova toplinske energije.

II. STATISTIČKI UZORAK ŠKOLSKIH ZGRADA U FBiH

Prema dokumentu Tipologija javnih zgrada u Bosni i Hercegovini (TJZ BiH) najveći broj zgrada u Federaciji BiH (FBiH) se odnosi na zgrade namijenjene za administrativne djelatnosti (zgrade sa uredskim prostorom) sa udjelom od 35,7%, zatim slijede zgrade namijenjene za obrazovanje (osnovne i srednje škole, fakulteti i druge obrazovne institucije) sa udjelom od 32,9%. U odnosu na korisnu površinu (A_k) najveća korisna površina se odnosi na zgrade namijenjene za obrazovanje sa udjelom od 33,5% a zatim slijede zgrade za administrativne djelatnosti sa udjelom od 27,7% [13].

U dokumentu TJZ BiH izvršena je klasifikacija i sistematizacija svih javnih zgrada u BiH u ukupno 42 tipa, tj. 6 razdoblja gradnje i 7 sektora namjene. Također je izvršena podjela u klimatske regije sjever (skraćenica RS FBiH) koju karakterizira kontinentalna klima i regiju jug (skraćenica RJ FBiH) koju karakterizira mediteranska i submediteranska klima. Ukupan broj zgrada za obrazovanje u FBiH iznosi 1.455, od čega u klimatskoj regiji sjever (RS) 1.192 ili 81,9% a u klimatskoj regiji jug (RJ) 263 ili 18,1%.

Kako školske zgrade imaju veliki društveni značaj, u razdoblju nakon 2010 godine najveći broj pokrenutih aktivnosti (izrada detaljnih energetske audita) i provođenja mjera energetske efikasnosti (toplinsko izoliranje ovojnice zgrade) u javnom sektoru u FBiH provedeno je nad zgradama namijenjenim za obrazovanje u FBiH.

Za ovo istraživanje korištena je strategija istraživanja prikupljanjem podataka iz dokumenata detaljnih energetske audita u cilju dobivanja reprezentativnih i pouzdanih podataka. Detaljni energetski pregled ili audit (DEA) je dokumentirani postupak koji se provodi u cilju utvrđivanja energetske karakteristike objekta i stupnja ispunjenosti tih karakteristika u odnosu na zahtjeve propisane posebnim propisima i sadrži

prijedlog mjera za ekonomski povoljno poboljšanje energetske karakteristika [14].

Postupak provedbe detaljnog energetske pregleda zgrade rezultira dokumentom koji između ostalog da sadrži veliki broj podataka o građevinskim karakteristikama zgrade u smislu toplinske zaštite ovojnice zgrade, karakteristikama instaliranih sustava klimatizacije, grijanja i hlađenja i ventilacije i podataka o potrošnji energije.

Za ovo istraživanje prikupljeno je 138 dokumenata DEA školskih zgrada u RS FBiH koji predstavljaju bazu za ovo istraživanje. Iz DEA su prikupljeni i selektirani podatci o stvarnoj potrošnji isporučene toplinske energije za grijanje i podatci o izračunatoj (proračunskoj) vrijednosti isporučene toplinske energije za grijanje. Statistički skup ili populaciju predstavljaju školske zgrade u RS FBiH, čiji su opseg i osnovne karakteristike definirane u dokumentu TJZ BiH, a prikupljeni DEA predstavljaju osnovni statistički uzorak.

Udio broja zgrada iz ovog uzorka u odnosu na ukupan statistički skup iznosi približno 11,6% ($138/1.192$). Udio korisne površine (A_k) školskih zgrada iz uzorka u odnosu na ukupan statistički skup iznosi približno 24,3% ($343.129/1.414.831$), što površinski predstavlja približno $\frac{1}{4}$ ukupnog statističkog skupa

III. ANALIZA ENERGETSKOG JAZA U POTROŠNJI TOPLINSKE ENERGIJE ŠKOLSKIH ZGRADA U RS FBiH

Za procjenu energetske karakteristike zgrada koriste se metodologije inženjerskih proračuna, simulacija, statističkih metoda i strojnog učenja. Iako je cilj energetske procjene zgrada u pravilu povezan s pokušajima poboljšanja njihovih performansi [1] u ovom istraživanju provedena je ocjena energetske karakteristike školskih zgrada u FBiH analiziranjem potrošnje toplinske energije koristeći statističku analizu.

Za prikupljene podatke izvršena je osnovna statistička analiza (deskriptivna statistika) čija je osnovna zadaća opisati, urediti i sažeti rezultate istraživanja kako bi bili razumljiviji i pogodniji za interpretaciju i daljnju analizu. U tabeli I prikazani su korišteni statistički parametri i oznake [15].

TABELA I. STATISTIČKI PARAMETRI

Oznaka	Opis
n	Broj jedinica iz statističkog skupa
x_{min}	Najmanja vrijednost u statističkom skupu
x_{max}	Najveća vrijednost u statističkom skupu
R_x	Raspon vrijednosti u statističkom skupu
$\bar{X}$	Aritmetička sredina ili prosječna vrijednost
M_e	Medijan - srednja položajna vrijednost zadanog niza podataka
σ_x	Standardna devijacija - predstavlja prosječno odstupanje od aritmetičke sredine

Energetske karakteristike zgrade mogu se odrediti i usporedbom stvarne (izmjerene) i predviđene (izračunate) potrošnje energije. Analiza postojeće stvarne potrošnje isporučene toplinske energije izvršena je na temelju utroška

energenata za proizvodnju toplinske energije (prosječna vrijednost potrošnje za 3 godine prema podacima iz DEA).

Potrošnja toplinske energije za grijanje mjeri se kroz isporučenu energiju. Isporučena godišnja toplinska energija za grijanje ($Q_{H,del}$) prema standardu BAS EN ISO 13790:2008 predstavlja energiju koja se doprema u tehničke sustave zgrade kako bi se zadovoljile potrebe za grijanjem. Na temelju ukupne stvarne godišnje potrošnje isporučene godišnje toplinske energije za grijanje ($Q_{H,del}$) izračunata je specifična stvarna isporučena godišnja toplinska energija za grijanje u odnosu na korisnu površinu zgrade (A_k) prema sljedećem izrazu:

$$Q'_{H,del} = \frac{Q_{H,del}}{A_k} [\%]. \quad (1)$$

U tabeli II i sl. 2 prikazani su rezultati deskriptivne statistike za stvarnu specifičnu isporučenu toplinsku energiju za grijanje ($Q'_{H,del}$) školskih zgrada u RS FBiH.

Analiza postojećih karakteristika zgrada i podaci o stvarnoj potrošnji energije olakšavaju izradu modela procjene potrošnje energije [16]. Jedan od pristupa za ocjenu energetskih karakteristika zgrade jeste korištenje podataka o zgradi za izračunavanje potrošnje energije pristupom odozdo prema gore, proračunavajući potrebnu energiju, koja bi se zatim mogla usporediti sa stvarnom potrošnjom energije [31].

S obzirom na veliki broj raspoloživih podataka o poznatim toplinskim karakteristikama građevinskih dijelova ovojnice u dokumentima detaljnih energetskih audita (DEA) provjerava se da li stvarna potrošnja toplinske energije i u kojoj mjeri odgovara potrebama za predviđenu namjenu zgrade zbog čega se prvo vrši proračun ili modeliranje potrebne toplinske energije ($Q_{H,nd}$) sukladno važećim propisima ili standardima.

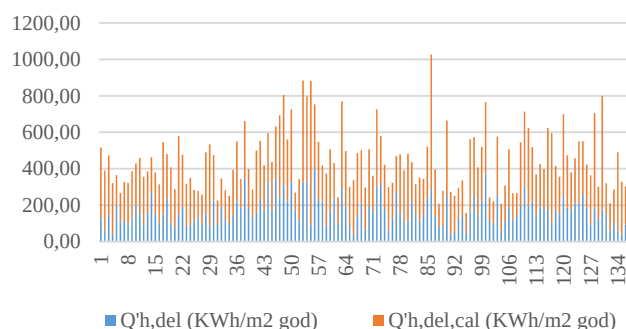
Zatim se vrši proračun isporučene toplinske energije ($Q_{H,del,cal}$) (za izračunatu toplinsku energiju dodan je indeks "cal" engl. - *calculated*) za postojeće stanje školske zgrade u FBiH uzimajući u obzir iskoristive i neiskoristive gubitke termotehničkih sustava ili pojednostavljeno uzimajući u obzir toplinske gubitke sustava kroz stupanj efikasnosti sustava. Proračunska godišnja isporučena toplinska energija za grijanje ($Q_{H,del,cal}$) uspoređuje se sa stvarnom potrošnjom isporučene energije ($Q_{H,del}$) na temelju čega se utvrđuje zadovoljava li stvarna potrošnja trenutne potrebe.

Unutarnja projektirana temperatura za školske zgrade iznosi $\Theta_{int} = 20^\circ\text{C}$. Klimatski uvjeti definirani su srednjim mjesečnim temperaturama ovisno o lokaciji zgrade i utječu godišnju potrošnju toplinske energije za grijanje. Podatci iz DEA pokazuju da za školske zgrade smještene u klimatskoj regiji "sjever" FBiH sezona grijanja prosječno traje 7 mjeseci a prosječan dnevni broj sati rada sustava grijanja iznosi oko 11,5 h. Prosječna vrijednost stupnja efikasnosti sustava grijanja iznosi 73 %, što znači da prosječno 27% gubitaka isporučene toplinske energije nastaje u sustavu grijanja [17].

Specifična proračunska isporučena godišnja toplinska energija za grijanje ($Q'_{H,del,cal}$) određena je u odnosu na korisnu površinu zgrade (A_k) prema sljedećem izrazu:

$$Q'_{H,del,cal} = \frac{Q_{H,del,cal}}{A_k} [\%]. \quad (2)$$

Na sl. 1 prikazana je usporedba stvarne i izračunate potrošnje isporučene toplinske energije za grijanje svih 138 školskih zgrada u RS FBiH.

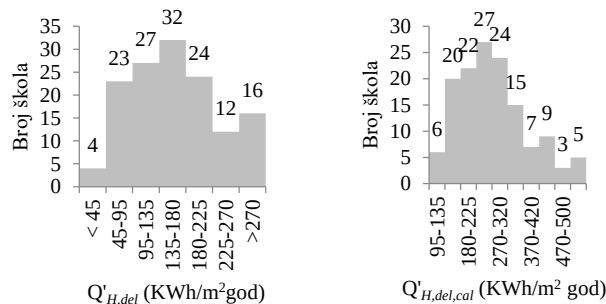


Sl. 1. Usporedba stvarne i izračunate isporučene toplinske energije školskih zgrada u RS FBiH

U tabeli II i sl. 2 prikazani su rezultati statističke analize izračunate specifične godišnje isporučene toplinske energije ($Q'_{H,del,cal}$) za grijanje.

TABELA II. DESKRIPTIVNA STATISTIKA

Varijabla	x_{min}	x_{max}	R_x	$\bar{X}$	M_e	σ_x
$Q'_{h,del}$ RS FBiH (kWh/m²god)	34,8	397,8	362,9	166,2	154,3	77,8
$Q'_{h,del,cal}$ RS FBiH (kWh/m²god)	97,2	788,2	691,0	279,2	256,5	117,0



Sl. 2. Histogrami broja školskih zgrada u RS FBiH u odnosu na $Q'_{H,del}$ i $Q'_{H,del,cal}$

Prosječna vrijednost stvarne specifične isporučene toplinske energije za grijanje ($Q'_{H,del}$) iznosi 166,2 kWh/m²god, u rasponu vrijednosti od 106,3 do 209,8 kWh/m²god nalazi se 50% školskih zgrada u RS FBiH. Prosječna vrijednost izračunate specifične isporučene toplinske energije za grijanje ($Q'_{H,del,cal}$) iznosi 279,2 kWh/m²god što je za oko 1,68 puta veće od stvarne potrošnje. U rasponu vrijednosti od 135,0 do 370,0 kWh/m²god nalazi se 108 školskih zgrada u RS FBiH ili 78,0%, a u rasponu od oko 197,0 do 327,0 kWh/m²god nalazi se 50% školskih zgrada.

Stvarna potrošnja toplinske energije osim karakteristika građevinskih dijelova ovojnice i opreme ovisi i o načinu ponašanja korisnika koja može imati značajan utjecaj na potrošnju energije [16].

Provedeno istraživanje energetske karakteristika školskih zgrada u FBiH pokazalo je da prosječne U-vrijednosti građevinskih dijelova ovojnice višestruko premašuju dopuštene vrijednosti što ukazuje na nedostatak slojeva toplinske izolacije i u najvećoj mjeri utječu na velike ukupne toplinske transmisijске gubitke i na potrošnju toplinske energije. Prosječna U - vrijednost (W/m^2K) ovojnice školskih zgrada u RS FBiH iznosi $1,87 W/m^2K$, a vrijednost koeficijenta transmisijskog gubitka topline približno je 2,3 puta veća od dopuštene vrijednosti [18].

Visoke vrijednosti specifične izračunate godišnje isporučene toplinske energije za grijanje ($Q'_{H,del,cal}$) posljedica su jako loših energetske karakteristika (nedostatak slojeva toplinske izolacije u građevinskim dijelovima ovojnice) postojećih školskih zgrada u FBiH i zastarjelih kotlovnica (veliki broj školskih zgrada se grije na ugljen i drvo s niskim stupnjem efikasnosti kotlova) koje imaju velike gubitke u distribuciji proizvedene toplinske energije.

IV. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

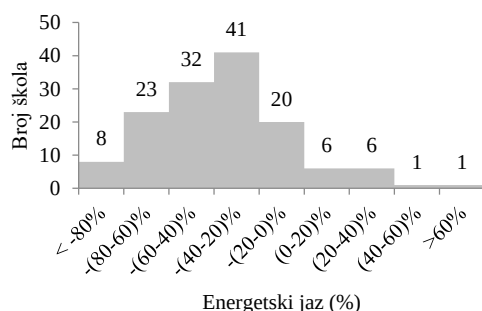
Energetski jaz ili odstupanje je izračunat kao odnos razlike stvarne i izračunate prema izračunatoj specifičnoj godišnjoj isporučenoj energiji za grijanje za postojeće stanje školskih zgrada u RS FBiH, prema sljedećem izrazu:

$$\text{energetski jaz} = \frac{Q'_{H,del} - Q'_{H,del,cal}}{Q'_{H,del,cal}} \times 100 [\%]. \quad (3)$$

U tabeli III i sl. 3 prikazani su rezultati statističke analize energetskog jaza stvarne u odnosu na izračunatu specifičnu godišnju isporučenu toplinsku energiju za grijanje.

TABELA III. DESKRIPTIVNA STATISTIKA ENERGETSKOG JAZA

Varijabla	x_{min}	x_{max}	R_x	$\bar{X}$	M_e	σ_x
Energetski jaz (%)	-0,88	0,77	1,65	-0,36	-0,36	0,29



Sl. 3. Histogrami broja školskih zgrada u RS FBiH u odnosu na energetski jaz

Rezultati istraživanja energetskog jaza pokazuju da najveći udio imaju negativna odstupanja i jedan vrlo mali dio pozitivnih odstupanja između stvarne i izračunate potrošnje energije što upućuje da školske zgrade u RS FBiH troše manje energije nego što je izračunato. Stvarna potrošnja prosječno iznosi oko 64% izračunate (računski potrebne), odnosno da je stvarna za prosječno oko 36% manja od izračunate. Ovo istraživanje pokazuje suprotno od većine drugih istraživanja u svijetu u kojima je najvećim dijelom stvarna potrošnja veća od izračunate.

Sa sl. 3 može se vidjeti kako se u rasponu vrijednosti od -80% do 0% nalazi 84% školskih zgrada, a u rasponu vrijednosti od -57% do -21% nalazi se 50% školskih zgrada u RS FBiH. U razredu od -40% do -20% je najveći broj školskih zgrada iz ovog istraživanja.

Prethodna istraživanja energetske karakteristika školskih zgrada u FBiH ukazuju na jako loše energetske karakteristike postojećih školskih zgrada u FBiH što za posljedicu ima visoke vrijednosti izračunate, odnosno potrebne toplinske energije za grijanje zbog čega nastaje energetski jaz.

Budući da najveći broj školskih zgrada u RS FBiH ima stvarnu potrošnju isporučene toplinske energije manju od izračunate može se zaključiti da u predmetnim školama nije osigurana odgovarajuća razinama toplinske udobnosti. Navedeno se može potvrditi i u komentarima korisnika školskih zgrada u FBiH preuzetih iz dokumenata DEA:

- Da je zgrada nedovoljno zagrijana, potvrdili su i zaposlenici, koji u najhladnijem razdoblju godine vode zabilješke o postignutim temperaturama u prostoriji, i koje prema njihovim tvrdnjama dostižu vrijednosti od $10^{\circ}C$, što je sa stajališta toplinske ugodnosti i namjene zgrade katastrofalno [19].
- Provedeni proračun teorijski potrebne energije za grijanje pokazuje odstupanja od stvarne potrošnje energije za zadovoljavanje potreba za toplinskom energijom, što ukazuje na činjenicu da uvjeti toplinske ugodnosti nisu zadovoljeni [20].
- Prema riječima odgovornih osoba ne ostvaruje se potrebna toplinska ugodnost, jer unutrašnja temperatura ne prelazi $20^{\circ}C$. Nedostatak finansijskih sredstava za nabavku energenta za grijanje jedan je od razloga nepostizanja toplinske ugodnosti unutar školske zgrade [21].
- Na temelju prikazanih količina stvarne potrošnje energije i izračunate potrošnje energije vidljivo je da je stvarna potrošnja toplinske energije mnogo manja te se dolazi do zaključka da u zgradi nije osigurana zadovoljavajuća razina toplinske udobnosti, tj. ugodan i kvalitetan boravak u pogledu potrebnih temperaturnih vrijednosti zagrijavanja zgrade [23].

Navodi iz DEA potvrdjuju da školske zgrade nisu dovoljno zagrijane, da se ne griju svi prostori škole (ostave, hodnici, arhiva itd.) dok se ostali prostori održavaju na nižoj temperaturi od projektne i da se ne ostvaruje potrebna toplinska ugodnost. Razlozi za navedeno leže u izrazito lošim energetske karakteristikama postojećih školskih zgrada u FBiH i nedostatku finansijskih sredstava za nabavku energenta za grijanje.

V. ZAKLJUČAK

Analiza energetske karakteristika školskih zgrada u RS FBiH pokazala je značajna negativna odstupanja između stvarne i izračunate potrošnje energije, s prosječnim energetske jazom od -36 % što upućuje da školske zgrade u RS FBiH troše manje energije nego što je izračunato. Ovi rezultati su suprotni s drugim istraživanjima koja imaju pozitivan energetski jaz u rasponu od 60 % do 85 %.

Jako loše energetske karakteristike postojećih školskih zgrada u FBiH (nepostojanje slojeva toplinske izolacije i visoka infiltracija vanjskog zraka kroz postojeće otvore uzrokuje velike toplinske gubitke) za posljedicu imaju visoke energetske potrebe za toplinskom energijom koje se najčešće zbog nedostatka finansijskih sredstava ne mogu postići. Posljedice su "pothlađenost" koja se ogleda u nižim temperaturama prostora i negrijanju svih dijelova zgrade (posebice hodnika, školskih dvorana i sanitarnih čvorova) ili nekih učionica zbog manjeg broja učenika.

U cilju postizanja toplinske ugodnosti potrebno je provesti mjere na poboljšanju energetske efikasnosti građevinskih dijelova ovojnice, i to najčešće kroz toplinsku izolaciju vanjskih zidova, toplinsku izolaciju stropova prema tavanu, krovovima ili negrijanim prostorima i potpunu ili djelomičnu zamjenu vanjskih otvora. Smanjenjem potrošnje toplinske energije moguće je postići i primjenom mjera za poboljšanje energetske efikasnosti i termotehničkih sustava grijanja. Navedenim mjerama će se smanjiti energetska jaz, jer će se smanjiti energetske potrebe, odnosno proračunski potrebna energija. Navedene mjere na poboljšanju energetske efikasnosti direktno utječu i na smanjenje utjecaja na okoliš i smanjenje emisije štetnih plinova.

LITERATURA

- [1] E. H. Borgstein, R. Lamberts, and J. L. M. Hensen, "Evaluating energy performance in non-domestic buildings: A review," *Energy and Buildings*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.018>
- [2] C. F. Bandera, and G. R. Ruiz, "Towards a New Generation of Building Envelope Calibration," *Energies*, vol. 10, 2017. 10.3390/en10122102
- [3] Á. L. León-Rodríguez, R. Suárez, P. Bustamante *et al.*, "Design and Performance of Test Cells as an Energy Evaluation Model of Facades in a Mediterranean Building Area," *Energies*, vol. 10, 2017. doi:10.3390/en10111816
- [4] P. De Wilde, The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation, Automation in Construction (2014), 41 p. 40-49 <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.009>
- [5] S. Cozza, J. Chambers, M.K. Patel, Measuring the thermal energy performance gap of labelled residential buildings in Switzerland, Energy Policy (2020), 137 p. 111085 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111085>
- [6] Y.K. Kim, L. Bande, K.A. Tabet Aoul, H. Altan, Dynamic energy performance gap analysis of a university building: Case studies at UAE university campus, UAE, Sustainability (2020), 13(1) p. 120 <https://doi.org/10.3390/su13010120>
- [7] M. Herrando, D. Cambra, M. Navarro, L. de la Cruz, G. Millán, I. Zabalza, Energy Performance Certification of Faculty Buildings in Spain: The gap between estimated and real energy consumption, Energy Conversion and Management (2016), 125 p. 141-153 <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.04.037>
- [8] C. Demanuele, T. Tweddell, and M. Davies, "Bridging the gap between predicted and actual energy performance in schools," in World Renewable Energy Congress XI, Abu Dhabi, UAE, 2010.
- [9] E. Burman, D. Mumovic, and J. Kimpian, "Towards measurement and verification of energy performance under the framework of the European directive for energy performance of buildings," *Energy*, vol. 77, pp. 153-163, 2014.
- [10] "Summary of Audits Performed on CarbonBuzz by the UCL Energy Institute," U. E. Institute, ed., 2013.
- [11] D. R. Luísa Dias Pereira, Stefano Paolo Corgnati, Manuel Gameiroda Silva, "Energy consumption in schools – A review paper," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 911-922, 2014, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.010>
- [12] F. AlFaris, A. Juaidi, and F. Manzano-Agugliaro, "Improvement of efficiency through an energy management program as a sustainable practice in schools," *Journal of Cleaner Production*, vol. 135, pp. 794-805, 2016.
- [13] M. Nišandžić, *Tipologija javnih zgrada u Bosni i Hercegovini*, Razvojni program Ujedinjenih nacija (UNDP) u Bosni i Hercegovini, 2018.
- [14] U. Desideri, D. Leonardi, L. Arcioni *et al.*, "European project EducaRUE: An example of energy efficiency paths in educational buildings," *Applied Energy*, vol. 97, pp. 384-395, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.02.009.
- [15] M. Papić, *Primijenjena statistika u MS Excelu za ekonomiste, znanstvenike i neznanke*, Zoro d.o.o., Zagreb, 2005.
- [16] M. Aksoezen, M. Daniel, U. Hassler *et al.*, "Building age as an indicator for energy consumption," *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 74-86, 2015.
- [17] Katić, D "Modeli procjene troškova toplinske energije školskih zgrada na području Federacije Bosne i Hercegovine," Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Građevinski i arhitektonski fakultet Osijek, Osijek, 2022.
- [18] Katić, D.; Krstić, H.; Marenjak, S. Energy Performance of School Buildings by Construction Periods in Federation of Bosnia and Herzegovina. *Buildings* 2021, 11, 42. <https://doi.org/10.3390/buildings11020042>
- [19] "Detaljni energetska pregled Javna ustanova O. Š. "Fahrudin Fahro Baščelija" Goražde, Ceteor, Sarajevo," 2013.
- [20] "Izveštaj o detaljnom energetskom pregledu JU OŠ „Mirsad Prnjavorac“ u Vogošći, Mašinski fakultet, Sarajevo," 2016.
- [21] "Detaljni energetska pregled Javna ustanova O. Š. "Musa Ćazim Ćatić" Kladanj, Ceteor, Sarajevo," 2015.
- [22] "Detaljni energetska pregled O. Š. "Todorovo" Velika Kladuša, Zagrebinspekt, Mostar," 2016.

ABSTRACT

This paper presents the results of research of the energy gap or difference between actual and calculated energy consumption for space heating for the current state of school buildings (primary and secondary schools) located in the north region of the Federation of Bosnia and Herzegovina (NR FBiH). The research was conducted by collecting data from detailed energy audit documents on a sample of 138 school buildings in the NR FBiH and is part of a broader study aimed at analyzing the energy performance of school buildings in the FBiH and determining their relationship to heating energy costs through the development of new models faster estimation of heating energy costs. The analysis of the delivered energy for space heating show that the actual consumption is 64% of the calculated and indicates an energy gap between the actual and predicted (calculated) values of energy consumption for heating.

ENERGY GAP IN ENERGY CONSUMPTION FOR HEATING OF SCHOOL BUILDINGS IN THE NORTHERN REGION OF THE FEDERATION OF BOSNIA AND HERZEGOVINA

Dragan Katić, Hrvoje Krstić

Upotreba zelenih struktura modularnog tipa pri obnovi stambenih zgrada

Simulacija studije slučaja na području grada Banja Luka

Milana Radujković¹, Darija Gajić², Budimir Sudimac³

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

³Univerzitet u Beogradu, Arhitektonski fakultet, Beograd, Republika Srbija

milana.radujkovic@student.mf.unibl.org, darija.gajic@aggf.unibl.org, sudimac@arh.bg.ac.rs

Sažetak— Rad se bazira na istraživanju i kvantifikaciji benefita pasivnih sistema optimizacije omotača stambenih zgrada u vidu modularnih zelenih struktura, na krovu i na fasadi. Istraživanje je pokazalo da je implementacijom vertikalnih i krovnih zelenih sistema pri obnovi omotača stambenih zgrada moguće postići uštede energije za zagrijavanje i hlađenje, u lokalnim klimatskim uslovima. Samim tim, postižu se i ekonomske uštede, kao i smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte. Predloženim rješenjem modularnog tipa zelenih struktura, uticalo bi se na jednostavnost i brzinu implementacije, a pozitivni efekti bili bi značajno uvećani, kada se radi o klimatskim uslovima na području grada Banja Luka.

Ključne riječi— pasivni sistemi; održivi modul; zeleni elementi; omotač zgrade; ušteda energije; otporno hlađenje

I. UVOD

Otporna obnova stambenih zgrada upotrebom zelenih krovova i zelenih zidova je inovativan pristup obnovi i adaptaciji postojećih stambenih objekata s ciljem povećanja njihove otpornosti na klimatske promjene, poboljšanja energetske efikasnosti i unapređenja urbanog okruženja. Ovaj pristup može doprinijeti održivosti gradova, smanjenju zagađenja, poboljšanju mikroklimе, kao i smanjenju uticaja poplava u gusto izgrađenim urbanim područjima [1,2]. Primjena zelenih struktura je ključna u otpornim obnovama stambenih zgrada, jer one mogu pomoći u borbi protiv brojnih izazova izazvanih klimatskim promjenama, kao što su: povećanje temperature u gradovima, ekstremni vremenski uslovi (poplave i suše) i smanjen udio zelenih površina u ograničenim prostorima urbanih sredina. Istraživanje je bazirano na upotrebi inovativnih tehnologija materijalizacije omotača zgrada koje doprinose postizanju energetske optimizacije [3,4].

Prema zahtjevima za unapređenjem omotača zgrade koji su definisani Pravilnikom o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada u Republici Srpskoj, moguće je smanjiti energiju za grijanje u stambenim zgradama do 60%. Istraživanje stambenih zgrada izgrađenih u periodu od 1971-1980. godine, pokazuje da implementacija troškovno optimalnih mjera sa zahtjevnijim koeficijentima prolaza toplote za netransparentne dijelove omotača zgrade i manje zahtjevnim za prozore, od standardnih mjera u Bosni i

Hercegovini, može dovesti do ušteda od 948.107,00 MWh/a. Studija slučaja u ovom istraživanju pokazala je da je moguće smanjiti potrebnu energiju za grijanje ispod 40 kWh/m² [5].

Prema najnovijim strateškim dokumentima Evropske unije u oblasti energetske efikasnosti, najviše značaja pridaje se „dubokoj“ obnovi zgrada sa uštedom energije od oko 60%, što podrazumijeva obnovu cijelog omotača zgrade. Tu je takođe jedan od ključnih principa upotreba organskih građevinskih materijala. Primjenom modularnih sistema u organskim materijalima koji su troškovno optimalni, mogla bi se uveliko unaprijediti obnova zgrada prema nZEB standardima [6].

Cilj istraživanja jeste da se utvrde pozitivni uticaji koje je moguće kvantifikovati nakon upotrebe pasivnih sistema u vidu zelenih elemenata na omotačima postojećih zgrada i na osnovu toga da se predloži optimalan modul zelenih elemenata za buduću obnovu stambenih zgrada u klimatskom području grada Banja Luka.

Rezultati su pokazali da zelene strukture imaju sposobnost da utiču na smanjenje potrošnje energije u objektu, kako za grijanje, tako i za hlađenje. Ovi rezultati odražavaju toplotni doprinos zelenih struktura i sprječavanje pregrijavanja i pokazuju kako primjena zelenih struktura može doprinijeti smanjenju rashladnog opterećenja i posljedično smanjenju potrošnje energije za hlađenje u zgradama, što je softverska simulacija potvrdila.

II. METODOLOGIJA

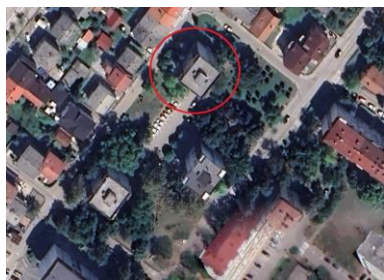
A. Odabir i analiza referentnog stambenog objekta

Referentni stambeni objekat na području grada Banja Luka (Slika 1.) odabran je prema odgovarajućim kriterijumima koji su podrazumijevali sljedeće:

1. Orijentacija netransparentne fasade na koju je moguće primijeniti zeleni zid treba da bude južna-jugozapadna (tada su efekti najveći usljed najintenzivnijeg Sunčevog zračenja na istraživanom području).

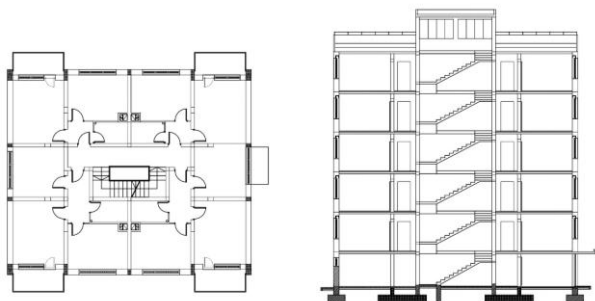
2. Fasada na koju će biti primijenjena zelena struktura ne smije da bude zaklonjena drugim objektima (visokim zgradama ili rastinjem koje pravi sjenu i/ili onemogućava pravilnu instalaciju zelenih struktura).

3. Krov zgrade treba da bude ravan i pristupačan, kako bi bila omogućena primjena zelenih struktura horizontalno.



Sl. 1. Lokacija i položaj referentnog stambenog objekta na području grada Banja Luka (prema Google satelitskoj podlozi)

Zgrada je kompaktne kvadratne osnove s ravnim prohodnim krovom, izgrađena 1971. godine i sastoji se od 6 etaža i 20 stanova. Bruto površina osnove zgrade iznosi $239,65 \text{ m}^2$ (Slika 2.), te kako je prizemlje negrijani prostor, ukupna neto površina grijanog prostora iznosi $862,00 \text{ m}^2$, a zapremina $2241,00 \text{ m}^3$. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje sa prekidom u grijanju iznosi $146,79 \text{ kWh/m}^2$ [7]. Zgrada je klasične gradnje, masivnog konstruktivnog sistema sa ravnim prohodnim krovom (Slika 3.).



Sl. 2. Osnova i vertikalni presjek modela referentnog stambenog objekta



Sl. 3. 3D model referentnog stambenog objekta

Konstruktivni zidovi su debljine 25 cm i u oba pravca od ošupljene opeke, sa vertikalnim i horizontalnim AB serklažima. Spoljašnji zidovi su debljine 38 cm i obostrano omalterisani, dok su međuspratne konstrukcije pune AB ploče. Zidovi nisu termoizolovani, za razliku od krova na kome se nalazi termoizolacija debljine 3 cm . Balkonska vrata i prozori su dvostruka drvena spojena krila sa dva obična jednostruka

stakla i imaju unutrašnju platnenu roletnu. Negrijani prostori su stepeništa i podrumski prostori koji su u prizemlju [7]. Termičke karakteristike elemenata omotača zgrade prema postojećem stanju (Tabela I) ukazuju na gradnju perioda nakon 1967. godine, kada se na predmetnom području pojavljuje prvi Pravilnik o minimalnim tehničkim uslovima za izgradnju stanova [8] koji propisuje samo U-koeficijente za spoljašnji zid i krov iznad grijanog prostora, dok predloženo unapređenje (Tabela II) predstavlja obnovu omotača zgrade prema važećem Pravilniku o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada [9]. Naravno, Pravilnik ukazuje ako se dodavanjem slojeva termičke izolacije ugrožava svijetla visina ili širina prostora, onda se ti elementi omotača ne unapređuju, što vidimo kod ove zgrade da je to zid prema negrijanom stepenišnom prostoru.

Nakon primjene predloženih mjera "duboke" termičke obnove omotača, ušteda potrebne energije za grijanje iznosila bi oko 67% na godišnjem nivou. Specifična godišnja potrebna energija za grijanje sa prekidom u grijanju bi se smanjila sa $146,79 \text{ kWh/m}^2$ na $48,44 \text{ kWh/m}^2$.

TABELA I. TERMIČKE KARAKTERISTIKE ELEMENATA OMOTAČA ZGRADE – POSTOJEĆE STANJE

Vrsta elementa	Materijalizacija	U-koeficijent ($\text{W/m}^2\text{K}$)
Spoljašnji zid 1	malter 2 cm, puna opeka 38 cm, malter 3 cm	1,04
Spoljašnji zid 2	malter 2 cm, AB zid 38 cm, malter 1,5 cm	2,54
Zid prema negrijanom stubištu	malter 2 cm, puna opeka 25 cm, malter 2 cm	1,27
Prozori	Drveni, dvostruki sa spojenim krilima i jednostrukim staklom	2,92
Međuspratna konstrukcija iznad negrijanog podruma	parket 2 cm, cementni estrih 2,5 cm, natron papir, termoizolacija 3 cm, AB konstrukcija 12 cm, malter 1 cm	0,75
Ravan krov	kulir ploče 4 cm, pijesak 3 cm, hidroizolacija, beton 9 cm, krovna ljepjenka, termoizolacija 3 cm, AB konstrukcija 12 cm, malter 1 cm	0,91

TABELA II. TERMIČKE KARAKTERISTIKE ELEMENATA OMOTAČA ZGRADE – SA PREDLOŽENIM MJERAMA UNAPREĐENJA ZA DUBOKU OBNOVU (PREMA PREPORUKAMA PRAVILNIKA O MINIMALNIM ZAHTJEVIMA ZA ENERGETSKE KARAKTERISTIKE ZGRADA)

Vrsta elementa	Materijalizacija	U-koeficijent (W/m²K)
Spoljašnji zid 1	malter 2 cm, puna opeka 38 cm, malter 3 cm, termoizolacija 12 cm, fasadni malter 1 cm	0,29
Spoljašnji zid 2	malter 2 cm, AB zid 38 cm, malter 1,5 cm, termoizolacija 12 cm, fasadni malter 1 cm	0,35
Zid prema negrijanom stubištu	malter 2 cm, puna opeka 25 cm, malter 2 cm	1,27
Prozori	Drveni, dvostruki sa spojenim krilima i dvostrukim staklom	1,60
Međuspratna konstrukcija iznad negrijanog podruma	parket 2 cm, cementni estrih 2,5 cm, natron papir, termoizolacija 3 cm, AB konstrukcija 12 cm, malter 1 cm, termoizolacija 12 cm, fasadni malter 1 cm	0,26
Ravan krov	kulir ploče 4 cm, pijesak 3 cm, PE folija, termoizolacija 20 cm, hidroizolacija, beton 9 cm, krovna ljepenska, termoizolacija 3 cm, AB konstrukcija 12 cm, malter 1 cm	0,15

TABELA III. SPECIFIKACIJA MODULA 1 (PREMA SPECIFIKACIJAMA PROIZVOĐAČA I SOFTVERSKOM MODELU)

	Parametar	Vrijednost
Supstrat	Debljina	0,1 m
	Gustina	710,00 kg/m³
	Toplotna provodljivost	1,65 W/(mK)
	Specifična toplota	1.225,00 J/(kgK)
Vegetacija	Visina biljaka	0,25 m
	LAI (indeks lisne površine)	5,0 (ljetno), 2,0 (zimno)
	Koeficijent emisije lisne površine	0,95
	Koeficijent refleksije lisne površine	0,22
	Specifična toplota	2.232,00 J/(kgK)
	Toplotna provodljivost	0,35 W/(mK)
	Minimum Stomatal Resistance (otpornost biljaka na transport vlage)	200,00 s/m



B. Odabir i analiza primijenjenih zelenih modula

Referentni stambeni objekat odabran je prema odgovarajućim kriterijumima, tako da je moguća primjena zelenih modula na dva načina: vertikalno na fasadi i horizontalno na ravnom krovu, pri čemu je potrebno naglasiti da su neophodna određena prilagođavanja u zavisnosti od konkretnog slučaja.

Odabrana su dva tipa zelenih modularnih struktura. Debljina supstrata Modula 1 (Tabela III i Slika 4.) je 10 cm, visina i širina su po 60 cm, a vegetacioni sloj je visine do 25 cm i sadrži sljedeće vrste: ukrasnu travu (*Carex morrowii*), močvarni ljiljan (*Acorus gramineus*), mazus (*Mazus reptans*), puzavu ivicu (*Ajuga reptans*), čupavu travu (*Deschampsia cespitosa*), grebić (*Geum rivale*), hojheru (*Heuchera hybrid*), hotiniju (*Houttuynia cordata*), zvončić (*Campanula posharskyana*), geranijum (*Geranium wlassovianum*) i hemerokalis (*Hemerocallis hybrid*).

Sl. 4. 3D model Modula 1

Drugi modul ima debljinu supstrata od 15 cm i biljke koje podnose ekstremnije uslove i zahtijevaju manje održavanja (sedumi, mahovine, niske trave i trajnice). U skladu s tim, izmijenjene su vrijednosti odgovarajućih parametara Modula 2 na softverskom modelu (Tabela IV i Slika 5.). Takođe, visina i širina modula 2 su promijenjene i iznose 50 cm x 50 cm. Ergonomski dizajn modula omogućava da jedna osoba može da vrši ugradnju, tako da je proces pojednostavljen i ubrzan (4 modula čine površinu od 1 m²).

TABELA IV. SPECIFIKACIJA MODULA 2 (PREMA SOFTVERSKOM MODELU)

	<i>Parametar</i>	<i>Vrijednost</i>
Supstrat	Debljina	0,15 m
	Gustina	710,00 kg/m ³
	Toplotna provodljivost	1,05 W/(mK)
	Specifična toplota	1.500,00 J/(kgK)
Vegetacija	Visina biljaka	0,10 m
	LAI (indeks lisne površine)	3,0 (ljetno), 3,0 (zima)
	Koeficijent emisije lisne površine	0,8
	Koeficijent refleksije lisne površine	0,15
	Specifična toplota	2.500,00 J/(kgK)
	Toplotna provodljivost	0,55 W/(mK)
	Minimum Stomatal Resistance (otpornost biljaka na transport vlage)	100,00 s/m



Sl. 5. 3D model Modula 2

Prilikom softverskog modelovanja zelenih struktura, neophodno je voditi računa o načinu navodnjavanja supstrata. U skladu sa odabranim modulima i načinom njihove primjene, različito su postavljeni parametri za navodnjavanje. Kod Modula 1 koji sadrži biljke kojima je neophodno stalno navodnjavanje, odabran je „Smart“ sistem koji podrazumijeva da se navodnjavanje vrši po utvrđenom planu, ali da bude isključeno kada je supstrat 30% ili više zasićen vodom. Sa druge strane, kod Modula 2 koji sadrži biljne vrste otporne na sušu i pojačanu insolaciju, odabrano je tzv. prirodno navodnjavanje, odnosno navodnjavanje od padavina na lokaciji (definirano prema podacima lokalne mikroklimе, na nivou jednog sata).

C. Proces softverske simulacije

Kako bi se analizirala potrošnja energije u referentnom stambenom objektu, korišten je *DesignBuilder* softver koji koristi *EnergyPlus* simulacione metode i omogućava

modelovanje fizike zgrade, sistema grijanja i hlađenja, osvjetljenja i simulaciju potrošnje toplotne i električne energije i unutrašnje temperature vazduha. U skladu sa funkcijama koje softver nudi, omogućeno je kreiranje zelenih struktura (zidova i krovova), kao spoljašnjih elemenata omotača zgrade, uz adekvatna prilagođavanja određenih parametara.

Za potrebe ovog istraživanja, u skladu sa raspoloživim podacima, izvršena je simulacija za potrošnju energije za grijanje tokom zimskog perioda i hlađenje tokom ljetnog perioda, za termički obnovljenu zgradu bez zelene strukture i za zgradu nakon primjene predloženih zelenih struktura (Slika 6). Nakon simulacije izvršena je komparativna analiza dobijenih rezultata i prikazane su prednosti primjene ovih struktura sa energetskeg aspekta.

Ukupno su postavljena 4 scenarija simulacije, odnosno predložena su 2 varijantna rješenja modularnih zelenih struktura za omotač referentne stambene zgrade:

1. Zgrada u postojećem stanju bez zelenih struktura,
2. Zgrada nakon termičke obnove bez zelenih struktura,
3. Zgrada sa primijenjenim Modulom 1 na ravnom krovu (Modul 1_H) i
4. Zgrada sa primijenjenim Modulom 2 na jugozapadnoj fasadi (Modul 2_V).



Sl. 6. 3D modeli zgrade prema varijantnim rješenjima

III. REZULTATI SIMULACIJE

A. Potrošnja energije za grijanje

Prema podacima datim u Tipologiji stambenih zgrada Bosne i Hercegovine [7], specifična godišnja potrebna energija za grijanje u istraživanom objektu iznosi 146,79 kWh/m² na godišnjem nivou, sa prekidom u grijanju. Neto površina grijanog prostora iznosi 862,00 m². Dakle, ukupna potrošnja energije za grijanje istraživanog objekta na godišnjem nivou iznosi 126.532,98 kWh.

Primjenom predloženih mjera duboke termičke obnove (prema Tabeli II), specifična godišnja potrebna energija za grijanje bi se smanjila na 48,44 kWh/m², a ukupna godišnja

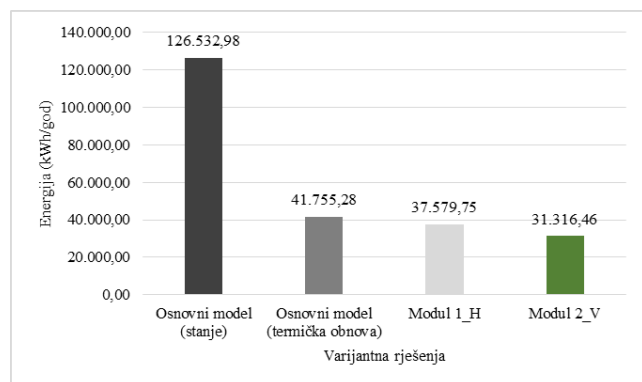
potrošnja energije za grijanje bi bila smanjena na 41.755,28 kWh.

Kao posljedica izolacionog efekta, sprječavanja hlađenja i povećanja unutrašnje temperature vazduha zimi, primjetne su i značajne uštede u potrošnji energije za grijanje zgrade primjenom zelenih struktura. Proces simulacije je pokazao da se potrošnja energije u stambenoj zgradi može smanjiti za grijanje, ako se na omotaču primijene predložene modularne zelene strukture. Uštede u potrošnji energije za grijanje su najznačajnije u zgradi sa vertikalnom zelenom strukturom debljine 15 cm i one iznose 25%.

Zimi, tokom sezone grijanja, zelene strukture djeluju kao vrsta izolatora za prenos toplote i uštede energije. Smanjenjem potrošnje energije za grijanje za 25% u zimskom periodu, zeleni zid (Modul 2_V) bi mogao biti dobar alat za poboljšanje energetske performansi zgrade (Tabela V). Takođe, primjena modularnih zelenih struktura na ravnom krovu dovodi do smanjenja energije potrebne za grijanje u iznosu od 10%. Slika 7 prikazuje potrošnju energije za grijanje zgrade bez zelenih struktura i sa primijenjenim zelenim strukturama, prema varijantnim rješenjima.

TABELA V. REZULTATI SIMULACIJE POTROŠNJE ENERGIJE ZA GRIJANJE PREMA VARIJANTNIM RJEŠENJIMA

	<i>Specifična potrošnja energije za grijanje kWh/m²god</i>	<i>Ukupna potrošnja energije za grijanje kWh/god</i>
Osnovni model (stanje)	146,79	126.532,98
Osnovni model (termička obnova)	48,44	41.755,28
Modul 1_H	43,60	37.579,75
Modul 2_V	36,33	31.316,46



Sl. 7. Grafički prikaz potrošnje energije za grijanje zgrade (kWh)

B. Potrošnja energije za hlađenje

Ljeti su primjetne značajne uštede energije za hlađenje zbog smanjenog dobitka Sunčevog zračenja zahvaljujući efektima vegetacije zelenih struktura koje su integrisane u

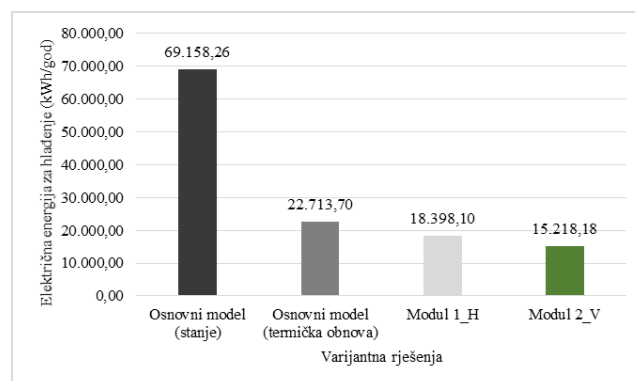
omotač zgrade. Efikasnost zelenih struktura u smanjenju potrošnje energije direktno je povezana sa rashladnim efektima biljaka na fasadu ili krov. Glavna prednost vegetacije tokom dana u sezoni rashlađivanja je značajna ušteda energije zbog smanjenog Sunčevog zračenja od zasjene koju vegetacija pruža, kao i smanjenje temperature u neposrednoj blizini omotača, usljed procesa evapotranspiracije. Zelene strukture koje pokrivaju postojeće netransparentne elemente omotača zgrade povećavaju toplotnu otpornost postojećih struktura i smanjuju prenos toplote kroz zid i krov (utiču na smanjenje U-koeficijenta).

Simulacija potrošnje električne energije za hlađenje zgrade urađena je za četiri mjeseca, od maja do septembra. Simulacija je pokazala da najviše efekta u smanjenju potrošnje električne energije tokom ljetnog perioda imaju zelene strukture postavljene vertikalno na jugozapadnu fasadu, odnosno varijantno rješenje označeno kao Modul 2_V. Ukupne uštede iznose 33%. Manji efekti su postignuti sa varijantnim rješenjem označenim kao Modul 1_H, i to 19% ušteda električne energije za hlađenje zgrade.

Korišćenje zelenih struktura može donijeti uštedu energije u hlađenju zgrade i do 33% (Tabela VI i Slika 8.). To znači da zelene strukture poboljšavaju udobnost u zatvorenom prostoru, čine ambijent prijatnijim i smanjuju emisiju gasova staklene bašte. Posljedično, pozitivni uticaji se ogledaju i kroz sprječavanje naprezanja građevinskih materijala, usljed manjih temperaturnih kolebanja, što produžava njihov životni vijek.

TABELA VI. REZULTATI SIMULACIJE POTROŠNJE ENERGIJE ZA HLAĐENJE PREMA VARIJANTNIM RJEŠENJIMA

	<i>Specifična potrošnja energije za grijanje kWh/m²god</i>	<i>Ukupna potrošnja energije za grijanje kWh/god</i>
Osnovni model (stanje)	80,23	69.158,26
Osnovni model (termička obnova)	26,35	22.713,70
Modul 1_H	21,34	18.398,10
Modul 2_V	17,65	15.218,18



Sl. 8. Grafički prikaz potrošnje energije za hlađenje zgrade (kWh)

Rezultati ovog istraživanja mogu biti primijenjeni u fazi planiranja i projektovanja zelenih struktura, u cilju energetske obnove omotača stambenih zgrada, ne samo u klimatskom

području grada Banja Luka, nego i na svim zgradama sjeverne klimatske zone Republike Srpske, a s tim i Bosne i Hercegovine. Takođe, uz adekvatnu tehničku dokumentaciju i procjenu stanja objekata, predložene modularne strukture mogu biti primijenjene i na javnim zgradama, poslovnim objektima i slično.

IV. ZAKLJUČAK

Rezultati simulacije na referentnom objektu u lokalnim klimatskim uslovima grada Banja Luka pokazali su da najveće efekte u optimizaciji omotača zgrade ima predloženi modul 2_V debljine 15 cm sa biljnim materijalom otpornim na različite vremenske uslove, koji može biti primijenjen vertikalno na fasadi ili horizontalno na ravnom krovu. Rezultati simulacije su pokazali da najviše efekta u smanjenju potrošnje električne energije tokom ljetnog perioda imaju zelene strukture postavljene vertikalno na jugozapadnu fasadu, odnosno varijantno rješenje označeno kao Modul 2_V. Ukupne uštede iznose 33%.

Pored svih navedenih prednosti, upotreba zelenih struktura može i negativno da utiče na sam omotač na kome je primijenjena. Ukoliko se pripremni radovi ne urade na adekvatan način, od procjene dodatnog opterećenja zelenih sistema i stanja postojeće konstrukcije, do pravilne ugradnje i održavanja, zelene strukture mogu imati više štete nego koristi. Stoga, neophodno je uspostaviti mehanizme i mjere za pravilno planiranje, projektovanje, ugradnju i održavanje zelenih struktura. S obzirom na to da je Banja Luka seizmički aktivno područje, veoma je važno pri implementaciji predmetnih modularnih struktura detaljno procijeniti dodatno opterećenje, naročito na krovnim konstrukcijama gdje se mogu zadržavati voda i snijeg, kako bi se spriječila potencijalna strukturna oštećenja u najnepovoljnijim kombinacijama opterećenja.

Zeleni krovovi i zidovi predstavljaju ekološki održive i efikasne metode za jačanje otpornosti stambenih zgrada. Ove tehnologije ne samo da pomažu u borbi protiv klimatskih promjena, već i pružaju brojne prednosti u pogledu energetske efikasnosti, smanjenja zagađenja i unapređenja ukupnog kvaliteta života u urbanim sredinama. S obzirom na njihove brojne prednosti, preporučuje se njihov širi razvoj i integracija u buduće planove obnove postojećih i izgradnje novih stambenih zgrada.

LITERATURA

- [1] Alexandri E., Jones P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Build. Environ.* 43 (4), 480–493.

- [2] Bass B., Baskaran B. (2001). Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas, Institute for Research and Construction, NRCC-46737, Project number A020, CCAF Report B1046, Ottawa, Canada, National Research Council;
- [3] Avgan G. & Ashrafian T. (2022). Bioclimatic Design and Advanced Strategies' Impacts on Energy Performance of Residential Buildings, *Clima 2022*
- [4] Badrulzaman J., Ismail S., Mohd Hisyam R. (2011). Evaluating the Impact of Vertical Greenery System on Cooling Effect on High Rise Buildings and Surroundings: A Review, DOI: <http://dx.doi.org/10.21776/ub.ruas.2011.009.02.1>
- [5] Gajić D., Sudimac B., Rajčić A., Peulić S., Rašović J. (2023). Energy savings potential in modular envelope renovations of prefabricated residential buildings in Bosnia-Herzegovina and Serbia, *Places and Technologies 2023*, pp 407–415, doi: https://doi.org/10.18485/arh_pt.2024.8.ch49
- [6] Sudimac B., Gajić D., Peulić S. (2022). Energy renovation of residential building envelope using organic materials for the level of cost optimal improvement/upgrade in Bosnia-Herzegovina and Serbia, *STEPGRAD 2022 Conference proceedings*, pp. 380–392.
- [7] Arnautović-Aksić D., Burazor M., Delalić N., Gajić D., Gvero P., Kadrić DŽ., Kotur M., Salihović E., Todorović D., Zagora N. (2016), Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine, Giz, Sarajevo;
- [8] Правилник о минималним техничким условима за изградњу станова, Службени лист СФРЈ бр. 45 из 1967. године
- [9] Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju Republike Srpske. Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada ("Službeni glasnik Republike Srpske", broj: 30/15) https://ekofondrs.org/sadrzaj/dokumenti/ee/Pravilnik_o_minimalnim_zahjevima_za_energetske_karakteristike_zgrada.pdf

ABSTRACT

This research is based on the quantification of the benefits of passive systems for optimizing the envelope of residential buildings in the form of modular green structures, on the roof and on the facade. The research showed that by implementing vertical and roof green systems during the renovation of the envelope of residential buildings, it is possible to achieve energy savings for heating and cooling, in local climatic conditions. Thus, economic savings are achieved, as well as a reduction in greenhouse gas emissions. The proposed modular type of green structures would affect the simplicity and speed of implementation, and the positive effects would be significantly increased, when it comes to the climatic conditions in the area of the city of Banja Luka.

THE USE OF MODULAR GREEN STRUCTURES FOR RENOVATION OF RESIDENTIAL BUILDINGS

Simulation of a case study in the area of the city of Banja Luka

Milana Radujković, Darija Gajić, Budimir Sudimac

Eksperimentalno istraživanje uticaja klimatoloških parametara na temperaturu PV modula

Danijela Kardaš Ančić¹, Mirko Komatina², Petar Gvero¹, Bojan Knežević¹, Milan Pupčević¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, Srbija

danijela.kardas@mf.unibl.org, mirkokomatina@gmail.com, petar.gvero@mf.unibl.org, bojan.knezevic@mf.unibl.org, milan.pupcevic@mf.unibl.org

Sažetak— Solarna energija je jedan od vodećih obnovljivih izvora energije zbog svog velikog potencijala, pristupačnosti cijena pojedinačnih sistema, nulte emisije i bez emisije buke. Sunčevo zračenje koje dopire na površinu fotonaponskog (PV) modula djelimično se transformiše u električnu energiju dok najveći dio zračenja se transformiše u toplotu. Kao posljedica toga, temperatura fotonaponskog modula raste što uzrokuje smanjenje njegove električne efikasnosti posebno na temperaturi iznad 25 °C. Ova studija predstavlja pregled izmjerenih temperatura PV modula u zavisnosti od izmjerenih klimatskih parametara. Eksperimentalna instalacija za istraživanje je projektovana, konstruisana i izgrađena tako da omogućuje mjerenje svih relevantnih parametara u stvarnom vremenu. Rezultati pokazuju da meteorološki parametri kao što su temperatura vazduha, sunčevo zračenje i brzina vjetra definišu i imaju značajan uticaj na temperaturu PV modula, a time i na proizvodnju električne energije.

Ključne riječi—temperatura PV modula; eksperimentalno istraživanje; meteorološki podaci; PV električna efikasnost;

I. UVOD

Globalni godišnji kapaciteti obnovljivih izvora energije povećali su se za skoro 50% na skoro 510 GW u 2023. godini, što je najbrža stopa rasta u posljednje dvije decenije [1]. EU predlaže povećanje godišnjih kapaciteta u Direktivi o obnovljivoj energiji na 45% do 2030. godine, u odnosu na 40% u prošlogodišnjem prijedlogu. Time bi se ukupni kapaciteti za proizvodnju obnovljive energije doveli na 1236 GW do 2030. godine, u poređenju sa 1067 GW predviđenih do 2030. godine [2]. U narednih pet godina očekuje se da će se postići nekoliko prekretnica u oblasti obnovljive energije [1]:

- 2025. godine obnovljivi izvori energije prevazilaze ugalj i postaju najveći izvor proizvodnje električne energije;
- proizvodnja električne energije iz solarnih PV će nadmašiti nuklearnu proizvodnju električne energije u 2025. i 2026. godini;
- u 2028. godini obnovljivi izvori energije čine preko 42% globalne proizvodnje električne energije, pri čemu će se udio vjetra i solarne energije udvostručiti na 25%.

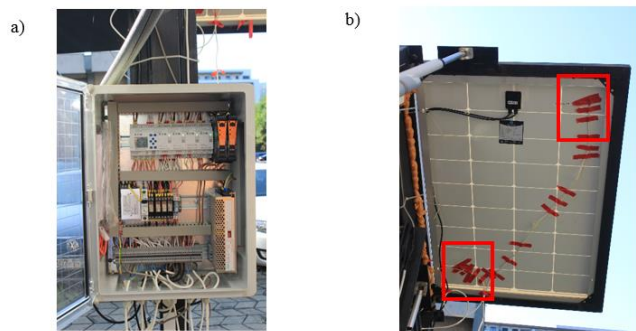
Globalno gledano, električna energija iz PV, predstavljala je tri četvrtine povećanja obnovljivih kapaciteta širom svijeta

2023 godine [1]. Kao deo REPowerEU plana, Strategija EU za solarnu energiju ima za cilj da do 2025. godine instalira preko 320 GW fotonaponskih panela (više nego udvostručivši se u odnosu na 2020.) i skoro 600 GW do 2030. [3]. Solarni fotonaponski paneli (PV) će dominirati u proizvodnji solarne energije od sada do 2050. godine [4]. Temperatura je jedna od fizičkih veličina koje imaju značajan uticaj na performanse fotonaponskih modula. Temperatura PV ćelije veća od 25 °C negativno utiče na električnu efikasnost PV modula [5] [6]. Ovo je veliki nedostatak solarne fotonaponske tehnologije. Kada temperatura fotonaponskih ćelija pređe 25 °C, električna efikasnost počinje da opada 0,4 – 0,65 %/°C [7] [8]. Tipični PV modul pretvara 6 – 23 % solarne energije u električnu energiju, dok se ostatak pretvara u toplotu, u zavisnosti od vrste tehnologije fotonaponskih ćelija i meteoroloških uslova [9] [10]. Faktori životne sredine imaju najveći uticaj na rad fotonaponskih sistema. Najvažniji faktori životne sredine su: sunčevo zračenje, vjetar, temperatura vazduha, akumulacija prašine, zaprljanost i efekat sijenčenja [11] [12] [13] [14] [15]. Temperatura zadnje površine fotonaponskog modula (T_m) i temperatura fotonaponske ćelije (T_c) mogu se razlikovati za visoke intenzitete sunčevog zračenja [16]. Pri solarnom zračenju od 1000 W/m², ova temperaturna razlika je tipično 2 do 3 °C. Za module sa ravnim pločama sa toplotno izolovanim zadnjom površinom, ova temperaturna razlika može se pretpostaviti da je nula [17]. S obzirom da je za analiziranu lokaciju prosječno dnevno sunčevo zračenje manje od 700 W/m², ove razlike su zanemarene i usvojeno je $T_c = T_m = T_{PV}$.

II. EKSPERIMENTALNA INSTALACIJA

Eksperimentalna instalacija je dizajnirana i napravljena na način da se može mjeriti temperatura fotonaponskog modula u realnom vremenu uzimajući u obzir relevantne meteorološke parametre kao što su temperatura vazduha, intenzitet sunčevog zračenja i brzina vjetra. Eksperimentalna instalacija (Sl. 1.) za ovu studiju se nalazi u dvorištu Mašinskog fakulteta u Banjoj Luci (44.46282 N, 17.11502 E) a meteorološka stanica je na krovu zgrade. Za eksperiment je izabran monokristalni PV sistem tip SZ-100-36M (Tabela 1). Tehničke specifikacije PV modula su date u tabeli 1. Temperatura modula je mjerena sa dva PT100 termopara postavljena na zadnjoj strani PV modula u dvije tačke. Ove lokacije su izabrane da bi se utvrdila razlika u distribuciji temperature preko panela. Za pozicioniranje termoparova izabrane su dve dijametralno različite tačke

(lijevi ugao dole i gornji desni, slika 1, b). Za dalju analizu korištena je srednja vrijednost ove dvije temperature. Tačnost PT100 je $\pm (0.15 + 0.002 \text{ k } |T|) ^\circ\text{C}$ za opseg od -50 do $300 ^\circ\text{C}$.



Sl. 1. Eksperimentalna instalacija (a - EASY – E4 – UC – 12 RC1; b – pozicija termoparova)

TABELA I. TEHNIČKA SPECIFIKACIJA PV MODULA

Standardni testni uslovi ("STC") $AM = 1.5$, $E = 1000 \text{ W/m}^2$, $T_c = 25 ^\circ\text{C}$	
Maksimalna snaga	100 W
Vrsta ćelija/efikasnost	monokristalne / 17.66 %
Maksimalna struja (I_{mpp})	5.41 A
Maksimalni napon (V_{mpp})	18.50 V
Napon otvorenog kola (V_{oc})	22.50 V
Struja otvorenog kola (I_{sc})	5.92 A
Radna temperatura	$-40 ^\circ\text{C} \div +80 ^\circ\text{C}$
Dimenzije panela	1020 x 670 x 35 mm

Podaci su prikupljeni u periodu od 3 dana (15. - 17.7.2023.) od 9:45 do 15:55 sa intervalom snimanja od 10 minuta i pohranjeni su putem EASI-E4-UC-12RC1 akvizicije podataka. Za ove analize izabran je mjesec jul kao najtopliji mjesec u godini za analizirano geografsko područje. Mjerenja su vršena 3 dana za redom kako bi se dobili relevantni podaci u zavisnosti od promjena meteoroloških parametara. Meteorološke podatke, uključujući intenzitet sunčevog zračenje, temperaturu okoline i brzinu vjetra, su mjereni meteorološkom stanicom Luft VS10. Tehnički podaci za meteorološku stanicu dati su u tabeli 2.

TABELA II. TEHNIČKA SPECIFIKACIJA METEOROLOŠKE STANICE

Temperatura vazduha	PTC, $-40 \div +60 ^\circ\text{C}$ ($\pm 1,0 ^\circ\text{C}$)
Solarno zračenje	Silicijum - piranometar, $0 \div 1500 \text{ W/m}^2$ ($\pm 10 \%$ or $\pm 120 \text{ W/m}^2$)
Brzina vjetra	$0 \div 40 \text{ m/s}$ ($\pm 1 \text{ m/s}$ or 5%)

III. REZULTATI I DISKUSIJA

Tabela 3. prikazuje maksimalne i minimalne vrijednosti meteoroloških parametara koji su izmjereni tokom eksperimentalnog istraživanja. Mjerenja su pokazala da se sunčevo zračenje (G), temperatura okoline (T_a) i brzina vjetra (v) kreću u rasponu od $457 - 822.3 \text{ W/m}^2$, $34.8 - 40.8 ^\circ\text{C}$ i $1.3 - 13.5 \text{ km/h}$, respektivno.

TABELA III. MAKSIMALNE I MINIMALNE VRIJEDNOSTI IZMJERENIH METEOROLOŠKIH PARAMETARA

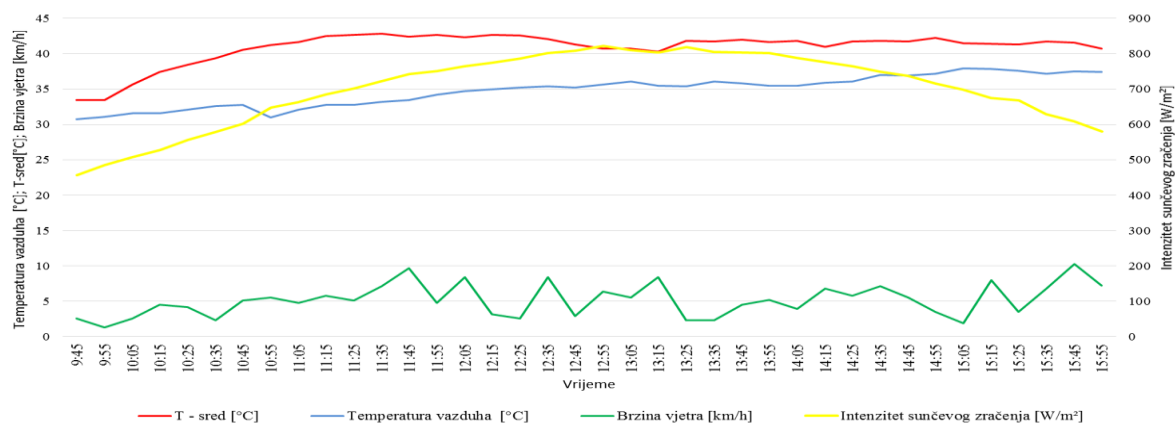
Day		$G_T (\text{W/m}^2)$	$T_a (^\circ\text{C})$	$v (\text{km/h})$
15.7.2023.	Max	822.3	37.9	10.3
	Min	457	30.7	1.3
16.7.2023.	Max	810.4	39	13.5
	Min	453.3	32.7	1.6
17.7.2023.	Max	806.7	40.8	9.3
	Min	461	34.8	1.6

U tabeli 4. su date srednje dnevne vrijednosti meteoroloških podataka (temperatura vazduha, brzina vjetra i intenzitet sunčevog zračenja) za cijeli period mjerenja kao i srednja dnevna izmjerena temperatura PV modula.

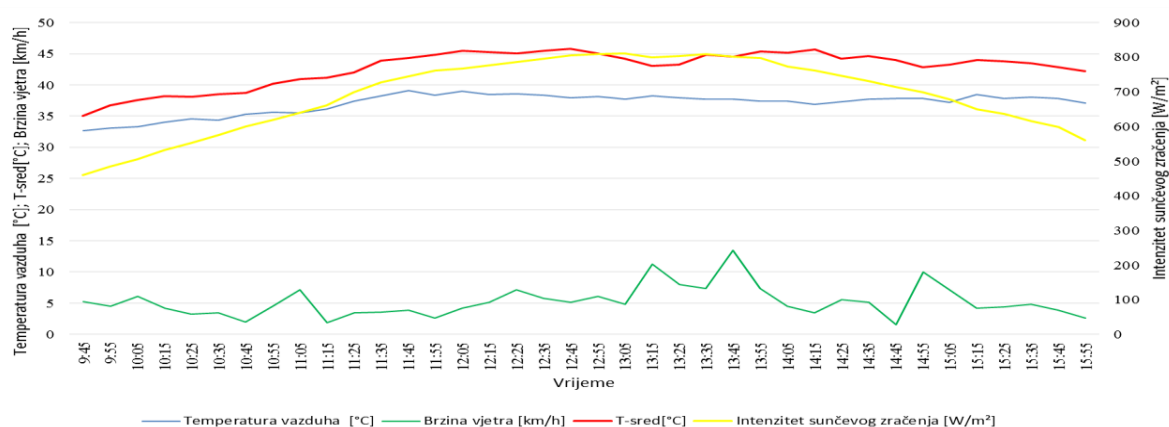
TABELA IV. SREDNJE DNEVNE IZMJERENE VRIJEDNOSTI METEOROLOŠKIH PARAMETARA KAO I SREDNJA DNEVNA TEMPERATURA PV MODULA

	15.7.2023.	16.7.2023.	17.7.2023.
Srednji dnevni intenzitet sunčevog zračenja [W/m^2]	703.62	698.15	686.63
Srednja dnevna temperatura vazduha [$^\circ\text{C}$]	34.71	36.99	38.72
Srednja dnevna brzina vjetra [km/h]	5.10	5.34	4.67
Srednja dnevna temperatura PV modula [$^\circ\text{C}$]	40.86	42.43	42.59

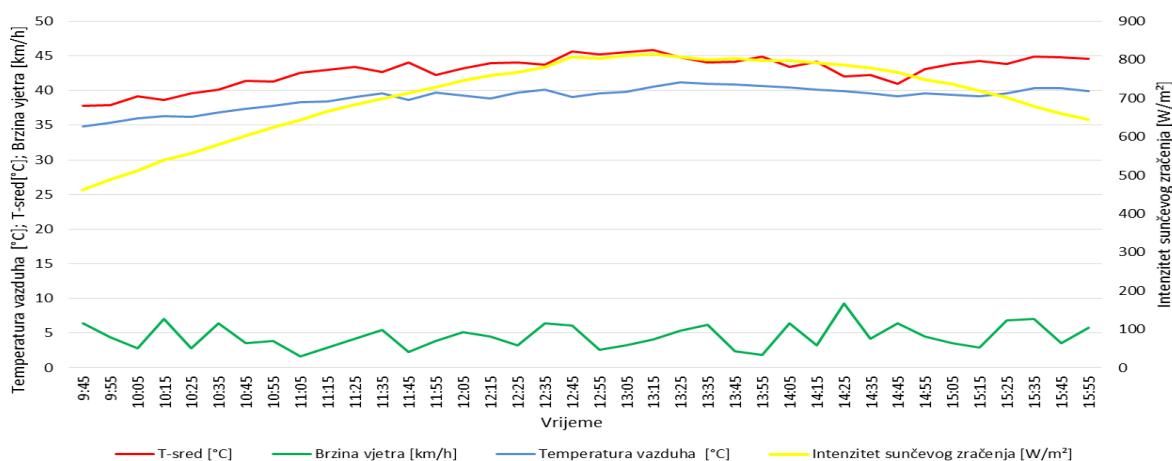
Kao što se može vidjeti u tabeli 4, najviša izmjerena temperatura PV modula odgovara danu sa najvišom temperaturom vazduha i najnižom brzinom vjetra (dan 17.7.2023.). Najniža izmjerena temperatura PV modula odgovara danu sa najnižom temperaturom vazduha i većom brzinom vjetra (15.7.2023.). Vrijednosti intenziteta sunčevog zračenja bile su relativno bliske tokom cijelog mjerenog perioda. Na Sl. 2, 3 i 4 dat je grafički prikaz izmjerenih vrijednosti temperature PV modula i meteoroloških podataka za cijeli period mjerenja.



Sl. 2. Izmjerene vrijednosti meteoroloških parametara i temperature PV modula na dan 15.7.2023.



Sl. 3. Izmjerene vrijednosti meteoroloških parametara i temperature PV modula na dan 16.7.2023.



Sl. 4. Izmjerene vrijednosti meteoroloških parametara i temperature PV modula na dan 17.7.2023.

Kao što se može videti na Sl. 2, 3 i 4., maksimalna vrednost izmjerene temperature PV modula odgovara maksimalnom dnevnom sunčevom zračenju i padu brzine vjetra. Kako brzina vjetra raste, temperatura PV modula se smanjuje. Ovi eksperimentalni rezultati potvrđuje uticaj vjetra

na konvektivno hlađenje fotonaponskog modula. U prvom dijelu dana raste intenzitet sunčevog zračenja, kao i temperatura vazduha i temperatura fotonaponskih modula. Temperaturna kriva PV modula prati krivu raspodele sunčevog zračenja sa maksimalnim i minimalnim

vrijednostima. Može se zaključiti da u prvom delu dana na temperaturu PV modula najveći uticaj ima intenzitet sunčevog zračenja sa uticajem brzine vjetra. U drugom dijelu dana (poslije 14 časova) temperatura vazduha i brzina vjetra imaju veći uticaj na temperaturu PV modula nego intenzitet sunčevog zračenje.

IV. ZAKLJUČAK

Analizirajući eksperimentalne podatke, može se zaključiti da je temperatura fotonaponskog modula iznad 25 °C tokom cijelog mjerenog perioda sa značajnim uticajem meteoroloških parametara. Minimalne i maksimalne vrijednosti izmjerene temperature PV modula odgovaraju minimalnim i maksimalnim vrijednostima mjerenih meteoroloških parametara (intenzitet sunčevog zračenja, temperatura vazduha i brzina vjetra). S obzirom na klimatske promjene, sve toplija ljeta sa izuzetno visokim temperaturama vazduha i intenzitetom sunčevog zračenja, može se očekivati da će temperatura PV modula biti iznad 25 °C skoro pola godine. Uzimajući u obzir izmjerene visoke temperature PV modula, za neka buduća istraživanja analiziraće se mogućnosti hlađenja i njegov uticaj na temperaturu PV panela i njegove performanse.

ZAHVALNICA

The authors acknowledge the support of the European Research Executive Agency (REA) for funding this research under the project “ENPOWER – Enhancing Scientific Capacity for Energy Poverty (101160253 — ENPOWER — HORIZON-WIDERA-2023-ACCESS-02)”.

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or European Research Executive Agency (REA). Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

The authors acknowledge the support of the Science Fund of the Republic of Serbia, Grant No. 4344, “Forward-Looking Framework for Accelerating Households” Green Energy Transition – FF GreEN and by the Ministry of Science, Technological Development and Innovation of the Republic of Serbia; grant number 451-03-137/2025-03/200105.

LITERATURA

- [1] Renewables 2023 - Analysis and forecast to 2028, International Energy Agency Report (2024)
- [2] REPowerEU Plan, European Commission (2022).
- [3] EU Solar Energy Strategy, European Commission, Brussels (2022)
- [4] The future of Solar energy, MIT (2015)
- [5] A. Nouar, „Methodology for predicting the PV module temperature based on actual and estimated weather data“, *Energy Conversion and Management: X*, 14, (2022)
- [6] I. Santiago, D. Trillo-Montero, M. Moreno-Garcia, V. Pallares-Lopez, J.Luna-Rodriguez, „Modeling of photovoltaic cell temperature losses: a review and a practice case in South Spain“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, (2018), pp. 70-89

- [7] M. Sharaf, A.S. Huzayyin, M.S.Yousef, „Performance enhancement of photovoltaic cells using phase change material (PCM) in winter“, *Alexandria Engineering Journal*, (2022) pp. 4229–4239
- [8] H.Gürbüz, S. Demitürk, H. Akcay, Ü. Topalci, „Experimental investigation on electrical power and thermal energy storage performance of a solar hybrid PV/T-PCM energy conversion system“, *Journal of Building Engineering*, 69 (2023)
- [9] C.B. Yoong, „Optimal orientation and tilting angle of PV panels considering shading and temperature effects“, *Lee Kong Chian Faculty of Engineering and Science University Tunku Abdul Rahman*, Ph.D thesis (2023)
- [10] M. Fouad, L.A. Shihata, E.I. Morgan, „An integrated review of factors influencing the performance of photovoltaic panels“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 (2017) pp. 1499–1511
- [11] M. Nezamisavjbolaghi, E. Davodian, A. Bouich, M. Tlemcani, O. Mesbahi, F.N. Janeiro, „The Impact of Dust Deposition on PV Panels' Efficiency and Mitigation Solutions: Review Article“, *Energies*, 16, (2023) pp. 2-19.
- [12] S. Gallardo-Saavedra, B. Karlson, „Simulation, validation and analysis of shading effects on a PV system“, *Solar Energy*, (2018), pp. 828-839
- [13] R. Conceicao, J. Gonzalez - Aguilari, A.A. Merrouni, M. Romero, „Soiling effect in solar energy conversion systems: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, (2022)
- [14] R. Korab, M. Polomski, T. Naczynski, T. Kandzia, „A dynamic thermal model for a photovoltaic module under varying atmospheric conditions“, *Energy Conversion and Management*, 280, (2023)
- [15] R. Shadid, Y. Khawaja, A. Bani-Andullah, M. Akho- Zahieh, A. Allaham, „Investigation of weather conditions on the output power of various photovoltaic systems“, *Renewable Energy*, 217, (2023)
- [16] M. Zouine, et al., „Mathematical Models Calculating PV Module Temperature Using Weather Data: Experimental Study“, in *Proceedings of the 1st International Conference on Electronic Engineering and Renewable Energy. ICEERE 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Singapore, (2019)
- [17] D.L. King, W.E. Boyson, J.A. Kratochvill, „Photovoltaic Array Performance Model“, Sandia National Laboratories, (2004)

ABSTRACT

Solar energy is one of the leading renewable energy sources due to its great potential, affordable prices for individual systems, zero emissions and no noise emissions. The solar radiation that reaches the surface of the photovoltaic (PV) module is partially transformed into electrical energy, while most of the radiation is transformed into heat. As a consequence, the temperature of the photovoltaic module increases, which causes a decrease in its electrical efficiency, especially at temperatures above 25 oC. This study presents an overview of the measured temperatures of PV modules as a function of the measured climate parameters. The experimental installation for research was designed, constructed and built in such a way as to enable the measurement of all relevant parameters in real time. The results show that meteorological parameters such as air temperature, solar radiation and wind speed define and have a significant impact on the temperature of the PV module, and thus on the production of electricity.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF CLIMATOLOGICAL PARAMETERS ON THE PV MODULE TEMPERATURE

Danijela Kardaš Ančić, Mirko Komatina, Petar Gvero, Bojan Knežević, Milan Pupčević

Analiza primjene mjera energetske efikasnosti na smanjenje zagađenja česticama (PM_{2,5})

Sara Radišić¹, Petar Gvero¹, Milovan Kotur¹, Milan Pupčević¹, Đorđe Vojinović²

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, BiH

²Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet, Banja Luka, Republika Srpska, BiH

radisic.sara@gmail.com, petar.gvero@mf.unibl.org, milovan.kotur@mf.unibl.org, milan.pupcevic@mf.unibl.org, djordje.vojnovic@tf.unibl.org

Sažetak—U radu su navedene teorijske osnove zagađenja česticama. U istraživanju su prikazane mjere energetske efikasnosti i rezultati trenutnog zagađenja česticama i zagađenja poslije primijenjenih mjera. Istraživanje je izvršeno u urbanom dijelu grada Banjaluke. Cilj rada je da prikaže zavisnost između zagađenja i energetske efikasnosti i takođe, da pokaže način na koji je moguće uticati na smanjenje zagađenja.

Ključne riječi—Čestice; Tipologija zgrada; Energetska efikasnost;

I. UVOD

Kvalitet vazduha se danas direktno vezuje za kvalitet života. Bosna i Hercegovina je poznata po lošem kvalitetu vazduha. Loš kvalitet vazduha u BiH je direktno povezan s vrstom goriva kao i lošom energetsom efikasnošću sistema grijanja koji se koriste.

Istraživanje u ovom radu predstavlja originalno istraživanje za koje su korišteni podaci iz [1] kao i podaci dobijeni od Republičkog zavoda za statistiku. Na ove podatke su primijenjene mjere energetske efikasnosti opisane u [2]. U radu je prikazano kako se kroz povećanje energetske efikasnosti mogu postići značajna smanjenja emisije štetnih gasova i samim tim omogućiti kvalitetniji život stanovništva.

Prilikom istraživanja u obzir su uzete samo stambene kuće u jednoj od urbanih zona grada Banjaluke kako bi se unificirali podaci za jednu grupu objekata koja je najdominantnija. Odabrano područje analize je posebno zanimljivo zbog širokog spektra starosti i vrste objekata koji se nalaze u naselju.

Za obradu podataka u radu korišten je softverski paket MATLAB.

II. ZAGAĐENJE ČESTICAMA

Zagađenje vazduha predstavlja atmosfersko stanje kod kojeg je koncentracija određene materije dovoljno velika da može da izazove neželjene efekte na živa bića i njihovu okolinu [3]. Istraživanje je fokusirano na čestice, zbog čega je korišten evropski standard za indeks zagađenosti vazduha (*European Air Quality Index*). Pored evropskog standarda, moguće je koristiti i druge standarde od kojih su najčešći američki (*US Air Quality Index*) i kanadski (*Canadian Air Quality Health Index*) [4].

U Tab. 1 su prikazane vrijednosti indeksa za navedene standarde koji se koriste.

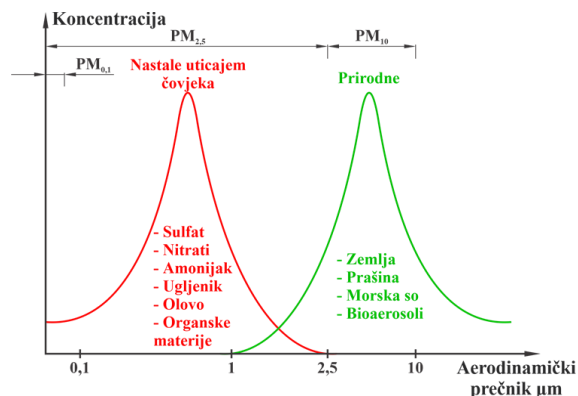
TABELA I. VRIJEDNOSTI INDEKSA ZA RAZLIČITE STANDARDE [4]

European AQI	US AQI	Canadian AQHI
Dobar (0 – 10)	Dobar (0 – 50)	Nizak rizik (1 – 3)
Solidan (10 – 20)	Umjeren (51 – 100)	Umjeren rizik (4 – 6)
Umjeren (20 – 25)	Nezdrav za osjetljive grupe (101 – 150)	
Loš (25 – 50)	Nezdrav (151 – 200)	Visok rizik (7 – 10)
Veoma loš (50 – 75)	Veoma nezdrav (201 – 301)	
Ekstremno loš (75 – 800)	Opasan (>300)	Veoma visok rizik (>10)

Zagađenje česticama se najčešće dijeli u zavisnosti od aerodinamičkog prečnika čestice gdje se izdvajaju dvije osnovne vrste i to:

- Krupne čestice: PM₁₀ (aerodinamički prečnik u opsegu 2,5 – 10 µm) i
- Fine čestice: PM_{2,5} (aerodinamički prečnik manji od 2,5 µm):
 - Ultra fine čestice: PM_{0,1} (aerodinamički prečnik manji od 0,1 µm),
 - Nano čestice PM_{0,01} (aerodinamički prečnik manji od 0,01 µm). [5]

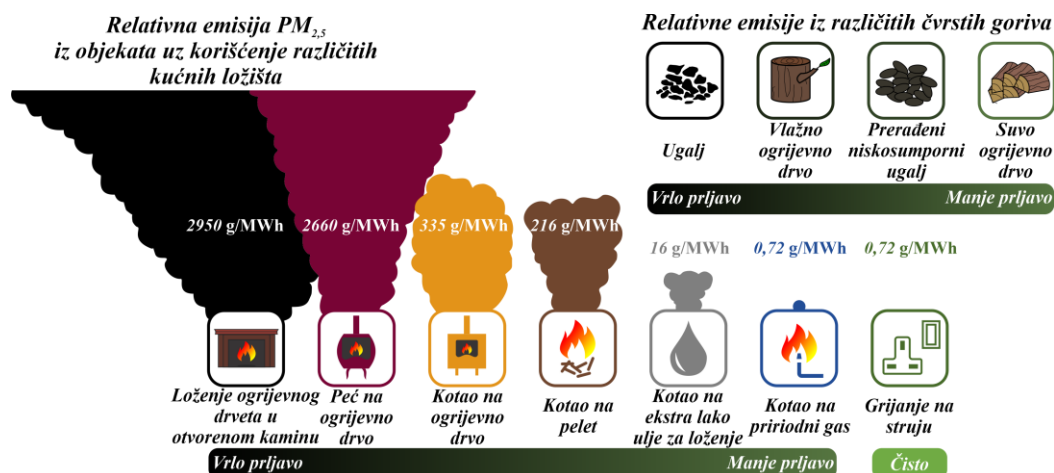
Na Sl. 1 je prikazan dijagram koncentracije različitih čestica, kao i neke od čestica koje se pojavljuju.



Sl. 1. Dijagram koncentracije različitih čestica [5]

Postoje mnogi faktori koji utiču na koncentraciju i distribuciju čestica u vazduhu. Kao značajni uticaji su se izdvojili temperatura (godišnje doba) i vremenski uslovi. U zavisnosti od temperature se mijenja i količina korištenog goriva za zagrijavanje, a samim tim i količina čestica koja se ispušta u vazduh.

Na Sl. 2 su prikazana zagađenja svakog od sistema grijanja, koji su iskorišteni za računanje količine čestica u vazduhu.



Sl. 2. Količine zagađenja česticama u zavisnosti od sistema grijanja i goriva koje se koristi [5]

III. ANALIZA KOLIČINE ZAGAĐENJA I PRIMIJENJENE MJERE ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Vremenski uslovi utiču na distribuciju tih čestica i njihovo prečišćavanje u vazduhu. Što se tiče rezultata, analiziran je primarno zimski period, odnosno period sezone grijanja u Banjaluci.

Podaci o koncentraciji čestica u vazduhu su podijeljeni u dvije grupe. Prva grupa predstavlja stvarne rezultate mjerenja zagađenja vazduha koji su trenutno aktuelni [1]. Ovi podaci se odnose na stanje kakvo je sada, odnosno stanje na koje su primijenjene mjere energetske efikasnosti. Druga grupa podataka o koncentraciji čestica u vazduhu se odnosi na količinu ispuštenih čestica poslije primijenjenih mjera energetske efikasnosti, odnosno korigovano stanje zagađenosti.

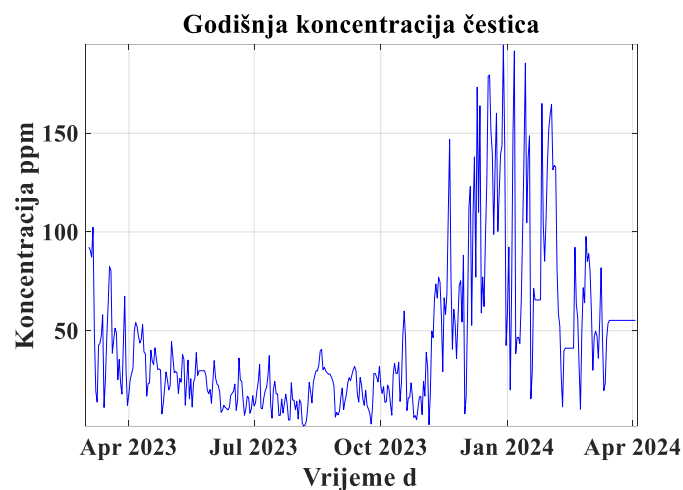
A. Rezultati zagađenja vazduha česticama bez primijenjenih mjera energetske efikasnosti

Vrijednosti zagađenja česticama su preuzete s PurpleAir internet stranice i to za dnevne vrijednosti (za dostupni period od 03.03.2023. do 03.04.2024.) i za časovne vrijednosti (za dostupni period od 19.02.2024. do 01.04.2024.).

Dnevne vrijednosti zagađenja vazduha su iskorištene kako bi se vidio uticaj godišnjeg doba odnosno temperature. Koristeći ove podatke, vidi se uticaj sistema grijanja, odnosno goriva koja se koriste za zagrijavanje, na vrijednosti zagađenja. Na te rezultate su primijenjene mjere energetske efikasnosti.

Časovne vrijednosti su iskorištene kako bi se dobili podaci o dnevnom zagađenju, gdje se može vidjeti u kojem periodu dana je zagađenje najveće i koji bi period dana trebao biti fokus što se tiče mjera energetske efikasnosti. Takođe, ovi

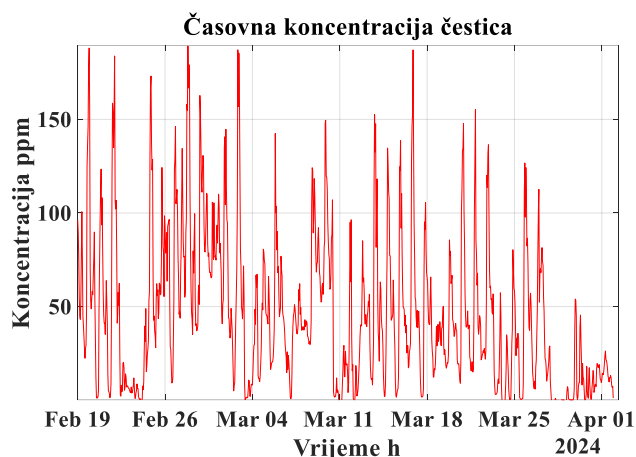
podaci su pokazatelj zagađenja koje dolazi od sagorijevanja pogonskih goriva, te su aktuelni i van sezone grijanja. Na Sl. 3 je prikazana godišnja vrijednost zagađenja po danu.



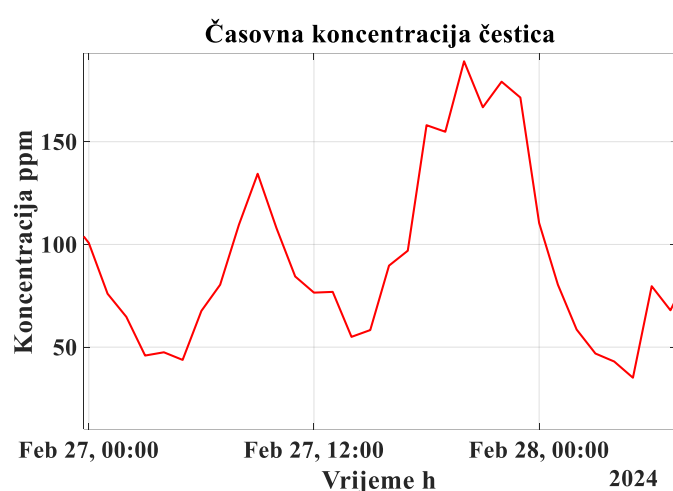
Sl. 3. Godišnja koncentracija čestica po danu

Na Sl. 3 se vidi da je zagađenje znatno veće u periodu sezone grijanja, odakle se vidi uticaj sistema grijanja na zagađenje. Proračunom je dobijeno da je za vrijeme sezone grijanja koncentracija čestica veća za oko 70% u odnosu na ostatak godine. Na tih 70% se primjenjuju navedene mjere dok je ostalih 30% zagađenja uzrokovano ostalim činiocima koji utiču na kvalitet vazduha, pri čemu se izdvaja najviše saobraćaj.

Na Sl. 4 su prikazane časovne vrijednosti zagađenja, dok je na Sl. 5 prikazan jedan dan gdje se vidi u kojim periodima dana dolazi do povećanja, a u kojim periodima dolazi do smanjenja zagađenja.



Sl. 4. Časovna koncentracija čestica u periodu od 19.02.2024. do 01.04.2024.



Sl. 5. Časovna koncentracija čestica u toku jednog dana

Na Sl. 4 se može vidjeti da postoje pikovi zagađenja u toku dana, dok se na Sl. 5 može primijetiti koji periodi dana imaju najveće zagađenje. Periodi najvećeg zagađenja su u toku tzv. vršnih časova, odnosno u periodima s pojačanim protokom saobraćaja na putevima.

B. Mjere energetske efikasnosti

Primijenjene mjere energetske efikasnosti se odnose isključivo na slobodnostojeće kuće. Podjela kuća je izvršena prema tipologiji stambenih zgrada [2] i prema podacima Republičkog zavoda za statistiku u odnosu na period gradnje, a samim tim i način gradnje. U obzir su uzete kuće s jednim i s dva stana (u zagradi je naznačen broj prizemnih kuća plus broj P+1 kuća) izgrađene poslije 1960. godine u sljedećim periodima:

- kuće izgrađene od 1961. do 1970. godine (1355+327),
- kuće izgrađene od 1971. do 1980. godine (121+135),
- kuće izgrađene od 1981. do 1990. godine (25 +42) i
- kuće izgrađene od 1991. do 2014. godine (88+126).

U radu je izvršena aproksimacija pri čemu je pretpostavljeno da kuće s dva stana troše tačno duplo više toplotne energije za grijanje. Mjere energetske efikasnosti koje su primijenjene se odnose na unapređenje omotača objekta (spoljašnji zid, prozori, pod na tlu/međuspratna konstrukcija iznad negrijanog podruma i međuspratna konstrukcija ispod negrijanog tavana) i unapređenje tehničkih sistema objekta.

U Tab. 2 su prikazane vrijednosti potrošnje toplotne energije bez unapređenja i s dva tipa unapređenja prema [2].

TABELA II. VRIJEDNOST TOPLOTNE ENERGIJE U MWh PO OBJEKTU U ZAVISNOSTI OD PERIODA IZGRADNJE OBJEKTA I TIPA UNAPREĐENJA [2]

Period	Bez unapređenja	Unapređenje 1	Unapređenje 2
1961-1970	25,87	9,56	5,94
1971-1980	25,88	9,10	5,31
1981-1990	13,79	7,38	5,59
1991-2014	15,70	10,58	8,26

Iz Tab. 2 se vidi da kuće starije gradnje zahtjevaju veću toplotnu energiju za grijanje iako u prosjeku imaju manju kvadraturu, a razlog je lošija energetska efikasnost samog objekta (lošija toplotna izolacija i stolarija) kao i sistema grijanja objekta (većina ovih objekata se grije pomoću peći na ogrijevno drvo). Takođe, vidi se da se unapređenjima postiže znatno veće smanjenje toplotne energije nego što je to slučaj sa objektima novije gradnje, gdje do izražaja dolazi upravo kvadratura samog objekta. Veći objekti novije gradnje su odmah u početku građeni pomoću boljih materijala i objekti imaju veću energetska efikasnost čak i bez unapređenja, tako da je kod njih manje izraženo smanjenje toplotne energije uslijed unapređenja.

Za vrijednosti prikazane u Tab. 2 u odnosu na vrijednosti zagađenja na Sl. 2 je izračunata masa čestica ispuštenih u toku sezone grijanja bez i sa unapređenjima u gramima i te vrijednosti su date u Tab. 3.

TABELA III. MASA ČESTICA U GRAMIMA PO OBJEKTU U ZAVISNOSTI OD PERIODA IZGRADNJE OBJEKTA I TIPA UNAPREĐENJA [2] ZA OBJEKTE KOJI SE ZAGRIJAVAJU POMOĆU PEĆI NA OGRIJEVNO DRVO

Period	Bez unapređenja	Unapređenje 1	Unapređenje 2
1961-1970	68814,2	3202,6	1989,9
1971-1980	68840,8	3048,5	1778,8
1981-1990	36681,4	2472,3	1872,6
1991-2014	41762	3544,3	2767,1

U Tab. 3 se uočava da se unapređenjem energetske efikasnosti i smanjenjem potrebne toplotne energije smanjuje i količina čestica koja se ispušta u atmosferu.

C. Računanje smanjenja koncentracije čestica u odnosu na unapređenja objekta

Rezultati mjera energetske efikasnosti su iskorišteni da bi se mogli dobiti rezultati zagađenja za cijelo naselje. Prilikom računanja mjera, zbog nedostatka egzaktnih podataka uzete su u obzir određene pretpostavke:

- Nije izvršeno unapređenje omotača objekta ni na jednom objektu, već se u obzir uzima da su svi objekti bez unapređenja.

- Za objekte koji kao gorivo koriste ulje za loženje (ekstra lako) ili prirodni gas se uzima da su to objekti koji posjeduju centralni sistem grijanja s vlastitim instalacijama, pri čemu se koriste isti podaci o potrošnji energije kao i za sisteme s centralnim sistemom grijanja s vlastitim instalacijama koji radi na ogrijevno drvo/pelet iz [2].
- 95% objekata s centralnim sistemom grijanja s vlastitim instalacijama koristi ogrijevno drvo kao gorivo, dok 5% koristi pelet (podaci su dati za 2013. godinu, kada pelet nije bio toliko zastupljen kao danas).
- 80% objekata s centralnim sistemom grijanja s vlastitim instalacijama je unapređenje prvog tipa, dok je 20% unapređenje drugog tipa.
- U slučaju unapređenja uzima se da je na 50% objekata izvršeno puno unapređenje tipa 1, a da je na 50% drugih objekata izvršeno puno unapređenje tipa 2.

U nastavku je prikazan matematički proračun koji je urađen za sve prizemne objekte i P+1 objekte iz svih perioda. Prvo se definišu pragovi za stepene tehničkog unapređenja gdje je Q toplotna energija za objekte bez unapređenja, dok su izrazi (1) i (2) računanje toplotne energije samo tehničkog unapređenja tipa 1 i tipa 2.

$$Q_{ts1} = Q - (0,35 \cdot Q), \quad (1)$$

$$Q_{ts2} = Q - (0,40 \cdot Q). \quad (2)$$

Koristeći pretpostavke i podatke iz [2] i podatke dobijene od Republičkog zavoda za statistiku, izračunate su toplotne energije na nivou naselja u odnosu na gorivo koje se koristi (Q_{drvo} ogrijevno drvo u pećima na drva, Q_{pg} prirodni gas, Q_{lu} ulje za loženje, Q_{dcg} ogrijevno drvo u kotlu centralnog grijanja i Q_{pcg} pelet).

$$Q_{drvo} = D_{pzp} Q P_{gd}, \quad (3)$$

$$Q_{pg} = D_{cgsvi} \left(\frac{0,8Q_{ts1} + 0,2Q_{ts2}}{2} \right) P_{gpg}. \quad (4)$$

$$Q_{lu} = D_{cgsvi} \left(\frac{0,8Q_{ts1} + 0,2Q_{ts2}}{2} \right) P_{glu}. \quad (5)$$

$$Q_{dcg} = D_{cgsvi} \left(\frac{0,8Q_{ts1} + 0,2Q_{ts2}}{2} \right) P_{gd}. \quad (6)$$

$$Q_{pcg} = D_{cgsvi} \left(\frac{0,8Q_{ts1} + 0,2Q_{ts2}}{2} \right) P_{gp}. \quad (7)$$

pri čemu su:

- D_{pzp} – broj domaćinstava koja se griju pojedinačnim zagrijavanjem prostoriya,
- P_{gd} – postotak domaćinstava koja koriste ogrijevno drvo kao gorivo,
- D_{cgsvi} – broj domaćinstava koja se griju pomoću sistema centralnog grijanja,

- P_{pgp} – postotak domaćinstava koja koriste prirodni gas kao gorivo,
- P_{glu} – postotak domaćinstava koja koriste ulje za loženje kao gorivo i
- P_{gp} – postotak domaćinstava koja koriste pelet kao gorivo.

Izračunate toplotne energije se koriste za računanje ukupne mase čestica u vazduhu za cijelo naselje. Na Sl. 2 su date pojedinačne vrijednosti zagađenja za objekat koje se množe s ukupnim toplotnim energijama i dobija se aproksimativna ukupna masa čestica prije unapređenja omotača prema izrazu.

$$m = Q m_{epD}. \quad (8)$$

$$m_{uk} = m_{duk} + m_{pguk} + m_{luuk} + m_{dcguk} + m_{puk}. \quad (9)$$

pri čemu su:

- Q – količina toplotne energije
- m_{epD} – masa čestica ispuštenih u atmosferu po domaćinstvu u zavisnosti od goriva,
- m_{uk} – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem svih goriva u toku godine prije unapređenja,
- m_{duk} – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem ogrijevnog drveta u pećima u toku godine prije unapređenja,
- m_{pguk} – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem prirodnog gasa u toku godine prije unapređenja,
- m_{luuk} – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem ulja za loženje u toku godine prije unapređenja,
- m_{dcguk} – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem ogrijevnog drveta u sistemima centralnog grijanja u toku godine prije unapređenja i
- m_{puk} – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem peleta u toku godine prije unapređenja.

Proračun je ponovljen i za vrijednosti toplotne energije poslije unapređenja prikazanih u Tab. 2. Na taj način je dobijena vrijednost mase čestica za sisteme koji su u potpunosti unapređeni. Dijeljenjem ukupne mase prije i poslije unapređenja može se dobiti postotak smanjenja koncentracije čestica u vazduhu (10) u zavisnosti od unapređenja.

$$p_{sk} = 100 - \left(\frac{m_{uk,pu}}{m_{uk}} \right) \cdot 100. \quad (10)$$

Pri čemu je:

- $m_{uk,pu}$ – ukupna masa čestica ispuštenih u atmosferu nastala sagorijevanjem svih goriva u toku godine poslije unapređenja.

Ovaj proračun je urađen na identičan način za sve periode gradnje i pojedinačno za prizemne i P+1 kuće. Dobijeni podaci su dati u Tab. 4.

TABELA IV. MJERNI PARAMETRI ZA POTROŠNJU TOPLOTNE ENERGIJE I NJEN UTICAJ NA KONCENTRACIJU ČESTICA U VAZDUHU

Mjerni parametri	Period izgradnje							
	Prizemne kuće				P+1 kuće			
	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2014	1961-1970	1971-1980	1981-1990	1991-2014
Q	25,87	25,88	13,79	15,70	51,74	51,76	27,58	31,40
Q'	9,56	9,10	7,38	10,58	19,12	18,20	14,76	21,16
Q''	5,94	5,31	5,59	8,26	11,88	10,62	11,18	16,52
Q_{ts1}	16,82	16,82	8,96	10,21	33,63	33,64	17,93	20,41
Q_{ts2}	15,52	15,53	8,27	9,42	31,04	31,06	16,55	18,84
Q_{drvo}	18740,89	2404,97	679,68	1370,30	6534,74	1939,92	523,92	822,18
Q_{pg}	7,73	0,99	0,28	0,57	2,70	0,80	0,22	0,34
Q_{lu}	12,15	1,56	0,44	0,89	4,24	1,26	0,34	0,53
Q_{dcg}	1865,06	239,34	67,64	136,37	650,33	193,06	52,14	81,82
Q_{pcg}	102,70	13,18	3,72	7,51	35,81	10,63	2,87	4,51
m_{duk}	49850,77	6397,22	1807,94	3645,00	17382,41	5160,19	1393,62	2187,00
m_{pguk}	0,01	0,0007	0,0002	0,0004	0,0019	0,0006	0,00	0,00
m_{luuk}	0,19	0,02	0,01	0,01	0,07	0,02	0,01	0,01
m_{dcguk}	624,80	80,18	22,66	45,68	217,86	64,67	17,47	27,41
m_{pcguk}	22,18	2,85	0,80	1,62	7,74	2,30	0,62	0,97
m_{uk}	50497,95	6480,27	1831,41	3692,32	17608,07	5227,18	1411,71	2215,39
$Q_{drvo,pu}$	5614,30	669,54	319,63	822,18	1957,64	540,07	246,38	493,31
$Q_{pelet,pu}$	309,15	36,87	17,60	45,27	107,80	29,74	13,57	27,16
$Q_{pg,pu}$	7,24	0,86	0,41	1,06	2,52	0,70	0,32	0,64
$Q_{lu,pu}$	11,38	1,36	0,65	1,67	3,97	1,09	0,50	1,00
$Q_{dcg,pu}$	1746,02	208,22	99,40	255,69	608,82	167,96	76,62	153,42
$Q_{pcg,pu}$	96,14	11,47	5,47	14,08	33,52	9,25	4,22	8,45
$m_{duk,pu}$	1880,79	224,30	107,08	275,43	655,81	180,92	82,54	165,26
$m_{pguk,pu}$	0,01	0,0006	0,0003	0,0008	0,0018	0,0005	0,00	0,00
$m_{luuk,pu}$	0,18	0,02	0,01	0,03	0,06	0,02	0,01	0,02
$m_{dcguk,pu}$	584,92	69,76	33,30	85,66	203,95	56,27	25,67	51,39
$m_{pcguk,pu}$	87,54	10,44	4,98	12,82	30,53	8,42	3,84	7,69
$m_{uk,pu}$	2553,44	304,52	145,37	373,94	890,36	245,63	112,06	224,36
p_{sk}	94,94	95,30	92,04	89,87	94,94	95,30	92,06	89,87

Oznake u Tab. 4 koje nisu navedene u radu su: Q' toplotna energija potrebna poslije unapređenja prvog tipa, Q'' toplotna energija potrebna poslije unapređenja drugog tipa, $Q_{pelet,pu}$ toplotna energija nastala sagorijevanjem peleta u sistemima centralnog grijanja s vlastitim instalacijama koji su prije unapređenja pojedinačno zagrijavali prostorije pomoću peći na ogrijevno drvo. Oznake koje u indeksu imaju *pu* oznaku odnose se na već navedene oznake, ali *poslije unapređenja*.

Kako su vrijednosti smanjenja dobijene pod pretpostavkom, potrebno je to korigovati, kako bi se dobile realnije vrijednosti za svaku vrstu objekta pojedinačno. U proračun se uvode korekcionni faktori kojima se definiše realnija situacija što se tiče unapređenja. Korekcionni faktor je obrnuto srazmjeran procentu smanjenja koncentracije čestica.

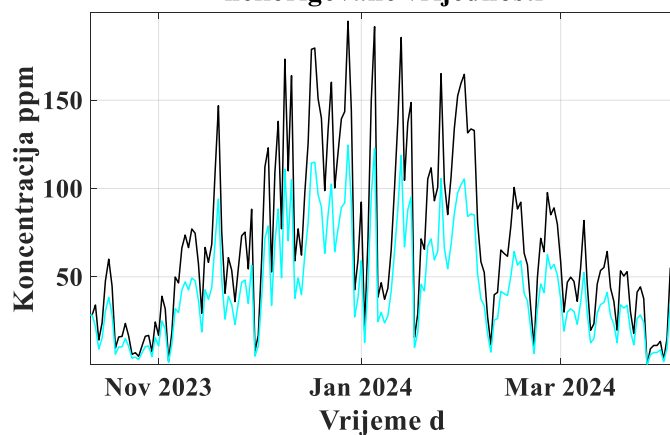
Što je objekat novije gradnje, veća je mogućnost da su na njemu izvršena neka unapređenja, zbog čega je njegov korekcionni faktor veći, a procenat realnog smanjenja koncentracije čestica manji. Korekcionni faktori koji se uvode su:

- 0,30 za objekte izgrađene od 1961. do 1970. godine;
- 0,40 za objekte izgrađene od 1971. do 1980. godine;
- 0,55 za objekte izgrađene od 1981. do 1990. godine i
- 0,70 za objekte izgrađene od 1991. do 2014. godine;

Sumirajući korigovana smanjenja koncentracije čestica za svaku vrstu objekata posebno, dobija se ukupna vrijednost smanjenja koncentracije čestica od 51,42% i odnosi se samo na onu količinu čestica nastalu sagorijevanjem goriva, što je oko 70% ukupne količine čestica.

Na Sl. 6 je prikazano trenutno stanje koncentracije čestica i korigovano stanje.

Uporedni prikaz korigovane i nekorigovane vrijednosti



Sl. 6. Uporedni prikaz trenutne i korigovane vrijednosti koncentracije čestica

Na Sl. 6 se može uočiti da je smanjenje koncentracije čestica primjetno. Naravno, ovakav način prikazivanja predstavlja jednostavnu aproksimaciju mogućeg stanja, gdje je na svaki dan primijenjen identičan postotak smanjenja koncentracije čestica. Vrijednosti zagađenja bi i sa unapređenjima energetske efikasnosti zavisile od više faktora, kao što su vremenski uslovi, gustina saobraćaja na putevima, itd.

IV. ZAKLJUČAK

Analiza primjene mjera energetske efikasnosti je tema ovog rada. Kroz rad je pokazano da se koristeći mjere energetske efikasnosti može značajno uticati na zagađenje vazduha.

Analizom je pokazano da važnu ulogu igraju sistemi grijanja kao i samo stanje u kojem se objekat nalazi. Dobijeni rezultati pokazuju da se mjerama energetske efikasnosti može smanjiti koncentracija čestica preko 50%.

Prikazani matematički model je interesantan, jer je moguće primijeniti na različite vrste objekata, kao i na veće prostore, kao što je grad i država. Takođe se može kombinovati s drugim metodama i drugim mjerama energetske efikasnosti. Time bi se dobili podaci koji su tačniji i precizniji.

LITERATURA

- [1] map.purpleair.com
- [2] D. Arnaudović-Aksić, M. Burazor, N. Delalić, D. Gajić, P. Gvero, Dž. Kadrić, M. Kotur, E. Salihović, D. Todorović, N. Zagora, "Slobodnostojeće kuće," Tipologija stambenih zgrada Bosne i

Hercegovine, Sarajevo, BiH, Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, giz, 2016, str. 68 – 103

- [3] M. Adamasu, M. Wueshet, "Air Pollution," Lecture notes, Gondar, Ethiopia, University of Gondar, 2006.
- [4] Standards for Air Quality Indices in Different Countries (AQI) [online], <https://atmotube.com/blog/standards-for-air-quality-indices-in-different-countries-aqi>
- [5] R. Radić, "Prostorne i vremenske varijacije koncentracija i hemijskog sastava suspendovanih čestica PM₁₀ u urbanoj, ruralnoj i industrijskoj sredini," Magistarski rad, Univerzitet u Banjoj Luci, Tehnološki fakultet, Banja Luka, BiH, 2016.
- [6] A. Podić, "Zagađenje zraka i mala kućna ložišta Problem koji ima rješenje," Eko akcija, Sarajevo, BiH, 2020.

ABSTRACT

This paper presents the theoretical foundations of particulate matter pollution. The study outlines energy efficiency measures and compares current levels of particulate pollution with levels recorded after the implementation of these measures. The research was conducted in one of the urban area of Banja Luka. The objective of this study is to demonstrate the correlation between pollution levels and energy efficiency, as well as to highlight methods for mitigating air pollution.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF ENERGY EFFICIENCY MEASURES ON PARTICULATE MATTER (PM_{2.5}) POLLUTION REDUCTION

Sara Radišić, Petar Gvero, Milovan Kotur, Milan Pupčević, Đorđe Vojinović

Performance and aesthetic evaluation of building-integrated photovoltaics with MorphoColor® and antisoiling coatings in a living lab environment

Aleksandar Janković^{1*}, Behnam Rosti², Francesco Goia¹, Ruth Woods³, Thomas Berker³, Sophie Gledhill⁴, Bruno Bueno⁴, Guangyu Cao²

¹Department of Architecture and Technology, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

²Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

³Department of Interdisciplinary Studies of Culture, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway

⁴Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg im Breisgau, Germany

*aleksandar.jankovic@ntnu.no

Abstract—This study evaluates the performance and subjective perception of photovoltaic (PV) panels featuring MorphoColor® and antisoiling coatings installed in the ZEB Living Lab at Gløshaugen campus (Norwegian University of Science and Technology). The objective analysis tracked energy production, efficiency, and environmental conditions over nearly a year, revealing that panels with antisoiling coatings performed slightly worse than those without when subjected to similar solar irradiance levels. A similar conclusion applies to the color effect of the MorphoColor® coating, which lowers the annual energy yield of the PV module by approximately 6% compared to the black reference. This reduction aligns with the efficiency losses previously reported for MorphoColor® technology. Subjective assessments gathered through more than 80 standardized interviews highlighted a preference for black solar panels that "blend in" with the aesthetics of the ZEB living lab. However, these preferences reflect the specific architectural context and limited color options (black and blue) that the survey offers. Preferences may differ in different settings, with a broader range of PV colors or other building types. Some respondents also suggested that colored panels could be integrated creatively and visibly, especially if better aligned with surrounding architectural features. The results underscore the importance of balancing technical performance with public aesthetic preferences to enhance solar technology adoption - an objective that can potentially be better achieved through engagement with potential building users prior to the introduction of MorphoColor® technology. Key findings include seasonal performance trends, the impact of shading, and divergent public opinions on solar panel visibility. This work contributes to the discourse on sustainable building design by addressing both functional and perceptual aspects of PV installations.

Keywords—photovoltaic panels; anti-soiling; MorphoColor®; building-integrated PV; aesthetic perception; living lab;

I. INTRODUCTION

Integrating photovoltaic (PV) panels into buildings is critical for advancing sustainable energy solutions, yet their adoption hinges on both technical performance and public acceptance. While efficiency and durability are well-studied, the aesthetic impact of PV panels remains a significant barrier. This study addresses this gap by examining PV panels with

MorphoColor® and antisoiling coatings in the ZEB Living Lab, combining objective performance metrics with subjective user evaluations. The research aims to (1) quantify the energy output and efficiency of coated panels under real-world conditions, (2) assess the influence of environmental factors like shading and seasonal variations, and (3) evaluate public perceptions of PV aesthetics. Our contributions include empirical data on panels' efficiency with two types of coatings, insights into design preferences, and recommendations for balancing functionality with visual appeal in urban solar deployments.

Prior research has demonstrated the benefits of antisoiling coatings in reducing dust-related efficiency losses, particularly in arid regions [1]. MorphoColor® coatings [2], inspired by structural coloration, have been explored for their potential to enhance visual appeal without significant efficiency trade-offs [3]. Studies on public perception highlight a preference for minimally visible PV installations, though cultural and contextual differences exist [4]. This study builds on these foundations by testing coatings in a Nordic climate and incorporating qualitative feedback from diverse stakeholders.

II. METHODOLOGY

A. Objective characterization

Four types of PV modules were mounted on the façade of the ZEB Living Lab: standard black panels, black panels with an antisoiling coating, panels with a MorphoColor® coating, and panels featuring both morpho and antisoiling coatings. **Error! Reference source not found.** shows the architecture of a system for monitoring PV performance. The DAQ system, built around a Raspberry Pi [4], monitored surface temperatures using two MCP9808 sensors (± 0.25 °C accuracy) on the reference black and MorphoColor® panel [5]. The information on the outdoor temperature and solar irradiance on the façade was collected using the living lab monitoring system and measured by a Second Class pyranometer and a Class B Pt100 resistance temperature detector (RTD). The pyranometer was located on the same wall with the same orientation as the panels, with a distance of around four meters

between them. Outdoor temperature was monitored with a weather station located on the living lab roof. Real-time tracking of PV energy generation by measuring power and

voltage output and generated current was done through PV inverters and a separate monitoring solution, the Tigo Energy System.

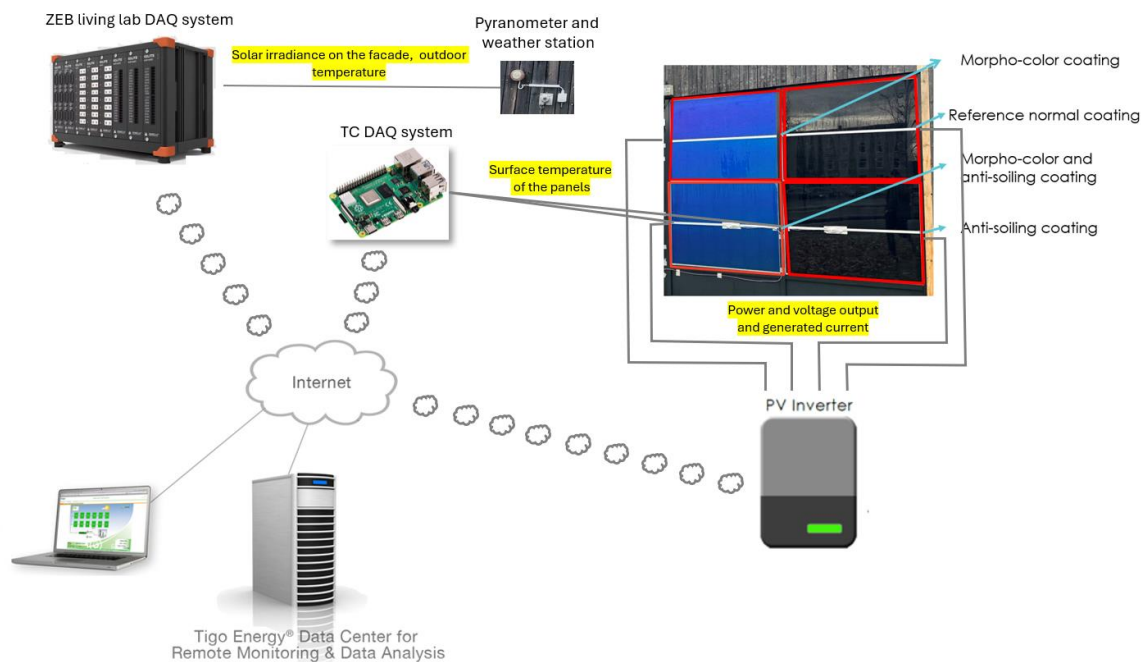


Fig. 1. Architecture of the system for monitoring PV performance in the ZEB living lab

The PV panels' performance and the surrounding environment were monitored for nearly a year. However, due to unforeseen circumstances, the living laboratory was out of operation from the beginning of September 2024, resulting in missing data from September 9 to October 17 to complete year-round measurements. PV energy production was recorded every minute, but the analysis focused on hourly, daily, and monthly outputs. Ambient temperature, incident solar radiation on the façade, and surface temperatures of the PV panels were measured at sub-minute intervals, with the analysis based on hourly, daily, or monthly averages or cumulative values.

B. Subjective characterization

The qualitative evaluation of building-integrated PVs was done in the fall of 2023 with the help of student assistants. More than 80 standardized interviews were conducted with users of the Gløshaugen campus, where building-integrated PVs are located. The questionnaire, which consisted of 17 questions, explored the informants' subjective aesthetic evaluations of the test case and PV on buildings in general. As expected for campus use, students were overrepresented in the

sample (more than 70%), where more than 90 % of the respondents were aged between 20 and 30 years

III. RESULTS

A. Objective characterization

The average daily photovoltaic energy by month, produced by four types of panels, along with the standard deviation of daily photovoltaic production, is shown in **Error! Reference source not found.** The highest PV production occurs in March and April, mainly due to the panels' vertical south-facing orientation, the solar path, and reduced cloud cover. PV production in September and October may be comparable to that in March and April. However, since data from September 9 to October 17, 2024, is missing, a definitive conclusion cannot be drawn, and the gap needs to be supplemented to complete the full-year measurements. From late April through May, June, July, and early August, the lower PV modules (those with an antisoiling coating) begin to outperform the upper modules (reference and MorphoColor®).

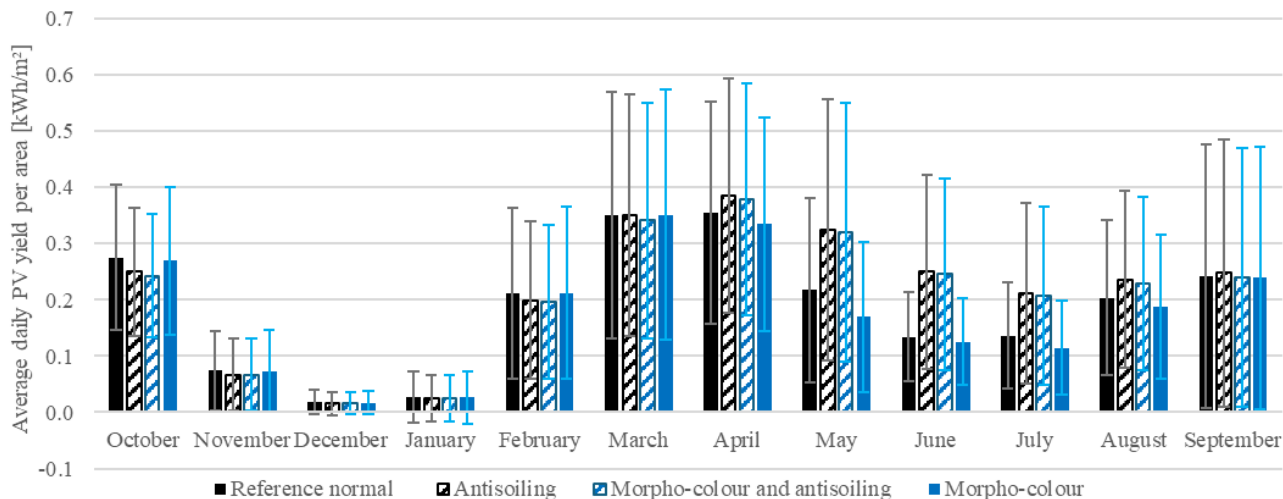


Fig. 2. Average daily photovoltaic energy by month

The effect becomes evident due to the sun's position and a slightly protruding façade element that creates a shadow that partially covers the upper panels, see **Error! Reference source not found.**



Fig. 3. A shadow formed by the building design at the top panels, noticeable in the warmer part of the year

The average monthly efficiency of the four types of PV panels is shown in Figure 5. The efficiency of the PV panels was not available for all days in the months since the data on solar irradiance measured on the façade was not available continuously due to the LL DAQ system not operating continuously. Higher efficiency is observed for all types of panels during the transitional months (October to November and February to April) compared to the winter and summer months. Lower efficiency in December and January might be due to the frost formation (evident in Figure 6), while in summer, the reason most likely lies in the shading effect and the higher panels' temperature. For example, in the three-week sequence from summer 2024 (03 June - 23 June, Figure 4), panel temperatures exceeded 50 °C on eight separate days, even if the ambient air temperatures were mild and did not exceed 25 °C during peak time. Solar irradiance on days with high panel temperature exceeded 600 W/m².

Due to the shading effect of the facade, the efficiency of panels without antisoiling coating (top panels) significantly decreases during warmer months. However, when the panels are exposed to a similar amount of solar irradiance, the panels without the antisoiling coating slightly outperform those with the coating, as seen in the colder part of the year. Furthermore, it can be concluded that the MorphoColor® coating slightly reduces the panels' efficiency, as seen from the year-round comparison of monthly power output and efficiency between black panels and those with MorphoColor®. The annual energy yield of the MorphoColor® module is approximately 6% lower than the black reference.

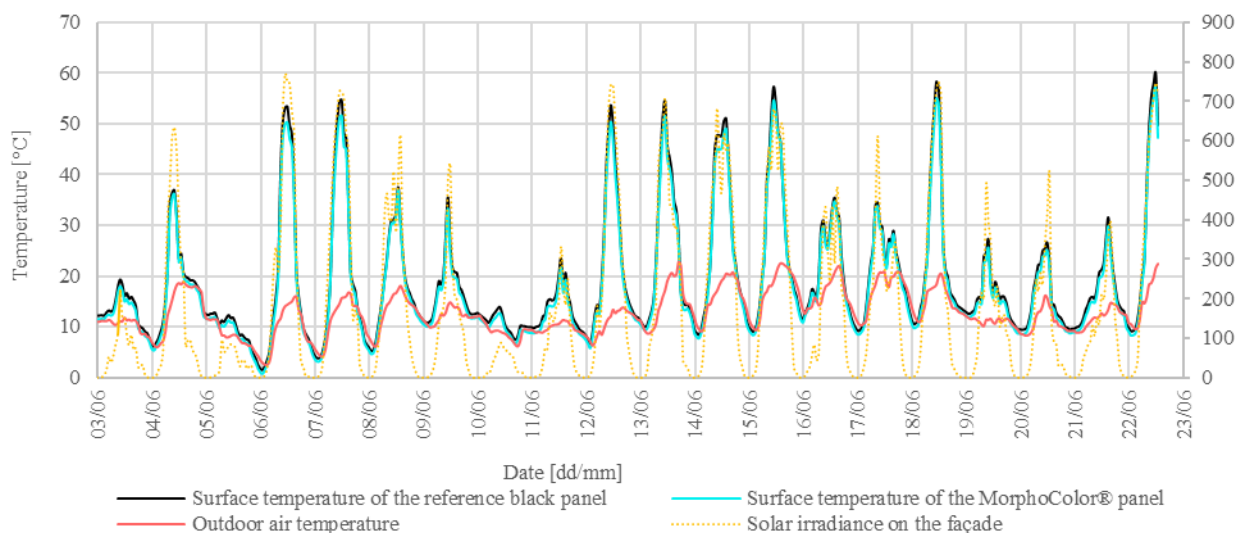


Fig. 4. Surface temperature of the reference black (blue) and MorphoColor® (orange)

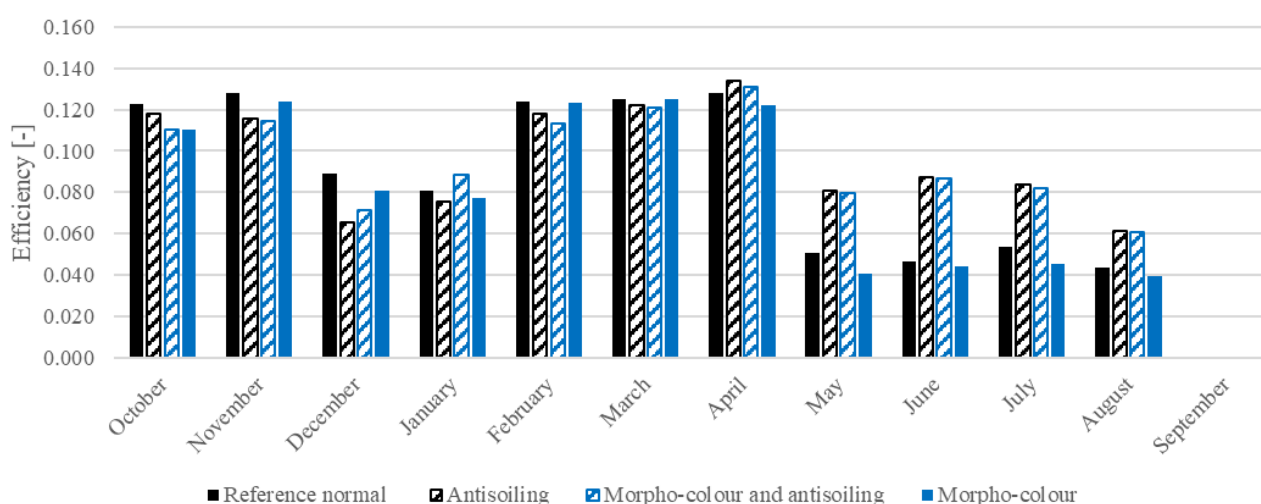


Fig. 5. Average efficiency by months

An analysis of the average daily PV production over the entire monitoring period (**Error! Reference source not found.**) reveals the following performance ranking, from highest to lowest: black panels with antisoiling coating, MorphoColor® panels with antisoiling coating, standard black panels, and MorphoColor® panels without antisoiling treatment.

TABLE I. AVERAGE PHOTOVOLTAIC ENERGY PER DAY FOR THE ENTIRE MONITORING PERIOD (OCTOBER 18, 2023 – SEPTEMBER 8, 2024).

Type	Average photovoltaic energy per day normalized per panel area [kWh/m ²]
Reference normal	0.179
Antisoiling	0.210
MorphoColor® and antisoiling	0.206
MorphoColor®	0.168

Note: the worse performance of samples without antisoiling coatings is influenced by their placement in the top row, which was in the warmer part of the year, shaded by the slightly protruding façade element

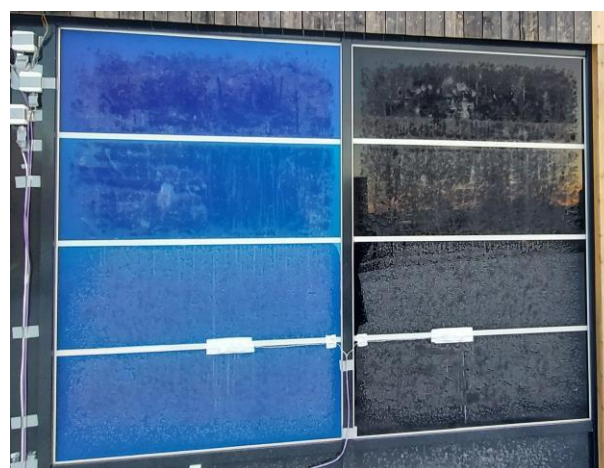


Fig. 6. Frost patterns on the PV panels

Panels without antisoiling coating tend to accumulate more dust. However, this difference is only noticeable when one is in close proximity to the panels. Furthermore, frost forms differently on panels with and without antisoiling coatings (Figure 6). The lower panels (with antisoiling) accumulate more frost. However, this was an unexpected outcome due to their increased hydrophobicity. A temperature inversion on clear, cold winter days and stronger radiative cooling near the ground may cause this phenomenon.

B. Subjective characterization

The majority of participants are young, primarily students studying at the Gløshaugen campus. About half of the respondents knew where the ZEB living laboratory was located, and slightly less than a quarter knew what the function of this facility was. Over half of the respondents were unaware of the building's solar panels. Additionally, approximately two-thirds of the respondents were completely unaware of any other solar technologies on or around the campus. This low level of awareness might not mean that students weren't paying attention, but rather that they didn't expect to see solar panels. Solar panels are still not very common on buildings in Norway, especially in cities. Because of this, people might be more used to simple building designs, and might see solar panels as something that doesn't fit in.

The survey results in Figure 8 display respondents' preferences regarding the appearance of solar technology facing the road, preferred colors, perceptions of the ZEB LL façade's complexity, and interest or experience with solar technology, with answers given on a 1 to 6 scale. The general impression is that respondents in this particular context tend to prefer black solar panels. However, for all people, it does not seem like color is the main issue when we discuss solar panels and the aesthetic of the building. Many wrote that the solar panels had to "blend in"; this may be the keyword. On whether there should be more buildings on Gløshaugen campus with more solar panels, almost everyone wrote "YES"

because it was green, future-thinking, climate-friendly, renewable, or cool. Most people seemed positive about solar technology, and some also thought that NTNU "should lead by example." However, some people were more hesitant and questioned the cost and degree of climate friendliness.

Many more people wanted the solar panels to be black, whereas 46 people wished them to be black. Eight people wanted them to be blue, whereas someone wrote, "Blue = ugly, Black = nice. The people who wanted the solar panels to be black also wanted them hidden, preferably on the roof. For example, someone wrote, "Black with minimalistic appearance and design." It seems like there is an interpretation that black is the color that will be the least visible, so it does not affect the building's appearance.

Some of the informants also expressed concern for historic and older buildings. Often, they wrote that the solar panels had to be hidden, but do they? Many older buildings do not have black roofs, and one wrote, "Terracotta colors that resemble the color of a roof." Everyone seems to agree that the building's appearance is essential, and, therefore, the solar panels must blend in, but they have different ideas on how to blend in.

It should be emphasized that these preferences reflect the specific options (black and blue) and the particular architectural context of the ZEB Living Lab at the NTNU campus. In other settings, with a broader range of color options or different building types, preferences may vary significantly. Therefore, conclusions about preferred solar panel color should be interpreted in light of this specific survey context. Moreover, while the specific MorphoColor® sample used in the ZEB Living Lab had a strong, vivid color that may have stood out more than blended in, colored PV panels in general have the potential to harmonize with a building's façade and materials, especially when thoughtfully selected to match architectural features. This could lead to them being perceived less as PV elements and more as an integrated part of the building's design.

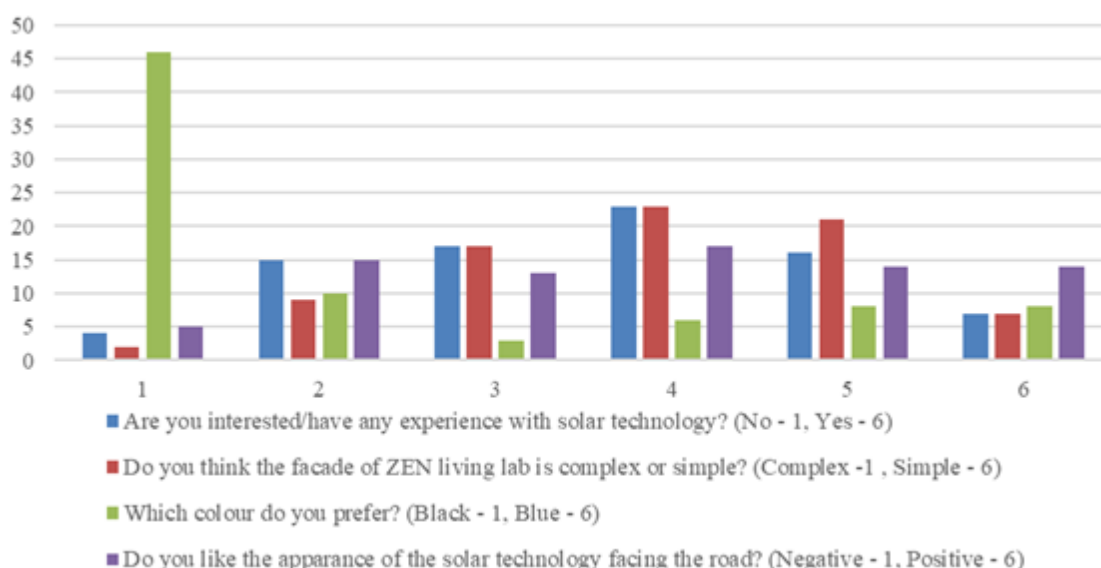


Fig. 7. The survey results on aesthetic preferences and perceptions of solar technology

IV. CONCLUSIONS

The analysis of the key performance indicators shows that PV panels with antisoiling coatings deliver the highest average daily energy production throughout the monitoring period. The antisoiling-only panel slightly outperformed the one with both MorphoColor® and antisoiling coatings, whereas overall, it outperformed 15 to 20% of panels without antisoiling coating. Seasonal trends revealed that the observed difference in efficiency during the warmer months (April–September) was due to shading caused by façade elements, which significantly reduced the performance of the upper panels (those without antisoiling coating). However, if exposed to similar incident solar radiation, panels without an antisoiling coating show slightly better performance, as evident in colder months (October–March). Also, MorphoColor® panels show slightly worse performance than black panels. Both outcomes are something to be expected, given that the output power of panels without coatings tested in the lab is marginally higher.

Furthermore, Trondheim is not considered an area with elevated particulate matter, so the accumulation of dust and particles on the surface was not large enough to significantly affect the panels' performance without an antisoiling coating. This is confirmed by the fact that the difference in dust accumulation on the panels was barely noticeable through visual inspection and only apparent upon close examination. Frost forms differently on panels with and without antisoiling coatings, with the lower coated panels accumulating more frost, an unexpected result due to their increased hydrophobicity, likely influenced by temperature inversion and stronger radiative cooling on clear, cold winter days. Although data gaps from September and October limit the full-year assessment, observed trends suggest similar behavior of panels as in March and April, respectively.

The subjective evaluation of the TC2 system and the ZEB Living Lab reveals a generally positive, yet nuanced, perception among respondents, most of whom were young students affiliated with the Gløshaugen campus. While roughly half of the participants knew the ZEB Living Lab's location, fewer knew its actual function, suggesting a communication gap about the lab's purpose. Interest in solar technology varied, with many expressing personal or work-related motivations, though their written responses often lacked elaboration. Most participants supported the broader use of solar panels at Gløshaugen (NTNU campus in Trondheim), associating them with climate-friendliness and NTNU's leadership in sustainability. However, some raised critical points about production-related emissions and Norway's low solar yield, reflecting a need for a greater public understanding of renewable energy trade-offs.

Aesthetic perceptions also played a key role. Most respondents preferred black solar panels, viewing them as less

visually intrusive and more compatible with traditional architecture. Many expressed a desire for panels to "blend in," favoring minimalist or hidden installations, especially on rooftops. At the same time, there were varied interpretations of what it means to "blend in," especially when considering different building types or historical architecture. Some informants, for instance, noted that black may not suit red-tile roofs and suggested alternative tones.

It is important to note that these preferences emerged within a specific context, limited to black and blue panel options and the architectural setting of the ZEB Living Lab. In other settings, aesthetic preferences might differ significantly where a broader spectrum of colors or different design constraints apply. While the MorphoColor® panels tested had a vivid tone that may not have blended in seamlessly, colored PV panels in general offer the potential to match and even enhance a building's appearance, especially when thoughtfully chosen to harmonize with façade materials. This duality, between camouflage and visual expression, suggests that future solar installations should balance functional performance with contextual aesthetics to foster public acceptance and appreciation. Advances in color PV technologies, such as MorphoColor®, may provide an effective means of achieving broader public acceptance and more architecturally integrated solar solutions.

ACKNOWLEDGMENT

This research was conducted as part of the iClimaBuilt project "Functional and advanced insulating and energy harvesting/storage materials across climate adaptive building envelopes," which has been funded through the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Programme, under grant agreement No. [952886](#).

LITERATURE

- [1] A. Elsafi, B. Aïssa, K. Ilse, and A. Abdallah, "Performance and durability of antisoiling and anti-reflective coatings for photovoltaic systems in desert climates," *Solar Energy*, vol. 293, p. 113446, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.solener.2025.113446.
- [2] B. Bläsi, T. Kroyer, T. E. Kuhn and O. Höhn, "The MorphoColor Concept for Colored Photovoltaic Modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 11, no. 5, pp. 1305–1311, Sept. 2021, doi: 10.1109/JPHOTOV.2021.3090158.
- [3] A. Borja Block *et al.*, "Colouring solutions for building integrated photovoltaic modules: A review," *Energy and Buildings*, vol. 314, p. 114253, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.enbuild.2024.114253.
- [4] S. R. Shakeel, H. Yousaf, M. Irfan, and A. Rajala, "Solar PV adoption at household level: Insights based on a systematic literature review," *Energy Strategy Reviews*, vol. 50, p. 101178, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.esr.2023.101178.
- [5] B. Rosti, A. Jankovic, F. Goia, H. M. Mathisen, and G. Cao, "Design and performance analysis of a low-cost monitoring system for advanced building envelopes," *Building and Environment*, vol. 269, p. 112344, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.buildenv.2024.112344.

Optimalna orijentacija solarnih panela u cilju maksimizacije prihoda na temelju tržišnih cijena

Emilija Mrđen, Predrag Mršić, Čedomir Zeljković

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
emilija.mrdjen@etf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org, cedimir.zeljkovic@etf.unibl.org

Sažetak—U radu je analizirana optimalna orijentacija solarnih panela za grad Banjaluku, u cilju maksimizacije godišnjeg prihoda od prodaje proizvedene električne energije. Geometrijske i energetske karakteristike fotonaponskog sistema su predstavljene odgovarajućim matematičkim modelima. Procjena godišnje proizvodnje je izvršena na osnovu podataka za tipičnu meteorološku godinu, dok su tržišne cijene električne energije preuzete sa sajta mađarske berze. Pomoću računarske simulacije, određeni su ukupni godišnji prihodi od prodaje električne energije za sve smislene kombinacije nagibnog i azimutalnog ugla panela, kako bi se pronašle one vrijednosti uglova, koje karakteriše maksimalan prihod. Navedeni proračun je izvršen za period od unazad deset godina, kako bi se analizirao i uticaj varijacije cijena električne energije na tržištu.

Gljučne riječi—ugao nagiba; azimutalni ugao; cijena električne energije.

I. UVOD

S obzirom na ekološke probleme koje izazivaju fosilna goriva, obnovljivi izvori energije svakim danom uzimaju sve više maha u proizvodnji električne energije. Među tehnologijama zasnovanim na obnovljivim izvorima, najintenzivniji razvoj ima tehnologija fotonaponskih sistema, kako u kombinaciji sa drugim distribuiranim izvorima energije, tako i u sklopu samostalne instalacije za domaćinstva, te stambene i poslovne zgrade. Zbog pogodnog geografskog položaja sa velikim brojem sunčanih dana tokom godine, dobijanje električne energije konverzijom sunčeve energije je već uveliko zastupljeno i u zemljama Balkana. Pored toga, tehnološki napredak u proizvodnji solarnih panela doveo je do značajnog smanjenja njihovih cijena, a troškovi ugradnje i održavanja samog sistema su veoma mali.

Sa druge strane, upotreba fotonaponskih sistema za proizvodnju električne energije je sve veća i radi lične zarade investitora. Konstantno povećanje cijene električne energije dovodi do brzog povrata kapitala, ali i uštede na troškovima energije, ako se radi o industrijskim objektima, tokom relativno dugog životnog vijeka sistema. Na taj način, investitor može ostvariti dobit čak i prije nego što su svi troškovi početne investicije u potpunosti pokriveni.

Na globalnom nivou, postoji mnogo berzi električne energije. One omogućavaju kupovinu i prodaju energije, bilo da se radi o kratkoročnim ugovorima, za dan unaprijed (eng. *day-ahead market*) ili unutar samog dana (eng. *intraday market*), bilo da su u pitanju dugoročni ugovori za buduće isporuke (eng. *futures market*). U ovom radu, za proračun su korišćene cijene definisane na mađarskoj berzi HUPX (eng.

Hungarian Power Exchange) [1], jer Bosna i Hercegovina ne raspolaže vlastitom berzom električne energije, dok se dio transakcija domaćih proizvođača upravo realizuje na mađarskom tržištu. Ovdje se mogu pronaći podaci kao što su trenutne cijene i količine proizvedene i prodane električne energije u realnom vremenu, dnevni, nedjeljni i mjesečni izvještaji, itd. Takođe, u istorijskim podacima se može doći do časovnih cijena, zatim do prosječnih dnevnih, sedmičnih, mjesečnih i godišnjih cijena za period unazad petnaest godina. Cijene se formiraju kroz proces aukcije zasnovan na ponudi i potražnji električne energije.

Odgovarajuća orijentacija panela može značajno povećati ukupnu godišnju proizvodnju energije. S obzirom na to da se cijena električne energije na tržištu može povećati tokom određenih perioda (npr. tokom zimskih mjeseci kada je potražnja veća), veća proizvodnja energije omogućava njenu prodaju po višim cijenama. Ako su solarni paneli postavljeni tako da omogućavaju veću proizvodnju u periodima kada je cijena energije visoka, to može značajno doprinijeti većim prihodima od prodaje. Drugim riječima, da bi ukupan godišnji prihod od prodane električne energije bio maksimalan, ključno je da se solarni paneli orijentišu i postave na način koji omogućava optimalnu proizvodnju u skladu s tržišnim uslovima.

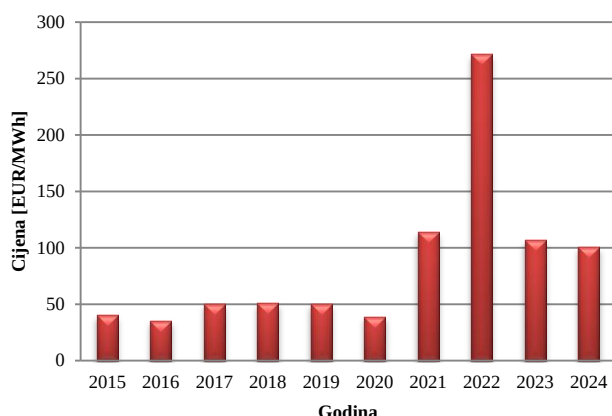
Metodologija za određivanje optimalne orijentacije solarnih panela s ciljem maksimizacije proizvodnje je dobro poznata, međutim, postoji mogućnost prilagodbe orijentacije ako je cilj optimizacije maksimizacija profita. U ovom radu su određeni nagibni i azimutalni uglovi solarnih panela koji rezultuju maksimalnim ukupnim godišnjim prihodom od prodaje proizvedene električne energije za period od 2015. do 2024. godine. Ova analiza uzima u obzir velike fluktuacije u cijenama električne energije koje su se desile tokom proteklih deset godina, kao i promjene u tržišnim uslovima koje su uticale na tržište električne energije.

II. DIJAGRAMI CIJENA ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju, predstavljene su određene vremenske zavisnosti cijena električne energije, pronađene na stranici HUPX-a [1].

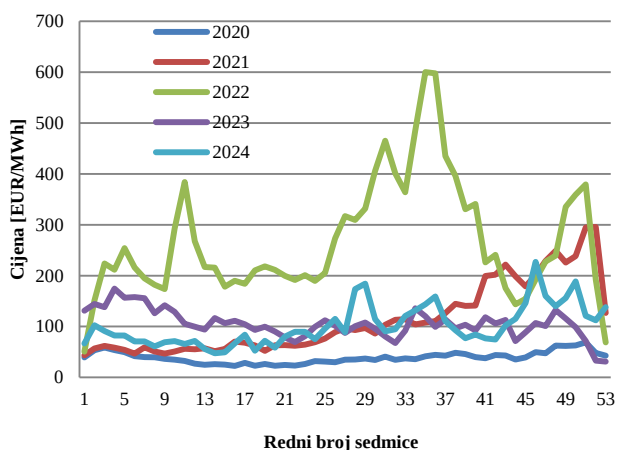
Na Sl. 1, prikazan je dijagram prosječnih godišnjih cijena električne energije, za period od 2015. do 2024. godine. Može se uočiti da postoje svega dvije vrijednosti cijena električne energije u datom periodu. Od 2015. do 2020. godine, sve do pojave pandemije, prosječna cijena se kretala u opsegu od oko 40 do 50 EUR/MWh. Već naredne godine nastupa drugi tip

cijene, koja iznosi oko 100 EUR/MWh. Izuzetak se javlja u 2022. godini, kada je cijena energije iznosila preko 250 EUR/MWh. Naglo poskupljenje električne energije od 2021. godine, najviše je posljedica lošeg geopolitičkog stanja u Evropi, povećane potražnje nakon pandemije, ali i ekonomskih oporavaka.



Sl. 1. Dijagram prosječnih godišnjih cijena električne energije

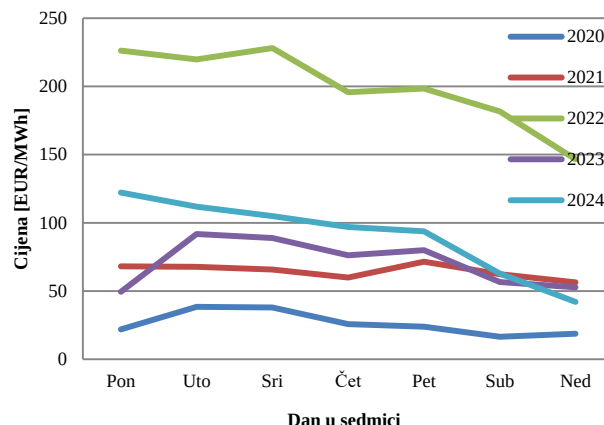
U cilju analize sezonskih promjena cijena električne energije na sedmičnom nivou, na Sl. 2 su prikazani grafici koji obuhvataju period od 2020. do 2024. godine. Iz prikazanih podataka jasno se uočava da su cijene električne energije najviše u zimskim i ljetnim mjesecima, odnosno početkom, sredinom i krajem godine. Ove oscilacije, prvenstveno su rezultat povećane potrošnje u tim periodima, zimi zbog potrebe za grijanjem, a ljeti zbog upotrebe rashladnih uređaja. Promjene u temperaturi i vremenskim uslovima značajno utiču na potražnju, a samim tim i na formiranje cijene električne energije.



Sl. 2. Grafik prosječnih sedmičnih cijena električne energije u periodu od 2020. do 2024. godine

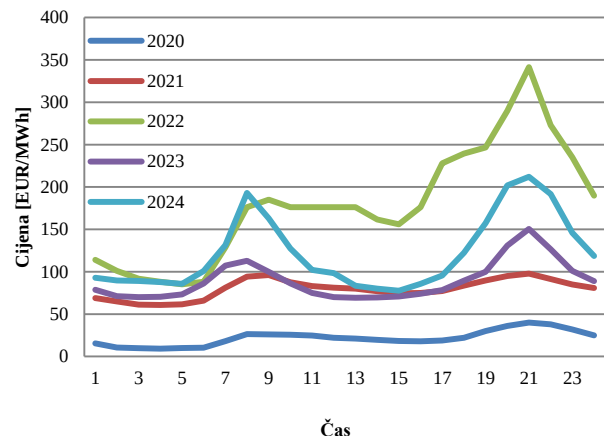
Na Sl. 3 prikazane su zavisnosti prosječnih dnevnih cijena električne energije unutar jedne sedmice, za isti vremenski period, pri čemu je odabrana prva sedmica mjeseca juna. Iz grafika se mogu uočiti karakteristične promjene cijena, tj.

činjenica da one uglavnom rastu početkom, dostižu vrhunac sredinom sedmice, a zatim postepeno opadaju prema vikendu. Najniže vrijednosti bilježe se tokom subote i nedjelje, kada je potrošnja električne energije smanjena, posebno u industrijskom i poslovnim sektoru.



Sl. 3. Grafik prosječnih dnevnih cijena električne energije u toku prve sedmice juna, u periodu od 2020. do 2024. godine

Časovna promjena cijene električne energije u toku jednog radnog dana, data je graphicima na Sl. 4, a kao primjer je odabran prvi ponedjeljak u mjesecu junu. Maksimalne vrijednosti cijena se javljaju u ranijim jutarnjim časovima i naveče, kada je potrošnja u domaćinstvima najveća, dok minimalne vrijednosti cijena nastupaju noću i sredinom dana.



Sl. 4. Grafik časovnih cijena električne energije za prvi ponedjeljak u junu, u periodu od 2020. do 2024. godine

III. METODOLOGIJA PRORAČUNA I ULAZNI PODACI

Proračun optimalnog nagibnog (Σ) i azimutalnog (ϕ_c) ugla je izvršen prema algoritmu prikazanom na Sl. 5.

Na početku simulacije, učitavaju se odgovarajući ulazni podaci. Vektor direktne komponente zračenja na normalnu podlogu, difuzne komponente na horizontalnu podlogu, te ambijentalne temperature, učitani su iz kalkulatora PVWatts američke Nacionalne laboratorije za obnovljivu energiju (eng. *National Renewable Energy Laboratory*) [2], i zasnivaju se na

podacima o tipičnoj meteorološkoj godini – TMY (eng. *Typical Meteorological Year*). Vektor jediničnih cijena električne energije (EUR/MWh) za datu godinu je preuzet sa stranice HUPX-a [1]. Pored toga, potrebno je unijeti i neophodne podatke fotonaponskog sistema, koji su prikazani u Tabeli 1.

TABELA 1. ULAZNI PODACI SIMULACIJE

Koeficijent refleksije zemljišta	0,2
Indeks prelamanja stakla panela	1,526
Nominalna radna temperatura ćelije (NOCT)	45°C
Temperaturni koeficijent snage panela	-0,348 %/°C
Nominalna AC snaga invertora	50 kW

U simulaciji se računa ukupan godišnji prihod od prodaje električne energije (C_{god}) na časovnom nivou, za svaku kombinaciju nagibnog i azimutalnog ugla. Pri tome, nagibni ugao se mijenja u opsegu od 0° do 90° (što odgovara horizontalnoj i vertikalnoj postavci panela), a azimutalni ugao u opsegu od -90° do 90° (što odgovara orijentaciji panela prema zapadu i istoku, respektivno).

Proračun časovne DC snage sistema vrši se prema izrazu [3], [4]:

$$P_{DC} = \frac{G_c}{1000} P_{DCn} (1 + \gamma (T_c - 25)), \quad (1)$$

gdje je G_c iradijansa na solarni panel, P_{DCn} nominalna DC snaga sistema, γ temperaturni koeficijent snage panela, a T_c temperatura ćelije, koja se računa kao u [5]. AC snaga na izlazu invertora, dobija se kao:

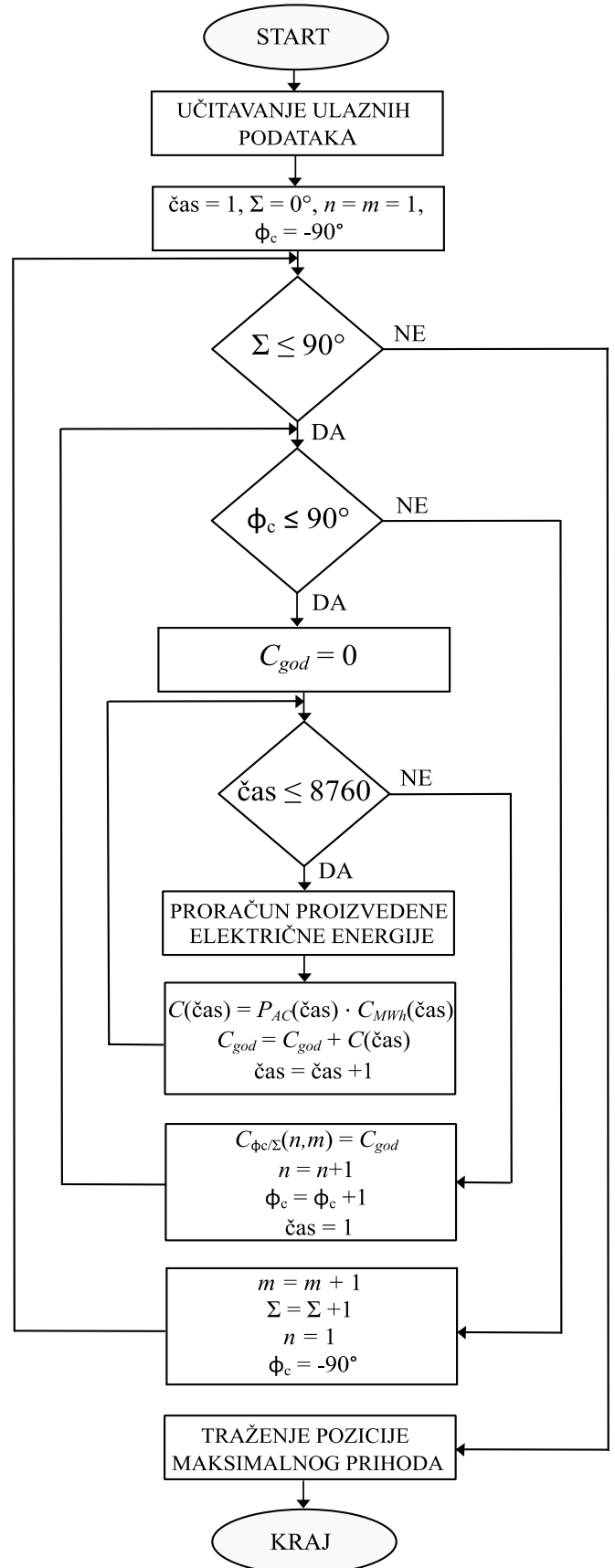
$$P_{AC} = \begin{cases} \eta P_{DC}, & 0 < P_{DC} < P_{DCn} \\ P_{DCn}, & P_{DC} > P_{DCn} \\ 0, & P_{DC} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

pri čemu se stepen iskorištenja invertora η računa kao u [6].

Proračuni ukupnih godišnjih prihoda se upisuju u matricu $C_{\phi_c/\Sigma}$. Sa n i m su označeni pomoćni indeksi, koji predstavljaju broj vrsta i kolona konačne matrice prihoda:

$$C_{\phi_c/\Sigma}(n, m) = \begin{bmatrix} C_{-90^\circ/0^\circ} & \cdots & C_{-90^\circ/-90^\circ} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{90^\circ/0^\circ} & \cdots & C_{90^\circ/90^\circ} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

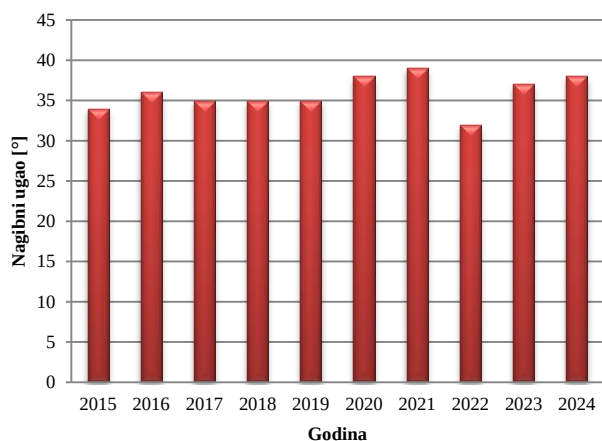
Prva vrsta matrice (3) odgovara prihodima za vrijednosti azimutalnog ugla od -90°, druga od -89°, itd. Slično, prva kolona matrice odgovara onim prihodima od prodaje električne energije koje se dobiju za nagib panela od 0°, itd. Prema tome, data matrica ima 181 vrstu i 91 kolonu. Program pronalazi najveću vrijednost matrice (3), te ispisuje njegovu poziciju (indekse n i m), na osnovu koje se lako mogu odrediti odgovarajući nagibni i azimutalni ugao panela, koji kao rezultat imaju maksimalan godišnji prihod.



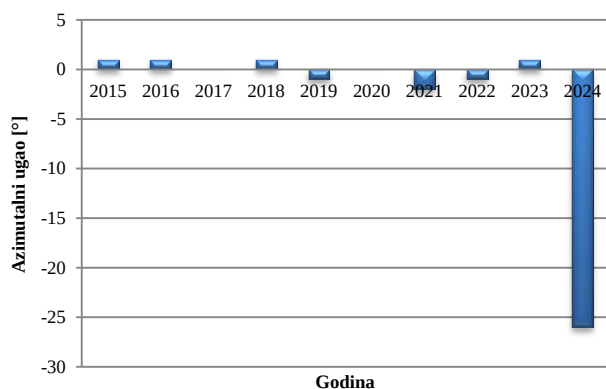
Sl. 5. Algoritam programa

IV. REZULTATI SIMULACIJE

Vrijednosti nagibnog i azimutalnog ugla solarnih panela za period od unazad deset godina, koji kao rezultat daju maksimalni godišnji prihod od prodaje proizvedene električne energije za grad Banjaluku, prikazani su na Sl. 6 i 7. Poznato je da se za ovaj grad dobija maksimalna godišnja proizvodnja energije pri nagibnom uglu od 34° i orijentaciji panela prema jugu, odnosno pri nultom azimutalnom uglu [7]. Prema Sl. 6, ugao nagiba panela se nalazi u opsegu od 32° do 39° , što je blisko nagibnom uglu pri maksimalnoj proizvodnji. Azimutalni ugao se, prema Sl. 7, kreće u opsegu od -2° do 1° , sa izuzetkom u 2024. godini, gdje dati ugao iznosi -26° . Ako se ova vrijednost odbaci, solarni paneli i pri maksimizaciji godišnjeg prihoda, treba da budu orijentisani prema jugu.

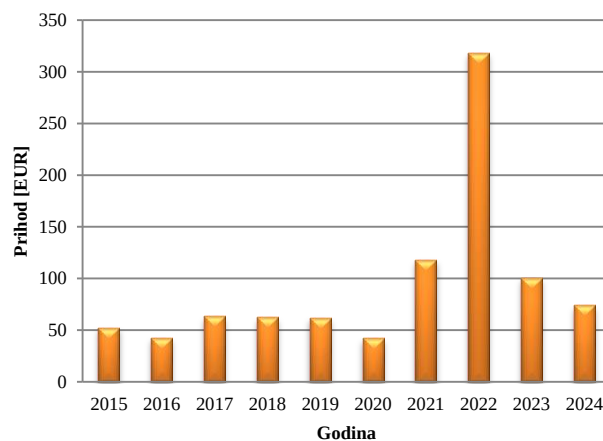


Sl. 6. Optimalni nagibni uglovi panela za postizanje maksimalnog godišnjeg prihoda od prodaje električne energije



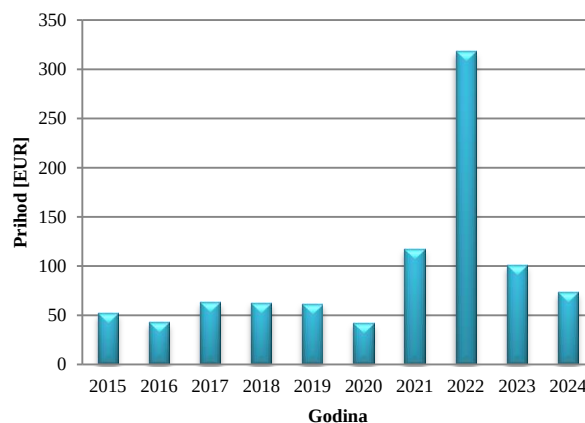
Sl. 7. Optimalni azimutalni uglovi panela za postizanje maksimalnog godišnjeg prihoda od prodaje električne energije

Ukupni godišnji prihodi od fotonaponskog sistema sa ulaznim podacima iz trećeg poglavlja, sa optimalnim uglovima panela sa Sl. 6 i 7, dati su na dijagramu na Sl. 8, pri čemu su prihodi dati po kWp instalisane snage. S obzirom na to da su vektori iradijansi za svaku godinu isti, a samim tim i proizvedena snaga sistema na časovnom nivou, očekivano je da će zavisnost godišnjeg prihoda biti ista kao i zavisnost cijena na Sl. 1.

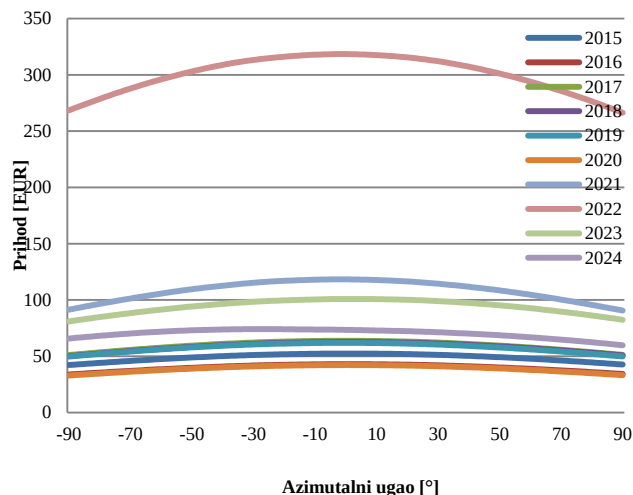


Sl. 8. Dijagram maksimalnih godišnjih prihoda po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema

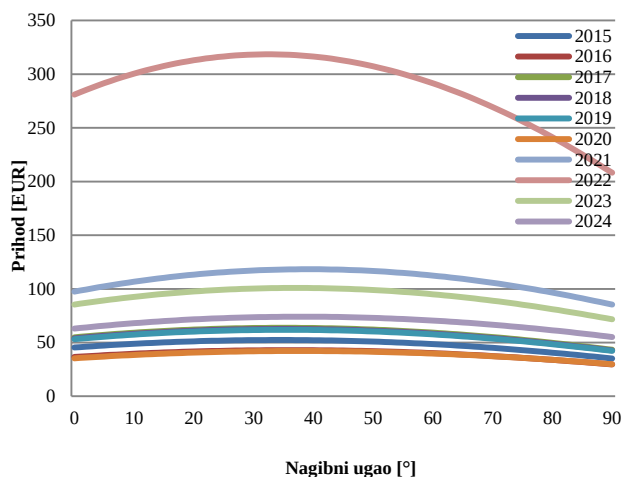
Pri nagibnom i azimutalnom uglu panela od 34° i 0° respektivno, godišnji prihodi su gotovo isti kao i pri orijentaciji panela u cilju maksimizacije prihoda (Sl. 6 i 7), što se može vidjeti na dijagramu na Sl. 9. Drugim riječima, proračun je pokazao da orijentacija panela koja ostvaruje najveću proizvodnju energije donosi neznatno manji godišnji prihod u odnosu na orijentacije koje omogućavaju najveću zaradu.

Sl. 9. Dijagram godišnjih prihoda po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema, za $\Sigma = 34^\circ$ i $\phi_c = 0^\circ$

Iako vrijednost azimutalnog ugla na Sl. 7 u 2024. godini mnogo odstupa od preostalih devet, razlika u vrijednosti prihoda pri datom azimutalnom uglu, i azimutalnom uglu koji omogućava maksimalnu proizvodnju je gotovo neprimjetna. Naime, pokazuje se da je godišnji prihod približno konstantan u opsegu azimutalnog ugla od oko -30° do 30° , što je prikazano graficima na Sl. 10, pri konstantnim nagibnim uglovima kao na Sl. 6. Sa druge strane, pri konstantnim azimutalnim uglovima sa Sl. 7, promjena vrijednosti prihoda je vrlo mala, u opsegu nagibnog ugla od oko 30° do 40° (Sl. 11).



Sl. 10. Godišnji prihodi po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema u funkciji azimutalnog ugla, pri optimalnim nagibnim uglovima dobijenim u simulaciji



Sl. 11. Godišnji prihodi po kWp instalisane snage fotonaponskog sistema u funkciji nagibnog ugla, pri optimalnim azimutalnim uglovima dobijenim u simulaciji

V. ZAKLJUČAK

U radu je određena optimalna orijentacija solarnih panela za grad Banjaluku, sa ciljem ostvarenja maksimalnog godišnjeg profita na bazi tržišnih cijena električne energije.

Na osnovu podataka sa sajta mađarske berze HUPX, pokazano je da cijena električne energije varira u zavisnosti od više faktora: vremenskih uslova, geopolitičkog stanja, te ponude i potražnje u datom trenutku. Određivanjem optimalnog nagibnog i azimutalnog ugla za period od unazad deset godina, uzeta je u obzir i potencijalna osjetljivost njihovih vrijednosti na promjenu cijene u toku godine. Kao rezultat, dobijeno je da solarne panele treba orijentisati prema

jugu, pod nagibom u prosjeku od oko 35° u odnosu na zemlju. Drugim riječima, orijentacijom panela tako da se postigne približno maksimalna godišnja proizvodnja električne energije, ujedno se postiže i maksimalan profit od njene prodaje, s obzirom na trenutno stanje cijena energije na tržištu. Isto tako, orijentacijom panela tako da se ostvari maksimalna godišnja proizvodnja električne energije, ostvariće se približno i maksimalan godišnji prihod od prodaje energije. Pored toga, pokazano je da vrijednost godišnjeg prihoda biva približno konstantna, za azimutalne uglove vrijednosti u opsegu od oko -30° do 30°, te za nagibne uglove od oko 30° do 40°. Odnosno, promjenom ovih uglova, pad proizvodnje se kompenzuje cijenom električne energije. Na kraju, optimalni nagibni i azimutalni uglovi dobijeni u simulaciji, nalaze se u uskom opsegu vrijednosti, bez obzira na veliku promjenu stanja na berzi.

LITERATURA

- [1] HUPX - Hungarian Power Exchange, <https://hupx.hu/en/>, posjećeno: 1.2.2025.
- [2] NREL - National Renewable Energy Laboratory, PVWatts Calculator, <https://pvwatts.nrel.gov/>, posjećeno: 1.2.2025.
- [3] Č. Zeljković, P. Mršić, B. Erceg, "Metod za određivanje uticaja prepreka na godišnju proizvodnju fotonaponskih sistema", III naučno stručni simpozijum Energetska efikasnost - ENEF 2017, novembar, 2017.
- [4] A. P. Dobos, PVWatts Version 5 Manual, Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, September 2014.
- [5] M. K. Fuentes, A Simplified Thermal Model for Flat-Plate Photovoltaic Array, SAND85-0330, Sandia National Laboratory, Albuquerque, 1987.
- [6] V. Kajtez, P. Mršić, Č. Zeljković, "Određivanje optimalnog odnosa instalisane snage fotonaponskih panela i instalisane snage invertora", V naučno stručni simpozijum Energetska efikasnost - ENEF 2023, april, 2023.
- [7] Č. Zeljković, "Obnovljivi izvori energije: solarna energetika", Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Akademska misao, Beograd, 2018.

ABSTRACT

The paper analyzes the optimal orientation of solar panels for the city of Banja Luka, with the aim of maximizing the annual income from the sale of generated electricity. The geometric and energy characteristics of the photovoltaic system are represented using appropriate mathematical models. The annual energy production was estimated based on typical meteorological year data, while market electricity prices were obtained from the Hungarian power exchange website. Using computer simulations, total annual income from electricity sales were calculated for all meaningful combinations of panel tilt and azimuth angles, in order to identify the angle values that yield the highest income. The calculation was performed for the past ten years to also analyze the impact of market price variations.

OPTIMAL ORIENTATION OF SOLAR PANELS FOR MAXIMIZING INCOME BASED ON MARKET PRICES

Emilija Mrden, Predrag Mršić, Čedomir Zeljković

Analiza isplativosti izgradnje solarne elektrane na krovu industrijskog objekta

Bojan Lazić, Predrag Mršić, Čedomir Zeljković

Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
bojan.lazic@student.etf.unibl.org, predrag.mrsic@etf.unibl.org, cedomir.zeljkovic@etf.unibl.org

Sažetak—U ovom radu se razmatra mogućnost izgradnje male solarne elektrane (MSE) na krovu industrijskog objekta. Analizira se ekonomska isplativost investicije za tri različita načina korišćenja proizvedene električne energije: (1) proizvedena električna energija se koristi isključivo za vlastite potrebe i ni u jednom trenutku se ne isporučuje u mrežu; (2) kompletna proizvedena električna energija se isporučuje u mrežu; i (3) proizvedena električna energija se prvenstveno koristi za vlastite potrebe, a višak se isporučuje u mrežu. Takođe, u radu su detaljno opisane mogućnosti priključenja MSE u zavisnosti od načina korišćenja proizvedene električne energije. U prvom dijelu rada, uz pomoć softverskog paketa *PVSol*, generisani su dijagrami potrošnje analiziranog objekta kao i procjene proizvodnje električne energije MSE za više varijanti instalisane snage MSE. Na osnovu dobijenih rezultata izvršen je izbor optimalne snage MSE tako da se maksimizuje profit tokom procijenjenog životnog vijeka, u skladu sa različitim načinom korišćenja proizvedene električne energije.

Ključne riječi—*mala solarna elektrana (MSE); PVSol; električna energija; instalisana snaga; ekonomska analiza.*

I. UVOD

Veliki porast proizvodnih kapaciteta fotonaponskih modula i energetske pretvarača, posebno u Kini, i veliki pad cijena materijala za proizvodnju modula i pretvarača doveo je do značajnog smanjenja troškova izgradnje solarnih elektrana, što je učinilo solarnu energiju pristupačnijom nego ikada [1]. Broj elektrana koje se grade na krovovima su u stalnom porastu od 2018. godine. Veća cijena električne energije i manji troškovi izgradnje solarne elektrane izazvali su porast broja solarnih elektrana koje se koriste za vlastitu potrošnju [2]. Neke od prednosti MSE kada se izgradi na krovu industrijskog objekta, a proizvedena električna energija se koristi za vlastite potrebe su [3]:

- smanjenje troškova napajanja električnom energijom;
- smanjenje emisije štetnih gasovita (CO_2) u procesu industrijske proizvodnje;
- solarni moduli imaju vijek trajanja koji je u većini slučajeva 25 godina, a tokom eksploatacije zahtijevaju minimalno održavanje;
- solarni moduli se postavljaju na krovnu površinu koja je slobodna i neiskorišćena, pa ne zauzimaju dodatan prostor u objektu ili u okolini objekta.

Za izradu gotovog proizvoda potrebni su energenti, materijali i rad u procesu proizvodnje. Cijena gotovog proizvoda zavisi od ulaznih energenata i materijala potrebnog da se proizvod napravi. U Republici Srpskoj cijena električne energije

za privredu je u stalnom porastu. Na cijenu gotovog proizvoda utiče i cijena električne energije koja se koristi u procesu proizvodnje kao ulazni energent. Da bi se održala konkurentnost na tržištu proizvođači su primorani da investiraju u mehanizme koji će smanjiti cijene ulaznih energenata. Da bi se smanjila cijena električne energije, kao ulaznog energenta u procesu proizvodnje, kompanije se odlučuju za izgradnju MSE na krovnim površinama industrijskih objekata. Krovne površine industrijskih objekata predstavljaju površine koje su u većini slučajeva neiskorišćene i maksimalno osunčane. Te površine sadrže veliki potencijal i pogodnosti za postavljanje fotonaponskih modula. Kod industrijskih objekata i skladišta krovna površina je obično velika i na nju se može izgraditi MSE snage od nekoliko desetaka kWp do nekoliko MWp. U Republici Srpskoj postoji veliko interesovanje za izgradnju MSE kako na zemlji tako i na krovnoj površini industrijskih i komercijalnih objekata. U zavisnosti od načina korišćenja proizvedene električne energije, MSE koja se izgradi na krovu industrijskog objekta može se povezati na elektroinstalacije samog objekta ili na elektrodistributivnu mrežu. Na osnovu pravilnika o uslovima za priključenje elektrana na elektrodistributivnu mrežu Republike Srpske definisane su šeme i načini priključenja MSE [4]. Postoje tri načina korišćenja proizvedene električne energije iz MSE izgrađene na krovu industrijskog ili komercijalnog objekta:

- I način: „zero feed in“ - gdje se proizvedena električna energija koristi isključivo za vlastite potrebe i ni u jednom trenutku energija se ne isporučuje u elektrodistributivnu mrežu.
- II način: „feed in“ - gdje se kompletna proizvedena električna energija isporučuje u elektrodistributivnu mrežu i prodaje po tržišnoj cijeni ili po garantovanoj otkupnoj cijeni [5].
- III način: „kupac-proizvođač sa isporukom viška proizvedene električne energije u mrežu“ - gdje se proizvedena električna energija prvenstveno koristi za vlastite potrebe, a višak se isporučuje u elektrodistributivnu mrežu i prodaje po ugovorenoj cijeni [6].

Načini priključenja MSE zavise od načina korišćenja proizvedene električne energije. Kada se energija koristi na I način MSE se povezuje na elektroinstalacije objekta ili na trafostanicu koja je u vlasništvu kompanije. Kada se energija koristi na II način MSE se priključuje na trafostanicu koja je u vlasništvu elektrodistributivnog preduzeća. Ako je za potrebe priključenja MSE potrebno izgraditi novu

trafostanicu, koja će biti u vlasništvu elektrodistributivnog preduzeća, troškove izgradnje finansira investitor koji gradi MSE. Kada se proizvedena energija koristi na *III način* MSE se povezuje na trafostanicu koja je u vlasništvu investitora ili na elektroinstalacije objekta neposredno poslije mjernog mjesta posmatrajući od strane elektrodistributivne mreže. Za povezivanje elektrane na *II i III način* potrebna je saglasnost elektrodistributivnog preduzeća da bi se energija mogla isporučivati u elektrodistributivnu mrežu [7]. U određenim dijelovima Republike Srpske, zbog već izgrađenih i povezanih elektrana, ne mogu se povezati nove elektrane, odnosno ne može se isporučivati električna energija u mrežu. Prema tome, jedina mogućnost povezivanja MSE je na trafostanicu koja je u vlasništvu investitora ili na električne instalacije objekta, s tim da se energija koristi na *I način*.

U ovom radu analizirana je mogućnost izgradnje MSE na krovu industrijskog objekta i analizirana je njena ekonomska isplativost, u zavisnosti od načina korišćenja proizvedene električne energije. Razmatrani objekat se nalazi u proizvodnom kompleksu kompanije koja se bavi preradom drveta i proizvodnjom gotovih proizvoda od drveta. Kompanija je smještena u banjalučkoj regiji. Analizirani objekat je zakrenut u odnosu na jug za 15° prema zapadu, a krovne strane su pod uglom od 7° u odnosu na horizontalnu površinu. Jedna strana krova je orijentisana prema jugozapadu za 15° u odnosu na jug, dok je druga strana krova orijentisana prema sjeveroistoku za 165° u odnosu na jug. Ukupna krovna površina pogodna za postavljanje fotonaponskih modula je 1500 m^2 . Na pomenutu krovnu površinu maksimalno može da se postavi 516 fotonaponskih modula pojedinačne snage 640 Wp. Instalirane snage MSE koje su analizirane u ovom radu su: 50 kWp, 75 kWp, 100 kWp, 150 kWp, 200 kWp, 250 kWp, 300 kWp, uzimajući u obzir da se prilikom postavljanja modula prvo popunjava strana koja je jugozapadno orijentisana.

II. METODOLOGIJA PRORAČUNA

Proizvodni kompleks analizirane kompanije je u 2024. godini potrošio je 837 204 kWh električne energije. U Republici Srpskoj krajni korisnik, pored energije, plaća i prenosnu mrežarinu, distributivnu mrežarinu kao i naknadu za obnovljive izvore električne energije (OIEE). Cijene pomenutih stavki zavise od manjih dnevnih tarifnih stavova (MT) i od viših dnevnih tarifnih stavova (VT). MT primjenjuju se u vremenu od 22:00 do 6:00 časova za zimsko računanje vremena, odnosno od 23:00 do 7:00 časova za ljetno računanje vremena i u dane vikenda neprekidno od petka u 22:00 (23:00) do ponedjeljka u 6:00 (7:00) časova [8]. U zavisnosti kojoj kategoriji potrošnje pripada krajnji kupac, različite su cijene energije, prenosne i distributivne mrežarine. Za 2025. godinu, te cijene su prikazane u tabeli I. Prikazane vrijednosti u tabeli I ne sadrže porez na dodatu vrijednost (PDV). U odnosu na 2024. godinu, u 2025. godini došlo je do rasta cijene električne energije, a cijene prenosne mrežarine, distributivne mrežarine i naknade za OIEE su ostale iste. Za analizirani industrijski objekat cijena električne energije je porasla sa 0,1478 KM/kWh na 0,1706 KM/kWh za vrijeme VT, odnosno sa 0,0985 KM/kWh na 0,1137 KM/kWh za vrijeme MT.

TABELA I. CIJENE ENERGIJE, PRENOSNE MREŽARINE, DISTRIBUTIVNE MREŽARINE I NAKNADE ZA OIEE ZA 2025. GODINU

	<i>Energija</i> [KM/kWh]	<i>Prenosna</i> <i>mrežarina</i> [KM/kWh]	<i>Distributivna</i> <i>mrežarina</i> [KM/kWh]	<i>Naknada za</i> <i>OIEE</i> [KM/kWh]	<i>Ukupno</i> [KM/kWh]
$C_{P,VT}$	0,1706	0,0192	0,0043	0,0007	0,1948
$C_{P,MT}$	0,1137	0,0096	0,0021	0,0007	0,1261
$C_{Q,VT}$	-	-	0,0361	-	0,0361
$C_{Q,MT}$	-	-	-	-	-
C_{OS}	-	1,0744	9,7499	-	10,8243

U tabeli I data je ukupna cijena $C_{P,VT}$ koja je jednaka zbiru cijene aktivne energije, mrežarine i naknade za OIEE za vrijeme VT, ukupna cijena $C_{P,MT}$ koja je jednaka zbiru cijene aktivne energije, mrežarine i naknade za OIEE za vrijeme MT, ukupna cijena $C_{Q,VT}$ koja je jednaka cijeni distributivne mrežarine reaktivne energije za vrijeme VT i ukupna cijena obračunske snage C_{OS} koja je jednaka zbiru cijene obračunske snage prenosne i distributivne mrežarine. Ukupni troškovi električne energije $T_{E,M}$ u toku jednog obračunskog perioda, koji je najčešće jedan mjesec, računaju se prema izrazu (1):

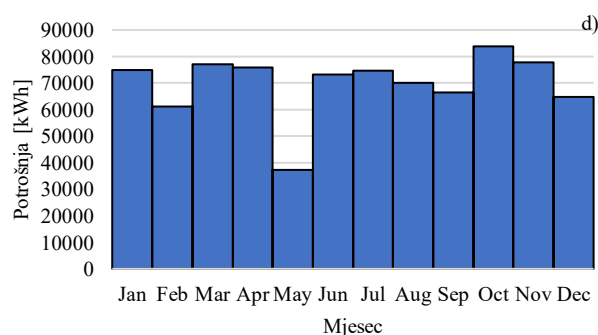
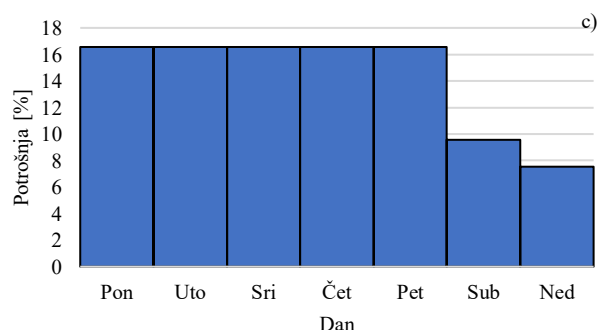
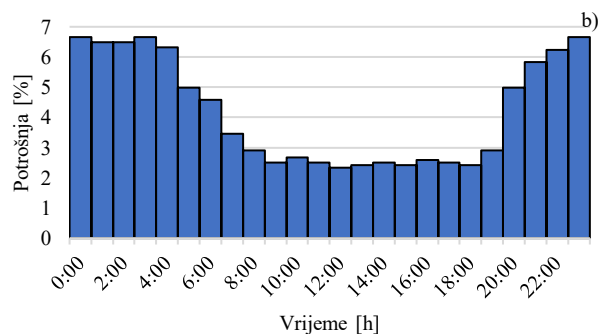
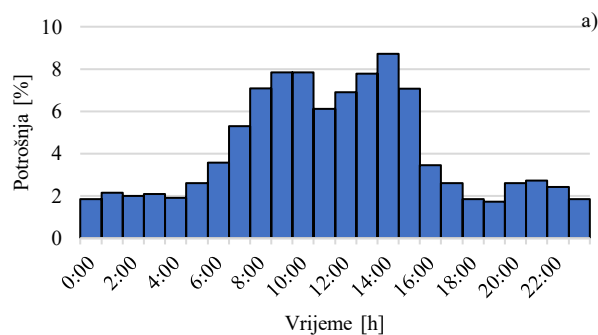
$$T_{E,M} = E_{P,VT} \cdot C_{P,VT} + E_{P,MT} \cdot C_{P,MT} + E_{Q,VT} \cdot C_{Q,VT} + P_{OS} \cdot C_{OS} \quad (1)$$

gdje je $E_{P,VT}$ aktivna energija koja se koristi za vrijeme VT, $E_{P,MT}$ aktivna energija koja se koristi za vrijeme MT, $E_{Q,VT}$ reaktivna energija koja se koristi za vrijeme VT i P_{OS} obračunska snaga. Obračunska snaga P_{OS} je tarifni element u kojem se mjeri i izražava proizvodni, prenosni i distributivni kapacitet, potreban da se podmiri maksimalno opterećenje kupca u svakom trenutku tokom obračunskog perioda [7].

A. Modelovanje potrošnje

Na osnovu dostupnih računa za utrošenu električnu energiju posmatranog objekta, korišćenjem softverskog paketa *PVSol* dobijeni su dnevni, sedmični i mjesečni profili potrošnje. *PVSol* u svojoj bazi posjeduje profile potrošnje za različite vrste potrošača i objekata, a mogu se unijeti i novi profili potrošnje. Za potrebe ovog rada, sa računa za električnu energiju, očitane su ukupne vrijednosti utrošene električne energije za svaki mjesec i te vrijednosti su unesene u *PVSol* na osnovu kojih je dobijena srednja mjesečna potrošnja. Poznajući da u analiziranom objektu proizvodni pogoni rade pet dana u sedmici, u *PVSol* su uneseni procenti potrošnje svakog dana u sedmici i dobijena je srednja sedmična potrošnja. Na osnovu toga što u objektu postoje potrošači koji rade 24 h pet dana u sedmici i toga što proizvodni pogoni rade u prvoj smjeni od 7:00 do 15:00 časova, u *PVSol* su unesena procentualna srednja opterećenja na satnom nivou u toku dana. Uneseni procenti potrošnje izračunati su na osnovu utrošene aktivne električne energije $E_{P,VT}$ i $E_{P,MT}$, i pomoću poznatog broja sati VT i MT za određeni mjesec. Na slici 1 prikazani su dnevne (za radni i neradni dan), sedmični i mjesečni profili potrošnje objekta, koji su usvojeni za dalju analizu. Procenti potrošnje energije u jednom satu označavaju koliki se dio energije troši u tom satu u odnosu na ukupnu energiju koja se troši u danu. Isto tako, procenti potrošnje energije u jednom danu označavaju

dio energije koja se troši u tom danu u odnosu na ukupnu energiju koja se troši u jednoj sedmici.



Sl. 1. Profili potrošnje objekta: (a) dnevni profil za radni dan, (b) dnevni profil za neradni dan, (c) sedmični profil, (d) mjesečni profil

B. Modelovanje proizvodnje MSE

U softverskom paketu *PVSol* modelovan je objekat dimenzija i orijentacije koja odgovara razmatranom objektu.

Na krov modela objekta postavljeni su modeli fotonaponskih modula i konfigurisane su fotonaponske elektrane instalisanih snaga $P_{in,DC}$: 50 kWp, 75 kWp, 100 kWp, 150 kWp, 200 kWp, 250 kWp, 300 kWp. *PVSol* estimira satne vrijednosti proizvodnje elektrane koristeći podatke za tipičnu meteorološku godinu. Takođe, uzima u obzir karakteristike, nagib i orijentaciju fotonaponskih modula, karakteristike i konfiguraciju invertora i uvažava gubitke u kablovima. U tabeli II data je mjesečna i godišnja proizvodnja električne energije analiziranih solarnih elektrana. Za pomenute elektrane fotonaponski moduli su prvo postavljani na stranu krova koja je orijentisana prema jugozapadu, a kada je ta strana krova popunjena, moduli su postavljani na stranu krova koja je orijentisana prema sjeveroistoku.

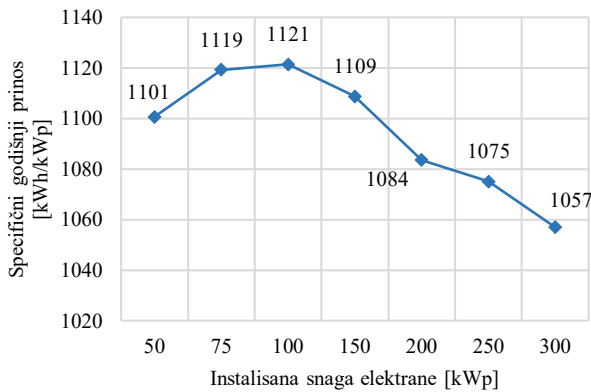
TABELA II. MJESEČNA PROIZVODNJA MSE DOBLJENA POMOĆU SIMULACIJE IZVRŠENE U SOFTVERU *PVSol*

	Proizvodnja [kWh]			
	50 kWp	75 kWp	100 kWp	150 kWp
Januar	2051	3127	4175	6193
Februar	2455	3740	4997	7412
Mart	4228	6446	8610	12770
April	5529	8429	11263	16705
Maj	6666	10170	13587	20148
Jun	6893	10517	14053	20838
Jul	7970	12165	16252	24098
Avgust	6628	10115	13514	20037
Septembar	5167	7881	10530	15616
Oktobar	3585	5466	7303	10831
Novembar	2144	3269	4365	6475
Decembar	1715	2616	3493	5180
Ukupno:	55032	83941	112143	166303

Proizvodnja [kWh]			
	200 kWp	250 kWp	300 kWp
Januar	7591	9052	10439
Februar	9447	11555	13537
Mart	16538	20432	24062
April	21928	27313	32311
Maj	26691	33436	39679
Jun	27724	34809	41358
Jul	31943	40038	47501
Avgust	26341	32845	38855
Septembar	20251	25037	29466
Oktobar	13820	16913	19792
Novembar	8109	9810	11413
Decembar	6322	7519	8673
Ukupno:	216706	268758	317085

Specifični godišnji prinos K_{spe} predstavlja količinu energije koju fotonaponska elektrana proizvodi za svaki instalisani kWp u toku jedne godine, uzimajući u obzir lokaciju, orijentaciju i nagib fotonaponskih modula elektrane. Na slici 2 prikazan je specifični godišnji prinos za analizirane MSE. Kada se poveća broj modula postavljenih na stranu krova koja je orijentisana prema sjeveroistoku K_{spec} se smanjuje. To smanjenje nije veliko zbog relativno malog nagiba krovne površine. Za ovako konfigurisane elektrane K_{spec} se kreće od 1057 kWh/kWp do 1121 kWh/kWp. Ukupna godišnja proizvodnja MSE može se predstaviti izrazom:

$$E_{Pr,g} = P_{in,DC} \cdot K_{spec} \quad (2)$$



Sl. 2. Specifični godišnji prinos analiziranih MSE

C. Modelovanje troškova izgradnje MSE

Troškovi izgradnje MSE su potrebni za ekonomski proračun. Način priključenja MSE i način korišćenja proizvedene energije značajno utiču na vrijednost troškova izgradnje. Na pomenute troškove utiče i snaga elektrane. Troškovi izgradnje MSE T_i mogu se predstaviti sljedećim izrazom:

$$T_i = T_{izg} + T_{Pd,D} + T_{TS} \quad (3)$$

gdje je T_{izg} trošak opreme, montaže i povezivanja MSE, koji se računa kao proizvod jedinične cijene izgradnje c_{izg} i instalisane snage $P_{in,DC}$; $T_{Pd,D}$ trošak izrade projektne dokumentacije i ishodovanja saglasnosti i dozvola; T_{TS} su troškovi ulaganja vezani za trafostanicu na koju se planira priključiti MSE. Jedinična cijena izgradnje c_{izg} zavisi od $P_{in,DC}$, što je $P_{in,DC}$ veće manja je c_{izg} . Takođe, kada se proizvedena energija koristi na *I način* jedinična cijena izgradnje je manja nego kada se energija koristi na *II* i *III način*. Kada se energija koristi na koristi na *II* i *III način* $T_{Pd,D}$ je veće nego za *I način* korišćenja energije zato što nije potrebno ishodovati dozvole i saglasnosti, a radovi izgradnje se definišu kao nadogradnja postojeće elektroinstalacije objekta. Za *I način* korišćenja energije T_{TS} je jednako nuli, zato što se MSE priključuje na postojeće elektroinstalacije objekta. Analizirani proizvodni kompleks u svom vlasništvu posjeduje trafostanicu nominalne snage 630 kVA, da bi se ostvario *II način* korišćenja energije potrebna je izgradnja nove trafostanice. Za *III način* korišćenja energije potrebno je uraditi rekonstrukciju dijela trafostanice da bi se mogao vršiti obračun preuzete i predate energije na osnovu standardne šeme snabdijevanja [6]. Vrijednost troška T_{TS} je veća kada se energija koristi na *II način* nego kada se energija koristi na *III način*, zato što je potrebno izgraditi novu trafostanicu što predstavlja veći trošak nego kada se rekonstruiše postojeća trafostanica. Bitno je napomenuti da prilikom izgradnje MSE instalisane snage 300 kWp zbog kraćeg vremena potrebnog za ishodovanje dozvola i saglasnosti u većini slučajeva rade se dvije elektrane instalisane snage 150 kWp i rade se dva seta projektno-

tehničke dokumentacije [9]. Za elektrane instalisane snage preko 150 kWp dozvolu za građenje izdaje nadležno ministarstvo što zahtijeva veće novčane troškove i duže vrijeme ishodovanje dozvole. Kada se grade dvije elektrane po 150 kWp polovina panela jedne elektrane postavlja se na jugozapadnu stranu krova, a druga polovina panela na sjeveroistočnu stranu krova. U ovom radu nije razmatrana opcija realizacije modularnih MSE osnovnih snaga 50, 75, 100, 150 kWp ili njihovih kombinacija iz razloga što jedinični trošak izgradnje MSE opada sa porastom instalisane snage MSE.

D. Proračun

Jedan od najjednostavnijih indikatora isplativosti investicije je prosti period otplate *SPP* (eng. *Simple Payback Period*) U izrazu za računanje prostog perioda otplate investicije figurišu samo dvije promjenljive [10]:

$$SPP = \frac{\text{Vrijednost ukupne investicije}}{\text{Godišnja dobit}} \quad (4)$$

Na prosti period otplate izgradnje MSE utiče više faktora kao što su: način finansiranja izgradnje, troškovi izgradnje, način korišćenja proizvedene električne energije, cijena po kojoj se prodaje električna energija itd. Ako se izgradnja finansira iz vlastitih sredstava rok otplate je manji zato što se ne plaćaju troškovi obrade kredita i kamate. Što je veći trošak izgradnje to je duži period otplate investicije, a ako je cijena po kojoj se proizvedena energija prodaje veća to je kraći period otplate investicije. Ukupna godišnja proizvedena električna energija predstavlja zbir energije koja se proizvodi u svakom satu godine i može se odrediti pomoću izraza:

$$E_{Pr,g} = \sum_{h=1}^{8760} E_{Pr}(h) \quad (5)$$

gdje je h čas u godini. Takođe, ukupna godišnja potrošnja objekta $E_{Po,g}$ može se predstaviti sličnim izrazom:

$$E_{Po,g} = \sum_{h=1}^{8760} E_{Po}(h) \quad (6)$$

U slučaju kada je potrošnja objekta veća od proizvodnje elektrane dolazi do potrebe preuzimanja energije iz mreže. Ukupna energija koja se preuzme iz mreže $E_{Po,M,g}$, na nivou godine, data je izrazom:

$$E_{Po,M,g} = \sum_t (E_{Po}(t) - E_{Pr}(t)) \quad (7)$$

gdje je t čas u godini kada je potrošnja objekta veća od proizvodnje elektrane. U tom slučaju za svako t vrijedi:

$$E_{Po}(t) - E_{Pr}(t) > 0 \quad (8)$$

U slučaju kada je potrošnja objekta manja od proizvodnje elektrane dolazi do potrebe za isporukom energije u mrežu ili do ograničenja snage invertora. Ukupna energija koju

proizvodi MSE, a koja se isporučuje u mrežu $E_{Pr,M,g}$, ili koja se gubi prilikom ograničavanja rada invertora, na nivou godine, data je izrazom:

$$E_{Pr,M,g} = \sum_{k=1}^{8760} E_{Pr}(k) - E_{Po}(k) \quad (9)$$

dok je ukupna energija koju proizvodi MSE, a koja se koristi za napajanje potrošača objekta $E_{Pr,K,g}$, data izrazom:

$$E_{Pr,K,g} = \sum_{k=1}^{8760} E_{Po}(k) \quad (10)$$

gdje je k čas u godini kada je potrošnja objekta manja ili jednaka proizvodnji elektrane. U tom slučaju za svako k vrijedi:

$$E_{Pr}(k) - E_{Po}(k) \geq 0 \quad (11)$$

Kada MSE proizvodi manje energije nego što objekat troši sva proizvedena energija se koristi za potrošnju, a dodatna energija se preuzima iz mreže. Sa druge strane, kada MSE može da proizvodi više energije nego što objekat troši izlazna snaga invertora se ograničava na snagu objekta i dolazi do ograničavanja snage invertora pa se ne koristi sva raspoloživa energija. Energija koja se ne koristi može se skladištiti u akumulatorske baterije, to nije analizirano u ovom radu zbog relativno visokih cijena baterija. Ovaj slučaj je karakterističan za *I način* korišćenja energije. Kada se energija proizvedena iz MSE koristi na *I način* ukupna korisna energija $E_{Pr,K,g}$ data je izrazom (10). U zavisnosti od dana u sedmici i perioda u danu kada se energija $E_{Pr,K,g}$ troši za napajanje potrošača, ista se može predstaviti izrazom:

$$E_{Pr,K,g} = E_{Pr,K,VT,g} + E_{Pr,K,MT,g} \quad (12)$$

gdje je $E_{Pr,K,VT,g}$ energija koja se koristi u periodu viših dnevnih tarifnih stavova, a $E_{Pr,K,MT,g}$ energija koja se koristi u periodu manjih dnevnih tarifnih stavova tokom čitave godine.

Za *I način* korišćenja proizvedene energije prosti period otplate SPP_I investicije dat je izrazom:

$$SPP_I = \frac{T_{i,I}}{(E_{Pr,K,VT,g} \cdot C_{P,VT} + E_{Pr,K,MT,g} \cdot C_{P,MT}) - T_{od}} \quad (13)$$

gdje je $T_{i,I}$ ukupan trošak investicije, a T_{od} trošak održavanja na godišnjem nivou i iznosi oko 1% od ukupne investicije.

Kada se proizvedena energija koristi na *II način* sva proizvedena energija se predaje u elektrodistributivnu mrežu. Tu energiju je moguće prodavati u sistemu podsticaja po garantovanoj otkupnoj cijeni $C_{P,Pods}$ ili na slobodnom tržištu. U ovom radu pretpostavljeno je da se energije prodaje u sistemu podsticaja po garantovanoj otkupnoj cijeni koja trenutno iznosi 0,2019 KM/kWh [11]. Za *II način* korišćenja

proizvedene energije prosti period otplate investicije SPP_{II} dat je izrazom:

$$SPP_{II} = \frac{T_{i,II}}{E_{Pr,g} \cdot C_{P,Pods} - T_{od} - T_{bal}} \quad (14)$$

gdje je $T_{i,II}$ ukupan trošak investicije, T_{od} trošak održavanja na godišnjem nivou, a T_{bal} trošak balansiranja na godišnjem nivou i iznosi 0,016 KM/kWh isporučene električne energije u mrežu. Troškove balansiranja snosi investitor za elektrane instalisane snage veće od 150 kWp [7].

Kada se proizvedena energija koristi na *III način* energija $E_{Pr,M,g}$ se isporučuje u elektrodistributivnu mrežu i prodaje se po ugovorenoj cijeni $C_{P,U}$, a energija $E_{Pr,K,g}$ se koristi za potrebe proizvodnog kompleksa. U ovom radu pretpostavljeno je da je ugovorena cijena jednaka cijeni energije za vrijeme MT i trenutno iznosi 0,1137 KM/kWh. Za *III način* korišćenja proizvedene energije period otplate investicije dat je izrazom :

$$SPP_{III} = \frac{T_{i,III}}{(E_{Pr,K,VT,g} \cdot C_{P,VT} + E_{Pr,K,MT,g} \cdot C_{P,MT} + E_{Pr,M,g} \cdot C_{P,U}) - T_{od} - T_{bal}} \quad (15)$$

gdje je $T_{i,III}$ ukupan trošak investicije, T_{od} trošak održavanja na godišnjem nivou, a T_{bal} trošak balansiranja na godišnjem nivou.

III. REZULTATI

U tabeli III je data jedinična cijena izgradnje (T_j) jednog kWp za različite nivoe instalisane snage MSE, u zavisnosti od načina korišćenja proizvedene električne energije. Prikazani iznosi odnose se na slučaj finansiranja iz vlastitih sredstava. Procjena investicionih troškova zasnovana je na aktuelnim tržišnim cijenama izgradnje MSE u banjalučkoj regiji. Troškovi izgradnje, kao i načini investiranja, predstavljaju ključne faktore u donošenju odluke o izgradnji MSE. Iz prikazane tabele može se vidjeti da se jedinični troškovi investicije smanjuju sa rastom instalisane snage MSE. Ukupan trošak izgradnje MSE dobija se kao proizvod jediničnog troška i nominalne snage, za određenu instalisanu snagu MSE. Prikazane vrijednosti u tabeli III date su bez poreza na dodatu vrijednost (PDV).

TABELA III. VRIJEDNOST INVESTICIJE IZGRADNJE MSE

$P_{in,DC}$	$T_{j,I}$ [KM/kWp]	$T_{j,II}$ [KM/kWp]	$T_{j,III}$ [KM/kWp]
50 kWp	1063	1243	1243
75 kWp	1035	1509	1167
100 kWp	1021	1429	1130
150 kWp	1006	1292	1092
200 kWp	960	1197	1056
250 kWp	956	1153	1040
300 kWp	953	1176	1053

Za različite vrijednosti instalisanih snaga MSE i načine korišćenja proizvedene električne energije, a prema izrazima (13), (14) i (15), izračunat je prosti period otplate investicije i dat je u tabeli IV. Na osnovu dobijenih rezultata može se vidjeti da je za analizirani slučaj, najkraći prosti period otplate za MSE instalisane snage 75 kWp čija se proizvedena energija koristi na *I način*. Taj period je 5,8 godina. Kada se energija koristi na *II način* najkraći prosti period otplate ja za MSE instalisane snage 50 kWp (6,1 godinu), a kada se energija koristi na *III način* najkraći prosti period otplate ja za MSE instalisane snage 150 kWp, odnosno 200 kWp (6,1 godinu). Karakterističan slučaj je za MSE instalisane snage od 150 kWp pa naviše gdje je prosti period otplate približno jednak za sva tri načina korišćenja proizvedene energije.

TABELA IV. PROSTI PERIOD OTPLATE INVESTITCIJE

$P_{m,DC}$	SPP_I [godina]	SPP_{II} [godina]	SPP_{III} [godina]
50 kWp	6,0	6,1	7,1
75 kWp	5,8	7,4	6,5
100 kWp	5,9	6,7	6,2
150 kWp	6,1	6,3	6,1
200 kWp	6,1	6,5	6,1
250 kWp	6,4	6,2	6,2
300 kWp	6,7	6,5	6,5

Dodatna analiza različitih opcija je izvršena računanjem jediničnog profita u periodu od 25 godina korišćenja MSE. U tabeli V prikazan je jedinični profit MSE u zavisnosti od instalisane snage i načina korišćenja energije. Prilikom ovog proračuna korišćene su trenutne cijene električne energije prikazane u tabeli I, trenutna garantovana otkupna cijena, a nije uzeta u obzir mogućnost rasta cijena električne energije za privredu. Ukupan profit u periodu od 25 godina jednak je proizvodu jediničnog profita i instalisane snage MSE. Kada se energija koristi na *I način* ukupan profit se odnosi na uštedu koja se ostvari smanjenjem troškova za električnu energiju u periodu od 25 godina. Kada se energija koristi na *II način* ukupan profit se dobija prodajom energije po garantovanoj otkupnoj cijeni u periodu od 15 godina i pod pretpostavkom da će se i dodatnih 10 godina prodavati po toj cijeni. Kada se energija koristi na *III način* ukupan profit se dobija kao zbir uštede smanjenja troškova električne energije i zarade od prodaje viška proizvedene električne energije po ugovorenoj cijeni.

TABELA V. JEDINIČNI PROFIT KORIŠĆENJA MSE U PERIODU OD 25 GODINA

$P_{m,DC}$	UP_I [KM/kWp]	UP_{II} [KM/kWp]	UP_{III} [KM/kWp]
50 kWp	3419	3979	3244
75 kWp	3435	3775	3416
100 kWp	3353	3937	3464
150 kWp	3150	3990	3438
200 kWp	2974	3547	3284
250 kWp	2811	3561	3219
300 kWp	2615	3437	3060

IV. ZAKLJUČAK

U radu je analizirana isplativost izgradnje MSE na krovu industrijskog objekta kompanije koja se bavi preradom

drveta i proizvodnjom gotovih proizvoda od drveta. U prvom dijelu rada opisani su mogući načini korišćenja proizvedene električne energije i opisani su mogući načini priključenja MSE u Republici Srpskoj. Pomoću softverskog paketa *PVSol* estimirana je satna, mjesečna i godišnja proizvodnja MSE i generisani su satni, sedmični i mjesečni profili potrošnje. Na osnovu poznatih tržišnih cijena izgradnje MSE, u banjalučkoj regiji, izračunati su jedinični troškovi izgradnje MSE u zavisnosti od instalisane snage MSE i načina korišćenja proizvedene električne energije. Takođe, izračunat je prosti period otplate investicije u zavisnosti od instalisane snage i načina korišćenja proizvedene električne energije. Dobijeni rezultati pokazuju da prosti period otplate zavisi od instalisane snage MSE i od načina korišćenja energije. Najkraći prosti period otplate se dobija za MSE instalisane snage 75 kWp kada se energija koristi na *I način*. U periodu od 25 godina, MSE instalisane snage 150 kWp donosi najveći jedinični profit kada se energija koristi na *II način*. Nakon izvršene analize može se zaključiti da i ako nema kapaciteta za priključenje elektrane na elektrodistributivnu mrežu, ekonomski isplativa investicija je izgradnja elektrane za vlastite potrebe. Kao dodatna analiza može se razmotriti opcija ugradnje akumulatorskih baterija za skladištenje neiskorištene električne energije, kada se izgradi elektrana za vlastite potrebe.

LITERATURA

- [1] SolarPower Europe [SPE], "Global Market Outlook For Solar Power 2024-2028," SPE Technical Report, Brussels, 2024.
- [2] IEA [International Energy Agency], Snapshot of Global Photovoltaic Markets 2024, Report IEA-PVPS T1-42:2024.
- [3] M. Grebski, A. Maryniak, "Benefits of installing a Photovoltaic Power-Generation System for a Warehouse Facility", 2020.
- [4] Pravilnik o uslovima za priključenje elektrana na elektro distributivnu mrežu Republike Srpske, MH „Elektroprivreda Republike Srpske“, novembar 2023.
- [5] Pravilnik o podsticanju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije, „Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske“, Trebinje, septembar 2023.
- [6] Pravilnik o kupcima-proizvođačima električne energije „Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske“, Trebinje, avgust 2023.
- [7] Zakon o električnoj energiji Republike Srpske („Sl. Glasnik RS“, br. 68/2020)
- [8] Odluka o utvrđivanju tarifnih satova za korisnike distributivnih sistema u Republici Srpskoj, „Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske“, Trebinje, decembar 2022.
- [9] Zakon o uređenju prostora i građenju Republike Srpske („Sl. Glasnik RS“, br. 40/2013, 2/2015 - odluka US, 106/2015 i 3/2016 - ispr., 104/2018 - odluka US i 84/2019)
- [10] Č. Zeljković, „Obnovljivi izvori energije-Solarna energetika“, Univerzitet u Banjoj Luci, Akademsko misao Banja Luka - Beograd, 2018.
- [11] Odluka o visini garantovanih otkupnih cijena i premija za električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora, „Regulatorna komisija za energetiku Republike Srpske“, Trebinje, jul 2022.

ABSTRACT

This paper explores the feasibility of installing a small solar power plant (SSPP) on the roof of an industrial facility. The economic viability of the investment is analyzed under three different usage scenarios for the generated electricity: (1) the electricity is used exclusively for the facility's own consumption, with no energy injected into the grid at any

time; (2) all generated electricity is injected into the grid; and (3) the electricity is primarily used for self-consumption, with any surplus delivered to the grid. Additionally, the paper provides a detailed description of the possible grid connection configurations for the SSPP, depending on the selected electricity usage scenario. In the initial part of the paper, consumption diagrams for the analyzed facility were generated using the PVSol software package, along with electricity production estimates for several installed capacity variants of the SSPP. Based on the obtained results, the optimal system size was selected to maximize profit over the estimated system lifetime, in accordance with the different electricity usage scenarios.

COST-EFFECTIVENESS OF INSTALLING A SOLAR POWER PLANT ON THE ROOF OF AN INDUSTRIAL FACILITY

Bojan Lazić, Predrag Mršić, Čedomir Zeljković

Povećanje energetske efikasnosti u proizvodnji primjenom lean metoda

Maja Vuković¹, Nemanja Sremčev², Zorana Tanasić¹, Goran Janjić¹, Rade Repajić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

maja.vukovic@mf.unibl.org, nextesla@gmail.com, zorana.tanasic@mf.unibl.org, goran.janjin@mf.unibl.org, rade.repajic@student.mf.unibl.org

Sažetak— U savremenoj industriji, energetska efikasnost postaje ključni faktor u postizanju konkurentne prednosti, smanjenju operativnih troškova i održivom razvoju preduzeća. U industriji proizvodnje papira optimizacija proizvodnih procesa postaje neophodna kako bi se smanjila potrošnja energije i poboljšala ukupna efikasnost. Implementacija lean metoda, kao što su TPM (Total Productive Maintenance) i 5S, značajno doprinosi smanjenju energetske potrošnje, poboljšanju održavanja mašina i smanjenju zastoja, što direktno utiče na povećanje produktivnosti i smanjenje operativnih troškova. Ovaj rad se fokusira na analizu procesa proizvodnje papira, sa posebnim naglaskom na primjenu lean metoda u optimizaciji proizvodnje. Kroz analizu faktora koji utiču na efikasnost proizvodnih linija i primjenu strategija za prevenciju zastoja, istražuje se kako unaprjeđenje održavanja i upravljanja proizvodnim resursima može značajno doprinijeti energetske efikasnosti. Korišćenje naprednih sistema za praćenje i analizu podataka omogućava bolje upravljanje procesima, identifikaciju problematičnih tačaka i uvođenje korektivnih mjera koje vode ka smanjenju potrošnje energije i optimizaciji rada mašina.

Ključne riječi— lean; TPM; 5S; energetska efikasnost;

I. UVOD

U uslovima sve dinamičnijeg tržišta i potrebe za većom efikasnošću, preduzeća nastoje da optimizuju sve aspekte proizvodnje. Jedan od ključnih elemenata u postizanju stabilnog i pouzdanog proizvodnog procesa jeste efikasno upravljanje održavanjem opreme. U tom kontekstu, Totalno produktivno održavanje (TPM) se izdvaja kao sistematski pristup koji ima za cilj eliminisanje zastoja, smanjenje gubitaka i aktivno uključivanje svih zaposlenih u proces unaprjeđenja.

A. Totalno produktivno održavanje - TPM

Totalno produktivno održavanje (TPM) predstavlja metodu koja ima za cilj eliminaciju kvarova i zastoja kroz aktivno učešće svih zaposlenih, čime se postiže stalno unaprjeđenje učinkovitosti proizvodne opreme [1].

Analizom i obradom svih podataka koje su godinama skupljali članovi JIRM instituta definisali su osnovne ciljeve za ostvarivanje TPM-a:

- da se efikasnost i raspoloživost opreme maksimizuju,
- da se razvije produktivno održavanje opreme,

- maksimalna uključenost svih sektora u implementaciju ove metode,
- povećano promovisanje TPM koncepta kao dijela poslovne filozofije,
- formiranje timova za kontinuirana unaprjeđenja [1].

TPM metoda zasniva se na osam osnovnih stubova koji obuhvataju ključna područja djelovanja usmjerenih ka povećanju pouzdanosti i efikasnosti proizvodne opreme. Ovi stubovi su: fokusirana poboljšanja, autonomno održavanje, planirano održavanje, rano upravljanje opremom, održavanje kvaliteta, administrativno održavanje, obuke i edukacije i bezbjednost i zaštita na radu [2].

B. Metoda 5S

Svih osam stubova TPM metode se zasnivaju na jednoj drugoj metodi, a to je 5S metoda. Ova metoda predstavlja temelj lean koncepta i jedna je od efikasnijih metoda za kontinuirano poboljšanje procesa unutar organizacije. Naziv ove metode potiče od pet japanskih pojmova koji počinju slovom „S“, a koji znače [1]:

- sortirati – označava da je potrebno razvrstati i sortirati sve materijale, opremu, alate i dokumentaciju prema učestalosti korištenja,
- složiti – u ovom koraku teži se da sve bude na svom mjestu, pri čemu se određuju lokacije za skladištenje materijala, alata i dokumentacije,
- srediti – označava da je potrebno sve redovno čistiti i održavati po unaprijed definisanom rasporedu,
- standardizovati – označava standardizaciju procesa rada uz pomoć različitih procedura i propisa,
- sprovoditi / samodisciplina – predstavlja najteži korak u ovoj metodi, a to je njegovo održavanje u određenom kontinuitetu.

C. Ukupna efikasnost opreme (OEE)

Ukupna efikasnost opreme (Overall Equipment Efficiency – OEE) predstavlja osnovni standard za mjerenje proizvodne produktivnosti i analizu efikasnosti primjene TPM koncepta. Koristi se za mjerenje sposobnosti mašina sa ciljem da se na

vrijeme naprave proizvod traženog kvaliteta radi osiguranja lojalnosti kupca. S obzirom na to da je u najvećem broju slučajeva vrijeme proizvodnog ciklusa ograničeno sposobnošću mašina da dosegnu taj ritam, primjena OEE mjere omogućava da se identifikuje problem koji sprječava ostvarivanje zadanog tempa proizvodnje [3].

II. PRIMJENA LEAN METODA U INDUSTRIJSKOJ PROIZVODNJI

Jedan od odlučujućih faktora koji utiče na energetska efikasnost u industriji proizvodnje papira je upotreba modernih proizvodnih linija i stalno ulaganje u tehnologiju. Uz korišćenje naprednih sistema za praćenje proizvodnje, kao što su softverski paketi za praćenje i analizu podataka, mogu se identifikovati problematična područja koja utiču na smanjenje efikasnosti i povećanje potrošnje energije. U kontekstu energetske efikasnosti, važno je ne samo analizirati tehničke parametre rada mašina, već izvršiti i optimizaciju procesnih tokova u cilju smanjenja nepotrebnih zastoja i povećanja produktivnosti.

Implementacija lean metoda u proizvodnji predstavlja ključnu strategiju za unapređenje energetske efikasnosti. Lean pristupi, koji se temelje na eliminaciji otpada i optimizaciji resursa, omogućavaju poboljšanje rada kroz minimiziranje zastoja, smanjenje vremena potrebnog za rješavanje kvarova i efikasno upravljanje svim resursima – od ljudskih kapaciteta do energetske potrošnje. Ovaj pristup doprinosi boljoj iskorišćenosti proizvodnih linija i smanjenju troškova, čime se direktno utiče na veću energetska efikasnost.

Energetska efikasnost u proizvodnji papira može se postići kroz analizu faktora koji direktno utiču na efikasnost proizvodnih linija. Jedan od najvažnijih parametara u ovoj analizi je Overall Equipment Effectiveness (OEE), koji mjerenjem dostupnosti, efikasnosti i kvaliteta rada mašina pruža sveobuhvatan uvid u cjelokupnu proizvodnju. U konkretnim analizama (Slika 1), uočeno je da početni nivoi OEE mogu biti niski zbog tehničkih problema, podešavanja mašina i obuke radnika, ali s vremenom, kroz praćenje i optimizaciju tih parametara, dolazi do poboljšanja i smanjenja potrošnje energije po proizvedenoj jedinici proizvoda.

	2022													2023
	Januar	Februar	Mart	April	Maj	Jun	Jul	Avgust	Septembar	Oktobar	Novembar	Decembar	Ukupno 2022	Januar
Raspoloživost (A)	32.4	40.9	51	54.2	53.2	60.9	61	62.8	64	72	66.2	73.7	57.69	74.5
Efikasnost (U)	60.1	70.6	68.5	69.9	67.2	69.9	77.5	67.4	81.8	85.2	70.9	87.5	73.04	81.6
Kvalitet (Q)	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0	99.00	99.0
OEE (stvarni)	19.3	28.6	34.6	37.5	35.4	42.1	46.8	41.9	51.8	60.7	46.5	63.8	42.42	60.2
OEE (planirani)	47.4	54.6	57.4	59.2	62.8	63.8	66.5	67.4	64.5	67.4	67.4	67.4	62.15	63.4
Stvarno tona (T)	130	289.1	551.3	541.5	644.1	650.4	823.6	838.5	858.2	1123.1	848.5	1029.1	693.95	668
Planirano tona (T)	443	525.1	679.3	721.8	868.9	876.3	968	1069.9	1057	1075.5	1015.7	1034.8	861.28	1135.6

Sl. 1. Ukupno OEE po mjesecima

Dalje, analiza zastoja u proizvodnji takođe igra ključnu ulogu u povećanju energetske efikasnosti. Zastoji mogu biti rezultat tehničkih problema, poput kvarova na mašinama, ali i organizacionih grešaka, kao što su loše postavljeni rasporedi proizvodnje ili neadekvatno održavanje. Analizom uzroka zastoja, kao što su problemi sa rezanjem papira ili kvarovi na pojedinim proizvodnim jedinicama, moguće je ne samo smanjiti vremena neproduktivnosti, već smanjiti nepotrebnu potrošnju energije koja nastaje tokom perioda kada su mašine neaktivne.

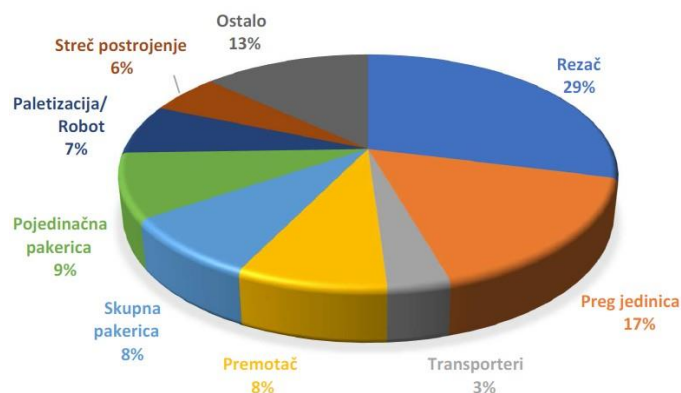
Za implementaciju ovih strategija, potrebno je koristiti alate za analizu podataka i kontinuirano praćenje proizvodnih linija, kako bi se na vrijeme detektovali problemi i preventivno reagovalo.

Na osnovu dostupnih podataka iz softverskog paketa ESO/ES, izvršena je analiza zastoja koji su se dogodili na proizvodnoj liniji TL15. Na Slici 2 prikazana je tabela sa svim registrovanim zastojima, kao i ukupno vrijeme njihovog trajanja, iskazano u satima. Jasno se uočava da je najveći broj zastoja izazvan problemima na rezaču i preg jedinici, koji su bili povezani sa intervencijama održavanja. Ukupno vrijeme neplaniranih intervencija održavanja iznosilo je 145 sati.

Ek. jedinica	Naziv org. komponente	Kod (1), tipa	Kod (2), tipa	Kod (3), tipa	Kod tipa zastoja	Trajanje stvarno
					11124x Zamjena noževa i ostalog	6
					11150x Drugo	1
					111581x Podešavanje - vilenice (premotava...)	2
					111583x Podešavanje - rezača (rezanje)	0
					111584x Podešavanje - pojedinačne paketerice	2
					111587x Podešavanje - hitni mašine	0
				111	TEHNOLOŠKI ZASTOJI	10
				1123x	Održavanje u toku rada	1
				112	Zastoji održavanja	1
				11301	Transporteri	1
				11301x	Transporteri	4
				11303	Hitzarica	0
				11303x	Hitzarica	2
				11305x	Dizalice i kranovi	1
				11313x	Pregovanje i laminacija	24
				113150	Premotač	2
				11315x	Premotač / Agregat za slaganje	12
				11317x	Akumulator	3
				11318	Rezač	25
				11318x	Rezač	17
				11310x	pregovanje R/D	6
				11311x	postrojenje za palete	2
				113203	Pojedinačna paketerica - vrećice 1	0
				11320x	Pojedinačna paketerica	13
				113211	skupna paketerica 1	3
				11321x	Skupna paketerica	12
				11322	Paletizacija/Robot	10
				11323	Štač postrojenje	0
				11323x	Štač postrojenje	8
					Kvarovi	145
						156
				1224x	Ostalo	1
				122	Energije i medija	1
					Ostalo	1
						157
				71115A	ZAMJENA ŠABERA	1
					TEHNOLOŠKI	1
					PDGONSKI	1
2117	Konfekcija TL15					158

Sl. 2. Evidencija zastoja na liniji TL15

Na Slici 3 grafički je prikazana struktura zastoja, pri čemu se jasno uočava da zastoji na rezaču čine 29% ukupnog vremena, dok zastoji na preg jedinici iznose 17%. S obzirom na to da rezač predstavlja najznačajniju tačku zastoja, u nastavku će biti izrađena TPM karta za rezač, kao i prikazana predložena poboljšanja. Ova poboljšanja imaju za cilj smanjenje zastoja i povećanje ukupne efikasnosti proizvodne linije TL15.



Sl. 3. Grafički prikaz zastoja usljed održavanja

A. Rezač – analiza zastoja

Za prikupljanje podataka korišćena je intervencijska knjiga koju smjenski radnici u održavanju popunjavaju nakon svake intervencije, a podaci se kasnije unose u elektronsku bazu. Ovakva sistematizacija omogućava precizno praćenje vrste i učestalosti zastoja po pojedinim mašinama.

Jedan od najznačajnijih problema na rezaču dogodio se u dva navrata, kada je došlo do pucanja vijka koji pričvršćuje osovinicu na kojoj je postavljen protuteg koji služi kao balans. Takav kvar je značajno uticao na stabilnost rada mašine.

Proces otklanjanja ovog problema, koji je prikazan kao poboljšanje (Slika 4), započet je potpunim demontiranjem sklopa rezača. Usljed velike mase – preko 700 kilograma – noseća ploča je morala biti izvučena pomoću kрана. Nakon toga, izvršeno je precizno proširivanje utora i izrada dodatnih navojnih otvora kako bi se obezbjedila čvršća i pouzdanija konstrukcija veza. Nakon ponovnog sklapanja i puštanja

rezača u rad, isti problem više nije evidentiran, što ukazuje na uspješnost sprovedenog poboljšanja.

Poboljšanje procesa /Process improvement		
Broj nedostataka: 1	Naziv / Description: Rezač / Log saw	Datum / Date: 15.11.2022.
Problem / Issue:	Prije / Before:	
Uzrok / Cause:	Datum / Date: 11.11.2022.	Poslije / After:
Rješenje / Solution:	Proširivanje utora i izrada nove osovinice u odgovarajućoj toleranciji	
	Datum / Date: 15.11.2022.	

Sl. 4. Poboljšanje na rezaču

Na osnovu prikupljenih podataka, za rezač je izrađena TPM karta (Slika 5) sa ciljem unapređenja pouzdanosti i smanjenja broja intervencija. U izradi karte korišćeni su podaci iz tehničke dokumentacije proizvođača mašine, unaprijed definisani programi preventivnog održavanja, 5S metoda, zapažanja sa terena, kao i zapisi iz knjige zastoja. Ključne aktivnosti obuhvataju redovno čišćenje unutrašnjosti rezača od ostatka papira i emulzije, svakodnevnu kontrolu pritiska vazduha, održavanje čistoće posude za vodu koja prikuplja varnice i nečistoće prilikom oštrenja noža, kao i periodičnu dopunu sistema za podmazivanje. Takođe, izlazni transporteri moraju se čistiti na kraju svake smjene radi sprečavanja mehaničkih oštećenja i zaglavlivanja materijala. Sve aktivnosti predviđene TPM metodom zapisuju se u obrasce za 5S i TPM, koji omogućavaju nadzor nad redovnim izvršavanjem mjera održavanja. Dosljedna primjena ovih aktivnosti doprinosi smanjenju broja zastoja, produženju radnog vijeka opreme i optimizaciji potrošnje energije. Na taj način TPM direktno podržava ciljeve energetske efikasnosti, smanjujući rasipanje resursa i obezbjeđujući stabilniji i ekonomičniji rad proizvodne linije.

5-S и TPM за радно мјесто / 5-S & TPM INSTRUCTION FOR WP			
Линија / Line	Број машине / Machine number	Назив / Description	Додатни текст / Additional text
TL 15	64526	Резач / Log saw	Резач 90.46
Датум / Date	Ревизија / Revision	Израдио / Created by	Потпис / Signature
01-02-23	90.46.00	Раде Репацић	<i>Раде Репацић</i>

Појединачно / Shift	Дан / Day	Смјена / Shift	Мјесец / Month	Година / Year	Редни број / No.	Тип / Type	Опис акције / Description of the action	Потребна средства / Resources	Одговоран / Responsible
					1	SS	Очистити унутрашњост и простор око резаћа (обрисати прашину, уклонити остатке папире и материјале од емалјажа)	Цријево за ваздух, усисвач, метла и крпа	Вођа машине/оператер
					2	SS	Очистити транспортер за одјечавање	Четка/метла за чишћење	Вођа машине/оператер
					3	TPM	Визуелна контрола притиска (6 бара)		Вођа машине/оператер
					4	TPM	Визуелна контрола истрошености брусера		Вођа машине/оператер
					5	TPM	Контрола затегнутости ланаца и паралелности валуна		Одржавање
					6	TPM	Зачепа ножа	Заштитне рукавице и заштитни поклопац за оштрицу ножа	Одржавање
					7	TPM	Визуелна провера валуна и треноса резања		Одржавање
					8	TPM	Чишћење посуде са водом	Четка и крпа за чишћење	Вођа машине/оператер
					9	TPM	Визуелна провера димензија за експлициту		Одржавање
					10	TPM	Зачепа брусера		Одржавање
					11	TPM	Подизање свих лекација	Пневматска пумпација ваздуха	Одржавање
					12	TPM	Зачепа валуна и треноса резања		Одржавање

Тлоцрт радног простора / Workplace layout

Појашњење / EXPLANATION:

(П) По смјени / Once per shift (на крају смјене / end of shift)
 (Д) Дневно / Daily (На крају прве смјене / end of 1st shift)
 (С) Седмично / Weekly (На крају прве смјене петком / end of 1st shift on Friday)
 (М) Мјесечно / Monthly (на крају прве смјене првог радног дана / end of 1st shift on 1st workday)

На мјестима гдје је постављена наљепница / On the location on the workplace there is a label

Примјер / Example: Примјер "Једном у смјени", "активност 3" / means "Once per shift", "activity"

Трајање активности / Activity duration:

Трајање (П) и (Д) не смије бити дужи од 5 мин
 The time for (P) and (D) must not exceed 5 min
 За дужи активности резервисати вријеме / For longer duration reserve time

Ниво / Level	Извршење / Perform
1	Свака смјена / Each shift
2	1. смјена / 1st shift
3	1. смјена / 1st shift
4	1. смјена / 1st shift

Sl. 5. TPM karta rezača

III. ZAKLJUČAK

Osnovna prednost primjene lean koncepta ogleda se u sistematičnom uočavanju stvarnih problema u procesu i njihovom otklanjanju, što dovodi do kontinuiranog unapređenja načina rada. Ovakvim pristupom sistem postaje efikasniji, a aktivnosti se stalno prilagođavaju tako da budu produktivnije od prethodnih. Lean način razmišljanja podstiče zaposlene da predlažu i sprovode praktična, efikasna rješenja koja ne samo da doprinose većem profitu, već i stvaraju

dodatnu vrijednost za kupce i veće zadovoljstvo unutar kolektiva.

Nakon analize stvarnog stanja na liniji TL15, kao i uvođenja TPM karti i sprovedenih procesa poboljšanja, došlo se do zaključka da bi primjenom svih definisanih aktivnosti produktivnost linije mogla porasti za 5 do 10%. Ovo povećanje produktivnosti direktno utiče i na energetska efikasnost. Smanjenjem broja zastoja, optimizacijom radnog vremena i boljim tehničkim održavanjem opreme smanjuje se nepotrebna potrošnja energije. Na taj način, TPM i lean

pristup ne samo da poboljšavaju operativne performanse, već doprinose održivom i energetski efikasnom poslovanju.

LITERATURA

- [1] Z. Tanasić, G. Janjić, M. Soković: Napredni koncepti proizvodnje, Mašinski fakultet, Univerzitet u Banjoj Luci, Banja Luka, 2022.
- [2] O. Taiichi: Toyota Production System: Beyond Large – Scale Production. Productivity Inc., Portland, 1988.
- [3] S. Shigeo, A. Dillon: A study of the Toyota production system from an industrial engineering viewpoint, Productivity Press, Portland, 1989.
- [4] C. Marchwinski, J. Shook: Lean Lexicon: A Graphical Glossary for Lean Thinkers, Lean Enterprise Institute, 2004.
- [5] A. Chris: The 5S Playbook: A Step -by-Step Guideline for the Lean Practitioner, CRC Press Taylor & Francis Group, 2016.
- [6] D. McCarthy, N. Rich: Lean TPM – A Blueprint for Change, Elsevier Butterworth – Heinemann, Oxford, 2004.
- [7] S. Nakajima: Introduction to Total Productive Maintenance (TPM), Productivity Press, Cambridge, MA, 1988.
- [8] M. Ferazzi, S. Fercassetti, A. Bilancia, A. Portioli: Investigating the influence of lean manufacturing approach on environmental performance: A systematic literature review, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2025, DOI: 0.1007/s00170-024-13215-5
- [9] B. Ioshchikhes, M. Frank, M. Weigold: A systematic review of expert systems for improving energy efficiency in the manufacturing industry, Energies 17 (19) (2024) 4780. DOI: 10.3390/en17194780
- [10] Satta S, Caldarelli: Lean production as a tool for green production: the Green Foundry case study, Procedia Manufacturing 42:498–502, 2020. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.02.042

ABSTRACT

In modern industry, energy efficiency is becoming a key factor in achieving competitive advantage, reducing operational costs, and supporting sustainable business development. In the paper manufacturing industry, the optimization of production processes is essential to reduce energy consumption and improve overall efficiency. The implementation of lean methods, such as TPM (Total Productive Maintenance) and 5S, significantly contributes to lowering energy usage, improving machine maintenance, and reducing downtime, which directly impacts increased productivity and reduced operational costs. This paper focuses on analyzing the paper production process, with special emphasis on the application of lean methods in production optimization. By examining the factors that influence production line efficiency and applying strategies for downtime prevention, the study explores how improving maintenance and managing production resources can significantly enhance energy efficiency. The use of advanced systems for monitoring and data analysis enables better process control, identification of critical issues, and the introduction of corrective actions that lead to reduced energy consumption and optimized machine operation.

IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN PRODUCTION THROUGH THE APPLICATION OF LEAN METHODS

Maja Vuković, Nemanja Sremčev, Zorana Tanasić, Goran Janjić, Rade Repajić

Monitoring fotonaponskih elektrana kroz evaluaciju temperature modula i proizvedene snage

Nikolina Gajić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, Banja Luka, Republika Srpska
nikolina.gajic@student.etf.unibl.org

Sažetak — Fotonaponske elektrane igraju veoma važnu ulogu u tranziciji ka održivim izvorima energije, omogućavajući iskorišćenje nepresušne solarne energije za proizvodnju električne energije. Međutim, njihova efikasnost i pouzdanost zavise od različitih faktora, uključujući promjene u vremenskim uslovima, degradaciju modula i tehničke probleme u sistemu. U ovom radu predstavljen je integrisani pristup razvoju i evaluaciji naprednog sistema za nadzor fotonaponskih elektrana, pri čemu je implementacija temperaturnih i proizvodnih modula imala centralnu ulogu u unapređenju tačnosti i funkcionalnosti monitoringa. U okviru istraživanja analizirana su tri temperaturna modela Faiman, Sandia i NOCT modelu, u odnosu na realna mjerenja temperature modula sa fotonaponske elektrane „MSE EFT Stanari“. Pored toga, razmatran je i model za procjenu očekivane proizvedene snage sistema. Za potrebe testiranja i vizualizacije modela razvijena MATLAB GUI aplikacija koja omogućava učitavanje, obradu i vizualizaciju mjerenih i modeliranih podataka u realnom vremenu. Na osnovu poređenja teorijskih i eksperimentalnih podataka, ustanovljeno je da Sandia model i Faiman model nudi slične rezultate, dok NOCT model iako je jednostavniji, pokazuje veća odstupanja i ograničenu primjenljivost u dinamičkim uslovima. Pouzdana procjena temperatura modula je važan ulazni podatak za proračun očekivane proizvodnje električne energije. Kroz poređenje modeliranih i izmjerenih vrijednosti proizvedene snage, potvrđeno je da model vjerodostojno prati izmjerene vrijednosti sa elektrane. Kombinovana analiza temperaturnih i proizvodnih modela omogućava detaljniji nadzor performansi sistema, bržu identifikaciju odstupanja i pouzdaniju osnovu za tehničke i ekonomske analize rada fotonaponske elektrane. Prikazan u ovom radu predstavlja vrijednu osnovu za optimizaciju sistema nadzora i poboljšanja efikasnosti i pouzdanosti fotonaponskih postrojenja.

Ključne riječi — temperatura modula; fotonaponska elektrana; Faiman model; Sandia model; NOCT model, model proizvedene snage; MATLAB

I. UVOD

Fotonaponske elektrane omogućavaju direktnu konverziju sunčevog zračenja u električnu energiju na održiv i ekološki prihvatljiv način, ali njihov rad može biti narušen usljed uticaja spoljašnjih faktora kao što su vremenski uslovi, postepena degradacija i tehnički kvarovi unutar sistema koji mogu dovesti do potpunog gubitka očekivane proizvodnje električne energije. Da bi se minimizovali ovi rizici i obezbjedio optimalan rad sistema, neophodno je primijeniti adekvatne sisteme za monitoring i upravljanje. Sistemi za

monitoring fotonaponskih elektrana omogućavaju kontinuirano praćenje najvažnijih parametara, identifikaciju odstupanja od optimalnih vrijednosti i blagovremenu reakciju na moguće probleme. Njihova arhitektura, složenost i performanse zavise od veličine i značaja same elektrane. U manjim sistemima se najčešće prate osnovne električne veličine, poput napona, struje i snage, dok se kod većih i kompleksnijih sistema uvode napredne SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) platforme koje omogućavaju prikupljanje, memorisanje i analizu podataka u realnom vremenu. Pored električnih parametara, savremeni sistemi za monitoring uključuju i praćenje meteoroloških veličina, kao što su solarna iradijansa, temperatura i brzina vjetra, čime se omogućava preciznija analiza performansi elektrane. Na osnovu prikupljenih podataka, operatori mogu donositi odluku o optimizaciji rada sistema, otkrivanju potencijalnih kvarova i održavanju, što direktno doprinosi povećanju efikasnosti i smanjenju operativnih troškova, te produženju životnog vijeka. Digitalizacija i automatizacija procesa nadzora postaju neizostavni faktori u upravljanju velikim solarnim postrojenjima, omogućavajući preciznije prognoze proizvodnje, analizu performansi i povećanje pouzdanosti rada. U cilju proširenja funkcionalnosti sistema monitoringa, u ovom radu razvijen je softverski alat u MATLAB GUI okruženju koji omogućava učitavanje i obradu realnih podataka sa fotonaponske elektrane, primjenu temperaturnih i proizvodnih modela, kao i vizualizaciju dobijenih rezultata. Implementirani su modeli za snagu na osnovu parametara okoline i karakteristika modula. Time je omogućeno upoređivanje teorijskih rezultata sa stvarnim izmjerenim vrijednostima dobijenim sa senzora u sistemu. Pažnja je posvećena odstupanju između modeliranih i mjerenih vrijednosti, kako u pogledu temperature tako i proizvodnje, pri čemu su identifikovani uticaji faktora poput termalne inercije modula i promjenljive iradijanse. Ovaj pristup omogućava dublje razumijevanje ponašanja fotonaponskih modula, doprinosi boljoj validaciji matematičkih modela, te ostavlja prostor za optimizaciju nadzora i pouzdanosti sistema fotonaponskih sistema.

II. TEORIJSKI OSVRT NA SISTEM ZA MONITORING

Osnovna funkcija monitoring sistema je prikupljanje i obrada podataka u realnom vremenu, što uključuje dvije glavne grupe komponenti, a to su električni parametri (napon i struja fotonaponskih stringova ili pojedinačnih modula,

izlazna snaga invertora i energija) i meteorološki parametri (iradijansa u ravni modula, ambijentalna temperatura, temperatura modula, brzina i smjer vjetra). Električni parametri nam služe za procjenu trenutne efikasnosti pretvaranja solarne energije u električnu, kao i detekciju smanjenja performansi i kvarova, dok meteorološki parametri omogućavaju razumijevanje spoljnih faktora koji utiču na rad sistema, ali i računanje teorijske proizvodnje na osnovu modela. Arhitektura sistema za monitoring može značajno da varira u zavisnosti od veličine elektrane i zahtjeva korisnika. Tri najčešće konfiguracije su na nivou modula, na nivou stringa, te na nivou invertora. Zahvaljujući integraciji sa bazom podataka i sistemima za daljinski pristup, savremeni monitoring omogućava kako lokalni nadzor tako i centralizovano upravljanje više elektrana sa jednog mjesta. Uvođenje monitoringa fotonaponskih sistema naročito je značajno za srednje i velike elektrane, gdje čak i mala odstupanja mogu uzrokovati značajan finansijski gubitak na nivou godišnje proizvodnje. U okviru meteoroloških parametara temperatura fotonaponskog modula predstavlja jedan od značajnih parametara koji utiču direktno na njegovu efikasnost. Iako su nazivne vrijednosti snage definisane pri standardnim test uslovima (STC), realni uslovi na terenu odstupaju zbog varijabilnosti ambijentalne temperature, vjetra i intenziteta sunčevog zračenja. Povećanjem temperature modula iznad standardnih test uslova (STC: 25°C i 1000W/m²) dovodi do smanjenja napona ćelije, a time i ukupne proizvedene snage sistema. Iz tog razloga, precizno modeliranje temperature modula je od velikog značaja u analizama performansi, pouzdanoj procjeni fotonaponske snage i implementaciji strategija za detekciju kvarova. Na temperaturu modula prije svega utiče sunčevo zračenje na ravni modula, temperatura okoline i brzina vjetra [1]. Uz uslove okoline, važnu ulogu igra i sama montaža. Kaplan i Kaplan detaljno su proučili uticaj nagiba modula i ugla upada vjetra na temperaturu modula koristeći teorijske izraze za koeficijent prinudne toplotne konvekcije, kao i eksperimentalna mjerenja. Više temperaturnih modela razvijeno je u cilju estimacije stvarne temperature modula na osnovu mjerenih parametara okoline. Izbor modela može da zavisi od ciljeva istraživanja ili korišćenih softverskih alata. Modeli stacionarnog stanja koriste vremenske serije sunčevog zračenja, temperature okoline i brzine vjetra, koji se često daju kao prosjeci pri niskoj vremenskoj rezoluciji. Stoga, korišćenje ovih modela za takve ulazne podatke može biti razumno rješenje, dok s druge strane, ako se izlaz fotonaponskog sistema modelira za ulazne podatke visoke rezolucije, dinamički modeli su poželjniji [2]. U ovom radu analizirana su sva tri modela, Faiman model, Sandia model i NOCT model, te model proizvodnje, pri čemu su svi modeli testirani u realnim uslovima i međusobno upoređeni u pogledu tačnosti.

A. Temperaturni modeli

Faiman model je empirijski model gubitka toplote koji je usvojen u IEC standarde. Definiše temperaturu modula kao funkciju ambijentalne temperature, vrijednosti iradijance u ravni modula i brzine vjetra:

$$T_m = T_a + \frac{E_{POA}}{U_0 + U_1 \times WS}, \quad (1)$$

gdje su T_m vrijednost temperature modula, T_a vrijednost temperature ambijenta, E_{POA} vrijednost iradijance na ravni modula, U_0 vrijednost konstante prenosa toplote, U_1 konvektivna vrijednost prenosa toplote i WS je vrijednost brzine vjetra. [3]

Sandia model je eksponencijalni model koji bolje opisuje ne-linearnu zavisnost temperature modula od brzine vjetra:

$$T_m = T_a + E_{POA} \times e^{(a+b \times WS)}, \quad (2)$$

gdje su a i b parametri koji zavise od konstrukcije i materijala modula, kao i od konfiguracije montaže modula [4].

Prednosti Sandia modela ogleda se u njegovoj sposobnosti da preciznije modelira hlađenje modula pri različitim brzinama vjetra, što ga čini pogodnim za primjenu u analizama performansi u realnim meteorološkim uslovima.

NOCT model se bazira na konceptu *Nominal Operating Cell Temperature* i koristi se u tehničkim listovima proizvođača:

$$T_m = T_a + E_{POA} \frac{(T_{NOCT} - 20)}{800}, \quad (3)$$

gdje je T_{NOCT} vrijednost nominalne radne temperature ćelije pod standardnim uslovima [5].

Model se prvenstveno koristi u prelimenarnim analizama i nije toliko precizan kao prethodna dva, ali je od koristi zbog jednostavne upotrebe kada nisu dostupni detaljni meteorološki podaci [1].

B. Metrika evaluacije modela

Za procjenu preciznosti matematičkih temperaturnih modela primjenjene su tri standardne metrike, srednja apsolutna greška, korjen srednje kvadratke greške i koeficijent determinacije, koje omogućavaju kvantitativno poređenje između modeliranih i eksperimentalnih podataka.

Srednja apsolutna greška – *MAE (Mean Absolute Error)* daje prosječnu apsolutnu grešku između predviđene i stvarne vrijednosti,

$$MAE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]}, \quad (4)$$

gdje je, y_i izmjerene vrijednost temperature, a $\hat{y}_i$ modelirana vrijednost [7].

Korjen kvadratne greške *RMSE (Root Square Error)* posebno naglašava veće greške [7],

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}, \quad (5)$$

Koeficijent determinacije (R^2) izražava koliko dobro model objašnjava varijabilnost mjerenih podataka. R^2 bliži jedinici

označava bolje slaganje modela sa eksperimentalnim podacima.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (6)$$

gdje je $\bar{y}$ srednja vrijednost mjerenih podataka [7].

Metrike omogućavaju sveobuhvatnu evaluaciju svakog temperaturnog modela i dodatno doprinose objektivnosti zaključaka o njihovoj tačnosti i pouzdanosti u realnim uslovima rada.

C. Model proizvodnje

U kontekstu analize performansi fotonaponskih sistema, pored temperature modula, podjednako važnu ulogu ima i precizna procjena proizvodnje električne energije. Tačnost ovog modela je veoma važna u analizi fotonaponskih sistema, jer direktno određuje količinu očekivane električne energije i time ima presudan uticaj na procjenu proхода, ekonomsku isplativost i ukupnu efikasnost sistema. Na osnovu te procjene izrađuje se finansijska analiza, kalkuliše period povrata, te donosi investicione odluke. Procjenu očekivane proizvedene snage sistema moguće je realizovati pomoću pojednostavljene linearne formule:

$$(1) \quad \dots \quad (7)$$

gdje je N ukupan broj modula, P_{STS} nazivna snaga modula pri STS uslovima [W], γ temperaturni koeficijent snage [%/K].

Kroz integrisanu analizu koja uključuje temperature i proizvodne metode, u ovom radu se vrši njihova implementacija i evaluacija na realnim podacima iz postojeće fotonaponske elektrane. Rezultati modela su upoređeni sa izmjerenim vrijednostima sa senzora, čime se provjerava njihova vjerodostojnost i korisnost za operativni monitoring i optimizaciju performansi sistema.

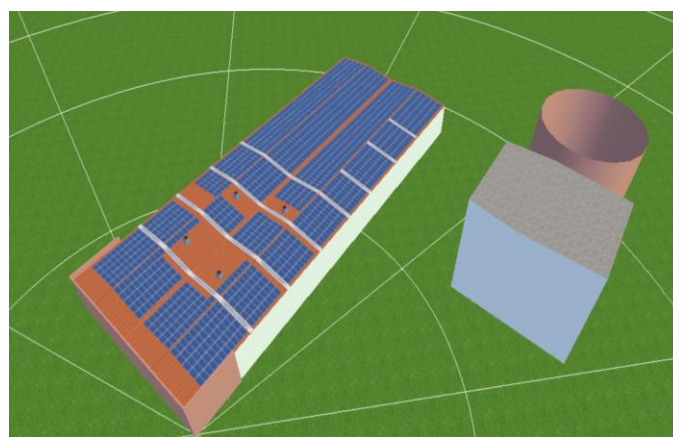
III. OPIS OGLEDNOG SISTEMA ZA MONITORING

Fotonaponska elektrana „MSE EFT Stanari“ čiji podaci se koriste u ovom radu se nalazi u Stanarima sa ukupnom nazivnom snagom od 405,44kWp izgrađene 2019. godine na krovnoj konstrukciji u kompleksu ETF – Rudnik i termoelektrana Stanari. Krov objekta je izveden tako da ima dva dvovodna krova od kojih su dvije ravni orijentisane ka jugoistočnoj strani, a dvije ka sjeverozapadnoj strani, oslonjenja na betonsku konstrukciju pod uglom od 6 stepeni. Elektrana je izgrađena korišćenjem polikristalnih fotonaponskih modula Q CELLS tipa Q POWER-G5 280. Na elektrani ima ukupno 1447 postavljenih fotonaponskih modula koji su povezani na 19 invertora proizvođača Fronius. Na Sl. 1 je prikazan ilustrirani prikaz elektrane pripremljen u PV*SOL-u [6].

Fotonaponska elektrana, čiji se monitoring sistem koristi kao osnov ovog rada, predstavlja objekat sa instaliranim senzorima za mjerenje iradijance, temperature, brzine vjetra, napona i struje. Elektrana radi već 5 godina, što omogućava analizu dugoročnih performansi i uticaja spoljnih faktora na njen rad.

Analiza je sprovedena na osnovu višednevnog skupa podataka koji obuhvata četiri karakteristična dana iz različitih godišnjih doba, 07. februara, 22. mart, 23. jun, 22. oktobar. Ovim pristupom omogućeno je obuhvatanje meteoroloških uslova, uključujući sezonske oscilacije u intenzitetu sunčevog zračenja, temperaturnim uslovima i brzini vjetra, što utiče na pouzdanu procjenu temperaturnih modela u realnim operativnim okolnostima. Za svaki od navedenih dana, modelirane vrijednosti temperature modula dobijene su na osnovu ulaznih meteoroloških parametara, a zatim su poređene sa eksperimentalnim mjerenjima prikupljenim sa senzora na fotonaponskoj elektrani. U cilju kvantitativne evaluacije preciznosti svakog modela, korišćene su tri standardne metrike, srednja apsolutna greška, korjen srednje kvadratne greške i koeficijent determinacije.

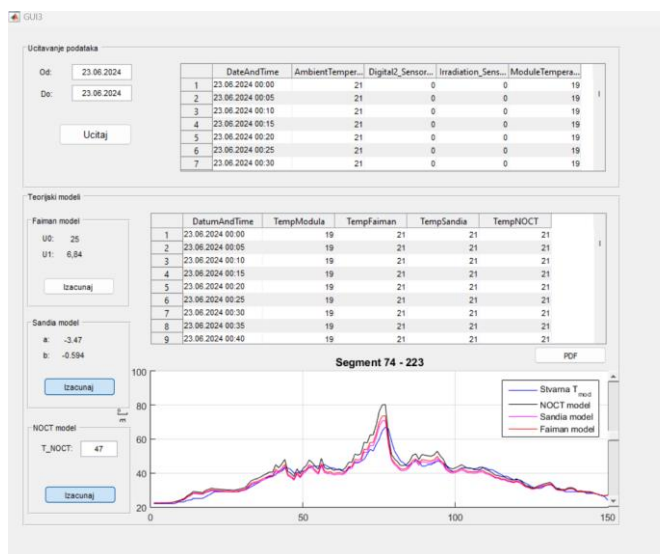
Za radi olakšavanja analize temperaturnih modela i procjene proizvodnje, razvijen je interaktivni sistem koja se sastoji od tri povezane MATLAB GUI aplikacije. Glavni prozor omogućava izbor između dvije funkcionalne cjeline, analize podataka temperature i analize podataka proizvodnje. U okviru GUI3 aplikacije implementirana je mogućnost za učitavanje podataka iz unaprijed definisane Excel tabele, filtriranje podataka po vremenskom intervalu, automatsku konverziju i validaciju meteoroloških parametara, te proračun temperature modula korišćenjem tri modela, Faiman, Sandia i NOCT. Pored toga, aplikacija omogućava grafički prikaz izmjerenih i modeliranih vrijednosti temperature, kao i vizualizaciju trendova i odstupanje kroz interaktivne grafikone. S druge strane, GUI4 se bavi procjenom proizvodnje fotonaponskog sistema. Na osnovu ulaznih parametara kao što su iradijansa i



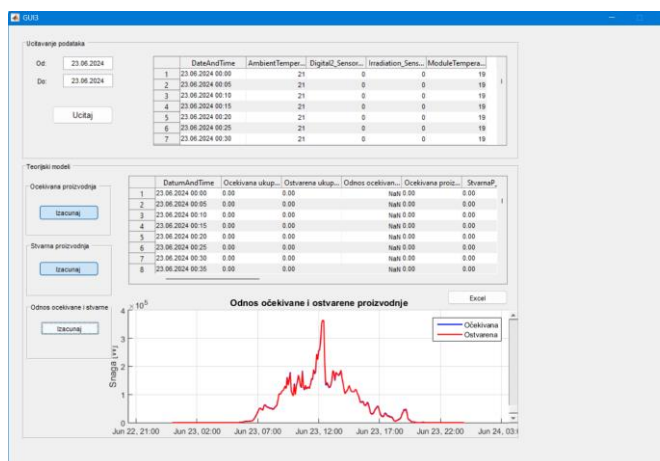
Sl. 1 – Ilustrovani prikaz elektrane pripremljen u PV*SOL

temperatura modula, izračunava se očekivana snaga, a zatim se ona poredi sa stvarnim podacima prikupljenim sa invertora. Aplikacija omogućava korisniku da analizira iskorišćenost sistema, sagleda performanse svakog pojedinačnog invertora, te vizuelno uporedi očekivane i ostvarene rezultate na vremenskoj skali. Obe aplikacije nude intuitivne kontrole za unos i upravljanje parametrima, pregledne tabele i grafičke prikaze rezultata, kao i mogućnost izvoza podataka za dalju analizu. Na taj način, sistem pruža

sveobuhvatan alat za validaciju modela, detekciju odstupanja i podršku u donošenju odluke vezano za održavanje i optimizaciju rada fotonaponske elektrane. Izgled GUI3 interfejsa na „Sl. 2“ i GUI4 interfejsa na „Sl. 3.“



Sl. 2 – Izgled GU3 interfejsa



Sl. 3 – Izgled GUI4 interfejsa

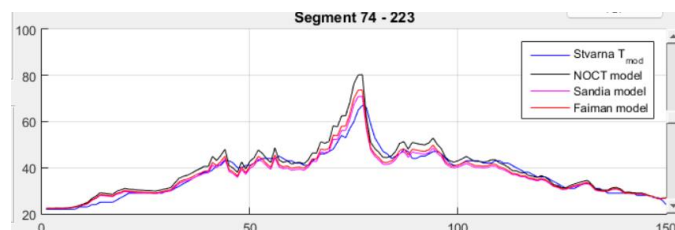
IV. PRIMJENA OGLEDNOG SISTEMA ZA MONITORING

A. Estimacija temperature modula i poređenje sa mjerenjem

Na osnovu izmjerenih vrijednosti iradijanse, temperature, ambijenta i brzine vjetrova, implementirana je procjena fotonaponskih modula pomoću Faiman modela, Sandia modela i NOCT modela. Na „Sl. 4“ je prikazan grafik sa sva tri teorijska modela na dan 23.06.2024. godine, kao i sa stvarnom vrijednosti temperature sa senzora. Plava linija predstavlja izmjerene vrijednosti temperature sa senzora, dok su ostale linije rezultat simulacije tri modela.

U cilju validacije i kvantitativnog ocjenjivanja preciznosti modela, primjenjene su tri standarde metrike za dane 07.

februar, 22. mart, 23. jun, 22. oktobar, te za analizirane dane su dobijene vrijednosti prikazane u Tabeli I.



Sl. 4 – Grafički prikaz sva tri teorijska modela

TABELA I. PRIKAZ PRECIZNOSTI MODELA

Datum	Modeli	MAE	RMS E	R2
07.02.2024.	Faiman	2,0742	2,9327	0,91677
	Sandia	2,5056	3,2430	0,89823
	NOCT	2,8767	3,8928	0,85335
22.03.2024.	Faiman	2,3607	2,8222	0,95334
	Sandia	3,0127	3,6467	0,92210
	NOCT	4,3691	5,7644	0,80535
23.06.2024.	Faiman	1,2827	2,0213	0,96312
	Sandia	1,2837	2,0241	0,96301
	NOCT	1,6530	2,7941	0,92952
22.10.2024.	Faiman	2,1613	2,9930	0,95763
	Sandia	2,1515	2,9776	0,95806
	NOCT	2,8895	4,3010	0,91250

Na osnovu metrike potvrđujemo da su Sandia i Faiman modeli znatno pouzdaniji u procjeni temperature modula, dok NOCT model, iako je jednostavniji, pokazuje veće odstupanje i nižu korelaciju sa stvarnim mjerenjima.

Faiman model – Faiman model pruža uravnoteženu procjenu temperature modula u periodu stabilne iradijanse i umjerene brzine vjetrova. Međutim, tokom naglih promjena iradijanse model često predviđa brže povećanje temperature nego što se to stvarno mjerenjem pokazalo. Ovo se može pripisati zanemarivanju termalne inercije modula, odnosno modulima je potrebno vrijeme da se zaista zagriju ili ohlade, što Faiman model ne uzima u obzir.

Sandia model – Sandia model bolji reprezentuje efekat brzine vjetrova na hlađenje modula od Faiman modela, jer koristi eksponencijalnu zavisnost. Model se pokazao kao najprecizniji

u periodima visoke iradijance, što potvrđuje njegovu efikasnost u punim sunčanim uslovima. Međutim, parametri modela nisu univerzalni, već zavise od tipa modela i uslova instalacije, što može umanjiti tačnost ako se model prethodno ne prilagodi lokalnim uslovima.

NOCT model – NOCT model je najjednostavniji, jer ne uključuje uticaj vjetra niti realne karakteristike fotonaponskih modula. Međutim, pokazuje najveća odstupanja u uslovima promjenljive iradijance i brzine vjetra. Precjenjuje temperaturu u hladnijim i vjetrovitijim uslovima, dok potcjenjuje u vrlo toplim uslovima bez vjetra. Koristan je za početne projektne proračune, ali nije pogodan za precizni operativni monitoring.

U periodu naglog porasta iradijance, svi modeli predviđaju temperaturu veću od stvarne, jer senzor modula reaguje sa kašnjenjem zbog termalne inercije materijala. Sva tri modela prate sličan trend porasta i opadanja temperature modula u jutarnjim i večernjim satima, kada je temperatura ispod 30°C, razlike između modela su gotovo zanemarljive, međutim u toku maksimalnog solarnog zračenja, u sredini dana, razlika postaje izraženija. Najveća razlika između modela uočena je kada je temperatura modula iznad 50°C. U nekoliko trenutaka, razlika između NOCT, Faiman i Sandia modela prelazi 5°C, što može značajno uticati na fotonaponske performanse.

Faiman model pokazuje veću osjetljivost na promjene vjetra (kroz U_1), što se ogleda u nešto nižim temperaturama kada je brzina vjetra veća. Sandia model koristi eksponencijalni izraz i daje konzervativnije vrijednosti u ekstremnim uslovima, dok NOCT model je jednostavan i najčešće pokazuje najvišu temperaturu, jer ne uključuje vjetar direktno.

B. Estimacija proizvodnje i poređenje sa mjerenjima

U ovoj analizi, korišćeni su realni podaci sa fotonaponske elektrane, uključujući izmjerenu iradijansu E_{POA} , procijenjenu temperaturu modula T_{mod} , poznatu nazivnu snagu panela 280W, proizvođački temperaturni koeficijent modula -0,40 [%/K]. Korišćen je isti skup podataka koji je primijenjen i u estimaciji temperature modula. Za svaki trenutak izračunata je očekivana vrijednost proizvedene snage invertora i poređena je sa stvarnim vrijednostima. Ukupna snaga stvarne vrijednosti na invertorima je dobijena tako što su učitane struje i naponi na pojedinačim MPPT-ovima te sumiran njihov proizvod. Na osnovu raspoloživih podataka izračunat je i procenat iskorišćenosti sistema u odnosu na očekivanu vrijednost. Rezultat poređenja pokazuje vrlo jasno uvid u stepen saglasnosti između modeliranih i izmjerenih vrijednosti. Za svaki vremenski trenutak izračunata je apsolutna razlika između stvarne izlazne snage i modelovane snage, koja je zatim izražena u odnosu na modelovanu vrijednost kao relativno odstupanje. Srednja vrijednost relativnog poklapanja za cijeli dan dobijena je tako što su odstupanja izračunata za sve vremenske korake i potom iskorištena za određivanje prosječnog stepena saglasnosti. Na osnovu navedenog računa dobijeno je da je srednje poklapanje između stvarne i modelovane izlazne snage 99,38%, što ukazuje na visoku tačnost modela za konkretne uslove mjerenja. Vizuelna potvrda

ovakvog rezultata vidi se na “Sl. 5”, gdje kriva izmjerene snage u velikoj mjeri prati krivu očekivanih, odnosno modelovanih vrijednosti.

Ovaj primjer jasno ilustruje kako sistem za monitoring omogućava da se na osnovu stvarnih podataka napravi predikcija očekivanih performansi i otkrije ekvivalentna odstupanja u radu elektrane. Takođe demonstrira značaj prethodne tačke estimacije temperature modula kao ulaznog parametra za tačnu procjenu snage, kao i ekstimaciju proizvodnje koja je značajna za prije svega za finansijsku analizu.



Sl. 5 – Prikaz stvarne i očekivane vrijednosti proizvedene snage

V. ZAKLJUČAK

Savremeni sistemi za monitoring fotonaponskih elektrana predstavljaju neizostavan alat u postizanju visoke efikasnosti, pouzdanosti i dugovječnog održavanja proizvodnih performansi solarnih postrojenja. Njihova primjena omogućava kontinuirano praćenje važnih parametara, pravovremeno otkrivanje odstupanja, te unapređenje procesa donošenjem odluka kroz analitičku obradu i vizualizaciju podataka. U ovom radu prikazan je primjer implementacije integrisanog sistema za monitoring, koji kroz tri segmenta MATLAB GUI aplikacije omogućava dvosmjernu analizu, evaluaciju temperaturnih modula i estimaciju očekivane proizvodnje. U okviru analize temperature modula upoređeni su modeli Faiman, Santia i NOCT sa izmjerenim vrijednostima u realnim uslovima rada, pri čemu je Sandia model i Faiman model pokazali približno slične rezultate, a NOCT model odstupa. U drugom dijelu, korištenjem istih meteoroloških podataka, izvedena je procjena očekivane proizvodnje i njeno poređenje sa ostvarenom proizvodnjom, čime je demonstrirana uloga monitoring sistema u verifikaciji performansi i detekciji mogućih odstupanja. Kombinovanjem teorijskih modela, stvarnih mjerenja i napredne softverske podrške, sistem za monitoring se potvrđuje kao značajna komponenta u efikasnom upravljanju i optimizaciji rada fotonaponskih elektrana. Prikazani primjeri jasno ilustruju njegovu ulogu ne samo u nadzoru, već i u validaciji modela, predikciji ponašanja sistema i unapređenju ukupne strategije održavanja i planiranja proizvodnje.

ZAHVALNICA

Zahvaljujem se profesoru dr Čedomiru Zeljkoviću na nesebičnom angažmanu, stručnim savjetima i sugestijama, kao i na kontinuiranoj podršci tokom izrade ovog rada. Takođe, izražavam zahvalnost tehničkom osoblju elektrane „MSE EFT

Stanari“ na dostavljenim podacima i podršci tokom realizacije istraživanja.

LITERATURA

- [1] Akhsassi, M., El Fathi, A., Erraissi, N., Aarich, N., Bennouna, A., Raoufi, M., & Outzourhit, A. (2018). Experimental investigation and modeling of the thermal behavior of a solar PV module. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 180, 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2017.06.052>
- [2] Anderson, K., Kemnitz, J., & Boyd, M. (2021). *Evaluating cell temperature models and the effect of wind speed in PV system capacity testing* Preprint. Paper presented at 48th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC 48). <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.130M>.
- [3] Sandia National Laboratories. (n.d.). *Faiman module temperature model*. PV Performance Modeling Collaborative. Pristupljeno 25.03.2025. godine. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/module-temperature/faiman-module-temperature-model/>
- [4] Sandia National Laboratories. (n.d.). *Sandia module temperature model*. PV Performance Modeling Collaborative. Pristupljeno 25.03.2025. godine <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/module-temperature/sandia-module-temperature-model/>
- [5] Zeljković, Č. (2018). *Obnovljivi izvori energije: Solarna energetika*. Univerzitet u Banjoj Luci / Elektrotehnički fakultet; Akademska misao
- [6] EFT – Rudnik i termoelektrana Stanari (2018). *Glavni projekat fotonaponske elektrane "EFT SOLAR" (405.44 kW)*. EFT – Rudnik i Termoelektrana Stanari, Banja Luka (*Interna dokumentacija*).
- [7] Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247–1250. <https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014>

ABSTRACT

Photovoltaic power plants play a crucial role in the transition towards sustainable energy sources, enabling the utilization of inexhaustible solar energy for electricity generation. However, their efficiency and reliability depend on various factors, including changes in weather conditions, module degradation, and technical issues within the system. This paper presents an integrated approach to the development and evaluation of an advanced monitoring system for photovoltaic plants, in which the implementation of temperature and power output models plays a central role in improving the accuracy and functionality of the monitoring process. As part of the study, three temperature models — Faiman, Sandia, and NOCT — were analyzed in relation to real temperature measurements from the photovoltaic power plant “MSE EFT Stanari.” Additionally, a model for estimating the expected power output of the system was considered. For the purpose of testing and visualization, a MATLAB GUI application was developed, enabling the loading, processing, and real-time visualization of measured and simulated data. Based on the comparison between theoretical and experimental data, it was established that the Sandia and Faiman models offer similar results, while the NOCT model, despite its simplicity, shows greater deviations and limited applicability under dynamic conditions. Accurate

estimation of module temperature is a critical input for calculating the expected energy production. Through comparison of modeled and measured power output values, it was confirmed that the production model reliably tracks the real data recorded at the plant. The combined analysis of temperature and power models allows for more detailed performance monitoring, faster identification of deviations, and a more reliable basis for technical and economic evaluation of photovoltaic systems. The approach presented in this study provides a valuable foundation for optimizing monitoring systems and improving the overall efficiency and reliability of photovoltaic installations.

EVALUATION OF PHOTOVOLTAIC MODULE TEMPERATURE MODEL ACCURACY USING A MATLAB GUI TOOL AND DATA FROM AN OPERATIONAL POWER PLANT

Nikolina Gajić

Uticaj ugradbene pozicije polivinilhloridskih prozorskih elemenata fasadnog omotača stambenih zgrada na temperaturu unutrašnje površine zida

Stefan Petrović¹, Biljana Antunović², Darija Gajić²

¹Gebrüder Schneider Fensterfabrik GmbH & Co. KG, Štimpfah, SR Njemačka, ²Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

stefan.mitrov@protonmail.com, biljana.antunovic@aggf.unibl.org, darija.gajic@aggf.unibl.org

Sažetak—Predmet ovog istraživanja je uticaj ugradbene pozicije polivinilhloridskih prozorskih elemenata fasadnog omotača stambenih objekata, na prosječnu i minimalnu temperaturu unutrašnje površine zida, kao i posljedično, mogućnost stvaranja površinske kondenzacije i buđi. Analiza je urađena pomoću softvera Flixo 8.2.1180.1 sa aspekta promjene rasporeda temperatura kroz konstrukciju zida, zasićenja vazduha vodenom parom i temperaturni faktor u uslovima sjeverne i južne klimatske oblasti, definisanim u skladu sa pravilnicima koji regulišu energetska efikasnost zgrada u Republici Srpskoj. Razmatrani su polivinilhloridski okviri prozora sa ugradnjom na tri pozicije fasadnog zida, koja je preuzeta iz Tipologije stambenih zgrada Bosne i Hercegovine, a projektovani u skladu sa katalogom dobro riješenih toplotnih mostova bosansko-hercegovačkog standarda. Rezultati analize ukazuju na to da, u testnim uslovima, ugradbena pozicija prozora može uticati na prosječnu temperaturu unutrašnje strane zida, te na mogućnost formiranja površinske kondenzacije i buđi.

Ključne riječi: ugradbena pozicija; površinska kondenzacija; buđ; temperatura unutrašnje površine zida; simulacija

I. UVOD

Na objektima porodičnog stanovanja, u zavisnosti od arhitektonske prakse i klimatske zone, površine prozora na fasadnom zidu predstavljaju značajnu površinu. Stoga za zadržavanje pozitivnih energetskih karakteristika, trajnosti i funkcionalnosti zgrade potrebno je da se za svaki ugrađeni prozor obezbijedi tehnički prikladna instalacija i integracija u fasadni omotač [1]. Imajući u vidu klimatske promjene i rastuće cijene energenata na globalnom nivou, države su propisale pravilnike koji definišu zahtjeve kako bi se unaprijedila energetska efikasnost zgrada [2]. Tako su tehničkim zahtjevima za racionalnu upotrebu energije i toplotnu zaštitu u zgradama propisani, između ostalih, i najveći dopušteni koeficijent prolaza toplote pojedinih građevinskih dijelova omotača (U-koeficijenti), smanjenje uticaja toplotnih mostova na omotaču, te sprječavanje površinske kondenzacije vodene pare [3]. Fokusirajući se na prethodne tehničke zahtjeve, koji se neposredno odnose i na prozorske elemente, u ovom radu su prikazani uticaji ugradbene pozicije prozora na temperaturu unutrašnje strane zida, a samim tim i na energetske karakteristike zgrade. U skladu sa pomenutim zahtjevima, za klimatske oblasti sjever i

jug, uz pomoć softvera Flixo 8.2.1180.1. [4], simulirane su tri ugradbene pozicije. Kako bi simulacije odgovarale stvarnim uslovima upotrebe zgrade i kako bi iste imale praktičnu primjenu prilikom sprječavanja mogućih negativnih pojava, prozori su projektovani sa ugradnjom na tri pozicije fasadnog zidnog omotača. Ovaj tip omotača je karakterističan za arhitekturu porodičnog stanovanja u urbanim i ruralnim regionima u Bosni i Hercegovini, građenim u od 2014. godine [5].

Analiza dobijenih simuliranih podataka data je u vidu tabelarnog prikaza, uticaja ugradbene pozicije na prosječnu temperaturu unutrašnje strane zida neposredno pored prozora, kao i na mogućnost stvaranja buđi na osnovu dobijene vrijednosti temperaturnog faktora.

II. METODOLOGIJA

A. Određivanje energetskih karakteristika prozora

Za simuliranje uticaja ugradbene pozicije na temperaturu unutrašnje površine zida odabrani su polivinilhloridni (u daljem tekstu PVC) prozori, kao jedni od najčešće ugrađivanih i prisutnih na prostoru Bosne i Hercegovine [5]. Pri tome, ovaj tip prozora je konstruisan tako da ispunjava uslove propisane u skladu sa Pravilnikom o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada Republike Srpske [3]. Ukupan koeficijent prolaza toplote prozora U_w , izračunat je u skladu sa standardom BAS EN ISO 10077-1 [6] :

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \Psi}{A_g + A_f} \quad (1)$$

gdje je U_w (W/(m²K)) ukupan koeficijent prolaza toplote prozora, A_g (m²) površina stakla, U_g (W/(m²K)) koeficijent prolaza toplote stakla, A_f (m²) površina rama, U_f (W/(m²K)) koeficijent prolaza toplote rama, l_g (m) dužina spoja između stakla i rama i Ψ (W/mK) linearni koeficijent toplotnih mostova na spoju stakla i rama.

Koeficijent prolaza toplote je izračunat za referentne dimenzije jednokrlnog prozora širine 1230 mm i visine 1480 mm [7]. Uzeta je vrijednost koeficijenta prolaza toplote stakla $U_g = 1,10$ W/(m²K) koje je dvostruko vakumirano, punjeno inertnim gasom, konstruisano u konfiguraciji 4 Flot + 16 + 4 Flot, ukupne dimenzije paketa 24 mm, sa termički poboljšanim distancerom koeficijenta linijskih toplotnih

gubitaka od $\psi = 0,06 \text{ W/(mK)}$ [3]. Kako bi se dobile ukupne vrijednosti koeficijenta prolaza toplote prozora U_w , dovoljne da ispunjavaju minimalne zahtjeve $U_w = 1,6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ za oblast sjever, korišteni su profili rama i krila prozora konstruisani od strane autora, a ne profili koji su komercijalno dostupni. Koeficijenti prolaza toplote kroz profile rama i krila U_f , prikazani na slici 1, računati su koristeći metodologiju definisanu u standardu ISO 10077-2 [8].

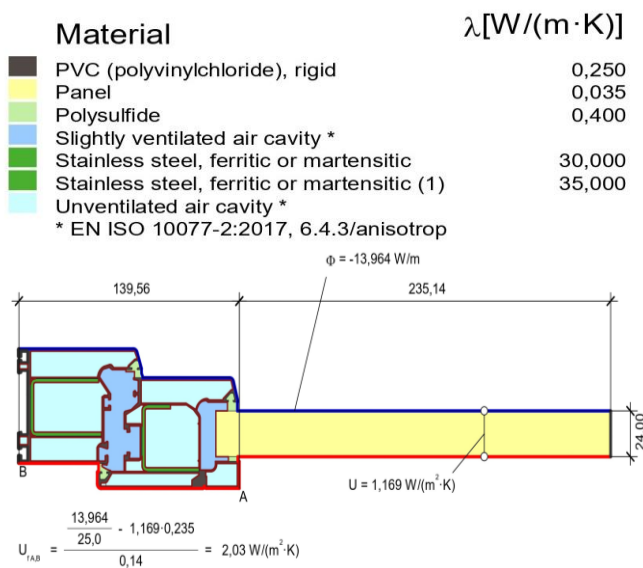
$$U_f = \frac{\frac{\Phi}{\Delta\theta} - U_p \cdot b_p}{b_f} \quad (2)$$

gdje je $U_f \text{ (W/(m}^2\text{K))}$ koeficijent prolaza toplote kroz ram, $\Phi \text{ (W)}$ ukupan toplotni tok kroz ispitivani uzorak, $\Delta\theta \text{ (K)}$ temperaturna razlika između unutrašnje i spoljašnje strane rama, U_p vrijednost ispitne ploče ("Panel"), $b_p \text{ (m)}$ širina ispitne ploče, $b_f \text{ (m)}$ širina dijela rama koji se ispituje.

U ovom proračunu, umjesto prethodno definisanog stakla, koristi se panel sa visoko-izolacionim toplotnim svojstvima $\lambda = 0,035 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, kako bi se eliminisali uticaji linearnih toplotnih gubitaka distancera. Proračunom odabranog PVC prozora dobijeno je da je $U_w = 1,59 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Temperaturni uslovi za oblast jug su $\theta_e = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ i za oblast sjever $\theta_e = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ za spoljašnji i $\theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, za unutrašnji vazduh, redom, sa otporom prelazu toplote definisanim za neventilisani zid koji se graniči sa spoljašnjim vazduhom, $R_{si} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ za unutrašnji i $R_{se} = 0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$ za spoljašnji vazduh [3].

Na slici 1. prikazan je PVC okvir prozora, prema simuliranim uslovima koristeći softver Flixo 8.2.1180.1. [4] koji sa koeficijentima toplotne provodljivosti prikazanim na slici 1, ima vrijednost koeficijenta prolaza toplote $U_f = 2,03 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.



Sl. 1. PVC profil sa koeficijentima toplotne provodljivosti elemenata

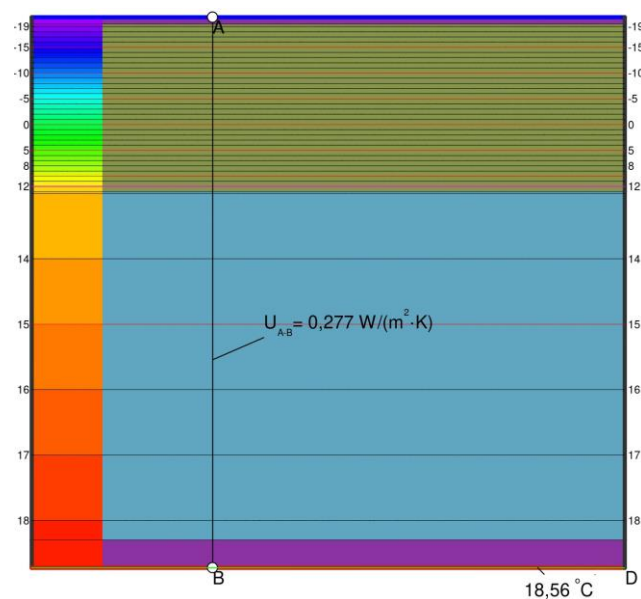
B. Određivanje energetske karakteristika fasadnog zida

Za analizu uticaja ugradbene pozicije prozorskih elemenata fasadnog omotača stambenih objekata, na prosječnu i minimalnu temperaturu unutrašnje površine zida, je odabran konstruktivni sklop fasadnog zida, karakterističan za slobodnostojeće jednoporodične kuće u ruralnom području i višeporodične urbane zgrade, građene od 2014. godine [5]. Konstrukciju spoljašnjeg fasadnog zida ovih građevina karakteriše višeslojna neventilisana konstrukcija, izračunatog U-koeficijenta, prema BAS ISO 6946 [3]-[8]. Koeficijenti toplotne provodljivosti slojeva su definisani prema Pravilniku o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrada RS [6]. Primjenom softvera Flixo 8.2.1180.1, prema EN ISO 13788:2005 [9], za uslove klimatskih oblasti sjever i jug, prema parametrima definisanim gore navedenim pravilnikom izračunata je unutrašnja temperatura zida [3].

Analizirani konstruktivni sklop fasadnog zida, na slici 2 karakterističan je za postojeće stanje slobodnostojeće jednoporodične kuće u ruralnom području i višeporodične stambene zgrade građene u urbanim sredinama u periodu od 2014. godine [5]. Karakteristični neventilisani fasadni zid je konstruisan od slojeva prikazanih u Tabeli 1.

TABELA I. SLOJEVI KARAKTERISTIČNOG ZIDA TIP 1

Materijal	Gustina (kg/m ³)	Toplotna provodljivost $\lambda \text{ (W/(m} \cdot \text{K))}$	Debljina d (m)
podužni krečni malter	1700	0,85	0,02
šuplji opekarski blok	1200	0,52	0,25
termoizolacija	20	0,041	0,12
pigmentisani fasadni malter	1850	0,70	0,01

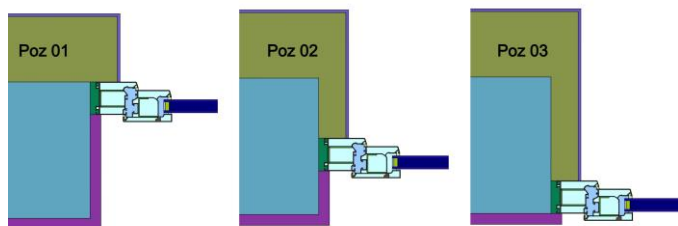


Sl. 2. Zid tip 01- slojevi zida i raspored temperatura za klimatsku oblast sjever

Konstrukciju spoljašnjeg karakterističnog fasadnog zida predmetnih zgrada karakteriše zid koji ispunjava minimalne zahtjeve propisane pravilnikom. [3]-[5] Dobijena je vrijednost koeficijenta prolaza toplote $U = 0,277 \text{ W/m}^2\text{K}$, dok su propisane vrijednosti $U = 0,300 \text{ W/m}^2\text{K}$ za oblast sjever i $U = 0,450 \text{ W/m}^2\text{K}$ za oblast jug. Temperatura unutrašnje strane zida za oblast sjever je $\Theta_{sjever} = 18,56 \text{ }^\circ\text{C}$, a temperatura unutrašnje strane zida za oblast jug iznosi $\Theta_{jug} = 19,10 \text{ }^\circ\text{C}$.

C. Definisanje ugradbene pozicije prozora

Simulacijom je obuhvaćeno testiranje PVC okvira za prozore za definisanu konstrukciju, u tri najčešće ugradbene pozicije prikazane na slici 3 [2]. Prva ugradbena pozicija (Poz 01) je definisana spoljašnjom ravni šupljeg opekarskog bloka, druga pozicija (Poz 02) je uvučena 0,10 m od unutrašnje ravni šupljeg opekarskog bloka i treća pozicija (Poz 03) je u ravni sa unutrašnjom ivicom šupljeg opekarskog bloka. Prilikom projektovanja svake od navedenih pozicija spoja, vođeno je računa da spoj bude isprojektovan u skladu sa bosansko-hercegovačkim katalogom dobrih rješenja toplotnih mostova na stambenim objektima. Na svakoj od pozicija termoizolacija je prepuštena 5 cm preko okvira prozora [3].



Sl. 3. Prikaz pozicije prozora u odnosu na zid

D. Pojava kondenzacije i stvaranje buđi

Prema uslovima iz pravilnika za stambene zgrade, propisana je projektna temperatura unutrašnjeg vazduha, $\Theta_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, i relativna vlažnost vazduha $\phi = 60\%$. U ovim uslovima prema navedenom Pravilniku, granična vrijednost temperature površine na kojoj dolazi do kondenzacije je $\Theta_k = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno ukoliko je uslov $\Theta_k \leq \Theta_{si \min}$ ispunjen, konstrukcija ispunjava minimalne uslove i neće doći do stvaranja površinske vlage usljed kondenzacije [6].

Međutim, ovim uslovom se kontroliše mogućnost stvaranja kondenza na površini zida, ali ne i mogućnosti za stvaranje buđi. Za ispitivanje konstrukcije na spoju zida i prozora se koristi temperaturni faktor unutrašnjeg površinskog otpora fR_{si} [11]. Na ovaj način dobija se pokazatelj rizika od stvaranja buđi. Temperaturni faktor fR_{si} se računa na sljedeći način:

$$fR_{si} = \frac{\Theta_{siz} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} \quad (3)$$

gdje Θ_{siz} ($^\circ\text{C}$) predstavlja minimalnu temperaturu unutrašnje površine zida [2] dobijenu simulacijom, Θ_e ($^\circ\text{C}$) predstavlja spoljašnju, a Θ_i ($^\circ\text{C}$) unutrašnju projektanu temperaturu vazduha.

S obzirom na to da projektni uslovi za stambene zgrade, propisuju relativnu vlažnost vazduha 60%, a do uslova za

stvaranje buđi dolazi kada relativna vlažnost vazduha dostigne 80% vrijednost površinske temperature računa se prema formuli:

$$\Theta_{si} = \left(\frac{\Phi}{80}\right)^{\frac{1}{8,02}} \cdot (109,8 + \Theta_i) - 109,8(^{\circ}\text{C}). \quad (4)$$

gdje je, Φ (%) projektna vlažnost vazduha, Θ ($^\circ\text{C}$) unutrašnja projektna temperatura.

Dobija se da je pri navedenim uslovima vrijednost površinske temperature zida sa unutrašnje strane $\Theta_{si} = 15,43 \text{ }^\circ\text{C}$, odnosno ova temperatura predstavlja graničnu temperaturu na kojoj se počinju stvarati povoljni uslovi za stvaranje buđi.

Ti uslovi se zadržavaju do temperature, pri kojoj dolazi potpunog zasićenja vodenom parom i stvaranja površinskog kondenza, odnosno do temperature unutrašnje površine koja iznosi $12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dobija se da je granična vrijednost fR_{si} za oblast jug

$$fR_{si \min} = \frac{\Theta_{siz} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} = 0,817, \quad (5)$$

a za sjever

$$fR_{si \min} = \frac{\Theta_{siz} - \Theta_e}{\Theta_i - \Theta_e} = 0,886. \quad (6)$$

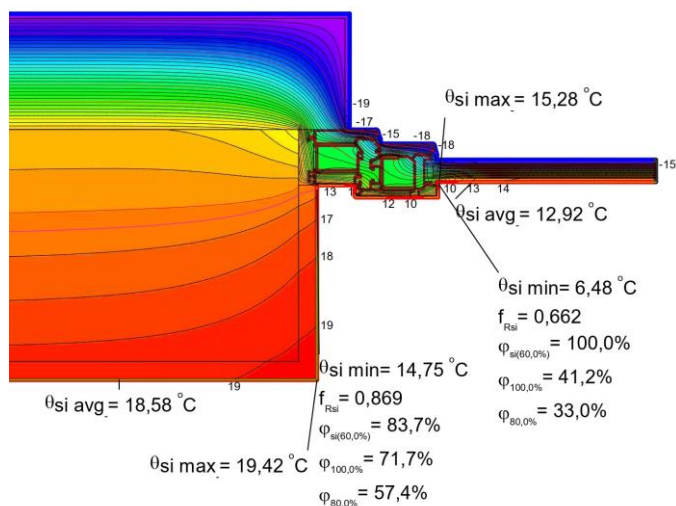
Prema ISO 10211 ukoliko konstrukcija ispunjava uslov $fR_{si, \min} \leq fR_{si}$ uslovi za stvaranje buđi u testiranim uslovima su niski.

II. SIMULACIJA PRIMJENOM SOFTVERA FLIXO

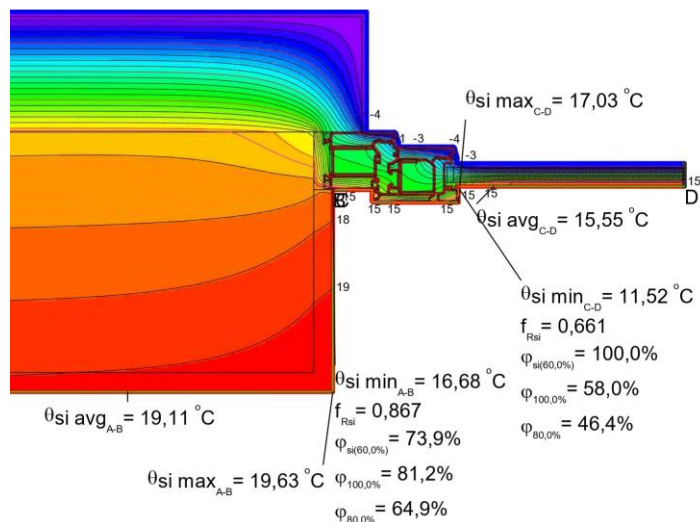
Koristeći softver Flixo 8.2.1180.1 [4], simulirane su navedene kombinacije konstruktivnog sklopa zida i prozora sa svim ugradbenim pozicijama, u obje zone klimatske oblasti propisane u gorenavedenom Pravilniku Republike Srpske. Na slikama 4 - 6 su prikazani rezultati analize prozora u definisanom zidu, na pozicijama 01, 02 i 03, za klimatsku oblast sjever, a na slikama 7 - 9 rezultati simulacije za tri razmatrane pozicije za klimatsku oblast jug.

Analize prikazuju raspored temperatura kroz konstrukciju, od ljubičaste, prema crvenoj, pri čemu ljubičasta boja predstavlja temperature koje su bliže vrijednosti spoljašnje temperature Θ_e , a crvena vrijednosti bliže unutrašnjoj temperaturi Θ_i . Na slikama se mogu vidjeti i vrijednosti fR_{si} , koje se računaju za minimalnu temperaturu unutrašnje strane zida $\Theta_{si \min}$, naznačenu na slikama. Prosječna temperatura unutrašnje strane zida, označena je sa $\Theta_{si \text{ avg}}$.

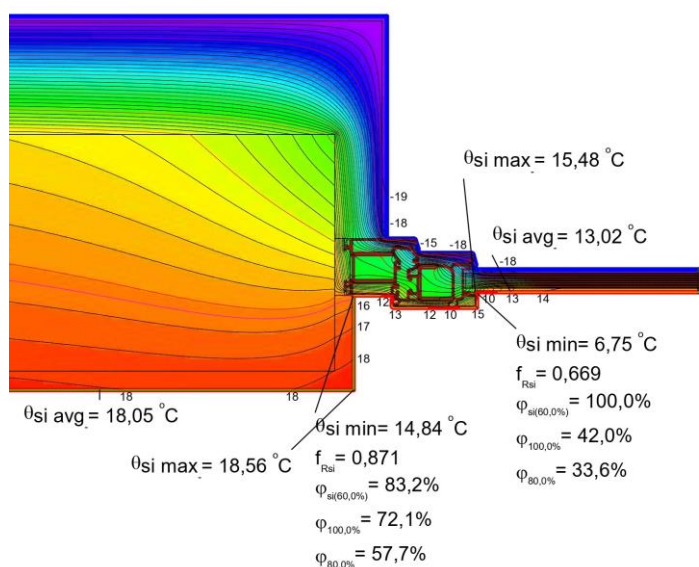
Pored toga, prikazane su iste vrijednosti i za prozorsku konstrukciju, čija analiza, nije predmet ovog rada.



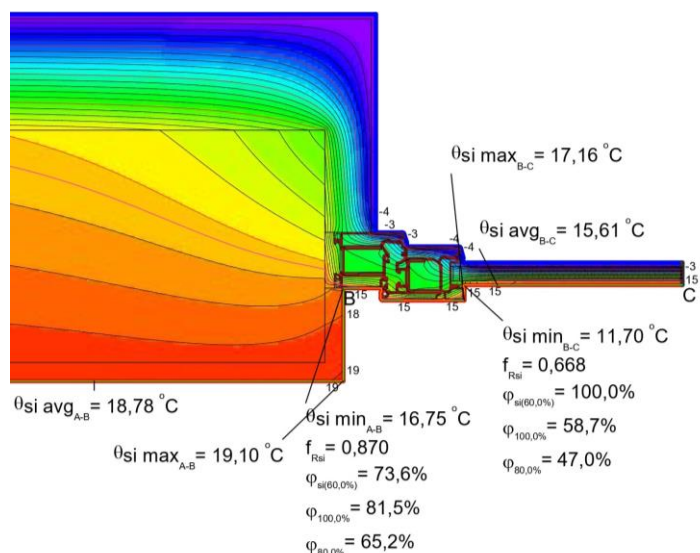
Sl. 4. Oblast sjever – Pozicija 01



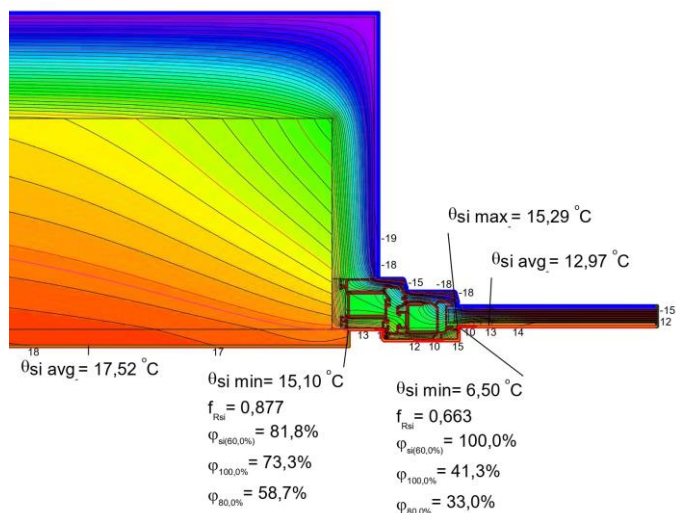
Sl. 7. Oblast jug – Pozicija 01



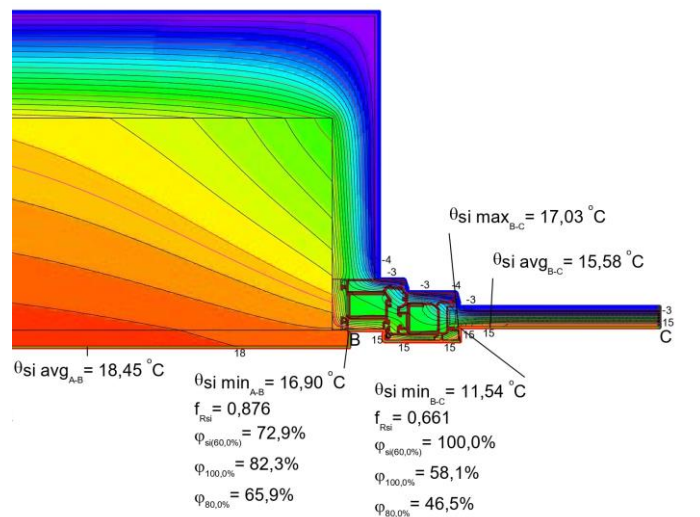
Sl. 5. Oblast sjever – Pozicija 02



Sl. 8. Oblast jug – Pozicija 02



Sl. 6. Oblast sjever – Pozicija 03



Sl. 9. Oblast jug – Pozicija 03

III. REZULTATI SIMULACIJA

U tabelama II i III, prikazani su rezultati urađenih simulacija za prethodno opisanu konstrukciju spoljašnjeg (fasadnog) zida, PVC prozorskog profila i tri različite pozicije prozora označene sa 01, 02 i 03. Prikazani su f_{Rsi} faktor i prosječna površinska temperatura unutrašnje strane zida $\Theta_{si\ avg}$ značajne za analizu mogućnosti pojave površinske kondenzacije i buđi.

Simulacijama, prikazanim na slikama 4 - 9, su dobijene vrijednosti $\Theta_{siz\ min}$ za sve simulirane situacije, tj. pozicije prozora za obe klimatske zone. Najnepovoljniji rezultat je dobijen za poziciju 01 u oblasti sjever gdje je $\Theta_{siz\ min} = 14,75\ ^\circ\text{C}$, samim tim je prethodno definisan minimalni uslov $\Theta_k \leq \Theta_{siz\ min}$ ispunjen i može se zaključiti da sve konstrukcije ispunjavaju zahtjev propisan Pravilnikom o sprečavanju stvaranja površinske kondenzacije.

TABELA II. REZULTATI SIMULACIJA ZA OBLAST SJEVER

Oblast sjever		Poz 01	Poz 02	Poz 03			
Tip zida	U zida (W/m²K)	f _{Rsi}	Θ _{si} avg	f _{Rsi}	Θ _{si} avg	f _{Rsi}	Θ _{si} avg
Tip 03	0,277	0,87	18,58	0,87	18,05	0,88	17,52
f _{rsi} ≥ 0,89							
f _{rsi} < 0,89							

TABELA III. REZULTATI SIMULACIJA ZA OBLAST JUG

Oblast jug		Poz 01	Poz 02	Poz 03			
Tip zida	U zida (W/m²K)	fRsi	θse	fRsi	θse	fRsi	θse
Tip 03	0,277	0,87	19,11	0,87	18,78	0,88	18,45
f _{rsi} ≥ 0,82							
f _{rsi} < 0,82							

Rezultati simulacije pokazuju da, u klimatskoj oblasti sjever, prozori sa PVC okvirima i ukupnim koeficijentom prolaza toplote $U_w = 1,59\ \text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ne mogu biti ugrađeni na način koji bi u potpunosti onemogućio pojavu uslova pogodnih za razvoj buđi. Vrijednosti temperaturnog faktora f_{Rsi} ostaju ispod preporučene granične vrijednosti. Tabela prikaz ukazuje na to da ugradbena pozicija 03 ostvaruje najpovoljnije rezultate na osnovu faktora f_{Rsi} u svim simuliranim slučajevima. Uzrok takvog rezultata je u rasporedu temperaturnog polja — izoterme se u ovom slučaju nalaze bliže unutrašnjoj površini zida, čime se povećava uticaj unutrašnje temperature na kritične tačke spoja prozora i zida, koje su ujedno i najosjetljivije na vlagu. S druge strane, najpovoljniji uticaj na prosječnu temperaturu unutrašnje površine zida ostvaren je kod ugradbene pozicije 01. Kod ove varijante, zbog pomjeranja prozorskog okvira ka spoljašnjoj zoni zida, veći dio unutrašnje površine ostaje izložen toplom unutrašnjem vazduhu, što omogućava efikasnije zagrijavanje te površine. U ovom slučaju, izoterme su povučene ka spoljašnjoj strani zida, što rezultira smanjenjem uticaja niskih

spoljašnjih temperatura na unutrašnju površinu. Time se postiže povećanje prosječne temperature, iako se istovremeno smanjuje lokalna termička stabilnost u zoni spoja.

U oblasti jug, primjetne su iste pravilnosti, pri čemu je mogućnost za adekvatno ugrađivanje, bez stvaranja povoljnih uslova za stvaranje buđi, moguća na svim pozicijama. Najveći uticaj na to imaju definisani, blaži projektni uslovi, koji proizilaze iz klimatskih karakteristika ove oblasti.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran uticaj ugradbene pozicije PVC prozorskih elemenata fasadnog omotača stambenih objekata, na prosječnu i minimalnu temperaturu unutrašnje strane zida simulacijom u softveru Flixo 8.2. 1180.1. za klimatske oblasti sjever i jug.

Rezultati jasno pokazuju da nijedna ugradbena pozicija prozora ne ostvaruje istovremeno optimalne vrijednosti i za prosječnu temperaturu unutrašnje površine zida i za temperaturni faktor f_{Rsi} , koji ukazuje na rizik od stvaranja buđi.

Za postizanje optimalnih rezultata, posebno u oštrijim klimatskim uslovima, neophodno je u projektantski pristup uključiti dodatne mjere, kao što su kontrola relativne vlažnosti unutrašnjeg vazduha (kao faktora koji direktno utiče na rizik od buđi), korišćenje prozora sa boljim termoizolacionim karakteristikama, te eventualna optimizacija detalja spoja zida i prozora.

Kombinovanjem povoljne ugradbene pozicije sa odgovarajućim tehničkim rješenjima, moguće je uticati na temperature unutrašnje strane zida i time doprinjeti energetsom kvalitetu zgrade.

LITERATURA

- [1] EN 14351-1 – Windows and doors – Product standard, performance characteristics – Part 1: Windows and external pedestrian doorsets, European Committee for Standardization (CEN), 2006.R. Nicole, "Title of paper with only first word capitalized," J. Name Stand. Abbrev., in press.
- [2] Guideline for Installation of Windows and External Pedestrian Doors, ed. 08/2022, Gütegemeinschaft Fenster, Fassaden und Haustüren e.V., Frankfurt, ift Rosenheim, Rosenheim, 2022. ISBN: 978-3-86791-483-3. M. Young, The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [3] Pravilnik o minimalnim zahtjevima za energetske karakteristike zgrade, Ministarstvo za prostorno uređenje, građevinarstvo i ekologiju, [Republika Srpska, Bosna i Hercegovina], [2015].
- [4] <https://www.flixo.com/>
- [5] D. Arnautović-Aksić, M. Burazor, N. Delalić, D. Gajić, P. Gvero, D. Kadrić, M. Kotor, E. Salihović, D. Todorović, and N. Zagora, *Tipologija stambenih zgrada Bosne i Hercegovine (Typology of Residential Buildings in Bosnia and Herzegovina)*, Sarajevo: Arhitektonski fakultet Univerziteta u Sarajevu, 2016.
- [6] BAS EN ISO 10077-1 – Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 1: General, Institute for Standardization of Bosnia and Herzegovina (BAS).
- [7] prEN 12412-1 – Thermal performance of windows, doors and shutters – Determination of thermal transmittance by hot box method – Part 1: Complete windows and doors, European Committee for Standardization (CEN).

- [8] EN ISO 10077-2:2017 – Thermal performance of windows, doors and shutters – Calculation of thermal transmittance – Part 2: Numerical method for frames, European Committee for Standardization (CEN), 2017.
- [9] BAS ISO 6946 – Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods, Institute for Standardization of Bosnia and Herzegovina (BAS).
- [10] BAS EN ISO 13788:2005 – Hygrothermal performance of building components and building elements – Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation – Calculation methods, Institute for standardization of Bosnia and Herzegovina (BAS), 2005.
- [11] EN ISO 10211 – *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations*, European Committee for Standardization (CEN).
- [12] V. M. Vilems, K. Schild, and S. Dinder, *Grđevinska fizika – Priručnik – Dio 1*, 1st ed. Belgrade, Serbia: Grđevinska knjiga d.o.o., 2008. ISBN: 978-86-395-0561-5.

ABSTRACT

The subject of this research is the influence of the installation position of polyvinyl chloride window elements in the building envelope of residential buildings on the average and minimum temperature of the interior wall surface, and consequently, the potential for surface condensation and mold formation. The analysis was carried out using the software Flixo 8.2.1180.1, focusing on the distribution of temperatures through the wall structure, air saturation with water vapor, and the wall surface temperature factor under conditions typical of the northern and southern climatic zones, defined in accordance with the regulations governing the energy performance of buildings in the Republic of Srpska. The study considered polyvinyl chloride window frames installed in three positions within the facade wall, based on the Typology of Residential Buildings in Bosnia and Herzegovina and designed according to the catalogue of well-designed thermal bridges from the Bosnian-Herzegovinian standard. The results of the analysis indicate that, under the tested conditions, the window installation position can influence the average interior wall surface temperature as well as the likelihood of surface condensation and mold formation.

Keywords: installation position; surface moisture; mold; interior wall surface temperature; simulation

INFLUENCE OF THE INSTALLATION POSITION OF POLYVINYL CHLORIDE WINDOW ELEMENTS IN THE BUILDING ENVELOPE OF RESIDENTIAL BUILDINGS ON THE INTERIOR WALL SURFACE TEMPERATURE

Stefan Petrović, Biljana Antunović, Darija Gajić

Uticaj primjene recikliranog betonskog agregata na otpornost betona prema dejstvu mraza

Gordana Broćeta¹, Marina Latinović Krndija¹, Anđelko Cumbo¹, Aleksandar Savić², Slobodan Šupić³, Žarko Lazić¹

¹Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka, Republika Srpska

²Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, Beograd, Srbija

³Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, Srbija

gordana.broceta@aggf.unibl.org, marina.latinovic@aggf.unibl.org,
andjelko.cumbo@aggf.unibl.org, sasha@imk.grf.bg.ac.rs, ssupic@uns.ac.rs, zarko.lazic@aggf.unibl.org

Sažetak—Agresivno djelovanje mraza predstavlja jedan od ključnih uzroka degradacije betonskih konstrukcija u područjima s izraženim hladnim klimatskim uslovima tokom zimskog perioda, kao što je slučaj sa prostorom Republike Srpske.

Cilj ovog rada jeste eksperimentalno ispitivanje uticaja različitih vrsta recikliranih agregata, dobijenih drobljenjem starog, otpadnog betona, na stepen degradacije samougrađujućih betona (*Self-Compacting Concrete* – SCC) usljed agresivnog dejstva mraza.

U okviru eksperimentalnog istraživanja projektovane su četiri mješavine samougrađujućeg betona, pri čemu su korišćeni agregati različitog porijekla sa domaćeg tržišta: prirodni riječni agregat (NRA), prirodni drobljeni agregat (NCA), te reciklirani agregati poznatog (RCA-K) i nepoznatog porijekla (RCA-U).

Ispitivana svojstva su obuhvatila za svjež beton – temperaturu, sadržaj zaostalog vazduha, konzistenciju i zapreminsku masu, a za očvršli beton – čvrstoću pri pritisku u starosti od 28 dana i otpornost na dejstvo mraza.

Iako su sve ispitivane betonske mješavine zadovoljile propisane kriterijume domaće regulative u pogledu otpornosti na mraz nakon 150 i 200 ciklusa naizmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja, ustanovljeno je da vrsta primijenjenog agregata ipak ima nezanemarljiv uticaj. Konkretno, izbor vrste prirodnog agregata (riječni ili drobljeni) ne pokazuje značajan uticaj na otpornost na mraz. Sa druge strane, reciklirani agregat poznatog porijekla (RCA-K) pokazuje se kao adekvatna zamjena za prirodne agregate u uslovima izloženosti mrazu. Najveće smanjenje otpornosti na mraz zabilježeno je nakon 200 ciklusa naizmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja kod betona sa recikliranim agregatom nepoznatog porijekla (RCA-U), i to u prosjeku za oko 10% u odnosu na betone spravljene sa ostalim vrstama agregata.

Ključne riječi — samougrađujući beton; prirodni riječni agregat; prirodni drobljeni agregat; reciklirani betonski agregat; otpornost prema dejstvu mraza;

I. UVOD

Trajnost betona predstavlja jednu od najaktuelnijih tema savremenog graditeljstva, budući da je beton osnovni konstrukcijski materijal današnjice, dok je istovremeno

evidentan problem njegove degradacije pod uticajem agresivnih faktora sredine. U uslovima hladne klime tokom zimskog perioda, jedan od najznačajnijih mehanizama degradacije jeste djelovanje mraza [1]–[4]. Shodno tome, istraživanja usmjerena na ublažavanje posljedica ovog mehanizma su od izuzetne važnosti za unapređenje trajnosti betonskih konstrukcija.

U tom kontekstu, posebno mjesto zauzima uspostavljanje principa za racionalan izbor komponentnih materijala kod samougrađujućih betona (*Self-Compacting Concrete* – SCC), čija primjena u inženjerskoj praksi bilježi kontinuiran porast, sa tendencijom da u potpunosti zamijeni klasične tradicionalne betone, koji se ugrađuju vibriranjem [5]–[8]. Imajući u vidu problem prekomjernog iscrpljivanja prirodnih resursa pri proizvodnji komponentnih materijala za betonske kompozite, posebnu važnost ima iskorišćavanje potencijala otpadnih materijala kroz proces reciklaže, a sa ciljem njihove ponovne upotrebe kao korisnih sastojaka u proizvodnji novog betona [8]–[11]. U tom smislu, poseban potencijal ima recikliranje otpadnog betona, za koji ne postoje sistemski uređene deponije građevinskog otpada u Republici Srpskoj. Svakodnevno se generišu značajne količine ovakvog otpada usljed rušenja postojećih objekata, kao i nakon hazardnih događaja poput poplava iz 2014. godine, pri čemu se građevinski otpad, uključujući i otpadni beton, najčešće odlaže na neadekvatne lokacije – komunalne ili, još češće, divlje deponije – Sl. 1.



Sl. 1. Divlja deponija građevinskog otpada

Istraživanja ukazuju da je količina tzv. građevinskog i demoliranog otpada višestruko veća od količine komunalnog otpada koji se svakodnevno generiše, a u državama sa visokim intenzitetom nove gradnje taj odnos može biti i do četiri puta veći [12]. Kao jedno od održivih rješenja za istovremeni problem prekomjerne proizvodnje građevinskog otpada i iscrpljivanja nalazišta prirodnih agregata, pokazao se postupak reciklaže deponovanih građevinskih materijala, i to prije svega betona [13].

Jedan od mogućih pristupa unapređenju trajnosnih karakteristika betona, konkretno otpornosti na dejstvo mraza, jeste izbor odgovarajuće vrste agregata [12]. U tom cilju, u ovom radu analizirani su uticaji različitih vrsta agregata sa domaćeg tržišta – prirodnog riječnog agregata (NRA), prirodnog drobljenog agregata (NCA), te recikliranih agregata dobijenih drobljenjem otpadnih betona (RCA) – na otpornost samougrađujućeg betona prema dejstvu mraza.

Istraživanje otpornosti samougrađujućeg betona prema dejstvu mraza, nakon 300 ciklusa, a u skladu sa ASTM S666, *M. Tuyan*-a i sar. [14], pokazalo je da povećanje vrijednosti vodopraškastog faktora i povećanje učešća krupnog recikliranog betonskog agregata utiče na smanjenje predmetne otpornosti betona. Pri tome je uočeno da vodopraškasti faktor ima značajniji uticaj na predmetno svojstvo. Takođe, ovo istraživanje je pokazalo mogućim uspostavljanje linearne funkcionalne zavisnosti između upijanja metodom postupnog potapanja i gubitka mase nakon realizovanih ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, sa gotovo savršenom korelacijom. Primjenom istog standarda *N. Öznur Öz*-a i sar. [15], ispitali su uticaj primjene plavuća u krupnim frakcijama agregata, variranjem njegovog učešća u iznosima 10, 20, 25 i 30%. Tim istraživanjem pokazalo se da primjena plavuća smanjuje čvrstoću pri pritisku samougrađujućih betona, ali da se ipak najmanje procentualno smanjenje čvrstoće nakon 300 ciklusa dobija za betone sa 10, 15 i 20% plavuća – navedeno respektivno. Autori istraživanja ovo objašnjavaju pozitivnim uticajem porozne strukture plavuća i njegove sposobnosti da upije vodu, koja u procesu mržnjenja migrira iz kapilarnog sistema cementnog kamena u porni prostor plavuća. Ipak, korišćenje plavuća u iznosu od 30% krupnog agregata stvara dodatni "prostor", zbog kojeg se smanjuje otpornost prema dejstvu mraza. Analizom rezultata mjerenja gubitka mase pokazalo se da je povećanje broja ciklusa iniciralo sve veći gubitak mase uzoraka. U tom smislu, najbolji rezultati su dobijeni za uzorke betona spravljenog sa 10% plavuća, a najlošiji primjenom istog u iznosu od 30%. Konačno, predmetnim istraživanjem se zaključilo da najbolju otpornost prema dejstvu mraza, nakon 300 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, kako nedestruktivnom, tako i destruktivnom metodom, ima samougrađujući beton sa učešćem od 10% plavuća. Pri tome, upotreba ovog lakog agregata može biti pogodna do učešća u iznosu od 20% zapremine krupnih frakcija, ali dalje povećanje njegovog učešća degradira otpornost betona prema ovom deterioracionom mehanizmu. Istraživanjem *Huda et al.* [16], u kojem je krupna frakcija prirodnog agregata zamijenjena sa recikliranim betonskim agregatom u iznosima 0, 30, 40 i 50% u samougrađujućim betonima sa elektrofilterskim pepelom, kao mineralnim dodatkom, pokazalo je da svi projektovani betoni

zadovoljavaju kriterijum otpornosti na dejstvo mraza nakon 300 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, u skladu sa ASTM S666. Bez obzira na navedeno, uočeno je da učešće recikliranog betonskog agregata smanjuje nivo predmetne otpornosti, pri čemu se kao najniža pokazala za učešće od 40% ovog agregata. Istraživanjem *Hao Yan et al.* [17], u kojem je varirano učešće eolskog pijeska u iznosu 0, 20, 40 i 60% i krupne frakcije recikliranog betonskog agregata u iznosu od 0, 25 i 50% ispitana je otpornost na 200 ciklusa mraza samougrađujućih betona u skladu sa GB/T50082. Pokazalo se da povećanje učešća eolskog pijeska ubrzava pad otpornosti betona na dejstvo mraza, a da učešće recikliranog betonskog agregata usporava tu tendenciju. Sa tim u vezi utvrđene su optimalne stope zamjene eolskog pijeska i recikliranog betonskog agregata, respektivno u iznosima, od 20 do 40% i od 25 do 50%.

II. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Radi određivanja uticaja različitih vrsta recikliranih agregata proizvedenih od starog otpadnog betona na otpornost samougrađujućeg betona na dejstvo mraza, u okviru eksperimentalnog istraživanja ispitane su četiri betonske mješavine. U njima su korišćene sledeće vrste agregata: prirodni (riječni, oznake NRA i drobljeni, oznake NCA) i reciklirani agregati (poznatog, oznake RCA-K i nepoznatog porijekla, oznake RCA-U). Sve mješavine agregata su projektovane kao trofrakcijske, nominalno najkrupnijeg zrna 16 mm, kontinualnog granulometrijskog sastava.

U nastavku su navedene oznake betonskih mješavina kao i vrste upotrebljenog agregata:

- C-NR – samougrađujući beton spravljen sa prirodnim riječnim agregatom,
- C-NC – samougrađujući beton spravljen sa prirodnim drobljenim agregatom,
- C-RC-K – samougrađujući beton spravljen sa mješavinom sitnog riječnog i krupnog agregata od recikliranog betona poznatog porijekla i
- C-RC-U – samougrađujući beton spravljen sa mješavinom sitnog riječnog i krupnog agregata od recikliranog betona nepoznatog porijekla.

Na betonima u svježem stanju ispitane su sljedeće karakteristike:

- temperatura, u skladu sa EN 12350-1 [18],
- sadržaj zaostalog vazduha, u skladu sa EN 12350-7 [19],
- konzistencija, u skladu sa EN 12350-8 [20] i
- zapreminska masa, u skladu sa EN 12350-6 [21].

Na očvrslim betonima ispitana su sljedeća svojstva:

- čvrstoća pri pritisku u starosti od 28 dana, u skladu sa EN 12390-3 [22] i
- otpornost na dejstvo mraza, u skladu sa SRPS U.M1.016 [23].

A. Komponentni materijali

Za izradu predmetnih betona korišćeni su sljedeći komponentni materijali:

- cement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N, "Dalmacijacement", proizvođača "Sv. Juraj" iz Splita, specifične mase 3140 kg/m^3 ;
- mineralni dodatak tipa I – krečnjačko brašno, proizvođača "Japra" a. d. iz Novog Grada, specifične mase 2780 kg/m^3 ;
- NRA – prirodni riječni agregat "Petoševci", proizvođača "Niskogradnja" iz Laktaša, BiH, pran i separisan u frakcije: 0/4, 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1606 , 1554 i 1582 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2740 , 2696 i 2683 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 0,6, 0,8 i 0,4%;
- NCA – prirodni drobljeni agregat "Dobrnja", proizvođača "Binis" iz Banjaluke, BiH, pran i separisan u frakcije: 0/4, 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1546 , 1354 i 1318 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2709 , 2746 i 2718 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 0,64, 1,22 i 0,71%;
- RCA-K – reciklirani agregat poznatog porijekla, dobijen drobljenjem otpadnog betona C25/30 i C35/45, frakcije: 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1278 i 1231 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2350 i 2350 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 2,4 i 2,2%;
- RCA-U – reciklirani agregat nepoznatog porijekla, dobijen drobljenjem otpadnog betona uzetog sa deponije građevinskog šuta, frakcije: 4/8 i 8/16 mm, zapreminske mase u rastresitom stanju, respektivno po frakcijama: 1267 i 1221 kg/m^3 , zapreminske mase zrna, respektivno po frakcijama: 2330 i 2330 kg/m^3 i upijanja vode, respektivno po frakcijama: 3,6 i 3,1%;
- hemijski dodatak – superplastifikator "Cementol®Zeta Super S", proizvođača "TKK" iz Srprenica, Slovenija;
- voda iz gradskog vodovoda.

B. Betonske mješavine

Polazni kriterijum za projektovanje mješavina bio je ispunjenje uslova za klasu konzistencije SF2, za koju se vrijednost razlivanja slijeganjem kreće u granicama od 660 do 750 mm. Izbor ove klase konzistencije samougrađujućeg betona izvršen je s obzirom da ona ima najširu primjenu u praksi, jer je pogodna za izvođenje normalno armiranih stubova i zidova.

U tabeli I su date količine komponentnih materijala u 1 m^3 projektovanih samougrađujućih betonskih mješavina

praškastog tipa, kao i računске vrijednosti zapreminskih masa betona u svježem stanju. Pri tome se napominje da je, prema preporukama [12], [24] za betone spravljene sa recikliranim betonskim agregatima primijenjena dodatna količina vode, koju reciklirani agregati upiju za 30 min, a u svrhu postizanja zahtijevane konzistencije.

TABELA I. SASTAVI I ZAPREMSKE MASE PROJEKTOVANIH BETONA

Vrsta betona			C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U	
Cement			[kg/m ³]	453	448	450	450
Krečnjačko brašno			[kg/m ³]	181	153	196	193
Agregat	NRA	0/4 mm	[kg/m ³]	909	–	832	860
		4/8 mm	[kg/m ³]	185	–	–	–
		8/16 mm	[kg/m ³]	460	–	–	–
	NCA	0/4 mm	[kg/m ³]	–	827	–	–
		4/8 mm	[kg/m ³]	–	239	–	–
		8/16 mm	[kg/m ³]	–	539	–	–
	RCA	4/8 mm	[kg/m ³]	–	–	234	262
		8/16 mm	[kg/m ³]	–	–	394	335
HRWRA			[kg/m ³]	6,74	6,73	6,75	6,75
Voda			[kg/m ³]	202,4	188,7	189,0	189,0
Dodatna voda			[kg/m ³]	–	–	14,3	19,9
Zapreminska masa			[kg/m ³]	2397	2401	2316	2316

C. Realizacija ispitivanja

Spravljanje svih betona, izrada i njegovanje uzoraka izvršeni su na isti način i pri jednakim termohigrometrijskim uslovima u laboratoriji – pri temperaturi od $20 \pm 3^\circ\text{C}$ i relativnoj vlažnosti vazduha od $65 \pm 5\%$.

Miješanje betona je izvršeno u laboratorijskoj miješalici proizvođača "CONTROLS", model "TTM 140V". Temperatura svježeg betona izmjerena je digitalnim termometrima proizvođača "CONTROLS", modela "82-D1226/A" i proizvođača "HANNA", u skladu sa EN 12350-1 [18]. Sadržaj zaostalog vazduha izmjeren je porozimetrom zapremine osnovnog suda 8000 cm^3 , proizvođača "CONTROLS", modela "54-C0170/D", u skladu sa EN 12350-7 [19]. Procjena konzistencije izvršena je metodom razlivanja slijeganjem, u skladu sa EN 12350-8 [20] pri normalnom položaju konusa tokom ispitivanja – Sl. 2. Ispitivanja su sprovedena korišćenjem Abramsovog konusa, proizvođača "CONTROLS", modela "C150/A" i bazne ploče istog proizvođača, modela "54 C0149/20".



Sl. 2. Mjerenje konzistencije svježeg samougrađujućeg betona – dizanje Abramsovog konusa iz normalnog položaja

Zapreminska masa svježeg betona dobijena je kao srednja vrijednost izmjerena na tri uzorka oblika kocke dužine ivice 15 cm, u skladu sa EN 12350-6 [20].

Svi uzorci su se u prva 24 h držali u kalupima, prekriveni folijom, a zatim do 28 dana u bazenima napunjenim vodom, pri temperaturi od $20 \pm 3^\circ\text{C}$,

Čvrstoća betona pri pritisku dobijena je kao srednja vrijednost izmjerena na tri uzorka oblika kocke dužine ivice 15 cm u starosti od 28 dana, prema standardu EN 12390-3.

Ispitivanje otpornosti betona na dejstvo mraza izvršeno je u skladu sa nacionalnim standardom SRPS U.M1.016 [23], primjenom destruktivne metode. Broj uzoraka po jednoj betonskoj mješavini iznosio je 15, podijeljeno u sljedeće grupe:

- E_0 – etaloni, čija je čvrstoća pri pritisku utvrđena na dan početka ispitivanja,
- E_I – etaloni – uzorci koji nisu bili izloženi zamrzavanju, a čija je čvrstoća pri pritisku određena na dan ekvivalentne starosti, u odnosu na uzorke koji su bili izloženi na 150 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja,
- E_{II} – etaloni – uzorci koji nisu bili izloženi zamrzavanju, a čija se čvrstoća pri pritisku odredila na dan ekvivalentne starosti, u odnosu na uzorke koji su bili izloženi na 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja,
- M_{150} – uzorci koji su bili izloženi na 150 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja i
- M_{200} – uzorci koji su bili izloženi na 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja.

Postupak zamrzavanja sproveden je u komori za hlađenje proizvođača “CONTROLS”, modela “65-D1409”, kapaciteta 50 kg sa mogućnošću održavanja stalne temperature vazduha od -20 do $+65^\circ\text{C}$ i tačnošću od $0,1^\circ\text{C}$, te automatskim registrovanjem temperature vazduha u uređaju u blizini betonskih tijela.

Na Sl. 3 prikazana je predmetna komora u radu i sa uzorcima postavljenim u ladicama komore.



Sl. 3. Komora za hlađenje sa uzorcima postavljenim u rad

III. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISPITIVANJA

A. Beton u svježem stanju

Rezultati ispitivanja betona u svježem stanju – temperature (T), zapreminske mase (D), zaostale poroznosti (A_c) i razlivanja slijeganjem (SF) prikazani su u tabeli II.

TABELA II. REZULTATI ISPITIVANJA BETONA U SVJEŽEM STANJU

Vrsta betona		C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U
T	[$^\circ\text{C}$]	26	25	29	29
A_c	[%]	1,1	1,8	4,2	4,2
SF	[mm]	760	700	660	710
D	[kg/m^3]	2396	2400	2316	2317

B. Beton u očvrslom stanju

Rezultati ispitivanja čvrstoće pri pritisku u starosti 28 dana ($f_{c,cube,28}$) dati su u tabeli III. Svi projektovani betoni imali su mješovit lom – lom po cementnom kamenu i zrnima agregata, kao i pravilnu figuru loma.

TABELA III. REZULTATI ISPITIVANJA ČVRSTOĆE BETONA PRI PRITISKU

Vrsta betona		C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U
$f_{c,cube,28}$	[MPa]	59,1	63,1	65,1	60,9

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na dejstvo mraza, dobijeni kao prosječne vrijednosti čvrstoća pri pritisku zamrzanih tijela $f_{c,cyl}(M)$ i etalona ekvivalentne starosti $f_{c,cyl}(E)$, dati su u tabeli IV.

TABELA IV. REZULTATI ISPITIVANJA OTPORNOSTI BETONA NA MRAZ

Vrsta betona		C-NR	C-NC	C-NC-K	C-NC-U
$f_{c,cyl}(E_0)$	[MPa]	56,3	63,0	65,9	60,1
$f_{c,cyl}(E_I)$	[MPa]	62,7	70,7	66,0	60,3
$f_{c,cyl}(M_{150})$	[MPa]	61,8	64,8	65,8	59,3
$f_{c,cyl}(E_{II})$	[MPa]	66,1	74,4	66,1	60,3
$f_{c,cyl}(M_{200})$	[MPa]	57,4	65,0	60,7	47,5

IV. ANALIZA I DISKUSIJA REZULTATA

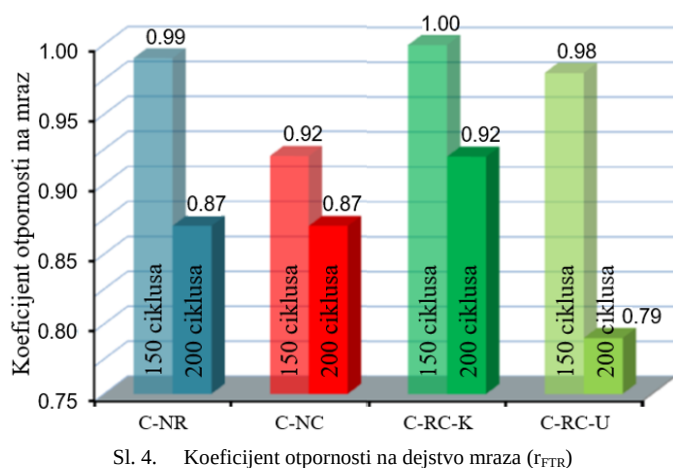
Učešće recikliranih agregata u samougrađujućim betonskim mješavinama imalo je uticaj na smanjenje zapreminske mase prosječno za oko $80 \text{ kg}/\text{m}^3$, u odnosu na betone spravljene sa prirodnim agregatima. Takođe, njihovo prisustvo znatno je uticalo i na povećanje zaostalog vazduha u svježem betonu i to za 2,75%. Pritom, nije bilo znatnog uticaja na smanjenje razlivanja slijeganjem (prosječno smanjenje razlivanja iznosilo je 45 mm, što se ne smatra značajnim s obzirom da je postignuta ciljana konzistencija, tj. klasa SF2), jer je korišćena dodatna količina vode prilikom spravljanja betona sa recikliranim agregatima.

Prema vrijednostima dobijenih zapreminskih masa, svi betoni su ocijenjeni kao betoni normalne zapreminske mase.

Analiza čvrstoća pri pritisku u starosti od 28 dana izvršena je testiranjem značajnosti razlika čvrstoća parova betona primjenom Studentovog t testa. S obzirom da je za sve analizirane betone aritmetička sredina dobijena iz tri rezultata ispitivanja broj stepeni slobode svakoga analiziranog para betona iznosio je četiri. Za nivoom značajnosti od 0,05,

konstatovano je da rezultati testiranja pripadaju istom skupu, tj. da razlike u vrijednostima čvrstoća nisu statistički značajne. Naime, dobijene su neznatno veće čvrstoće betona sa recikliranim agregatima u iznosu oko 2 MPa za betone u starosti od 28 dana. Analizom čvrstoća etalonskih betona u zasićenom stanju pokazalo se da beton spravljen sa prirodnim riječnim agregatom i beton spravljen sa kombinacijom prirodnog sitnog riječnog agregata i recikliranog krupnog agregata poznatog porijekla imaju približno jednake priraštaje čvrstoća u starostima većim od 28 dana. Pritom se uočava da beton spravljen sa recikliranim agregatom nepoznatog porijekla ne prati ovaj priraštaj čvrstoće pri pritisku, odnosno ima za oko 6 MPa manje vrijednosti čvrstoće pri pritisku u odnosu na beton spravljen sa recikliranim agregatom poznatog porijekla u starostima većim od 28 dana u zasićenom stanju. Navedeno se može objasniti prisustvom nepoželjnih materija u recikliranom betonskom agregatu nepoznatog porijekla, koji je dobijen sa deponije građevinskog šteta, a koje nepovoljno utiču na adheziju između cementnog kamena i zrna agregata, te time i na priraštaj čvrstoće betona pri pritisku u starostima većim od 28 dana.

Rezultati ispitivanja otpornosti betona na dejstvo mraza pokazali su da je za sve eksperimentom obuhvaćene betone, odnos čvrstoća pri pritisku ispitnih tijela, koji su bili izloženi naizmjeničnim ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja (150 i 200 ciklusa) i ispitnih tijela – etalona, ekvivalentne starosti, veći od 0,75 – Sl. 4. Na osnovu kriterijuma [23] zaključeno je da sve ispitivane vrste betona zadovoljavaju uslove kvaliteta nakon 150 i 200 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja.



Sl. 4. Koeficijent otpornosti na dejstvo mraza (R_{FTR})

Detaljnijom analizom dobijenih rezultata uočeno je da na otpornost betona na dejstvo mraza imaju uticaj primijenjena vrsta agregata, ostvarena čvrstoća pri pritisku i poroznost.

Najveći pad otpornosti na dejstvo mraza ima C-RC-U. Ovaj beton pokazuje odličnu otpornost do 150 ciklusa, a nakon još samo 50 ciklusa, pokazatelj njegove otpornosti je manji za 21,2% (što je značajno više u odnosu na prosječan predmetni pad svih ostalih vrsta betona, koji iznosi 11,3%). Takođe, uzorci C-RC-U su nakon 200 ciklusa mraza pretrpjeli i fizičku destrukciju, ocijenjenu vizuelno i evidentiranu kroz gubitak mase (< 5%), tako da se uslovno može prognozirati da ovaj beton ne bi zadovoljio strože zahtjeve u pogledu otpornosti na mraz.

Potpuno drugačije ponašanje usljed dejstva mraza pokazuje C-RC-K. Ovaj beton ima visok nivo otpornosti za obje serije ciklusa mraza (150 i 200), pri čemu je pad koeficijenta otpornosti na mraz (R_{FTR}) između 200 i 150 ciklusa za oko 8%. To je približno prosječnoj gorenavedenoj vrijednosti, kada se izuzme C-RC-U. Poređenjem betona C-RC-K, sa betonom C-NR, uočava se da beton C-RC-K ima bolju otpornost na dejstvo mraza. Betoni C-NR i C-RC-K su odabrani za poređenje jer su originalna zrna korišćenog RCA, takođe riječnog porijekla (agregati se razlikuju po prisustvu starog cementnog kamena). Ovo implicira da prisustvo starog cementnog kamena u RCA, sa aspekta analiziranog svojstva, svakako nije nedostatak ovom agregatu. Štaviše, pore starog cementnog kamena u RCA su u određenoj mjeri omogućile migraciju vode iz nove prelazne zone, a time u toj mjeri i ekspanziju leda tokom mržnjenja. Slični zaključci nalaze se kod istraživanja N. Öznur Öz-a i sar. [19], gdje su procenti smanjenja čvrstoće, nakon 300 ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja, za primjenu 10, 20 i 30% plavuća u krupnoj frakciji, manji u odnosu na etalonski beton (zbog porozne strukture plavuća može se u izvjesnoj mjeri napraviti poređenje sa RCA). Takođe, kod betona C-RC-K dobijena je veća poroznost cementnog kamena, odnosno veći porni prostor (krupnih pora i kapilara), za ekspanziju leda i migraciju vode tokom mržnjenja. Dakle, otpornost betona na mraz je i u funkciji poroznosti.

Poređenjem betona sa riječnim i drobljenim agregatom, uočava se da ne postoji značajna razlika u otpornosti na dejstvo mraza.

V. ZAKLJUČAK

Otpornost betona na dejstvo mraza zavisi od vrste primijenjenog agregata. Ovo se prvenstveno odnosi na izbor između recikliranog agregata nepoznatog porijekla i ostalih primijenjenih vrsta agregata (riječnog, drobljenog, mješavine riječnog i recikliranog agregata poznatog porijekla). Primjena recikliranog agregata nepoznatog porijekla utiče na smanjenje otpornosti na dejstvo mraza, u odnosu na prosječnu otpornost, koja se uočava kod betona sa nekom od drugih vrsta agregata. Do navedenog smanjenja dolazi tek nakon 200 ciklusa naizmjeničnog zamrzavanja i odmrzavanja, čemu su svakako doprinijele činjenice da se ovaj beton karakteriše većom količinom cementnog kamena, najvećim količinama upijene vode i najvećom mogućnošću da u manjoj mjeri zaostanu sastojci koji smanjuju kvalitet agregata u pogledu predmetnog svojstva (napominje se da je sirovina za proizvodnju ovog agregata bio otpadni beton sa deponije građevinskog šteta). Stoga se ne može očekivati da bi primjena recikliranog agregata nepoznatog porijekla mogla zadovoljiti strože zahtjeve u pogledu otpornosti na dejstvo mraza. Ipak, primjenom svih navedenih vrsta agregata, a za tehnologiju proizvodnje samougrađujućeg betona praškastog tipa, pokazalo se mogućim izrada betona otpornih na 200 ciklusa mraza.

Izbor između riječnog i/ili drobljenog ili recikliranog agregata poznatog porijekla, nema značajan uticaj na otpornost na dejstvo mraza. Pokazalo se da se bolja otpornost na dejstvo mraza dobija što je veća čvrstoća betona pri pritisku i veća zaostala poroznost.

LITERATURA

- [1] Y. Şahin, Y. Akkaya, and M. Taşdemir, "Effects of freezing conditions on the frost resistance and microstructure of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 270, pp. 121458, 2020.
- [2] K. Ma, K. Feng, Z. Wang, G. Long, Y. Xie and W. Li, "Mechanical properties and crack evolution of SCC with macro-crack under freeze-thaw cycles," *Journal of Building Engineering*, vol. 69, pp. 106323, 2023.
- [3] G. Broćeta, M. Malešev, V. Radonjanin, S. Šupić, A. Savić, I. Lukić, A. Cumbo and M. Latinović, "Effect of aggregate origin on freeze/thaw resistance of self-compacting concrete with and without a de-icing agent," *Building Materials and Structures*, vol. 66, no. 4, pp. 2300013B, 2023.
- [4] J. Nilimaa and V. Zhaka, "An Overview of Smart Materials and Technologies for Concrete Construction in Cold Weather," *Eng.*, vol. 4, pp. 1550–1580, 2023.
- [5] D. Jevtić, G. Broćeta i A. Savić, "Projektovanje mješavina samozbijajućih betona," *Savremeni materijali 2013, VI Međunarodni naučni skup, Banjaluka*, str. 497–514, 2014.
- [6] A. Savić, G. Broćeta, M. Aškrabić, S. Panić and L. Vidanović, "Effect of Mixing Approach on the Properties of Concrete with Different Aggregate Types," *Contemporary Materials*, vol. 13, no. 1, pp. 74–83, 2022.
- [7] K. C. Onyelowe, S. Hanandeh, V. Kamchoom, et al. "Mechanical properties of self compacting concrete reinforced with hybrid fibers and industrial wastes under elevated heat treatment," *Scientific Reports*, vol. 15, pp. 12753, 2025.
- [8] B. N. Kumar, A. M. Reddy and P. S. Vineela, "Development of sustainable high performance self compacting concrete using construction & demolition waste and steel slag," *Discover Civil Engineering*, vol. 2, pp. 62, 2025.
- [9] A. Savić, M. Aškrabić, B. Kovačević and D. Pavlović, "Properties of SCC mixtures with coarse recycled aggregates," *ASES International Congress Proceedings*, pp. 265–274, 2018.
- [10] M. Popović, B. Borozan, M. Štavljanin, A. Savić and M. Latinović, "Evaluation of scc mixtures with the combined use of crumb rubber and recycled concrete aggregate," *10th International Conference on Renewable Electrical Power Sources, Union of Mechanical and Electrotechnical Engineers and Technicians of Serbia (SMEITS) Society for Renewable Electrical Power Sources*, 2022.
- [11] M. Popović, A. Savić, G. Broćeta, B. Borozan and M. Štavljanin, "Experimental investigation of scc with recycled rubber and recycled concrete aggregate," *International Conference On Contemporary Theory and Practice In Construction XV, Banja Luka*, pp. 63–72, 2022.
- [12] G. Broćeta, M. Malešev i V. Radonjanin, *Trajnost samougrađujućeg betona u funkciji primijenjene vrste agregata, Naučna monografija izuzetnog značaja, Univerzitet u Banjoj Luci, Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet, Banja Luka*, 2021.
- [13] M. Malešev, V. Radonjanin and G. Broćeta, "Properties of recycled aggregate concrete," *Contemporary Materials*, vol. 5, no. 2, pp. 240–249, 2014.
- [14] M. Tuyan, A. Mardani-Aghabaglou and K. Ramyar, "Freeze-thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate," *Materials & Design* vol. 53, pp. 983–991, 2014.
- [15] H. Öznur Öz, H. Erhan Yücel and M. Güneş, "Freeze-Thaw Resistance of Self Compacting Concrete Incorporating Basic Pumice," *Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 1, pp. 285–291, 2016.
- [16] S. B. Huda and M. S. Alam, "Mechanical and Freeze-Thaw Durability Properties of Recycled Aggregate Concrete Made with Recycled Coarse Aggregate," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 27, no.10, 2015.
- [17] H. Yan, Qi. Liu, F. Han, S. Liu, T. Han and B. He, "Frost Durability of Self-Compacting Concrete Prepared with Aeolian Sand and Recycled Coarse Aggregate," *Materials*, vol. 16, no. 19, pp. 6393, 2023.
- [18] EN 12350-1:2019 Testing fresh concrete – Part 1: Sampling and common apparatus.
- [19] EN 12350-7:2019 Testing fresh concrete – Part 7: Air content – Pressure methods.
- [20] EN 12350-8:2019 Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test.
- [21] EN 12350-6:2019 Testing fresh concrete – Part 6: Density.
- [22] EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [23] SRPS U.M1.016:1992 Beton – Ispitivanje otpornosti betona prema dejstvu mraza.
- [24] S. Marinković, I. Ignjatović, V. Radonjanin and M. Malešev, "Recycled Aggregate Concrete for Structural Use – An Overview of Technologies, Properties and Applications," *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*, 2011.
- [25] V. Radonjanin, M. Malešev, S. Marinković and A. E. Sead Al Malt, "Green recycled aggregate concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 1503-1511, 2013.

ABSTRACT

The aggressive action of freeze-thaw cycles is one of the principal causes of degradation in concrete structures located in regions with harsh cold climatic conditions during the winter season, such as the territory of the Republic of Srpska.

The aim of this study is to experimentally investigate the influence of various types of recycled aggregates – obtained by crushing old waste concrete – on the extent of degradation in self-compacting concrete (SCC) when exposed to aggressive freeze-thaw conditions.

The experimental program involved the design of four SCC mixtures with aggregates of different origins available on the local market: natural river aggregate (NRA), crushed natural aggregate (NCA), and recycled concrete aggregates of known (RCA-K) and unknown provenance (RCA-U).

The evaluated properties included, for fresh concrete: temperature, entrapped air content, consistency, and bulk density; and for hardened concrete: compressive strength at 28 days and freeze-thaw resistance.

Although all tested mixtures satisfied the requirements of the national regulatory standards regarding freeze-thaw resistance after 150 and 200 cycles of alternate freezing and thawing, the type of aggregate used was found to have a non-negligible influence. Specifically, the choice between river and crushed natural aggregates showed no significant impact on frost resistance. In contrast, the recycled aggregate of known provenance (RCA-K) proved to be a viable substitute for natural aggregates under freeze-thaw exposure. The greatest reduction in frost resistance – on average approximately 10% compared to mixtures incorporating other aggregate types – was observed in SCC mixtures containing recycled aggregate of unknown provenance (RCA-U), particularly after 200 freeze-thaw cycles.

EFFECT OF RECYCLED CONCRETE AGGREGATE APPLICATION ON THE FREEZE-THAW RESISTANCE OF CONCRETE

Gordana Broćeta, Marina Latinović Krndija, Anđelko Cumbo, Aleksandar Savić, Slobodan Šupić, Žarko Lazić

The Effect of Polypropylene Fibers on the Mechanical and Physical Properties of Foam Concrete

Mohsen Kiana¹, Aleksandar Savić¹, Gordana Broćeta², Aleksandar Radević¹, Ehsan Kiana³, Marina Aškračić¹, Nenad Ivanišević¹

¹University of Belgrade, Faculty of Civil Engineering, Belgrade, Serbia,

²University of Banja Luka, Faculty of Architecture Civil Engineering and Geodesy, Banja Luka, Republic of Srpska

³Technical University of Graz, Faculty of Civil Engineering, Graz, Austria, & Kian Foam Concrete Company, Tehran, Iran
kiana.mohsen.eng@gmail.com, savic.alexandar@gmail.com, gordana.broceta@aggf.unibl.org, aradevic@grf.bg.ac.rs,
ehsan.kiana@student.tugraz.at, amarina@imk.grf.bg.ac.rs, nesa@grf.bg.ac.rs

Abstract— Foam concrete (FC) is a lightweight material composed of cement, water, and a foaming agent. Including the foaming agent significantly reduces the density of the concrete, making it lighter than conventional mixes. However, due to the absence of coarse aggregates, foam concrete generally exhibits lower mechanical properties than other lightweight concrete types. This study explores the potential of enhancing the mechanical properties of foam concrete by incorporating polypropylene fibers into the mixture. The research focuses on evaluating the influence of these fibers on key performance characteristics, aiming to improve the structural integrity of foam concrete, and, therefore aiding the mechanical properties. For this investigation, two types of cement were utilized: Type II cement with moderate heat of hydration, and Type IV pozzolanic cement. The findings of this study provide valuable insights into optimizing foam concrete for broader applications in construction, based on flexural, compressive strength and abrasion tests. **Keywords**—Foam concrete, Polypropylene fibers, Type II cement, Type IV (Pozzolanic) cement

incorporating additives such as polypropylene fibers, micro silica, sand, and nanoparticles [7].

Polypropylene (PP) fibers are synthetic fibers made from a thermoplastic polymer known for its excellent chemical resistance, low density, and high tensile strength. These fibers are widely used in various industries, including textiles, geotextiles, packaging, and especially in construction materials such as fiber-reinforced concrete. Polypropylene fibers are primarily utilized in concrete to enhance its mechanical properties, particularly its tensile strength, crack resistance, and durability. Due to their hydrophobic nature, PP fibers do not absorb water, making them ideal for cement-based composites. They are also resistant to most chemicals and have good fatigue resistance [8]. This study focuses on evaluating the effects of polypropylene fibers on the mechanical and physical properties of foam concrete, aiming to make its use more reliable and widespread in construction applications.

I. INTRODUCTION

In recent years, the construction industry has witnessed significant advancements aimed at optimizing building materials, reducing costs, and enhancing overall efficiency. One of the most notable innovations in this context is the development and use of lightweight concretes, particularly foam concrete (FC) [1]. Due to its low density, foam concrete significantly contributes to reducing the dead load of structures and considerably increases the speed of construction projects [2]. Additional advantages include reduced number of labors, lower execution costs, and easier transportation [3], [4]. One of the best properties of FC is their thermal insulation capacity, which aids energy efficiency of the whole structure.

Foam concrete is composed of three primary components: water, cement, and a foaming agent [5]. Despite its numerous benefits, foam concrete faces challenges in terms of mechanical and physical properties, which limit its application in certain structural scenarios [6]. Therefore, extensive research has been conducted to improve its performance by

II. COMPONENT MATERIALS AND TESTING METHODS

This study investigates the influence of polypropylene fibers on the mechanical and physical behavior of foam concrete by designing and testing 6 different mixtures. All mixtures were formulated based on the practical application of foam concrete as a filler material for building floors. The base components included Type II Portland cement, pozzolanic cement, water, and two types of foaming agents: chemical and protein-based, and additionally 12 mm polypropylene fibers.

Initially, a water-to-cement ratio (W/C) of 0.45 was selected. However, due to the low flowability observed under real construction site conditions, the ratio was increased to 0.6 to facilitate easier pumping to higher floors. All pre-trials and sample preparation were conducted over two working days at a construction site in Tehran: on the first day, mixes using chemical foam were prepared, while on the second day, after a thorough cleaning of the pumping system, mixes with protein-based foam were cast.

A wind pressure foam concrete machine was used to transport the concrete via an air compressor and hose system to the second floor. To simulate real-life project conditions and ensure accurate sampling, specimens were collected at the end of the hose line and poured into preprepared molds. It should be noted that all samples were obtained from the second floor (see Fig. 1).



Figure 1. Pouring the FC into molds.

Both types of cement used in this study (Type II and pozzolanic) were sourced from Tehran Cement Factory in 50 kg bags, with a fixed dosage of 250 kg/m³ across all mixes. Two foaming agents were employed: chemical foam from Parsman Shimi and animal-based protein foam from Azarkavin Co. The dosage of foam was approximately 1 liter per cubic meter of concrete.

The polypropylene fibers had a cut length of 12 mm and were used at a dosage of 0.2 kg/m³. This quantity was selected as the minimum effective amount to enhance mechanical properties while avoiding potential damage to equipment. Table 1 summarizes the amount of component materials used in the mixtures.

TABLE I. QUANTITIES OF CONSTITUENT MATERIALS FOR 1 M³ OF FOAM CONCRETE

Component	Quantity (kg/m ³)
Cement	250
Water	150
Foam Agent	1
Fiber	0.2

Each mix was prepared with major care to simulate laboratory conditions. Water, cement, and foaming agent were added to the mixer first. After achieving a homogeneous base mix, the fibers were gradually added over one minute. The complete mixing process took 4 to 5 minutes. Once mixing was complete, the machine was sealed, and the foam concrete was pumped to the second floor. Sampling was done after one minute of discharge to ensure uniformity.

Specimens were cast in molds 4×4×16 cm prisms. After casting, the specimens were cured under laboratory conditions at a temperature of 23 ± 2 °C.

In this study, the aim was to examine the physical and mechanical properties of foam concrete by evaluating its dry density and ultrasonic pulse velocity as physical parameters, and its compressive and tensile strengths as mechanical indicators. To assess the influence of polypropylene fibers on foam concrete, tests using two types of cement and two types of foam (chemical and protein-based) were conducted, maintaining a constant water-to-cement ratio of 0.6 throughout all mixtures. An overview of all mixtures is presented in the Table II.

TABLE II. OVERVIEW OF ALL MIXTURES

Mix	Cement	Foam	PP fibers
M1	Pozzolanic	Chemical	–
M2	Pozzolanic	Chemical	✓
M3	Type II	Protein	–
M4	Type II	Protein	✓
M5	Pozzolanic	Protein	–
M6	Pozzolanic	Protein	✓

III. TEST RESULTS AND DISCUSSION

In this study, to investigate the effect of polypropylene fibers on the physical and mechanical properties of foam concrete, six different mixtures were made and tested using two types of cement (Type II and pozzolanic), two types of foam (chemical and protein-based), prepared with and without polypropylene fibers. The parameters examined include dry density, ultrasonic pulse velocity (UPV), compressive strength, and tensile strength. All specimens for these tests are shown in Fig. 2.



Figure 2. All specimens prepared for the testing of hardened properties

Bulk density measurements were conducted in accordance with the SRPS EN 12390-7:2019 standard [9]. The results and percentage changes for each mixture compared to its fiber less counterpart is presented in the Table III. The addition of polypropylene fibers led to an increase in dry density across all three groups. The highest increase was observed in mixture 2 (17% when compared to mixture 1), while the lowest was in mixture 4 (2.8% when compared with mixture 3). This increase is attributed to improved cohesion within the cement matrix and reduced void content due to the presence of fibers.

TABLE III. BULK DENSITY FOR EACH MIXTURE AND THE CALCULATED INCREASE IN PERCENTAGES

Mix Design Group	Density without Fibers (kg/m ³)	Density with Fibers (kg/m ³)	Density Increase (%)
Mixtures 1 & 2	491	575	17%
Mixtures 3 & 4	468	481	2.8%
Mixtures 5 & 6	451	479	6.2%

The compressive strength test was carried out based on the SRPS EN 12390-3:2019 standard using axial loading [10]. Polypropylene fibers had the greatest effect in mixtures with chemical foam and pozzolanic cement, significantly improving the structure under compressive loads, see Table IV.

TABLE IV. COMPRESSIVE STRENGTH FOR EACH MIXTURE AND THE CALCULATED INCREASE (OR DECREASE) IN PERCENTAGES

Mix Design Group	Strength without Fibers (MPa)	Strength with Fibers (MPa)	Change in Strength (%)
Mixtures 1 & 2	0.84	1.19	Increase of 41.7%
Mixtures 3 & 4	0.77	0.80	Increase of 3.9%
Mixtures 5 & 6	1.38	1.60	Increase of 15.9%

As shown in the table, in most mix designs, the addition of polypropylene fibers resulted in improved compressive strength, especially in mixture 2, with a significant increase of 41.7%. The reported 42% increase in compressive strength should be taken with caution, as it concerns very small values, for which testing devices also have lower accuracy. Only mixture 4 showed a slight decrease, which can be attributed to laboratory error or specific material properties.

The tensile strength test was conducted based on the SRPS EN 12390-6:2024 standard using flexural loading [11]. An increase in tensile strength was observed in all mixtures, indicating the fibers' effectiveness in reducing cracking and enhancing internal bonding, see Table V.

The table shows that adding polypropylene fibers significantly enhances the tensile strength of foam concrete, especially in mixture 2, with nearly 60% improvement. No data was available for mixture 3 (without fibers), but the overall trend shows a clear positive impact. Illustration of the fracture mechanism for this test is shown in Fig. 3.

TABLE V. TENSILE STRENGTH FOR EACH MIXTURE AND THE CALCULATED INCREASE IN PERCENTAGES

Mix Design Group	Strength without Fibers (MPa)	Strength with Fibers (MPa)	Change in Strength (%)
Mixtures 1 & 2	0.12	0.19	Increase of 58.3%
Mixtures 3 & 4	—	0.15	Data for non-fiber mix not available
Mixtures 5 & 6	0.14	0.18	Increase of 28.6%



Figure 3. Tensile test strength using flexural loading

Ultrasonic Pulse Velocity test was performed to assess the uniformity and internal integrity of the concrete. An increase in velocity in fiber-reinforced samples indicates enhanced compaction and fewer microcracks. For example, mixture 4 showed a 5.9% increase in velocity when compared to mixture 3 (without fibers), indicating improved foam concrete compactness. Test results are shown in Table VI.

TABLE VI. ULTRASONIC PULSE VELOCITY FOR EACH MIXTURE AND THE CALCULATED INCREASE IN PERCENTAGES

Mix Design Group	Ultrasonic Pulse Velocity without Fibers (m/s)	Ultrasonic Pulse Velocity with Fibers (m/s)	Velocity Increase (%)
Mixtures 1 & 2	1452	1684	15.9%
Mixtures 3 & 4	1547	1639	5.9%
Mixtures 5 & 6	1756	1811	3.1%

The Ultrasonic Pulse Velocity test is illustrated in Fig. 4. The time was measured and then the values of velocity were calculated based on time and length of the specimen.



Figure 4. Ultrasonic pulse velocity test illustration

In the flowchart shown in Fig. 5, bulk density, tensile strength, compressive strength and cracks results are compared, indicating improved performance in all parameters when polypropylene fibers are used.

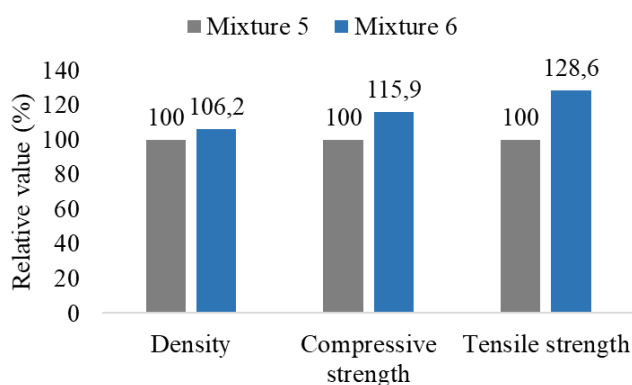


Figure 5. Comparison of physical and mechanical properties between mixtures with fibers and without fibers.

IV. CONCLUSIONS

Results show that the inclusion of polypropylene fibers slightly increases the density of the foam concrete, but has a significant positive effect on its mechanical properties. For instance, a comparison between mixture 5 (without fibers) and mixture 6 (with fibers) reveals that a mere 6.2% increase in density led to a 15.9% improvement in compressive strength and a 28.6% increase in tensile strength. Therefore, the addition of fibers is recommended as an effective means to enhance performance while potentially reducing cement demand.

Mixtures 1 and 2 utilized chemical foam, while mixtures 5 and 6 were made with protein-based foam. The results indicate that combining fibers with chemical foam significantly enhances the mechanical performance of foam concrete, leading to approximately 41% increase in compressive strength and 58% increase in tensile strength. Therefore, fibers act as an effective complement to chemical foam, enabling noticeable improvements in performance and potential cement reduction.

On the other hand, these results also reveal that the difference between chemical and protein foams becomes negligible when fibers are used. This suggests that the presence of fibers diminishes the direct influence of foam type on the overall quality of foam concrete. For instance, the compressive strength of the fiber-reinforced mix with chemical foam was 1.19 MPa, while with protein foam it was 1.60 MPa. However, the tensile strength of the mix with chemical foam was 0.19 MPa, compared to 0.18 MPa for the protein foam. These findings highlight that, in the presence of fibers, the foam type has a limited impact on tensile strength and a moderate effect on compressive strength.

The best overall performance was observed in the mix using pozzolanic cement, protein-based foam or chemical-based foam, and fibers. Future studies should focus on reducing the cement content in this optimal mix to help minimize environmental pollution caused by cement production, while maintaining or even enhancing concrete performance.

Also, as the fiber content was constant across all fiber-reinforced mixes in this study, it is recommended that future research investigates the effects of varying fiber dosages. The aim should be to identify the minimum cement content required to maintain desirable mechanical properties, contributing to more sustainable construction practices.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to express their sincere gratitude to Kian Foam Beton, based in Iran, especially Engineer Mahdi Kiana, for their generous financial support and technical assistance throughout the course of this research. This project would not have been possible without their commitment, provision of materials, and full funding. Their collaboration played a vital role in facilitating the experimental work and data acquisition necessary for this study. Also, the project was aided by The Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia and the Faculty of Civil Engineering of the University of Belgrade through a cooperation agreement (number 200092).

REFERENCES

- [1] K.-C. Thienel, T. Haller and N. Beuntner, "Lightweight concrete – From basics to innovations," *Materials*, vol. 13, no. 5, pp. 1120, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13051120>
- [2] Y. Fu, X. Wang, L. Wang and Y. Li, "Foam concrete: A state-of-the-art and state-of-the-practice review," *Advances in Civil Engineering*, vol. 13, pp. 1120, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/6153602>
- [3] A. N. Shankar, S. Chopade, R. Srinivas and N. K. Mishra, "Physical and mechanical properties of foamed concrete: A literature review,"

Materials Today: Proceedings, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.538>

- [4] G. Zhou and R. K. L. Su, "A review on durability of foam concrete," *Buildings*, vol. 13, no. 7, pp. 1880, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13071880>
- [5] L. Hou, J. Li, Z. Lu and Y. Niu, "Influence of foaming agent on cement and foam concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 280, pp. 122399, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122399>
- [6] Y. H. M. Amran, N. Farzadnia and A. A. Abang Ali, "Properties and applications of foamed concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 990–1005, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112>
- [7] A. Raj, D. Sathyan and K. M. Mini, "Physical and functional characteristics of foam concrete: A review," *Construction and Building Materials*, vol. 221, pp. 787–799, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.052>
- [8] C. Unterweger, O. Brüggemann and C. Fürst, "Synthetic fibers and thermoplastic short-fiber-reinforced polymers: Properties and characterization," *Polymer Composites*, vol. 35, no. 2, pp. 227–236, 2014. <https://doi.org/10.1002/pc.22654>
- [9] SRPS EN 12390-7:2019 Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete.
- [10] SRPS EN 12390-3:2019 Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens.
- [11] SRPS EN 12390-6:2024 Testing hardened concrete – Part 6: Tensile splitting strength of test specimens.

SAŽETAK

Pjenobeton je laki građevinski materijal sastavljen od cementa, vode i sredstva za pjenjenje. Prisustvo sredstva za pjenjenje značajno smanjuje gustinu betona, čineći ga lakšim od konvencionalnih betonskih mješavina. Ipak, zbog odsustva krupnog agregata, pjenobeton uopšteno pokazuje slabija mehanička svojstva u poređenju sa drugim vrstama lakih betona. Ovo istraživanje ispituje mogućnosti poboljšanja mehaničkih karakteristika pjenobetona primjenom polipropilenskih vlakana u betonskoj mješavini. Istraživanje je fokusirano na procjenu uticaja ovih vlakana na ključna svojstva predmetnog materijala, sa ciljem unapređenja strukturne otpornosti pjenobetona, a samim tim i njegovih mehaničkih svojstava. U eksperimentalnom dijelu korišćene su dvije vrste cementa: cement tipa II normalne toplotne hidratacije i cement tipa IV – pucolanski cement. Dobijeni rezultati pružaju dragocjene uvide u optimizaciju pjenobetona za širu primjenu u građevinarstvu, na osnovu ispitivanja čvrstoća pri savijanju i pritisku, kao i otpornosti prema habanju.

UTICAJ POLIPROPILENSKIH VLAKANA NA MEHANIČKA I FIZIČKA SVOJSTVA PJENOBETONA

Mohsen Kiana, Aleksandar Savić, Gordana Broćeta,
 Aleksandar Radević, Ehsan Kiana, Marina Aškračić, Nenad
 Ivanišević

Вода као просторни и временски елемент у архитектонском пројектовању

Уна Окиљ^{1,2}, Саша Чворо², Малина Чворо

^{1,2} Универзитет у Бањој Луци, Архитектонско-грађевинско-геодетски факултет,
una.okilj@aggf.unibl.org, sasa.cvoro@aggf.unibl.org, malina.cvoro@aggf.unibl.org

Сажетак— Овај рад истражује могућност замјене питке воде у објектима употребом кишнице и сиве воде. На основу хидролошке анализе падавина и унутрашње потрошње, разматра се у којој мјери алтернативни извори могу задовољити потребе за испирање тоалета. Анализирају се сценарији према броју корисника, ефикасности сакупљања и третману сиве воде, уз архитектонске факторе (кров, нагиб, филтрација). Резултати показују да се у оптималним условима може покрити до 98% потреба. И при већим губицима, покривеност остаје значајна. Рад промовише интегрисан приступ пројектовању и наглашава потребу за моделима који воду третирају као активан просторни ресурс.

Кључне ријечи—управљање водом; циркуларни водени токови; просторна и временска анализа;

I. УВОД

У контексту одрживог и ресурсно осјетљивог архитектонског пројектовања, вода се не посматра искључиво као технички ресурс неопходан за функционисање зграде, већ као динамичан и мултидимензионалан агенс унутар природног и изграђеног окружења. Њена појава, проток, складиштење и трансформација кроз различите фазе циклуса воде пружају основ за нове архитектонске и еколошке приступе који повезују простор, енергију, материју и вријеме. Архитектонски системи који интегришу атмосферске, унутрашње и прерађене воде у функционалну и просторну логику објекта постају платформа за имплементацију принципа циркуларне економије и еколошке одговорности. Такви системи прикупљања кишнице и рециклаже сиве воде већ су имплементирани у бројним савременим архитектонским пројектима, што указује на њихову практичну изводљивост и економску оправданост. Један од примјера је зграда “The Edge” у Амстердаму, која је добила титулу једне од најодрживијих јавних објеката на свијету. У овом објекту систем за сакупљање кишнице и третман сиве воде обезбјеђује преко 90% потреба за техничком водом, укључујући испирање тоалета и наводњавање унутрашњег зеленила (van der Meulen, 2019). Поред Амстердама, значајне примјене евидентирани су и у Аустралији, гдје бројне школе и универзитети користе прикупљену кишницу као извор техничке воде, што доводи до смањења оптерећења јавне водоводне мреже и трошкова одржавања (UNEP/IETC, 2009).

У складу са циљевима одрживог развоја УН – SDG 6 (Clean Water and Sanitation) и SDG 12 (Responsible Consumption and Production), оптимизација управљања водом представља кључни корак ка смањењу потрошње питке воде, повећању аутономности зграда и подршци локалним еколошким процесима (UN, 2015; UNEP, 2016). Савремени стандарди као што су EN ISO 16075-1:2020 (Guidelines for treated wastewater reuse for irrigation), SRPS EN 12566-3 (Small wastewater treatment systems) и препоруке EPA Guidelines for Water Reuse (2012) пружају основу за имплементацију локалних рјешења уз поштовање хигијенско-техничких и еколошких критеријума (ISO, 2020; CEN, 2005; EPA, 2012).

Студија случаја у овом раду је зграда Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета Универзитета у Бањој Луци, смјештене унутар заштићене природне цјелине Универзитетског града. На основу мјесечне анализе падавина, података о површини крова и процијењеној потрошњи воде, истражује се у којој мјери је могуће покрити потребе за испирањем тоалета кишницом, те какве су временске и количинске корелације између природне понуде и техничке потражње. Добијени резултати указују не само на потенцијал уштеде питке воде, већ и на важност адаптивног управљања водом унутар зграде у складу са сезонским флукуацијама и климатским условима.

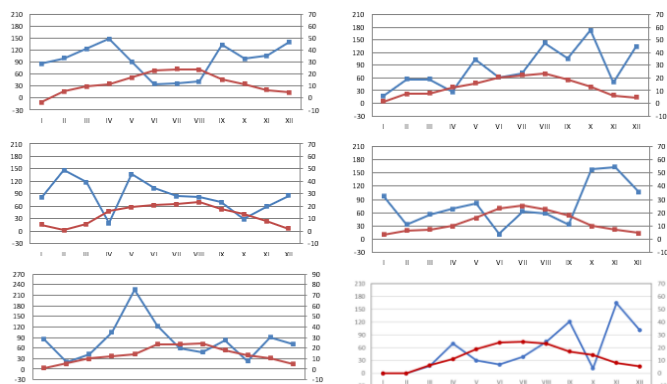
II. ПОТЕНЦИЈАЛ КИШНИЦЕ

У контексту холистичког и ресурсно оријентисаног пројектовања, атмосферска вода представља један од најзначајнијих обновљивих локалних ресурса. Кишница, као директан производ природног хидролошког циклуса, има потенцијал да се интегрише у архитектонски систем као техничка вода за употребу у санитарним уређајима, одржавању зелених површина или хидрауличком регулисању микроклиме. Њено коришћење утиче на смањење притиска на систем питке воде, али и на смањење отпадних токова у канализацији, што је у складу са циљевима одрживог развоја SDG 6 и SDG 12.

Планирање употребе кишнице у архитектури захтијева детаљну хидролошку анализу, с циљем да се уоче закономјерности и флукуације у количини падавина, као и да се процени реална употребљивост овог ресурса. Оваква анализа мора да укључи годишњи, сезонски и мјесечни распоред падавина у односу на расположиве

сакупљачке површине, као и температуру ваздуха која утиче на испаравање и режим коришћења.

У наставку је приказана упоредна анализа годишњих расподјела падавина и температуре за период 2017–2023. године на подручју града Бања Лука, која служи као основа за процјену реалне количине расположиве кишнице на истраживаној локацији — крову зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета у Универзитетском кампусу у Бањој Луци.



Сл. 1. Годишњи распоред падавина и средње температуре за период 2017–2022: упоредна анализа

Анализом свих графика на у периоду од 2017. до 2022. године уочава се да је укупна годишња количина падавина релативно уједначена, с просјечном вриједношћу од око 1320 l/m² годишње. Ипак, расподјела падавина током године показује значајне варијације по мјесецима и годинама, што указује на нестабилан режим падавина у смислу временског распореда. Упркос тим варијацијама, јасно се издвајају прољећни и јесењи мјесеци као најизраженији периоди појачаних падавина, док су лјетњи мјесеци нешто стабилнији, а зимски показују мање и уједначене количине. Година 2023. није одступала од укупне количине падавина, али је њена унутаргодишња расподјела потврдила овај образац са израженим пиковима у мају и новембру, што има директне импликације на капацитете и динамику система за локалну обраду отпадне воде.



Сл. 2. Годишњи распоред падавина и средње температуре за 2023. годину, Универзитетски град

Укупна количина падавина на анализираној локацији у 2023. години износила је 1271.7 l/m². Расподјела по сезонама показује највеће вриједности у прољеће (445.6 l/m²) и јесен (374.7 l/m²), док су зима (248.1 l/m²) и лјето (203.3 l/m²) значајно мање заступљене. Иако укупна

количина падавина на локацији може дати висок теоријски потенцијал за прикупљање кишнице, реална искористивост варира између 50% и 90% у зависности од карактеристика крова, техничке опремљености система и сезонске расподјеле падавина. Прорачун ефективне количине воде за употребу у санитарним системима мора узети у обзир све наведене губитке.

Ефикасност сакупљања кишнице у значајној мјери зависи од карактеристика површине са које се прикупља вода. Врста кровног покривача, његова текстура, нагиб и материјал утичу на способност одвођења и на степен губитака. У пракси се користи коефицијент сакупљања (runoff coefficient) који представља проценат падавина који се може ефективно сакупити са дате површине. Према стандардима EN ISO 16075-1:2020 и извештајима UNEP/IETC (2009), просјечне вриједности коефицијената сакупљања приказани су у табели 1.

ТАБЕЛА 1. КОЕФИЦИЈЕНТИ САКУПЉАЊА КИШНИЦЕ У ЗАВИСНОСТИ ОД ТИПА ПОВРШИНЕ КРОВА (ПРЕМА ISO 16075-1:2020 и UNEP, 2009)

Тип површине	Опис	Коефицијент сакупљања (C)
Глатки метални кров (цинк, алуминијум)	Неупијајућа површина, добра дренажа	0.90 – 0.95
Бетонски кров (необрађен)	Тврда површина, минимална апсорпција	0.75 – 0.85
Цријеп / керамички кров	Упија минималну количину, добар проток	0.80 – 0.90
Битуменска мембрана	Равни кров са битуменским покривачем	0.70 – 0.85
Шљунак (без вегетације)	Равна површина прекривена шљунком	0.40 – 0.60
Шљунак на пропусној подлози	Нестабилна дренажа, дио падавина се губи у подлози	0.20 – 0.40
Екстензивни зелени кров	Лаган супстрат, ограничена вегетација, задржава воду	0.30 – 0.50
Интензивни зелени кров	Дебљи супстрат, густа вегетација, велика апсорпција	0.20 – 0.40

Ефективност сакупљања кишнице у великој мјери зависи од врсте кровног покривача и физичких карактеристика површине. Како је приказано у табели, неупијајуће и глатке површине, нпр. метални кровови, омогућавају највећи степен искоришћења падавина (коефицијент сакупљања до 0.95), док површине са вегетацијом или непермеабилним супстратом, попут зелених кровова и шљунковитих површина, задржавају значајан дио воде и имају знатно нижи коефицијент (0.20–0.50).

Нагиб крова има значајан утицај на ефикасност сакупљања кишнице, иако не утиче директно на количину падавина, која се мјери по хоризонталној пројекцији површине. Његов утицај огледа се прије свега у брзини отицања воде, степену задржавања и могућим губицима при сакупљању. Код кровова са малим нагибом (мањим од 5%), долази до споријег отицања воде, што може резултирати већим испаравањем, задржавањем на површини или чак продором у кровну конструкцију уколико површина није технички прилагођена. Са друге стране, кровови са средњим нагибом (од 5 до 30%)

омогућавају брзо и контролисано отицање воде према сакупљачима, те се сматрају оптималним у погледу ефикасности сакупљања, која у том случају достиже 85 до 95%. Кровови са великим нагибом (преко 30%) могу довести до губитака јер се вода креће великом брзином и често прска или прелази преко ивице сакупљача, нарочито током интензивних падавина. Стога, при прорачуну расположиве количине кишнице, поред избора кровног покривача, мора се узети у обзир и нагиб крова као фактор који утиче на укупан коефицијент сакупљања и реалну доступност воде за техничку употребу.

Иако се укупна количина годишњих падавина може квантификовати као потенцијални ресурс, стварна количина кишнице која се може технички искористити зависи од више фактора – прије свега од ефикасности система сакупљања и припреме воде за употребу. Током процеса прикупљања и филтрације долази до низа губитака, од првог испирања крова (first flush), преко задржавања у филтерима, до испаравања и преливања. Да би се та количина реално процијенила, користе се коефицијенти корисног приноса који узимају у обзир тип покривача, дизајн система и фазе пречишћавања. Због тога је од изузетне важности примјена система за одвајање првог тока, као и адекватно затварање резервоара како би се спрјечило секундарно загађење. У случајевима гдје се кишница користи за шире техничке намјене, пожељно је укључити додатне фазе пречишћавања, у складу са препорукама стандарда ISO 16075-1:2020, EPA Guidelines for Water Reuse (2012) и WHO (2006), који дефинишу минималне хигијенске услове за поновну употребу воде у техничке сврхе.

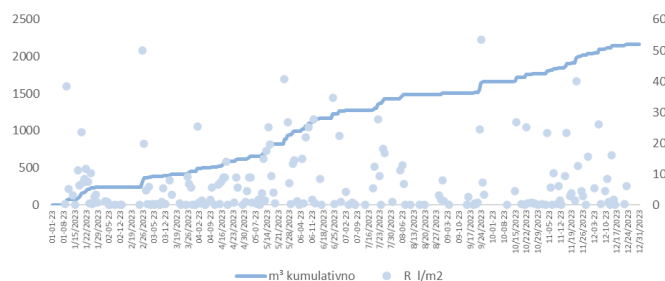
ТАБЕЛА 2. ГУБИЦИ ТОКОМ ПРИПРЕМЕ КИШНИЦЕ ЗА ТЕХНИЧКУ УПОТРЕБУ

Фаза система	Проценат губитка	Опис губитка
Први ток воде (first flush)	5–10%	Испирање површина од прашине, полена, измета птица, не улази у резервоар
Филтрација (механичка и биолошка)	2–5%	Задржавање воде у шљунку, пијеску, угљену; губици у филтрационом слоју
Испаравање и процјеђивање	1–3%	У случају отворених или незаптивених резервоара
Прелив и технички губици	1–2%	Преливање при јачим падавинама, цурења, системски губици
Укупни процијењени губици	10–20%	

У пројектовању система за сакупљање и употребу кишнице, препоручује се да се у прорачунима узима у обзир минимално 15% губитака, што значи да од укупне количине падавина само 80–90% може бити технички расположиво. Ова корекција је посебно важна приликом пројектовања складишних капацитета и процјене потенцијала замјене питке воде за санитарне сврхе. Ови подаци указују да је количина кишнице доступна за техничку употребу снажно условљена архитектонским рјешењем, типом површине и организацијом система.

У случају анализираних локације, укупна количина падавина у 2023. години износила је 1271.7 l/m². Узимајући у обзир површину крова од 2000 m² и

ефикасност сакупљања која варира у зависности од избора покривача и техничког система, реална количина технички искористиве кишнице креће се у распону од приближно 570 до 1080 m³ на годишњем нивоу. Овако велики распон резултат је комбинованог утицаја коефицијента сакупљања (у зависности од типа крова), као и процијењених губитака током процеса прикупљања, пречишћавања и складиштења. На Сл. 3 приказан је годишњи обрачун потенцијалне количине сакупљене кишнице уз ефикасност сакупљања од 85% од укупне количине падавина по јединици површине.



Сл. 3. Кумулативна количина сакупљене кишнице и дневне падавине током 2023. године на локацији Универзитетског камуса у Бањој Луци (крвна површина 2000 m², ефикасност сакупљања 85%)

Дијаграм приказује најповољнији сценарио у којем су оптимизовани сви елементи система сакупљања кишнице – укључујући кровни материјал са високим коефицијентом отицања, средњи нагиб крова и минималне губитке у филтрацији. Кумулативна анализа падавина показује изражену сезонску неравномјерност, са доминантним количинама у прољећним и јесењим мјесецима. Љетни периоди су нестабилни и испрекидани, док зимски мјесеци имају ниже, али релативно стабилне приносе. Крива кумулативне расподеле падавина потврђује динамичку и цикличну појаву ресурса, која је временски асинхрона у односу на унутрашњу потрошњу у објекту. Ова временска неусклађеност између понуде и потражње захтијева пажљиво планирање, нарочито у погледу димензионисања резервоара, избора система и оптимизације искористивости. У наредном поглављу разматра се ритам производње отпадне воде унутар објекта, као основа за реалну процјену могућности замјене питке воде у техничке сврхе.

III. ПРОИЗВОДЊА ОТПАДНЕ ВОДЕ УНУТАР ОБЈЕКТА

Након детаљне анализе сезонске динамике падавина, капацитета сакупљања и утицаја архитектонских и техничких фактора на искористивост кишнице, потребно је сагледати унутрашњу структуру и обим потрошње воде у објекту како би се утврдиле реалне могућности замјене питке воде у техничким системима, посебно у функцији испирања тоалета. Поред кишнице, која представља периодичан, али значајан ресурс, унутрашњи водни циклус зграде укључује и сиву воду као потенцијални секундарни извор, чија се филтрација може реализовати локално и искористити у сврхе за које није потребна хигијенски исправна вода. Све ово указује на потребу

деталне анализе динамике производње отпадне воде, као предуслова за развој система који усклађују улазне ресурсе са конкретним потребама објекта.

Интерни водни токови идентификују сегменте у којима се питка вода троши у техничке сврхе, што отвара простор за њену замјену кишницом или прерађеном водом. Унутрашња потрошња воде у јавним и образовним објектима углавном се односи на санитарну употребу, при чему се испирање тоалета издваја као највећи појединачни потрошач питке воде. Према подацима Европске агенције за животну средину и критеријумима DGNB система за одрживу градњу, испирање тоалета може да учествује са 30–40% у укупној дневној потрошњи воде у зградама (DGNB, 2020; EEA, 2017). Ова категорија воде, која након употребе постаје црна отпадна вода, не захтијева квалитет питке воде, што је чини погодном за снабдијевање из алтернативних извора. Са друге стране, сива вода настаје из умиваоника, тушева, машина за прање и других хигијенских уређаја. Иако се често занемарује у системима за рециклажу, она има значајан потенцијал за поновну употребу након једноставне филтрације (ISO 16075-1:2020). Унутрашњи токови воде у објекту могу се квантификовати на основу броја корисника, функције простора и учесталости употребе, што представља основу за израду сценарија оптимизације система водоснабдијевања и канализације. Прорачун производње отпадне воде, на примеру зграде Архитектонско-грађевинско-геодетског и Шумарског факултета у Бањој Луци, изведен је са циљем идентификације капацитета који се могу парцијално или у потпуности подмирити кишницом.

На основу 554 корисника (редовни и први пут уписани студенти основних студија 2023/24 године и сви стално запослени – наставно и административно особље) и просјечне учесталости употребе тоалета од 2.5 пута дневно по особи, уз просјечну потрошњу од 6 литара по испирању, добија се слjedeћа дневна потрошња воде за санитарне потребе:

$$554 \text{ особа} \times 2.5 \text{ употреба} \times 6 \text{ литара} = 8310 \text{ литара/дан} = 8.3 \text{ l m}^3/\text{дан}$$

Поред тога, прање руку након сваког коришћења тоалета подразумева просјечну потрошњу од 3 литра по особи, што резултира са:

$$554 \text{ особа} \times 2.5 \times 3 = 4155 \text{ литара/дан} = 4.155 \text{ m}^3/\text{дан}$$

Годишњи обим потрошње воде зависи од броја дана када је објекат у активної употреби. У складу са академским календаром, процјењује се да се зграда користи приближно 215 дана годишње, што резултира:

$$12.465 \text{ m}^3/\text{дан} \times 215 \text{ дана} = 2,679.975 \text{ m}^3/\text{годишње}$$

Од укупно 2,679.975 m³ потрошене воде годишње око 66% (1,786.65 m³) представља црну воду (непогодна за поновну употребу), док преосталих 34% (893.325 m³) чини сиву воду. Ова укупна количина отпадне воде (сива + црна) представља укупан унутрашњи водни ток који се генерише током радних дана. Сезонска динамика отпадне воде директно прати присуство корисника у објекту и одражава структуру академског календара. Остварена

количина отпадне воде, дефинисана бројем корисника и фреквенцијом употребе санитарних простора, представља основну полазну тачку за разумијевање унутрашњих водних токова у објекту. Међутим, да би се овај водни ток сагледао у архитектонском и ресурсном контексту, неопходно је његово временско позиционирање.

Подаци су директно везани за настанак отпадне воде као резултат активности корисника у простору, док је њена сезонска и дневна динамика утиче на укупан волумен и појаве воде као периодичног ресурса. У наставку, сезонска анализа у оквиру академског календара омогућава да се овај унутрашњи ток воде појави као временски мапиран параметар, основ за каснију упоредну анализу са другим ресурсима.

ТАБЕЛА 3. ПРОЦИЈЕЊЕНА ОТПАДНА ВОДА (m³) ПО СЕЗОНИ ПРЕМА АКАДЕМСКОМ КАЛЕНДАРУ ЗА 2023-24 ГОДИНУ

Сезона	Број радних дана*	Процјена учесталости коришћења објекта	Процијењена отпадна црна вода (m ³)	Процијењена отпадна вода укупно (m ³)
Зима	60	Висока (настава + испити)	498.6	747.9
Прољеће	60	Висока (настава + испити)	498.6	747.9
Љето	30	Ниска (испити + пауза)	249.3	373.95
Јесен	65	Висока (настава + испити)	540.15	810.225
Укупно			1786.65	2679.975

Након анализе сезонске расподеле активности унутар објекта на основу академског календара, и утврђивања броја радних дана по сезони, добијена је процјена укупне количине отпадне воде која се генерише током године. Процијењена количина отпадне воде током 2023/24. академске године износи приближно 2679.975 m³, узимајући у обзир активност зграде током 215 радних дана (понедељак–петак, умањено за празнике и паузе). Ова количина укључује како санитарну потрошњу (вода за испирање WC-а), тако и техничку воду (вода из умиваоника након прања руку), те представља укупни водни ток који настаје као резултат редовног коришћења простора од стране 554 корисника. Процијењене вриједности отпадне воде по сезонама (зима, прољеће, љето, јесен) осликавају динамику присуства корисника и омогућавају каснију упоредну анализу са понудом других ресурса, попут кишнице или сиве воде.

Капацитети у објекту, према броју санитарних јединица, имају капацитет од приближно 1300 корисника дневно, што представља потенцијалну максималну производњу отпадне воде у оквиру његовог функционалног оптерећења. Та вриједност укључује све студенте, наставно и ненаставно особље, као и спољашње кориснике током наставе и ваннаставних активности. Иако се у анализи користи узорак од 554 редовно активна корисника, при чему су изостављени студенти другог циклуса и они који обнављају годину, укупни капацитет објекта остаје релевантан као горња граница при

пројектовању система за прикупљање и рециклажу воде. У том случају потрошња воде на испирање би била 19,5 м³/дан, а укупна годишња потрошња 4,192.5 м³. Полазећи од могућности да се кишница користи као техничка вода за испирање тоалета, поставља се питање: може ли систем за сакупљање и употребу кишнице бити димензионисан тако да покрије варијабилне потребе током године и значајно умањи потрошњу питке воде у санитарним чворовима?

IV. МОГУЋНОСТ УШТЕДЕ ПИТКЕ ВОДЕ

Питка вода представља ресурс од суштинске важности за живот и јавно здравље, али се унутар архитектонских објеката често користи у сврхе за које није неопходно да испуњава стандарде за људску потрошњу. Испирање тоалета, прање руку, чишћење и друге техничке функције знатно доприносе укупној потрошњи воде, иако за те намјене није потребан квалитет који захтијева скупу припрему и санитарну контролу. Ова пракса указује на могућности за увођење алтернативних извора, као што су кишница или третирана сива вода, што би омогућило значајне уштеде у систему водоснабдијевања. У складу са принципима одрживе изградње и стандардима као што су DGNB Criteria Set for New Buildings (DGNB, 2020) и EN ISO 16075-1:2020 за реупотребу третиране воде, у архитектури се све више инсистира на сегрегацији водених токова према квалитету и могућности поновне употребе. Такви приступи подржавају и циљеве одрживог развоја, прије свега SDG 6 (Чиста вода и санитарни услови) и SDG 12 (Одговорна потрошња и производња), који промовишу ефикасно коришћење ресурса и смањење оптерећења на постојећу инфраструктуру. Иако према State of Water Report for Bosnia and Herzegovina (UNECE, 2018), БиХ није земља са високим индексом водног стреса, глобални трендови указују на потребу за предвиђањем и превенцијом. Локално увођење система који смањују потрошњу питке воде постаје не само еколошки, већ и економски приоритет. У том контексту, анализа могућности замјене питке воде у санитарним чворовима кишницом, као релативно чистим и доступним ресурсом, представља један од првих корака ка стварању ефикасног, адаптивног и ресурсно одговорног архитектонског система.

С обзиром на претходно анализирану динамику потрошње воде у објекту и утврђене могуће количине сакупљања кишнице на годишњем и сезонском нивоу, у наставку је приказана упоредна табеларна анализа која сажима сценарије замјене питке воде у санитарним системима. Циљ анализе је да се, на основу дефинисаних параметара (број корисника, ефикасност сакупљања кишнице, учинак филтрације сиве воде), прикажу различити модели потенцијалне покривености потрошње техничком водом.

Прорачун обухвата два нивоа капацитета — тренутни број корисника (554) и максимални капацитет објекта (1300). За сваки сценарио узети су у обзир ефикасности сакупљања кишнице од 60% (шљунковити кров) и 85% (оптимално), као и опција допунске филтрације сиве воде, са учинком од 70%. Укупна количина кишнице доступна

за техничку употребу уз 85% ефикасности сакупљања износи 1080.95 м³ годишње, док при 60% износи 648.58 м³. Паралелно, количина повратне сиве воде која се може добити филтрацијом износи 625.33 м³ за 554 корисника, односно 1467.38 м³ за 1300 корисника. Уз ове улазне податке формиран су сценарији који комбинују различите изворе воде — појединачно или у комбинацији — са циљем да се дефинишу оквири реалне покривености потрошње у функцији испирања тоалета.

ТАБЕЛА 4. СЦЕНАРИЈИ ЗАМЈЕНЕ ПИТКЕ ВОДЕ ЗА ИСПИРАЊЕ ТОАЛЕТА

Сценарио	Број корисника	Потрошња воде за испирање (м ³)	Замјенска вода (м ³)	Покривеност (%)
Кишница (60% сакупљања, шљунак)	554	1786.65	648.58	36.3
Кишница 60% + сива вода (70% филтрације)			1320.76	73.9
Кишница (85% сакупљања)			1080.95	60.5
Кишница 85% + сива вода (70% филтрације)			1753.13	98.1
Кишница (60% сакупљања, шљунак)	1300	4192.50	648.58	15.5
Кишница 60% + сива вода (70% филтрације)			2236.58	53.4
Кишница (85% сакупљања)			1080.95	25.8
Кишница 85% + сива вода (70% филтрације)			2969.39	70.8

Анализа представљених сценарија показује да потенцијал уштеде питке воде значајно варира у зависности од архитектонских и техничких фактора. У оптималним условима, уз ефикасност сакупљања кишнице од 85% и укључену филтрацију сиве воде, као комбиновани систем има капацитет покривања до 98.1% годишњих потреба за испирање тоалета у тренутном режиму коришћења објекта (554 корисника). Насупрот томе, у условима повећаних губитака (сценарио са 60% ефикасности сакупљања), покривеност опада на 73.9%, што је и даље значајна уштеда.

У случају максималног капацитета објекта од 1300 корисника, покривеност се смањује, али чак и тада, у комбинацији оба извора (кишница и филтрирана сива вода), техничком водом се може замијенити између 53,4% и 70,8% потребне количине. Ови резултати указују да архитектонски избори, попут типа крова, нагиба, начина сакупљања и складиштења, али и укључивање сиве воде као секундарног ресурса, играју кључну улогу у димензионисању и ефикасности система. Представљени сценарији показују да се архитектонским прилагођавањем система за прикупљање и поновну употребу воде може постићи значајна уштеда питке воде. У тренутним капацитетима, за 2023.годину, кишница покрива 60,5% потреба. Комбинацијом са сивом водом, укупна покривеност могла би достићи и до 98% у најповољнијем

сценарију. Ови резултати указују да кишница и сива вода нису само допуна, већ могу постати основ управљања санитарним системом у архитектури.

Поред уштеде питке воде, сакупљање кишнице има и шири урбаноеколошки значај. Према климатским пројекцијама за регион Балкана, очекује се пораст екстремних временских појава – интензивних падавина у кратким интервалима, уз општи тренд смањења укупне количине годишњих падавина (World Bank, 2021). Ова динамика повећава ризик од урбаних поплава, нарочито у зонама са недовољно димензионисаном канализационом инфраструктуром. Системи за сакупљање и локално задржавање кишнице могу значајно смањити површинско отицање, умањити оптерећење канализације и допринијети превенцији поплава, чиме се додатно оправдава њихова примјена у контексту климатске адаптације.

Процјене трошкова имплементације система за сакупљање кишнице и третман сиве воде варирају у зависности од типа објекта, димензија система и степена аутоматизације. Према подацима Европске агенције за животну средину (ЕЕА), иницијална инвестиција износи од 50 до 150 € по m² кровне површине, са просјечним периодом поврата од 6 до 10 година у образовним и јавним објектима. У зградама са високом фреквенцијом коришћења, ова инвестиција могла би бити економски исплатива већ у средњорочном периоду.

V. ЗАКЉУЧАК

Резултати овог истраживања показују да архитектура има капацитет да преобликује начин управљања водом у зградама, усмјеравајући системе ка већој ефикасности и синхронизацији са природним токовима. Кроз анализу сезонске расподеле падавина, карактеристика кровних површина, унутрашњих водних токова и капацитета корисника, утврђено је да кишница и сива вода могу постати значајан, па чак и доминантан извор воде за испирање тоалета. У оптималном сценарију, техничком водом може се покрити до 98% те потребе, док чак и у условима нижег учинка сакупљања и већег броја корисника покривеност остаје преко 50%.

Истраживање указује да је временска неусклађеност између понуде (кишница) и потражње (унутрашња потрошња) кључни изазов, али и прилика за пројектовање адаптивних система складиштења и управљања. Комбинацијом два локално доступна ресурса — атмосферске и третиране отпадне воде — могуће је смањити ослањање на централизовано снабдијевање, ублажити еколошки отисак и повећати отпорност зграда.

Овакав приступ не захтијева сложене технолошке иновације већ логичну просторну оптимизацију и коришћење постојећих водних токова. Потребно је редеофинисати воду не као секундарни нуспроизвод архитектуре, већ као активан и временски одређен ресурс који обликује простор, ритам и функционалност зграде.

Овакви модели интегрисаног пројектовања представљају кључни корак ка еколошки одговорној архитектури будућности.

ЛИТЕРАТУРА

- CEN. (2005). EN 12566-3: Small wastewater treatment systems for up to 50 PT. European Committee for Standardization.
- DGNB. (2020). DGNB Criteria Set for New Construction Buildings – Version 2020 International. German Sustainable Building Council.
- EEA – European Environment Agency. (2012). Water Reuse in Europe: Relevant Guidelines, Needs for and Barriers to Innovation. EEA Technical Report No 1/2012. Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/publications/water-reuse-europe>
- EEA. (2017). Water use in Europe — Quantity and quality face big challenges. European Environment Agency.
- EPA. (2012). Guidelines for Water Reuse (EPA/600/R-12/618). United States Environmental Protection Agency.
- ISO. (2020). SRPS EN ISO 16075-1:2020 – Guidelines for treated wastewater reuse for irrigation – Part 1: General. International Organization for Standardization.
- M. Young. (1989). The Technical Writer's Handbook. Mill Valley, CA: University Science.
- UNECE. (2018). State of Water Report for Bosnia and Herzegovina. United Nations Economic Commission for Europe.
- UN. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development. United Nations.
- UNEP. (2016). A Snapshot of the World's Water Quality: Towards a Global Assessment. United Nations Environment Programme.
- UNEP/IETC. (2009). Rainwater Harvesting: A Lifeline for Human Well-being. United Nations Environment Programme / International Environmental Technology Centre.
- Van der Meulen, T. (2019). Smart & Sustainable Building: The Edge, Amsterdam. Deloitte Netherlands.
- WHO. (2006). Guidelines for the Safe Use of Wastewater, Excreta and Greywater. Volume 4: Excreta and Greywater Use in Agriculture. World Health Organization.
- World Bank. (2021). Bosnia and Herzegovina: Climate Risk Country Profile. Washington, DC: The World Bank Group. <https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>

ABSTRACT

This paper explores the potential for substituting potable water in buildings using rainwater and greywater. Based on a hydrological analysis of precipitation and indoor water use, the study assesses how alternative water sources can supply toilet flushing. Scenarios are analysed by occupancy, rainwater harvesting efficiency, and greywater treatment, accounting for resource variability and architectural factors (roof type, slope, filtration). Results show up to 98% of demand can be met under optimal conditions. Even with losses and higher occupancy, coverage remains substantial. The paper promotes integrated design and calls for models treating water as an active spatial resource.

WATER AS A SPATIAL AND TEMPORAL ELEMENT IN ARCHITECTURAL DESIGN

Una Okilj, Saša Čvoro, Malina Čvoro

Analiza disperzije onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora u urbanoj sredini primjenom numeričkih metoda

Dominik Pavlović¹, Jakov Baleta¹

¹ Sveučilište u Zagrebu Metalurški fakultet, Sisak, Hrvatska

Autor za korespondenciju: Jakov Baleta, baleta@simet.hr

Sažetak — Povećanje koncentracija onečišćujućih tvari u okolišu predstavlja ozbiljan rizik za ljudsko zdravlje i ekosustave. Suвременa tehnologija omogućuje nadzor i smanjenje emisija, čime se reducira i kontrolira negativan utjecaj na okoliš. Ovaj rad prikazuje primjenu numeričkih metoda kao alata za analizu onečišćujućih tvari u urbanim sredinama, s naglaskom na disperziju emisija iz stacionarnih izvora. Primjena numeričkih metoda provoditi će se kroz računalnu dinamiku fluida (RDF) gdje će se simulirati disperzija onečišćujućih tvari iz TE-TO Sisak i INA Rafinerije Sisak tijekom jednog reprezentativnog dana. Osim dobivenih podataka za industrijske izvore, zadat će se i meteorološki uvjeti koji su preuzeti iz numeričkih sustava za atmosferska istraživanja i prognoze vremena. Rezultati su prikazani u obliku rasprostranjenosti dimnih perjanica te koncentracije SO_2 i NO na različitim visinama. Treba naglasiti da se analizom pokazalo kako tijekom promatranog razdoblja nisu zabilježena prekoračenja graničnih vrijednosti za SO_2 u naseljenim zonama, što ukazuje na zadovoljavajuću kvalitetu zraka.

Ključne riječi — računalna dinamika fluida; disperzija onečišćujućih tvari; urbana sredina; emisije SO_2 ;

I. UVOD

Industrijski razvoj i porast svjetske populacije uzrokuju povećanu potrošnju energije, što rezultira emisijama onečišćujućih tvari koje negativno utječu na zdravlje ljudi i okoliš. Najveći udio energije i dalje se dobiva iz fosilnih goriva, čime se povećavaju koncentracije stakleničkih plinova i produkata izgaranja kao što su NO_x , SO_x i CO , što doprinosi globalnom zatopljenju, kiselim kišama i degradaciji zraka [1]. Zrak, voda i tlo izloženi su i prirodnim i antropogenim izvorima onečišćenja, pri čemu ljudske aktivnosti imaju dominantan utjecaj.

U ovom radu analizira se disperzija onečišćujućih tvari iz nepokretnih industrijskih izvora pomoću metode kontrolnih volumena i računalne dinamike fluida. Učinkovitost RDF-a u modeliranju disperzije onečišćujućih tvari iz industrijskih dimnjaka u urbanoj sredini opisana je i potvrđena u literaturi [2], pri čemu ova studija predstavlja RDF simulaciju disperzije CO_2 iz termoelektrane u urbanom području. U navedenom radu je postignuto zadovoljavajuće slaganje simulacijskih i eksperimentalnih rezultata, gdje je pogreška simulacije jedan red veličine manja od pogreške mjerenja.

Simulacija u ovom radu provedena je za područje grada Siska koristeći emisijske podatke iz TE-TO Sisak i INA Rafinerije Sisak te meteorološke podatke iz WRF modela.

Poseban naglasak stavljen je na ispitivanje prostorne raspodjele koncentracija SO_2 i NO , s ciljem ocjene utjecaja industrije na kvalitetu zraka u urbanom okruženju. Rezultati simulacije analizirani su na različitim visinama domene, a rad uključuje opis korištenih postrojenja, matematičkog modela te postavki numeričkog proračuna. Na kraju su izneseni zaključci i preporuke za daljnja istraživanja.

II. OPIS URBANE SREDINE I INDUSTRIJSKIH IZVORA

Urbanu sredinu u radu predstavlja Grad Sisak, koji je ujedno i upravno središte Sisačko-moslavačke županije. Smješten je na jugoistočnom dijelu sjeverozapadne Hrvatske i prostire se na površini od $422,8 \text{ km}^2$ s oko 40 000 stanovnika. Zahvaljujući položaju uz plovne rijeke Savu, Kupu i Odru, Sisak je povijesno razvijao snažnu industriju, trgovinu i promet. U periodu industrijskog jačanja, najznačajniji utjecaj na okoliš su imala postrojenja koja su se nalazila u Rafineriji nafte (INA) te HEP-ova termoelektrana [3]. Navedene dvije industrije su ujedno i glavni izvor onečišćenja u radu.

III. MATEMATIČKI MODEL

Razvijene su različite numeričke metode za rješavanje složenih problema u računalnoj dinamici fluida. Među njima, metoda konačnih volumena numerička je tehnika koja se koristi za rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednadžbi koje predstavljaju zakone očuvanja, dijeleći područje na kontrolne volumene i osiguravajući ravnotežu tokova na njihovim granicama. Zahvaljujući svojim konzervativnim svojstvima i mogućnosti primjene na strukturiranim i nestrukturiranim mrežama, metoda konačnih volumena izuzetno je pogodna za analizu problema koji uključuju strujanje fluida, prijenos topline i difuziju [4].

U računalnoj dinamici fluida, kako bi simulacije bile realistične i točne, važno je osigurati očuvanje nekoliko ključnih zakona fizike, a to su: zakon očuvanja mase, zakon očuvanja količine gibanja, zakon očuvanja energije, i zakon očuvanja kemijske vrste. Standardna transportna jednadžba predstavlja opći matematički oblik koji objedinjuje zakone očuvanja u analizi strujanja fluida. Ova metoda omogućava precizno modeliranje prijenosa tvari, energije, gibanja i kemijskih reakcija unutar fluida, osiguravajući da su svi zakoni pravilno očuvani tijekom simulacije, čime se postiže visoka preciznost i realističnost u rezultatima. Kroz matematički model, računalna dinamika fluida rješava algebarske oblike opće transportne jednadžbe (1), koja se može prikazati sljedećim izrazom:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i \phi)}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\gamma \phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) = S_\phi(\phi). \quad (1)$$

U navedenoj jednačbi, prvi član s lijeve strane predstavlja nestacionarni član, koji opisuje lokalnu vremensku promjenu promatranog fizikalnog svojstva. Drugi član predstavlja konvekcijski doprinos, odnosno transport svojstva uzrokovan strujanjem fluida. Treći član je difuzijski član, koji predstavlja difuzijski tok kroz stranice prostornog volumena, dok zadnji član označava volumensku gustoću nastajanja ili nestajanja fizikalnog svojstva [1].

IV. POSTAVKE NUMERIČKE SIMULACIJE

Simulacija se provodi u komercijalnom računalnom paketu AVL Fire® koji predstavlja industrijski standard za računalnu dinamiku fluida u području motora s unutrašnjim izgaranjem. Upotrebom ovog programa potrebno je odrediti geometriju, postaviti mrežu kontrolnih volumena, zadati početne i rubne uvjete. Postavke simulacije uključuju parametre ulaznog vjetra, pri čemu su podaci preuzeti iz meteorološkog modela WRF (eng. *Weather Research and Forecasting*), koji se koristi za prognoze i atmosferska istraživanja.

Simulacija se provodi za urbano područje grada Siska, pri čemu je domena s definiranim rubnim uvjetima oblikovana prema Sl. 1 i koordinatnim točkama grada (Tablica 1).



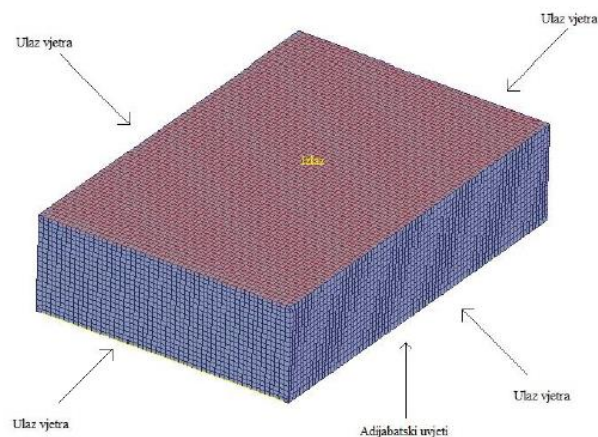
Sl. 1. Prikaz područja grada Siska [5]

Rubne točke koje opisuju geometriju grada Siska zadane su koordinatnim točkama koje su navedene u Tablici 1.

TABLICA 1. KOORDINATNE TOČKE KOJE PREDSTAVLJAJU KRAJNJE TOČKE DOMENE

Točke	Zemljopisna širina, °	Zemljopisna dužina, °
1 (ishodište)	45,436587	16,353278
2	45,436587	16,423981
3	45,510633	16,423981
4	45,510633	16,353278

Ulazni podaci za vjetar odnose se na četiri rubne koordinatne točke koje pokrivaju cijelu visinu domene i opisuju područje grada Siska, dok su vrijednosti za preostale točke unutar domene određene linearnom interpolacijom. Odabrani podaci obuhvaćaju razdoblje od 1. do 2. prosinca 2015. godine tijekom 24 sata, te sadrže komponente brzine vjetra i turbulentnu kinetičku energiju. Visina domene iznosi 2000 m, širina 8230 m, a dužina 5530 m. Na Sl. 2 prikazana je mreža s označenim rubnim uvjetima, pri čemu nisu uključeni ulazi emisija iz dimnjaka.



Sl. 2. Prikaz mreže sa selekcijama za rubne uvjete

Podaci za ulazne emisije u domenu zadani su na temelju izmjerenih vrijednosti emisija onečišćujućih tvari iz dimovodnih kanala peći rafinerije i termoelektrane. Mjerenja za rafineriju potječu iz 2007. godine, dok su podaci za termoelektanu preuzeti iz 2009. godine. Zbog ograničene dostupnosti mjerenih podataka nije bilo moguće provesti simulaciju s ulazima koji odgovaraju istom vremenskom razdoblju, što je onemogućilo i validaciju simulacijske studije. U računalnoj domeni modelirano je ukupno pet dimnjaka: dva pripadaju termoelektani, a tri rafineriji. Pritom u glavni dimnjak rafinerije dodane su prosječne emisijske vrijednosti osam pojedinačnih peći. Za izlazni rubni uvjet postavljen je konstantni statički tlak u iznosu od 0,8 bara, uzimajući u obzir linearni pad tlaka s visinom. Na donjoj granici domene primijenjen je adijabatski rubni uvjet. Za modeliranje turbulencije korišten je etablirani k-ε model. Kriterij konvergencije postiže se kada reziduali fizikalnih veličina padnu četiri reda veličine u odnosu na početno rješenje. Vremenska diskretizacija provedena je primjenom Eulerove implicitne sheme prvog reda. Sprega polja brzine i tlaka ostvarena je korištenjem SIMPLE algoritma. Za jednačbu kontinuiteta primijenjena je shema centralnih razlika, dok je za jednačbu količine gibanja korištena kombinacija uzvodne sheme i sheme centralnih razlika, s faktorom miješanja od 0,5. Energetska i skalarna jednačba, kao i jednačbe za turbulenciju, riješene su primjenom uzvodne diferencijske sheme.

V. STUDIJA UTJECAJA RAČUNALNE MREŽE

Studiju utjecaja mreže potrebno je provesti kako bi se osigurala neovisnost numeričkih rezultata o veličini i gustoći mreže. Prilikom simulacije toka fluida ili prijenosa topline,

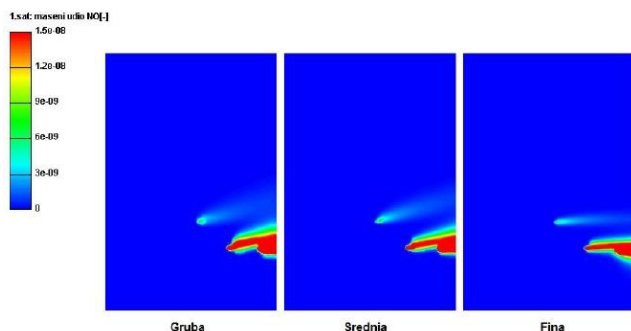
geometrija analiziranog tijela igra ključnu ulogu pri odabiru tipa mreže, bilo da se radi o strukturiranoj, nestrukturiranoj, heksaedarskoj, tetraedarskoj ili poliedarskoj mreži. Korištenje pregrube mreže može dovesti do netočnih rezultata i numeričke nestabilnosti, dok previše gusta mreža značajno povećava vrijeme računanja i računalne resurse bez nužnog poboljšanja točnosti [6].

Analiza računalne mreže u ovom radu obuhvatila je tri različite razine rezolucija mreža, označene kao gruba, srednja i fina mreža, koje se međusobno razlikuju prema ukupnom broju kontrolnih volumena. U Tablici 2 prikazane su maksimalne i minimalne dimenzije kontrolnih volumena za svaku od analiziranih mreža.

TABLICA 2. VRIJEDNOSTI VELIČINA KONTROLNIH VOLUMENA ZA SVAKU MREŽU

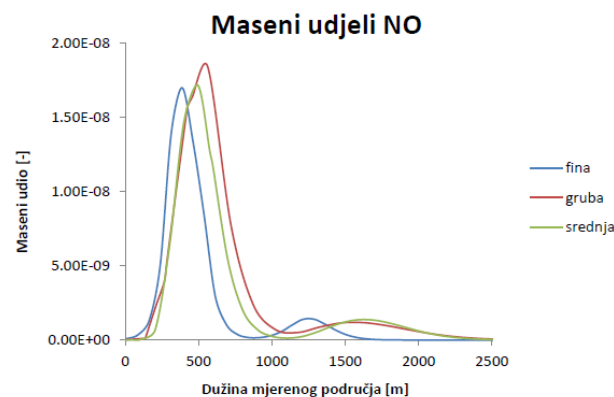
Naziv mreže	Min. veličina kontrolnog volumena, m	Maks. veličina kontrolnog volumena, m
Gruba	18,75	150
Srednja	12,5	100
Fina	9,375	75

Usporedba mreža provedena je na temelju koncentracije NO izmjerene na visini od 2 metra u prvom satu simulacije. Važno je istaknuti da su rezultati promatrani duž linije koja presijeca sve dimne perjanice unutar domene. Na temelju usporedbe odabrana je mreža koja pruža najbolji omjer između točnosti rezultata i zahtjeva za računalnim resursima. Na Sl. 3 prikazani su rezultati za svaku od analiziranih mreža.



Sl. 3. Prikaz rezultata različitih rezolucija mreža

Iz dobivenih podataka uočljive su razlike u širenju dimne perjanice i koncentracijama NO. Kod grube mreže zabilježeno je šire područje s maksimalnim vrijednostima koncentracije, a perjanica pokazuje veću rasprostranjenost u odnosu na srednju i finu mrežu. Smjer širenja perjanice kod grube i srednje mreže pokazuje određenu sličnost, dok je u usporedbi s finom mrežom uočena izraženija razlika. Perjanice dobivene srednjom i finom mrežom pokazuju slične koncentracije NO, uz manja odstupanja u orijentaciji smjera širenja. Rezultati masenih udjela NO za različite mreže prikazani su grafički na Sl. 4.

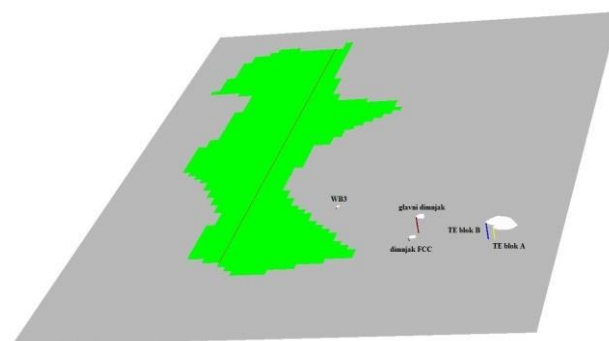


Sl. 4. Prikaz rezultata masenih udjela NO za tri mreže

Kod grube mreže zabilježene su najviše vrijednosti koncentracije NO, dok su rezultati za srednju i finu mrežu međusobno usporedivi i pokazuju slične vrijednosti. Promatrajući raspodjelu duž analiziranog područja, maksimalna koncentracija kod fine mreže dosegnuta je na udaljenosti manjoj od 500 metara, dok su kod preostalih dviju mreža vršne vrijednosti zabilježene na nešto većim udaljenostima, nakon 500 metara. Na temelju prikazanih rezultata može se zaključiti da fina i srednja mreža daju usporedive vrijednosti koncentracija, dok gruba i srednja mreža pokazuju sličan prostorni raspored perjanica. Uzimajući u obzir broj kontrolnih volumena i dobivene rezultate, srednja mreža pokazala se kao najpovoljnije rješenje jer zahtijeva manje računalnih resursa uz zadržavanje zadovoljavajuće razine točnosti. Stoga je u nastavku simulacija disperzije onečišćujućih tvari na području grada Siska provedena sa srednjom mrežom.

VI. REZULTATI

U okviru simulacije analizira se disperzija SO_2 i NO na promatranom području, s glavnim izvorima emisije lociranim na industrijskim dimnjacima. Rezultati se interpretiraju kroz prikaz dimnih perjanica koje potječu iz industrijskih izvora. U realnim atmosferskim uvjetima, oblik dimne perjanice određuje niz čimbenika, uključujući brzinu i smjer vjetrova, topografiju terena, prisutnost drugih atmosferskih tvari, doba dana te opće atmosferske uvjete. Pregled dobivenih rezultata odnosi se na područje grada Siska, pri čemu je gušće naseljeni dio prikazan zelenom bojom (Sl. 5).



Sl. 5. Simulirano područje

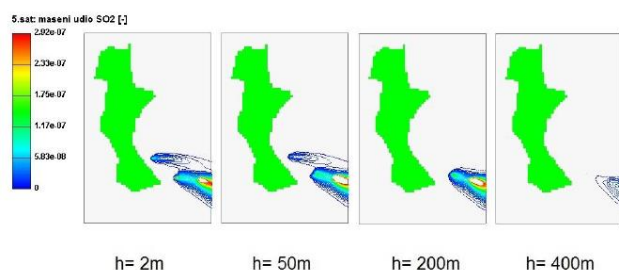
Za prikaz rezultata odabrana su tri reprezentativna sata koja obuhvaćaju početak i kraj dana, te jedan sat unutar tog intervala, kako bi se ilustrirala dnevna varijabilnost disperzije.

A. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije SO_2

Ulazak emisija u domenu odvija se na različitim visinama i pri različitim brzinama zbog različitosti visina, promjera te masenih protoka dimnjaka. Ulazak vjetra odvija se na bočnim stranama domene pri čemu se vrijednosti razlikuju s obzirom na dužinu, širinu i visinu domene za dani sat.

Na temelju podataka o emisijama iz dimnjaka, dobivene su koncentracije onečišćujućih tvari izražene u ppm. Ove koncentracije usklađene su s graničnim vrijednostima za emisije SO_2 , kako je propisano *Uredbom o razinama onečišćujućih tvari u zraku* (NN 117/12 i 84/17). Granična vrijednost koncentracije SO_2 u zraku, relevantna za zaštitu ljudskog zdravlja, iznosi $350 \mu g/m^3$ za vremensko usrednjavanje od jednog sata, a ta je vrijednost preračunata u masene udjele. Rezultati su analizirani za tri vremenska trenutka simulacije — peti, četrnaesti i dvadesetreći sat — kako bi se obuhvatile promjene u uvjetima, temeljenog na podacima iz WRF modela. Također, na slikama su prikazani rezultati na različitim visinama, pri čemu se mogu uočiti značajne promjene u obliku dimne perjanice.

Na Sl. 6 prikazana je disperzija SO_2 s pripadajućim vrijednostima koncentracija na različitim visinama domene za 5. sat simulacije.

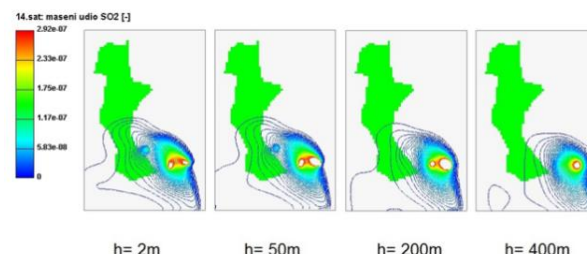


Sl. 6. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

Dimna perjanica prikazuje vrijednosti koncentracija onečišćujućih tvari iz različitih smjerova, ovisno o smjeru i brzini vjetra. Dimne perjanice koje izlaze iz dimnjaka imaju usko kanalizirani oblik, što rezultira malim širinama perjanica i relativno uniformnom distribucijom vjetra. Ovi uvjeti omogućuju dimnim perjanicama da se šire na veće udaljenosti i dulje zadržavaju u atmosferi, a slabija disperzija na krajevima dimnih perjanica doprinosi smanjenju koncentracija na tim područjima. Zbog toga je koncentracija onečišćujućih tvari na tlu, odnosno na visini od 2 m, najizraženija, posebno u blizini dimnjaka. To se objašnjava padom temperature dimnih plinova, što uzrokuje povećanje njihove gustoće. Kada gustoća plinova postane veća od gustoće okolnog zraka, plinovi se počinju kretati prema dolje, čime se smanjuje učinkovitost disperzije u atmosferi. Na visini od 50 m koncentracije označene crvenom bojom smanjuju se, a to se pripisuje višim dimnjacima koji omogućuju bolju disperziju. Ipak, na visini od 50 m također je zabilježeno povećanje koncentracije u predjelu gdje je smješten dimnjak visine 42 m, a to povećanje koncentracije označeno je svijetloplavom bojom. Dimnjaci

koji su niži, na svakoj visini za koju su prikazani rezultati, imaju sve slabije izraženu dimnu perjanicu. Na visinama od 200 i 400 m dimna perjanica iz tih dimnjaka potpuno nestaje, što je posljedica njihovih relativno malih visina.

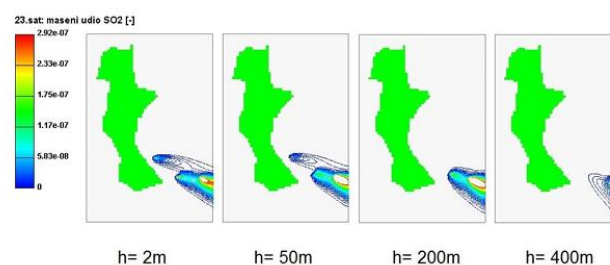
U četrnaestom satu, prema Sl. 7, uočene su značajne razlike u odnosu na peti sat. Dimna perjanica je šira i time omogućuje bolju disperziju na veće udaljenosti. Promatrani sat ima visoke koncentracije SO_2 i gotovo je jednako postojana na svim visinama u odnosu na druge sate.



Sl. 7. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

U realnim uvjetima, faktori koji utječu na razlike u koncentracijama dimnih plinova mogu se povezati s stanjem atmosfere, doba dana, meteorološkim uvjetima te drugim čimbenicima. Povećana brzina vjetra može uzrokovati širenje dimne perjanice na veće udaljenosti, čime dolazi do povećanja koncentracija onečišćujućih tvari pri tlu. Na temelju ovoga, može se zaključiti da nepokretni industrijski izvori grada Siska predstavljaju potencijalnu prijetnju od onečišćenja čak i za područja koja se nalaze na značajnim udaljenostima od industrijske zone. Udaljenost na kojoj će dimna perjanica biti prisutna ovisi o čimbenicima koji utječu na njezino širenje, poput brzine i smjera vjetra te specifičnih lokalnih atmosferskih uvjeta.

Prikazana dimna perjanica zahvaća naseljeniji dio grada, označen zelenom bojom, pri čemu je emisija SO_2 veća u odnosu na peti sat simulacije. Dimna perjanica ne pokazuje značajne promjene s visinom, no male razlike primjećuju se na visini od 400 m, gdje nije prisutna perjanica iz manjeg dimnjaka, a doprinos emisijama iz rafinerijskih dimnjaka je znatno slabiji. Prema rezultatima prikazanim na Sl. 8, dolazi do smanjenja koncentracije SO_2 , a u odnosu na koncentracije propisane Uredbom za granične vrijednosti emisija (GVE), dimna perjanica obuhvaća manja područja u odnosu na rezultate za 14. sat simulacije.

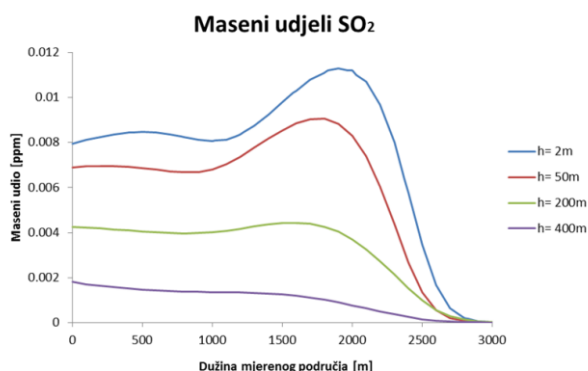


Sl. 8. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija SO_2

U usporedbi s prethodnim satom simulacije, dimna perjanica u 23. satu nije toliko prostrana te se smanjuje s

povećanjem visine. Ipak, oblik perjanice ostaje sličan onome iz petog sata, što ukazuje na to da je perjanica usko kanalizirana, a vjetar uniforman, pri čemu je moguće njezino širenje na veće udaljenosti. Perjanica iz glavnog dimnjaka na 400 m nije značajno izražena, a rezultati su slični onima u prethodnim satima simulacije. Emisije iz dimnjaka termoelektrane (TE) stvaraju dimnu perjanicu koja ostaje postojana na visini od 400 m kroz sve sate simulacije.

Dijagramski prikaz rezultata za 14. sat simulacije prikazan je na Sl. 9. Rezultati se odnose na presjek koji prolazi sredinom područja označenog zelenom bojom na Sl. 5.

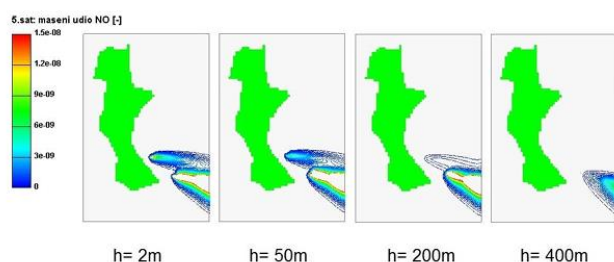


Sl. 9. Dijagramski prikaz masenih udjela SO_2 na različitim visinama za 14. sat

Usporedba dobivenih rezultata ukazuje na to da maksimalna zabilježena koncentracija SO_2 prevladava na visini od 2 m, dok se duž promatranog područja najveće vrijednosti bilježe na udaljenosti od približno 2000 m od izvora emisije. Nadalje, može se zaključiti da koncentracija onečišćujuće tvari opada s porastom visine, te na visini od 400 m pokazuje znatno niže vrijednosti. Emisije u okviru promatranog područja prostiru se do udaljenosti od oko 3000 m. Duljina i prostorni doseg dimne perjanice u značajnoj mjeri ovise o brzini i smjeru vjetra u trenutku emisije. Važno je istaknuti kako je iz priloženog dijagrama vidljivo da granična vrijednost koncentracije nije prekoračena tijekom analiziranog sata.

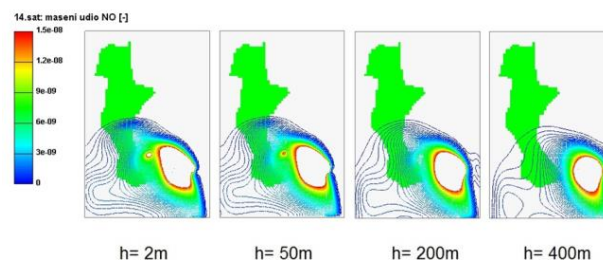
B. Pregled rezultata za vrijednosti koncentracije NO

U okviru ovog istraživanja, NO je uzet kao reprezentativni spoj skupine NO_x , budući da dominira u emisijama industrijskih izvora. Sljedeći prikazi ilustriraju disperziju NO na različitim visinama, pri čemu su uočene gušće i šire dimne perjanice u usporedbi s onima za SO_2 . Rezultati za 5. sat simulacije prikazani su na Sl. 10.



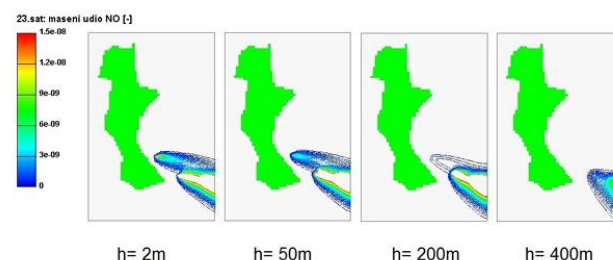
Sl. 10. Prikaz dimnih perjanica u 5. satu za vrijednosti koncentracija NO

U usporedbi s rezultatima za SO_2 , perjanica NO pokazuje šire prostorno rasprostiranje, s većim područjem maksimalne koncentracije onečišćujuće tvari. Također, smjer kretanja dimne perjanice ostaje nepromijenjen, usmjeren suprotno od gušće naseljenog dijela grada. Daljnjom analizom uočeno je da rafinerijski dimnjaci generiraju perjanice viših koncentracija na gotovo svim visinama u odnosu na termoelektrane izvore. Niži rafinerijski dimnjaci postižu maksimalne koncentracije pri tlu, s postupnim opadanjem vrijednosti koncentracije prema visini od 400 m. Najviše koncentracije NO, emitirane iz glavnog dimnjaka, zabilježene su na visinama od 50 i 200 m, dok su tragovi perjanice detektirani i na visini od 400 m. Rezultati simulacije za 14. sat na Sl. 11, prikazuju dimnu perjanicu sličnog karaktera kao kod emisija SO_2 .



Sl. 11. Prikaz dimnih perjanica u 14. satu za vrijednosti koncentracija NO

Rasprostranjenost dimne perjanice pokazuje gotovo ujednačen prostorni raspored na svim visinama na kojima su zabilježene maksimalne koncentracije. Ostvarene maksimalne vrijednosti koncentracija NO, rezultat su kumulativnog doprinosa svih dimnjaka uključenih u simulaciju. Rezultati simulacije za 23. sat prikazani su na Sl. 12.

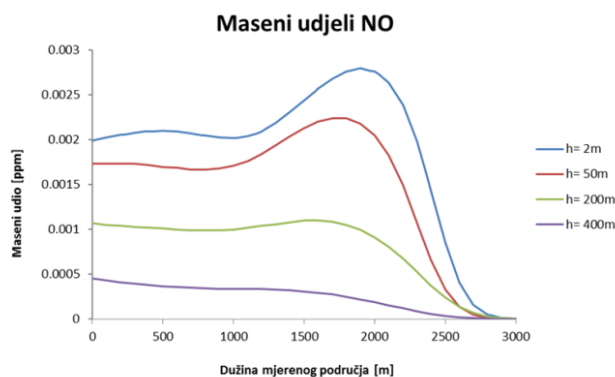


Sl. 12. Prikaz dimnih perjanica u 23. satu za vrijednosti koncentracija NO

Dimna perjanica zadržava usko kanaliziran oblik, slično kao i tijekom petog sata simulacije, što se može pripisati već prethodno opisanim uniformnim uvjetima vjetra. Maksimalne koncentracije NO u ovom slučaju mogu se uočiti na svim analiziranim visinama, što nije bilo zabilježeno pri ranijim uvjetima vjetra. Na visini od 400 m perjanice pokazuju veću gustoću u usporedbi s prethodno prikazanim rezultatima, pri čemu je posebno vidljiva maksimalna koncentracija dimne perjanice iz dimnjaka termoelektrane. Tijekom promatranog vremenskog razdoblja, gušće naseljeni dio grada ostaje izvan područja izloženosti emisijama.

Dijagramski prikaz koncentracija NO izrađen je i prikazan na Sl. 13. Rezultati se odnose na 14. sat simulacije i prikazani

su na različitim visinama unutar istog mjerila i područja kao i prethodni prikaz za SO_2 .



Sl. 13. Dijagramski prikaz masenih udjela NO na različitim visinama za 14. sat

Analiza dobivenih rezultata ukazuje na to da su najviše koncentracije onečišćujućih tvari zabilježene u blizini tla, pri čemu se s porastom visine bilježi jasan silazni trend vrijednosti koncentracija. Maksimalne vrijednosti ostvarene su na udaljenosti od približno 2000 m duž analiziranog profila, nakon čega koncentracije naglo padaju te, iznad 3000 m, više ne dosežu značajne razine unutar mjerene duljine područja. Posebno izražena razlika u koncentracijama uočena je između visinskih razina od 50 i 200 m, gdje dolazi do naglog smanjenja vrijednosti. Navedeno se može prvenstveno pripisati razlikama u visinama izvora emisije, budući da, kako je prethodno pokazano, niži dimnjaci imaju ograničen doprinos u održavanju stabilnosti i postojanosti dimnih perjanica na višim slojevima atmosfere, osobito na visinama od 200 i 400 m.

VII. ZAKLJUČAK

Glavni cilj ovog istraživanja, koji se odnosi na proučavanje disperzije onečišćujućih tvari na određenom području metodom kontrolnih volumena, u potpunosti je ostvaren. Računalna dinamika fluida u programskom paketu AVL Fire®, iako primarno razvijena za simulacije motora s unutrašnjim izgaranjem, pokazala se uspješnom i u kontekstu zadatka razmatranog u ovom radu. Simulacija pruža relevantne rezultate u skladu s postavljenim rubnim uvjetima, što je vidljivo kroz numeričke podatke i vizualne prikaze. Međutim, postizanje još realističnijih rezultata bilo bi moguće implementiranjem dodatnih faktora, poput hrapavosti i albeda tla, što bi poboljšalo izgled dimnih perjanica i utjecalo na njihove koncentracije. Također, točnost simulacije mogla bi se poboljšati uključivanjem drugih izvora onečišćenja, kao što su dodatni nepokretni izvori i emisije s prometnih površina. Za potpunu validaciju primijenjene metode, nužno je usporediti rezultate sa stvarnim podacima s mjernih postaja kakvoće zraka u simuliranom području.

LITERATURA

- [1] M. Martinjak, "Numerička simulacija sustava za selektivnu katalitičku redukciju," Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016.
- [2] F. Toja-Silva, J. Chen, S. Hachinger and F. Hase, "CFD simulation of CO_2

dispersion from urban thermal power plant: Analysis of turbulent Schmidt number and comparison with Gaussian plume model and measurements," Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, vol. 169, pp. 177-193, 2017.

- [3] G. Sisak, Strateški plan Grada Siska, Sisak, 2014.
- [4] A. M. Saeed and T. A. F. Alfawaz, "Finite Volume Method and Its Applications in Computational Fluid Dynamics," Axioms, vol. 14, no. 5, pp. 359, 2025.
- [5] <https://www.google.com/maps>, pristupljeno 26.10.2019.
- [6] I. Sadrehaghighi, "Mesh Assessment & Quality Issues," CFD Open Series, vol. 2, no. 40, 2023, pp. 10-13.

ABSTRACT

An increase in the concentration of pollutants in the environment poses a serious risk to human health and ecosystems. Modern technology enables the monitoring and reduction of emissions, thereby mitigating and controlling their negative impact on the environment. This paper presents the application of numerical methods as a tool for analyzing pollutants in urban areas, with a focus on the dispersion of emissions from stationary sources. The application of numerical methods will be carried out through computational fluid dynamics (CFD), simulating the dispersion of pollutants from TE-TO Sisak and INA Sisak Refinery during one representative day. In addition to data for industrial sources, meteorological conditions will also be specified, sourced from numerical systems for atmospheric research and weather forecasting. The results are presented in the form of smoke plume dispersion and concentrations of SO_2 and NO at different heights. It is important to emphasize that the analysis showed no exceedances of the limit values for SO_2 in the residential areas during the observed period, indicating satisfactory air quality.

THE ANALYSIS OF POLLUTANT DISPERSION FROM STATIONARY INDUSTRIAL SOURCES IN AN URBAN ENVIRONMENT USING NUMERICAL METHODS.

Dominik Pavlović, Jakov Baleta

The Role of Living Labs in Accelerating Smart and Energy-Efficient Solutions

Zivko Kokolanski¹, Dimitar Tashkovski¹, Vladimir Atanasovski¹, Nikolce Mojancevski¹, Vane Mitev¹

¹Ss. Cyril and Methodius University in Skopje,

Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies, Skopje, Republic of North Macedonia

kokolanski@feit.ukim.edu.mk

Abstract — The INNOFEIT Living Lab, hosted by the Center for Technology Transfer and Innovation at the Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies in Skopje, represents a dynamic open innovation ecosystem focused on smart energy systems. Operating under the Quadruple Helix model, it facilitates co-creation among academia, industry, government, and citizens in a real-life environment. Equipped with advanced infrastructure—such as solar energy systems, battery storage, electric vehicle charging, IoT labs, and smart control systems—the lab directly supports the development and testing of sustainable technologies aligned with SDG 7 (affordable and clean energy) and SDG 12 (responsible consumption and production). This paper explores the structure, objectives, and innovation methodologies of the INNOFEIT Living Lab, positioning it as a scalable model for user-driven energy research and as a strategic instrument within the broader European energy transition framework.

Keywords— *Living Lab; Smart Energy Systems; Open Innovation; Sustainable Development Goals*

I. INTRODUCTION

The global shift towards sustainable development and energy efficiency has intensified the need for innovation models that align technological advancements with real societal needs. In this context, Living Labs (LLs) have emerged as a promising frameworks for fostering user-driven, open innovation in real-life settings [1], [2]. By involving stakeholders from academia, industry, public institutions, and civil society, LLs enable the co-creation, experimentation, and validation of new energy solutions within actual environments—addressing limitations often present in traditional, isolated research settings [3].

In the domain of smart energy systems, Living Labs present notable advantages. They facilitate real-time data acquisition, iterative testing, and user feedback loops that are essential for deploying advanced energy technologies. For example, the ENERGISE project illustrated how subtle behavioral changes in household heating and laundry routines, introduced through a LL framework, contributed to measurable reductions in energy consumption and supported long-term habit shifts [4], [5]. University-based initiatives such as the University of British Columbia's Campus as a Living Lab further demonstrate the practical integration of renewable energy technologies into academic settings—

enhancing education and reducing institutional carbon footprints [6].

However, despite their potential, LLs face significant implementation challenges. These include the absence of standardized conceptual and evaluation frameworks [7], governance complexities among heterogeneous stakeholders [8], and limitations in funding continuity and scalability [9]. This creates difficulties in cross-comparing LL outcomes and limits their broader applicability in energy transitions.

Yet, momentum continues to build. Research increasingly points to the importance of developing shared methodological standards [7], enhancing cross-sector integration, and embedding LLs within institutional and urban ecosystems [10] – [14]. These improvements are crucial for transitioning LLs from fragmented pilots into key instruments of energy policy and innovation [15].

Against this backdrop, the INNOFEIT Living Lab, launched by the Center for Technology Transfer and Innovation at the Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies in Skopje, North Macedonia, offers a localized and strategic response. Focused on smart energy systems, it brings together academia, industry, and government actors to co-create and test advanced energy solutions. This paper explores Living Lab methodologies in the energy domain, discusses their benefits and limitations, and positions the INNOFEIT Living Lab within this evolving innovation landscape.

II. THE INNOFEIT LIVING LAB CONCEPT

The Center for Technology Transfer and Innovations, known as INNOFEIT (Fig.1), is an autonomous legal entity under the ownership of the Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, operating within the Faculty of Electrical Engineering and Information Technologies. Since its inception in 2018, INNOFEIT has served as the central point for technology transfer and as a leading research and development hub within FEEIT. INNOFEIT aims to consolidate and streamline R&D for the industry under a single roof, thereby eliminating fragmentation and enhancing collaboration. This centralization is particularly significant given FEEIT's strong reputation in international research, which INNOFEIT continues to build upon. With a growing emphasis on innovation, INNOFEIT has become a crucial bridge between academic research and industrial applications.



Fig. 1. Center for Technology Transfer and Innovations - INNOFEIT

An important recent milestone in the development of INNOFEIT is the Living Lab Project, funded by the Ministry of Economy. This project runs in 2025 (a period of 9 months), and represents a forward-looking initiative to further develop open innovation environments grounded in real-life applications.

The INNOFEIT Living Lab is a real-life, open innovation ecosystem designed to integrate research and innovation through a systematic user co-creation approach. This model facilitates the development and testing of smart energy systems in environments that simulate real-world conditions. Unlike traditional labs, Living Labs emphasize continuous engagement with end-users and stakeholders, promoting a feedback-rich environment that enhances the applicability and impact of innovations.

The Living Lab operates on the principles of the Quadruple Helix Model, which brings together the four main societal actors:

- Citizens – as users and contributors to the co-creation process,
- Government – as policy makers and enablers,
- Industry – as developers and implementers of innovation,
- Academia – as sources of research and development expertise.

By uniting these actors in a collaborative setting, INNOFEIT Living Lab facilitates rapid prototyping, validation, and scaling of smart energy solutions. It is both a testbed and a meeting ground where ideas evolve into tangible innovations aligned with societal and environmental goals.

A. Objectives and Strategic Alignment

The INNOFEIT Living Lab is designed with a specific set of objectives that align with broader institutional and European strategic goals, particularly the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs). Out of the ten SDGs commonly associated with Living Labs (SDG2, SDG3, SDG6,

SDG7, SDG11, SDG12, SDG13, SDG14, SDG15, and SDG17), the INNOFEIT Living Lab specifically contributes to:

- SDG 7 – Ensure access to affordable, reliable, sustainable, and modern energy for all.
- SDG 12 – Ensure sustainable consumption and production patterns.

These alignments underline the lab's focus on sustainable energy systems and responsible innovation practices.

Key objectives of the INNOFEIT Living Lab include:

- Integration of all available infrastructure under the Center for Technology Transfer and Innovation to ensure streamlined and efficient use of resources.
- Provision of an open innovation ecosystem for external stakeholders to engage in co-creation and experimentation activities.
- Support for experimental and R&D activities by stakeholders and members of the Smart Energy Systems Group (SEGS) within the INITIATE Project. The INITIATE Project, funded by the European Union (Grant No. 101136775), aims to conduct institutional reforms at pilot sites, with replication potential at other institutions across the EU.

B. Infrastructure and Technological Capacity

The infrastructure supporting the INNOFEIT Living Lab spans approximately 500 m² over two floors given in Fig.2. This physical space includes: 3 dedicated offices for industry and university research staff, a fully equipped Internet of Things (IoT) laboratory (Fig. 3), multifunctional meeting room, events hall to host workshops, and demonstrations.

In terms of technological infrastructure, the Living Lab includes:

1) Energy Infrastructure:

- Solar Power Plant (Fig. 4) – Total capacity of 30 kW, divided into three segments of 10 kW each.
- Battery Storage System (Fig. 5) – Capacity of 100 kWh to support partial energy autonomy and system reliability.
- Electric Vehicle Charger (Fig. 6) – Two charging plugs with 12 kW capacity each.

2) Heating and Cooling

- SPRSUN Heat Pump – Rated for 9.5 kW of maximum heating and 8.5 kW of cooling, with an operating temperature range of -20 °C to 45 °C.
- Thermal Buffers – Two thermal buffer tanks, each with a capacity of 500 liters, ensuring energy efficiency in heat distribution.
- Central Water Heating System – Providing experimental needs combined with the heat pump.

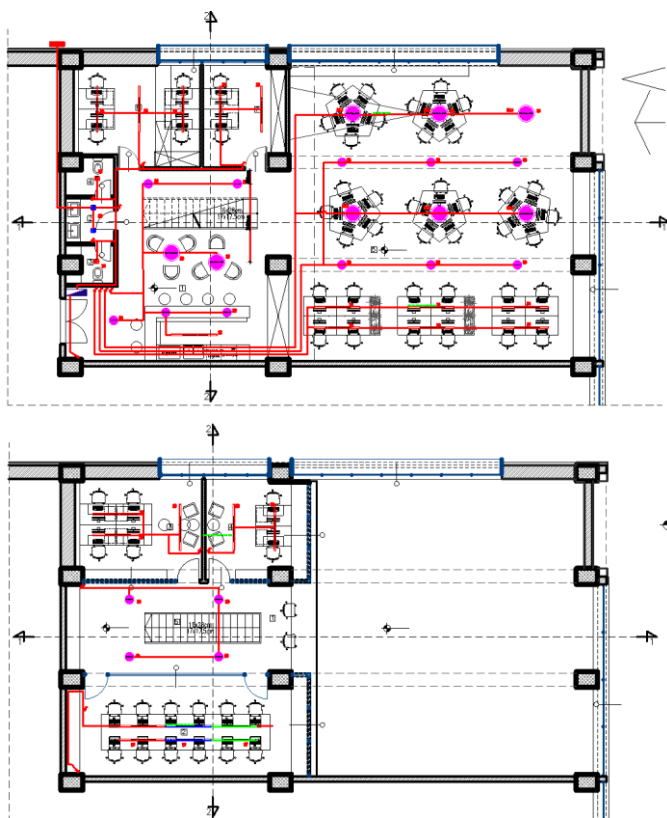


Fig. 2. Ground and first floor of INNOFEIT Living Lab



Fig. 3. INNOFEIT Living Lab Internet-of-Things laboratory

3) Monitoring and Control Systems

- Programmable Logic Controllers (PLCs) – For automation and control of all systems.
- Ambient Monitoring Sensors – Track temperature, humidity, air quality, and occupancy.
- Lighting Control and Presence Detection – Enhance energy efficiency and adaptivity of indoor spaces.
- Weather Station – Collects real-time data on solar radiation, wind speed and direction, and rainfall, feeding into predictive models and control algorithms.
- Dedicated Server for Digital Twin (DT) Integration – Central to data management and simulation activities supporting the lab's smart systems.

The Digital Twin capabilities play a crucial role in the INNOFEIT Living Lab and are co-aligned with the GOTOTWIN project, an INTERREG IPA ADRION initiative coordinated by FEEIT, which aims to advance the deployment of DT technologies to renewable energy sources infrastructure and services across the Adriatic-Ionian region. By integrating these capabilities into the INNOFEIT Living Lab, the project gains access to a fully operational, real-life testing environment that enables the validation of advanced DT methodologies, the assessment of interoperability across diverse technological domains, and the development of replicable use-cases in smart energy management.

More significantly, this collaboration contributes directly to enhancing energy resilience in the Adriatic-Ionian region. By enabling real-time simulation, predictive analysis, and remote experimentation, the Digital Twin infrastructure strengthens the ability of energy systems to anticipate, absorb, and adapt to external disruptions, including climate variability, grid instability, and fluctuating renewable energy supply. These capabilities are essential for building robust and adaptive energy infrastructures across regional public institutions and urban environments.

Additionally, the INNOFEIT Living Lab supports the GOTOTWIN project in promoting energy efficiency of renewable energy sources. Through precise modeling and optimization of solar generation, battery storage, and load management, the Living Lab provides actionable insights into how renewable systems can be operated with maximum efficiency and minimal waste. The data-driven approach enhances control strategies and decision-making processes, leading to smarter, more sustainable energy use.

The synergy between GOTOTWIN and the INNOFEIT Living Lab thus reinforces digital transformation while actively contributing to regional energy goals. It supports policy harmonization, fosters institutional innovation, and demonstrates how Digital Twins can be leveraged to accelerate the twin transition—digital and green—across the Adriatic-Ionian area.



Fig. 4. INNOFEIT Living Lab 30 kW solar power plant



Fig. 5. INNOFEIT Living Lab inverter and battery storage



Fig. 6. INNOFEIT Living Lab 24 kW electrical vehicle charger

Collectively, this infrastructure provides a robust foundation for experimentation, co-creation, and innovation in the realm of smart energy systems, enabling the INNOFEIT Living Lab to serve as a model for institutional reform and cross-sectoral collaboration.

III. EXPERIMENTAL POSSIBILITIES AND SCENARIOS FOR ENERGY EFFICIENCY AT THE INNOFEIT LIVING LAB

The INNOFEIT Living Lab provides a comprehensive, real-world environment ideally suited for experimentation in energy efficiency by merging physical infrastructure with advanced digital technologies in both local and international contexts. At its core, the Living Lab is designed to function as a dynamic, user-centric experimentation ground where smart energy technologies can be rapidly prototyped and refined. The integration of renewable energy systems, energy storage, intelligent control mechanisms, and real-time monitoring facilitates a wide array of experimental scenarios—ranging from demand-side management and thermal comfort optimization to smart grid simulation and renewable integration strategies.

A defining feature of the INNOFEIT Living Lab is its Digital Twin infrastructure, supported by a dedicated server system that enables virtual modeling, simulation, and predictive control of the lab's energy systems. This capability significantly enhances the lab's potential as a testbed, allowing for remote access, continuous performance evaluation, and scenario-based experimentation in a risk-free virtual environment that mirrors real operational conditions. Crucially, this infrastructure supports international remote experimentation, enabling stakeholders and research institutions beyond national borders to engage with the Living Lab. This model opens up new possibilities for collaborative research, student training, and EU-wide pilot projects, positioning the INNOFEIT Living Lab as a cross-border innovation enabler.

The DT-enabled remote experimentation framework is directly aligned with the objectives of the GOTOTWIN project for the co-development and testing of scalable DT methodologies, enhancing digital transformation in energy management and supporting policy harmonization and replication at regional levels.

Scenarios for energy efficiency experimentation at INNOFEIT Living Lab for the scientific community include:

- Smart building automation: Testing adaptive lighting, heating, and cooling strategies using ambient and occupancy sensors.
- Renewable energy integration: Simulating solar energy availability and optimizing battery storage cycles for different load profiles.
- Electric mobility: Evaluating load impacts and charging patterns from electric vehicle infrastructure.
- User behavior modeling: Incorporating end-user interaction data into feedback loops for energy-saving behavioral interventions.

IV. CONCLUSIONS

The INNOFEIT Living Lab represents a strategic and forward-looking response to the evolving demands of energy transition and sustainable development. Positioned within the broader European and global innovation ecosystems, it leverages the Quadruple Helix model to co-create smart energy solutions in a real-life setting that bridges academia, industry, government, and civil society.

By integrating renewable energy infrastructure, advanced digital monitoring, and a robust Digital Twin environment, the INNOFEIT Living Lab transcends the traditional boundaries of academic research. It provides a replicable, scalable, and user-centric platform for energy efficiency experimentation, remote collaboration, and cross-border innovation. These capabilities are particularly enhanced through its alignment with strategic initiatives such as the EU-funded INITIATE and GOTOTWIN projects, allowing it to function as both a national testbed and a regional enabler of digital transformation.

Moreover, the Living Lab's targeted contribution to SDG 7 (Affordable and Clean Energy) and SDG 12 (Responsible Consumption and Production) underlines its relevance to contemporary policy goals. Its infrastructure, governance model, and methodological framework collectively demonstrate how institutional reform, interdisciplinary collaboration, and digital technologies can converge to accelerate sustainable innovation.

It can be noted that the INNOFEIT Living Lab not only serves as a practical experimentation hub for smart energy systems but also stands as a model for embedding Living Lab methodologies into higher education and public infrastructure. Future work will focus on expanding international engagement, deepening integration with policy frameworks, and continuously refining the lab's digital capabilities to support the next generation of energy and climate solutions.

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported by the INTERREG IPA ADRION project GOTOTWIN (IPA-ADRION00406) and the Horizon Europe project INITIATE (number: 101136775).

REFERENCES

- [1] S. Leminen, M. Westerlund and A. Nyström, "Living Labs as Open-Innovation Networks," *Technology Innovation Management Review*, vol. 2, no. 9, pp. 6–8, 2012.
- [2] M. Burbridge, "If Living Labs are the Answer – What's the Question? A Review of the Literature," *Procedia Engineering*, vol. 180, pp. 1725–1732, 2017.
- [3] S. Leminen and M. Westerlund, "Categorization of Innovation Tools in Living Labs," *Technology Innovation Management Review*, vol. 7, no. 1, pp. 15–25, 2017.
- [4] ENERGISE, "ENERGISE Living Labs," [Online]. Available: <https://energise-project.eu/>. [Accessed: 30-Mar-2025].
- [5] E. Heiskanen, S. Laakso, K. Matschoss, S. Backhaus, and B. Reisch, "Designing Real-Life Experiments for Sustainability Transitions: Lessons from the ENERGISE Living Labs," *Sustainability*, vol. 12, no. 5, 2020.
- [6] University of British Columbia, "Campus as a Living Lab," [Online]. Available: <https://livinglabs.ubc.ca/about/what-are-living-labs>. [Accessed: 30-Mar-2025].
- [7] A. Overdiek and M. Genova, "Evaluating Living Labs? – An Overview of Existing Methods and Tools," *The Hague University of Applied Sciences*, 2021.
- [8] G. Nesti, "Living Labs: A New Tool for Co-Production?" in *Partnerships for Livable Cities*, Cham: Springer, 2020.
- [9] S. Leminen, M. Jokinen and J. Smed, "Living Lab – A New Form of Business Network," *Aalto University Publication Series*, 2012.
- [10] M. Hossain, S. Leminen and M. Westerlund, "A Systematic Review of Living Lab Research," *Journal of Cleaner Production*, vol. 213, pp. 976–988, 2019.
- [11] F. Delfino and P. Dufour, "Living Labs and Partnerships for Progress: How Universities Can Drive the Process Towards the Sustainable City," *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, vol. 18, no. 2, pp. 71–73, 2019.
- [12] K. Matschoss, S. Laakso and E. Heiskanen, "What Can We Say About the Longer-Term Impacts of a Living Lab Experiment to Save Energy at Home?," *Energy Efficiency*, vol. 17, 2024.
- [13] OPERANDUM, "OPEn-air laboRAtories for Nature baseD solUtions to Manage hydro-meteo risks," [Online]. Available: <https://www.operandum-project.eu/>. [Accessed: 30-Mar-2025].
- [14] R. Leone et al., "Co-creation for Nature-Based Solutions: Insights from the OPERANDUM Project," *Environmental Science & Policy*, vol. 112, pp. 67–76, 2020.
- [15] J. Schuurman, "Bridging the Gap Between Living Lab Research and Practice," *Technology Innovation Management Review*, vol. 5, no. 9, pp. 6–17, 2015.



Enhancing Scientific Capacity for
Energy Poverty



**Empowering Bosnia & Herzegovina to combat
energy poverty through research excellence and
capacity building**



enpower.project.eu@gmail.com



@enpower_project_eu



ENPOWER Horizon Europe
Project - BiH



@Enpower_EU

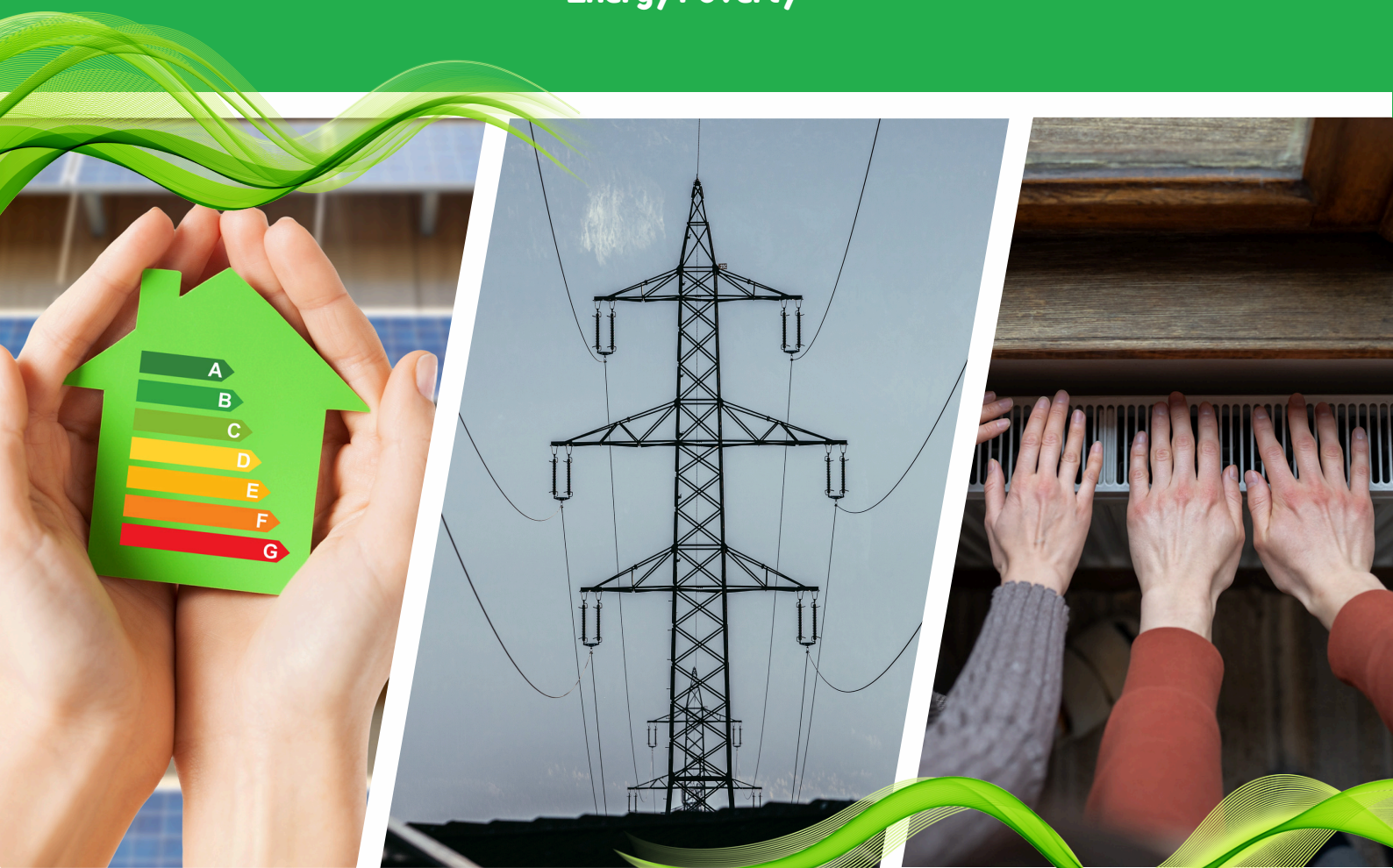


ENPOWER Project HE





Enhancing Scientific Capacity for
Energy Poverty



Enhancing the skills of researchers and
fostering a new generation of experts in
energy poverty solutions



enpower.project.eu@gmail.com



@enpower_project_eu



ENPOWER Horizon Europe
Project - BiH



@Enpower_EU



ENPOWER Project HE



unimc
UNIVERSITÀ DI MACERATA

KU LEUVEN

TILBURG UNIVERSITY

35 LANACO
Years of Continuity





LANACO



Sistemi tehničke zaštite

Profesionalno projektovanje i održavanje svih vaših električnih sistema, UPS uređaja, agregata, mreža, telekomunikacija i sistema tehničke zaštite.

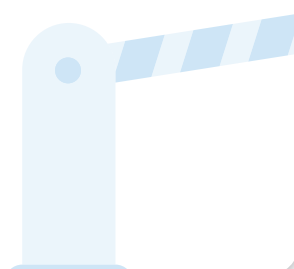
Video nadzor



Protivprovalna zaštita



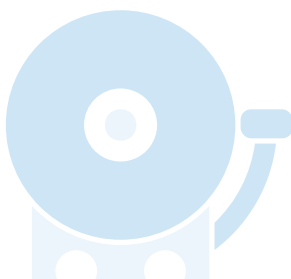
Pokretne rampe



Vatrodojavni sistemi



Alarmni sistem



Audio i EVAC sistemi



Kontrola prolaza



Kreirajmo zajedno sigurno okruženje prilagođeno vašim potrebama

LANACO



+387 51 335 500



prodaja@lanaco.com



www.lanaco.com

Zgrade budućnosti

Uz implementaciju EcoStruxure rješenja, modernizuj svoju infrastrukturu i pripremi postojeće i buduće objekte za pametno upravljanje zgradama.

se.com/ba

Life Is On

Schneider
Electric

Partnerstva za zelenu i inkluzivnu tranziciju



Razvojni program Ujedinjenih nacija (UNDP) u Bosni i Hercegovini, u bliskoj saradnji s domaćim i međunarodnim partnerima i donatorima, aktivno **podržava tranziciju zemlje ka niskougličnoj, održivoj i pravednijoj ekonomiji**. Ova tranzicija podrazumijeva sistemske promjene u načinu na koji proizvodimo i trošimo energiju - s ciljem **smanjenja emisija, povećanja energetske efikasnosti i očuvanja prirodnih resursa**.

Kroz projekte energetske obnove, razvoj politika i mjera zasnovanih na procjeni rizika, te digitalna rješenja za održivo upravljanje resursima, UNDP u BiH - putem jedinstvenog portfolijskog pristupa - provodi **zelenu tranziciju** koja otvara nova radna mjesta, jača lokalne zajednice i unapređuje kvalitet života širom zemlje.

U središtu ovih napora je princip inkluzivnosti - podržavamo jednak pristup zelenim tehnologijama i finansijama za sve građane, s **posebnim fokusom na žene i najranjivije skupine** koje su najviše pogođene posljedicama klimatskih promjena.

UNDP u BiH promoviše **rodno odgovorne mjere klimatske akcije**, jača institucionalne kapacitete i stvara prostor za inovacije koje pokreću održiv rast.

Prisutan na terenu u oko 170 zemalja i teritorija, UNDP radi na iskorjenjivanju siromaštva, istovremeno štiteći planetu. Pomažemo zemljama da razviju snažne politike, vještine, partnerstva i institucije kako bi mogle održati svoj napredak.

Konkretna mjera za održiv razvoj i klimatsku otpornost



Samo u proteklih dvanaest godina, u partnerstvu s institucijama vlasti u BiH i uz finansijsku podršku donatora, UNDP je realizovao više od **635** infrastrukturnih projekata koji su doprinijeli **smanjenju emisija CO₂ za preko 172.000 tona godišnje**, uz unapređenje **kvaliteta života za više od 1,6 miliona ljudi** širom zemlje. Kroz energetska obnova škola, bolnica, administrativnih i stambenih objekata, smanjeni su troškovi energije i stvoreno je zdravije, sigurnije okruženje za građane.

Paralelno s infrastrukturnim ulaganjima, UNDP kontinuirano provodi aktivnosti **jačanja kapaciteta institucija i lokalnih zajednica** za strateško planiranje i upravljanje energijom i okolišem. Razvijaju se regulatorni i politički okviri koji podstiču ulaganja u zelene tehnologije i omogućavaju dugoročne systemske promjene. U fokusu su i digitalna rješenja i inovativni alati koji lokalnim vlastima pomažu da efikasnije prate potrošnju resursa, upravljaju rizicima i planiraju klimatski otporne projekte.

Posebna pažnja usmjerena je na podršku mikro, malim i srednjim preduzećima, te jedinicama lokalne samouprave koje žele ulagati u **zelene i održive projekte** - uključujući pristup povoljnim finansijskim mehanizmima, savjetodavnu i tehničku podršku. Sve ove aktivnosti dio su šireg okvira podrške Bosni i Hercegovini u ispunjavanju klimatskih obaveza i **izgradnji pravedne, otporne i zelene budućnosti**.

Prisutan na terenu u oko 170 zemalja i teritorija, UNDP radi na iskorjenjivanju siromaštva, istovremeno štiteći planetu. Pomažemo zemljama da razviju snažne politike, vještine, partnerstva i institucije kako bi mogle održati svoj napredak.

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна и универзитетска библиотека
Републике Српске, Бања Лука

620.9:624(082)(0.034.2)
624

НАУЧНО-стручни симпозијум Енергетска ефикасност ENEF (6 ;
2025 ; Бања Лука)

Zbornik radova [Електронски извор] / VI naučno-stručni
simpozijum Energetska efikasnost ENEF, Banja Luka, 12.-13. jun
2025. ; [organizatori simpozijuma Mašinski fakultet Univerziteta u
Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Banjoj Luci,
Arhitektonsko-građevinsko-geodetski fakultet Univerziteta u Banjoj
Luci, Savez energetičara Republike Srpske ; urednici Petar Gvero,
Milovan Kotur]. - El. zbornik. - Banja Luka : Mašinski fakultet
Univerziteta u Banjoj Luci, 2025

Način pristupa (URL): <https://enef.etfbl.net/>. - Опис извора дана
9.6.2025. - Ел. публикација у ПДФ формату опсега 108 страна. -
Насл. са насл. екрана. - Радови на срп. и енгл. језику. - Текст
штампан двостручно. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-99976-11-10-9

COBISS.RS-ID 142706689