

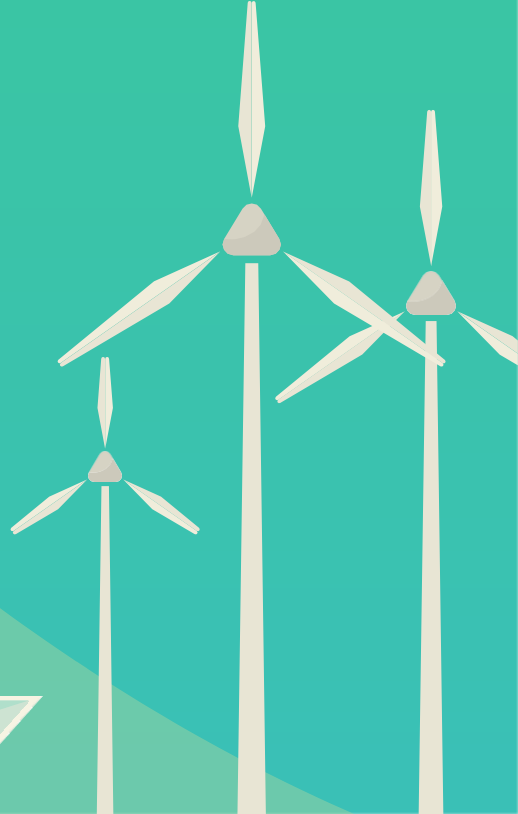
ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 1 / Godina XXV / Mart 2023.

energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 1, Mart 2023

Izdavač:

Savez energetičara
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd
e-mail: info@savezenergeticara.org
<http://www.savezenergeticara.org>

Suizdavači:

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Predsednik Saveza energetičara:
prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:
prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograda
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
prof. dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Miloš Banjac, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Popović, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Stevanović, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin, Beograd
prof. dr Vanja Šušteršić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
v. prof. dr Vladimir Vukašinović, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
docent dr Tomislav Rajić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
dr Iva Batić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Velika Britanija
prof. Vladimir Terzija, Humboldt Fellow, IEEE Fellow, EiC Elsevier IJEPES
prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica University Timisoara, Rumunija
prof. dr Neven Duić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
prof. dr Rade Ćirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza Kušljagić, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BiH
prof. dr Peter Vrtič, Univerzitet u Mariboru, Slovenija
prof. dr Predrag Popovski, Mašinski fakultet Skopje, Severna Makedonija
dr Ilija Batas-Bijelić, Generalni sekretar Saveza, Institut tehničkih nauka SANU

Priprema, tehnička i jezička obrada:
Savez energetičara

Štamparija:

Mašinac, Kragujevac

Tiraž:

150

UDK

620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

*Radovi su recenzirani uz tehničku obradu.
Nijedan deo ove publikacije ne može biti
reprodukovano, presnimavano ili prenošeno bez
prethodne saglasnosti Izdavača.*



Sadržaj

- [01] Nihad HODŽIĆ, Kenan KADIĆ, Anes Kazagić
Sustainable Energy Sector Using Waste Woody Biomass and Miscanthus in the Energy Transition / Primjenom otpadne drvene biomase i Miscanthusa do održivog sektora termoenergetike u vremenu energetske tranzicije
- [10] Filip NASTIĆ, Dušan GORDIĆ, Davor KONČALOVIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Jelena NIKOLIĆ, Nebojša JURIŠEVIĆ
Water and Electricity Consumption and Carbon Footprint of Washing Machines / Potrošnja vode, električne energije i ugljenični otisak veš mašina
- [17] Dejan IVEZIĆ, Marija ŽIVKOVIĆ
Industrial Waste Heat Potential for Meeting Heat Demand in the Republic of Serbia / Potencijal industrijske otpadne toplote za zadovoljenje toplotnih potreba u Republici Srbiji
- [24] Branko STOJANOVIĆ, Tomislav RAJIĆ, Darko ŠOŠIĆ
Rekonfiguracija i otočna kompenzacija u prisustvu distribuiranih izvora u razgranatoj distributivnoj mreži / **Distribution Network Reconfiguration and Capacitor Switching in the Presence of Distributed Resources in Large Scale Distribution System**
- [35] Aleksandar NEŠOVIĆ, Danijela NIKOLIĆ, Nebojša LUKIĆ
Energo koncept Yaodong podzemnih zgrada u XXI veku na teritoriji Srbije / Energy Concept of Yaodong Underground Buildings in the XXI Century on the Territory of Serbia

- [40] Miloš KUZMAN, Dunja GRUJIĆ
Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetskej tranziciji /
The Role of Communities of Renewable Energy Sources in the Energy
Transition
- [51] Aleksandar MIRKOVIĆ, Marija ŽIVKOVIĆ, Stevan ĐENADIĆ, Darja
LUBARDA, Chinedu ANYANWA
Integrative GHG Assessment in Oil and Gas Industry / Određivanje
emisije gasova staklene bašte u industriji nafte i gasa
- [59] Željko V. DESPOTOVIĆ, Ilija R. STEVANOVIĆ, Jovan ŠUMARAC
Daljinski nadzor i kontrola hibridnog postrojenja za navodnjavanje
useva na poljoprivrednoj parceli u mestu Belegiš / Remote Monitoring
and Control of a Hybrid Power Plant for Irrigation of Crops on an
Agricultural Plot in the Town of Belegiš
- [67] Nikola STANKOVIĆ
Analiza uticaja buke u fazi izgradnje i eksploatacije parka
vetroelektrana na lokalitetu Kostolca / Analysis of the Impact of Noise
during the Construction and Exploitation Phase of the Wind Farm Park in
Kostolac
- [74] Rastislav KRAGIĆ, Biljana LOVČEVIĆ-KURELJUŠIĆ, Valentina
ARAMBAŠIĆ, Željko BLITVA, Nenad V. PAVLOVIĆ
Iskustva iz izgradnje solarnih fotonaponskih elektrana na stanicama
za snabdevanje gorivom u svojstvu kupca-proizvođača / Experiences
in the Construction of Solar Photovoltaic Power Plants Mounted at Fuel
Supply Stations as a Prosumer

Sustainable Energy Sector Using Waste Woody Biomass and Miscanthus in the Energy Transition

Primjenom otpadne drvene biomase i Miscanthusa do održivog sektora termoenergetike u vremenu energetske tranzicije

Nihad Hodžić*, Kenan Kadić**, Anes Kazagić**

* University of Sarajevo - Mechanical Engineering Faculty, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

** JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Vilsonovo šetalište 15, 71000 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina

Abstract - The thermal energy sector is very important at this time of global energy transition. From the aspect of stable energy independence, this is especially important in countries whose energy system is based on fossil fuels, especially coal. This is why decarbonisation of the energy sector is necessary, with a partial and gradual substitution of coal with renewable fuels. However, the use of these fuels is not always possible in existing plants. This refers to the establishment of energy, economic and environmentally acceptable proportion of the co-firing of these fuels, i.e. a mixture of coal and renewable fuels. The success of the establishment of this process is a function of several variables, the dominant of which are the aggregate properties of the fuel, basic and their mixtures, including the ash properties of those fuels. With the motive of contributing to a more successful implementation of the energy transition in the thermal energy sector, and with the aim of obtaining new scientific knowledge about the characteristics of the combustion of lignite and brown coal with different renewable fuels, laboratory research was carried out. In particular, different mixtures of lignite and brown coal, waste woody biomass and Miscanthus as a fast-growing energy crop were subjected to co-firing with variable process conditions. In addition to changing the composition of fuel mixtures, the test regimes included a significant change in process temperature (1250-1450 °C) and the primary measure of staged air supply to the furnace. In these combustion conditions, the emission of undesirable and harmful components into the environment, the efficiency of combustion, and the tendency of the ash from the fuel mixture to possible soiling of the heating surfaces in the furnace were evaluated - an analysis of the characteristics of the ash samples from the reaction zone and samples of the slag and ash to the furnace. Here, in both cases of co-firing, lignite and brown coal with different types of biomass, it was shown that in real conditions it is possible to establish a sustainable primary energy conversion process from fuel with a low unburnt carbon content in the slag (unburnt carbon content, UBC<1%) as well as low CO emission, below 350 mg/m³. At the same time, the NO_x emission is below 320 mg/m³ during the co-firing of lignite mixtures at 1250 °C, and in the case of brown coal mixtures below 740 mg/m³ at 1450 °C. In both cases, the net CO₂ emission decreases in proportion to the proportion of biomass in the mixture, while the SO₂ emission is still high, at a

level of up to 2500 mg/m³ for lignite mixtures and up to 6400 mg/m³ for brown coal mixtures. None of the treated types of biomass, up to the level of applicable content in the mixture with lignite and brown coal, does not worsen the progress of the process from the aspect of possible slagging/fouling heating surfaces in the boiler.

Index Terms - Waste woody biomass, Miscanthus, Coal, Co-firing, Emissions, Ash

Rezime - U aktuelnoj eri globalne energetske tranzicije naročito je važan sektor termoenergetike. Ta važnost sa aspekta postizanja i održanja stabilne energetske nezavisnosti je posebno izražena u zemljama čiji je energetski sistem baziran dominantno na bazi primjene fosilnih goriva, naročito uglja, te u uslovima globalnih poremećaja. Stoga je u tom zahtjevnom procesu dekarbonizacije termoenergetskog sektora i nužno i neminovno bar djelimično i postepeno supstituisati fosilni ugalj obnovljivim vrstama goriva. Međutim, mogućnost uvođenja i naročito uspostave energetski, ekonomski i okolinski prihvatljivog procesa sagorijevanja uglja i obnovljivih goriva u postojećim ložištima i termoblokovima nije uvijek moguća. Ukupna uspješnost uspostave takvog jednog procesa je funkcija niza varijabli, od kojih su zbirne osobine goriva, komponentnih i mješavine, uključujući i osobine pepela iz tih goriva, dominantne u tom smislu. S motivom doprinosa za uspješnije provođenje energetske tranzicije u sektoru termoenergetike, a s ciljem dobijanja novih naučnih saznanja o karakteristikama sagorijevanja lignitnog i mrkog uglja sa različitim obnovljivim gorivima, izvršena su laboratorijska istraživanja. Konkretno, sagorijevanju su podvrgnute različite mješavine lignitnog i mrkog uglja, otpadne drvene biomase i Miscanthusa kao brzorastućeg energetskog usjeva i to u promjenjivim procesnim uslovima. Osim promjene sastava mješavina goriva, ispitni režimi su uključivali značajnu promjenu procesne temperature (1250-1450 °C) i primarnu mjeru stepenovanog privoda vazduha u ložište. U tim uslovima sagorijevanja utvrđena je emisija nepoželjnih i štetnih komponenti u okolinu, efikasnost sagorijevanja, te je ocijenjena sklonost pepela iz mješavine goriva ka mogućem prljanju ogrijevnih površina u ložištu - analizirane su karakteristike čvrstih uzoraka depozita pepela iz zone reakcije kao i uzorci

šljake i pepela na izlazu iz ložišta. Ovdje je u oba slučaja kosagorijevanja, i lignita i mrkog uglja sa različitim vrstama biomase, pokazano da je u realnim uslovima moguće uspostaviti održiv proces konverzije primarne energije iz goriva sa niskim sadržajem nesagorjelog ugljenika u šljaci (*unburnt carbon content*, $UBC < 1\%$) kao i niskom emisijom CO_2 , ispod 350 mg/m_n^3 . Pri tome je i emisija NO_x ispod 320 mg/m_n^3 pri kosagorijevanju mješavina lignita na 1250°C , a kod mješavina mrkog uglja ispod 740 mg/m_n^3 na 1450°C . U oba slučaja, neto emisija CO_2 se smanjuje srazmjerno udjelu biomase u mješavini dok je emisija SO_2 još uvijek visoka, na nivou do 2500 mg/m_n^3 za mješavine lignita a za mješavine mrkog uglja do 6400 mg/m_n^3 . Ni jedna od tretiranih vrsta biomase, do nivoa primijenjenog sadržaja u mješavini sa lignitnim i mrkim ugljem, ne pogoršava odvijanje procesa sagorijevanja sa aspekta mogućeg prljanja i zašljakivanja pepela u ložištu.

Ključne reči - otpadna drvena biomasa, *Miscanthus*, ugalj, kosagorijevanje, emisije, pepeo

I INTRODUCTION

Decarbonization of the energy sector is a necessary imperative. In this sense, increasingly strict requirements lead to at least partial substitution of fossil fuels with renewable and/or alternative fuels. This need is particularly pronounced in the field of thermal energy in developing countries whose energy system is based on the use of their own coal resources as a primary energy carrier. The energy transition from fossil to renewable fuels is happening gradually due to the pronounced complexity of implementation, but also the need for a safe and stable energy system. This complexity is reflected in the very demanding technical and economic interventions on the existing energy plants. According to the projection, the transition process will last for some time, especially in countries that have yet to enter the transition process of the energy sector on a larger scale, approximately two or three decades - Bosnia and Herzegovina (BiH) is such an example of a country. In order to replace fossil fuels and carry out the transition in a sustainable way, the focus of research is on environmentally acceptable fuels while increasing the efficiency of primary energy use. The category of promising renewable fuels primarily includes biomass, either as waste from agricultural, forestry or wood-processing activities. In this regard, research into the possibility of co-firing of different types of coal and a wide range of different types of biomass is very current in this period and practically throughout the world. In addition to research that is directed and determined by the technological settings of combustion in the existing furnaces of a very large number of different versions of energy plants, research is also intensively carried out in the direction of the development of new, cleaner combustion technologies. The development of such new combustion technologies belongs to the development of the so-called Clean Coal Technologies (CCT), which provides a global scientific contribution aimed at mitigating the increase in average temperature and climate change on the planet Earth, including local and national level contribution to a cleaner environment, as already defined by the goals of the United Nations Agenda for Sustainable Development 2030, [1], as well as the Green Agenda of the EU and the

Balkans, [2]. In connection with the above, including taking into account the fact that the energy system of BiH is based predominantly on domestic coal (about 2/3 of the total electricity produced in BiH is produced as part of thermal power plants on lignite and brown coal), in BiH it is neither realistic nor it is fair to expect a drastic reduction in the use of the most important domestic energy resource, coal, in a shorter period of time. This is also discussed in the long-term energy strategy of Bosnia and Herzegovina, where the commitment to the use of domestic coal in the future is clearly demonstrated [3]. The situation is quite similar in other countries in the Balkans. On the other hand, the goals of the European Union (EU) are clear and defined by the European Green Deal initiative, which is a commitment to complete climate neutrality by 2050, which was also confirmed in the annual report of the International Energy Agency for last year, [4-5]. BiH, on its way to the EU, must respect and adapt to the global market and trends that tend towards clean energy. The European Green Deal initiative is also a great opportunity for the energy transition of BiH and other countries, i.e. monitoring the trend of clean energy production, which was also discussed by regional experts in the subject area, [6]. The trend of switching electricity production from coal to renewable energy sources is a rather slow, investment-demanding and long-term process. Because of this, but also because of the current representation and especially because of the stability and reliability of production, including a fairly stable price even in conditions of market disturbances, coal as the primary energy source in thermal power plants is projected to remain an important resource in the energy system in the coming period. At the same time, due to competition and increasingly strict requirements regarding the overall reduction of negative impact on the environment, coal-based electricity producers are forced to monitor and adopt new technologies. Therefore, in addition to a higher degree of utilization, these plants should also be classified as plants with a significantly lower burden on the environment based on the polluting components in the flue gases. At the same time, this prolongs the use of fossil fuels for a certain period of time in which a further alternative or replacement for fossil fuels with other sources of energy should be found. New technologies - Clean Coal Technologies (CCT), also include technologies with additional renewable or alternative fuel/co-firing, e.g. co-firing of coal with waste woody biomass (residues after felling and wood processing, small branches, sawdust). These fuels are considered renewable and neutral from the aspect of origin and combustion process, i.e. CO_2 generation, [7-8]. Emission CO_2 from conventional coal-fired thermal power plant boilers in Bosnia and Herzegovina are extremely high - on average above 950 kg/MWh . In addition, coals from Bosnia and Herzegovina generally belong to low heating value and poor reactivity coals, and the ash from these coals is very prone to slagging and fouling of heating surfaces in boilers. In the short-term and medium-term plans of the EU, on whose path BiH is also, co-firing of coal with biomass and/or fuel generated from municipal waste (fuels of the professional nomenclature SRF/RDF - *Refuse Derived Fuel / Solid Recovered Fuel*) is one of the most promising applications - see also [9-11]. Renewable fuels in energy and industrial boilers must meet several criteria, such as appropriate energy potential, availability of supply throughout the year, appropriate chemical composition and humidity to reduce transport costs and

contribution to thermal power, and adequate price. Woody residues, as biomass, represent a fuel that meets all these criteria. In addition to the known significant reserves of coal, whose balance and exploitation reserves according to the latest estimates amount to about $4,5 \times 10^9$ t, [12], Bosnia and Herzegovina also has significant biomass potential - it is estimated that the total annual technical energy potential of biomass residues amounts to more than 33 PJ, which is equivalent to more of 3 million tons of BH lignite, [9], [13]. The use of biomass and fuel from waste has been in use in technologically developed countries for a long time and with further expansion of that use. Namely, the partial use of biomass replaces a certain amount of coal in the production of electricity and heat, reduces the amount of undesirable and harmful gases, in the context of decarbonization, primarily CO_2 , because about 98% of the total CO_2 emission at the world level originates from the burning of fossil fuels, and 30 % to 40% of that CO_2 emission is caused by burning coal, [14-15]. Every year, burning coal produces more than 14 billion tons of carbon dioxide (CO_2), which is released into the atmosphere, of which CO_2 is mostly generated during the production of electricity, [16], [17]. In the paper [18], it is stated that the negative greenhouse effect is mainly contributed by CO_2 with a share of more than 55%. Therefore, obtaining specific scientific and socially useful data on the possibilities of such application of domestic fuel resources (combination of the application of lignite and brown coal, waste wood biomass and/or energy crops in the co-combustion process) represents a more than sufficient motivational basis for research - see also [13], [14], [17] and [19]. Specifically, in this case, different mixtures of lignite and brown coal, waste wood biomass and Miscanthus as a fast-growing energy crop were subjected to combustion under variable process conditions.

II EXPERIMENTAL RESEARCH SETTINGS

Primary fuels: Laboratory research pulverized-fuel combustion technology was carried out for mixtures primary fuels: brown coal and lignite with two different type of woody biomass, waste woody biomass and energy crop Miscanthus. The designations, basic description and characteristics of primary fuels are given below in Table 1:

- LC, a mixture of lignite coals from the Šikulje and Dubrava mines (mines from the area of the Tuzla mining basin, Bosnia and Herzegovina) in a 50:50 mass ratio - the mixture was formed in laboratory conditions after drying and grinding the two listed component lignite coals.
- BC, a mixture of brown coals that have been delivered and burned in Kakanj TPP for many years. These are brown coals from mines in the area of the central Bosnian mining basin, BiH. More precisely, these are the Kakanj, Breza, Zenica, Gračanica, Livno and Nova Bila mines. Grinding of this coal mixture was extracted directly from the boiler unit 6 in Kakanj TPP - from the coal dust channel behind the mills. At the same time, the mass fraction of coal from the Kakanj mine in the mixture is about 55%.
- WB, waste woody biomass, small sawdust - the mixture is formed from beech and spruce sawdust in a ratio of 50:50.

- MI, Miscanthus, a fast-growing energy crop extracted from a sample plot of an agricultural plantation in Butmir, BiH. Miscanthus (MI) and waste woody biomass (WB) were ground in a laboratory mill after drying.

Table 1. Basic characteristics of primary fuels, [20]

Fuel	LC	BC	WB	MI
Moisture, %	3.27	12.04	41.82	12.33
Ash, %	38.28	36.98	0.39	4.28
Volatiles, %	33.64	29.90	48.98	71.40
C_{fix} , %	24.79	20.94	8.83	11.99
Combustible, %	58.45	50.98	57.80	83.39
Carbon, total, %	38.72	35.42	28.79	42.60
Hydrogen, %	2.95	2.64	3.54	4.79
Sulphur, combustible, %	0.90	1.09	0.06	0.11
Nitrogen, %	0.86	0.62	0.11	0.11
Oxygen, %	15.02	11.21	25.29	35.78
Gross, HHV, kJ/kg	14,870	14,018	10,846	15,361
Net, LHV, kJ/kg	14,187	13,198	9,155	14,090

LC - lignite coal, BC - brown coal, data after partial drying..

WB - waste woody biomass, MI - Miscanthus, data for delivery condition.

The basic characteristics of mixtures of lignite and brown coal are high moisture and ash content in the delivery state (especially lignite), poor reactivity and low heating value. The key characteristics of both types of biomass are significant moisture content, especially in the case of waste woody biomass, relatively low ash content and a significant share of volatiles and total combustible materials. Favourable features of these types of biomass are the very low content of sulphur and nitrogen, Table 1.

Test regimes: By mixing mixtures of lignite and brown coal (LC or BC) and a certain type of biomass (WB and/or MI) in the appropriate selected ratio by mass, three mixtures of coal and biomass were formed, which were separate, as well as mixtures of lignite and brown of coal, subjected to combustion in the appropriate technical and technological conditions, Table 2. These conditions basically refer to the chosen appropriate process temperature - 1250 °C for combustion lignite and mixtures of lignite and biomass, and 1450 °C for combustion brown coal and its corresponding mixtures with biomass. The process temperature of 1250 °C basically corresponds to the pulverized-fuel combustion technology with dry bottom furnace - applied on all boilers within the Tuzla TPP, while the temperature of 1450 °C corresponds to the technology applied on the current boilers within the Kakanj TPP - pulverized-fuel combustion technology with slag tab furnace. In addition, all test regimes included a total coefficient of excess air for combustion of $\lambda=1.15$ and a staged supply of that air to the combustion chamber (air staging), where the subsequent flow of that air (OFA - Over Fire Air) was, $\text{OFA}=\Delta\lambda=\lambda-\lambda_1=0.20$, Table 2. Under these conditions, in the actual operation of unit 6 within the Tuzla TPP and all units in the Kakanj TPP, the subject mixtures of lignite (LC) and brown coal (BC) are burned.

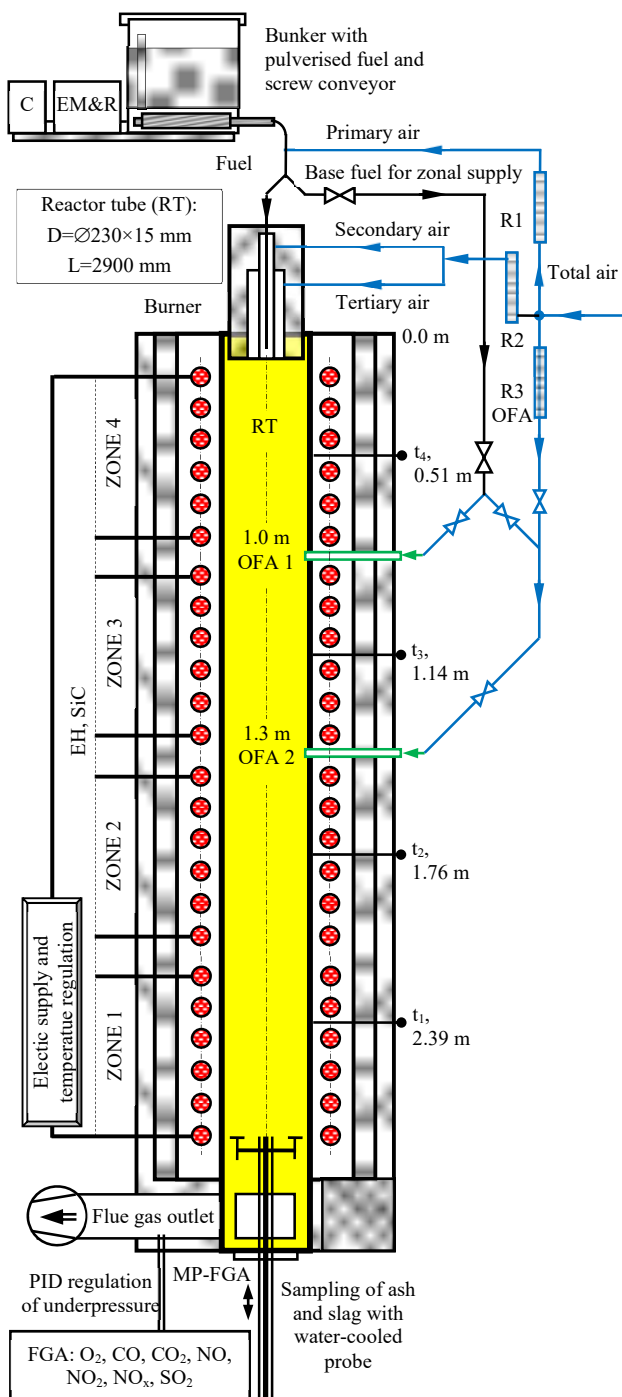


Figure 1. Principal scheme of part of the lab-scale furnace with indicated staging introduction of combustion air, [13]

In all test co-firing regimes, flue gas composition was continuously analyzed, on the basis of which the pollutant emission was determined: $\text{NO} + \text{NO}_2 = \text{NO}_x$, SO_2 , CO_2 and CO - the emission of all flue gas components was expressed in relation to the reference oxygen content in with dry flue gases, for $\text{O}_{2\text{ref}} = 6\%$, [21], - see also the principle scheme of the plant given in Figure 1.

In addition, during the test regimes, samples of ash deposits in the combustion chamber and samples of slag and ash at the exit from the combustion chamber were extracted and then analyzed. Considering the different bulk density of the test fuel mixtures, for each of them the characteristic of the fuel dispenser was previously determined so that the measurement results obtained during the research could be correlated with fuel consumption (kg/h), i.e. with the thermal load of the furnace based on the heat input through fuels (kW), [13].

Table 2. Test fuel mixtures and test regime settings

	Air staging $\lambda_1/\lambda=0.95/1.15$	
	Temperature 1250 °C	Temperature 1450 °C
No.	Designation and composition of the fuel mixture by mass	
1.	LC	BC
2.	LC:WB=85:15	BC:MI=93:7
3.	LC:WB:MI=80:13:7	BC:WB=85:15
4.	LC:WB:MI=75:15:10	BC:WB=75:25

LC - lignite, BC - brown coal, WB - waste woody biomass, MI - Miscanthus

Lab-scale furnace: An Automatic Controlled Tubular Reactor with electric SiC heaters is used for research. It was installed in the Solid Fuel Combustion Laboratory at the University of Sarajevo - Faculty of Mechanical Engineering, Figure 1 - see also [13], [17], [22-23]. At the facility, it is possible to research the combustion characteristics of different solid fuels at different temperatures and technological conditions. In short, the plant is designed to operate at a wide temperature interval (from ambient temperature to 1560 °C) and in conditions of different amounts and distribution of basic fuel and combustion air, including the ability to test reburning using both basic and additional solid and gasses fuels, for example natural gas. During the research, data concerning the efficiency of combustion, the deposit intensity and the characteristics of deposits from the reaction zone are obtained, as well as slag and ash at the reactor outlet. The emission of flue gas components O_2 , CO , CO_2 , NO , NO_2 , NO_x and SO_2 , HF , HCl , etc. are measured - [13], [17].

III RESEARCH RESULTS AND DISCUSSION

The investigation of the characteristics of co-firing on the macro principle of input-output, that is, reactants-products, as previously mentioned, was carried out at different process temperatures, at 1250 °C and 1450 °C. During the test regimes, the composition of flue gases was continuously analysed with the aim of determining the level of emissions of pollutants, and samples of ash deposits from the reaction zone/furnace, as well as samples of slag and ash at the exit from the incinerator, were also taken. These samples were then subjected to visual, chemical (CA) and ash characteristic temperature (AFT) analysis. In connection with the above, the obtained research results were presented separately - according to the type of basic fuel (lignite and brown coal) or according to the process temperature of combustion of that fuel.

- a) Lignite coal LC and biomass, $t=1250$ °C:**
Emission of pollutants, deposit, slag and ash

Figure 2 shows the results of NO_x and SO_2 emissions measured during the co-firing of a mixture of lignite LC, waste woody biomass WB and the fast-growing energy crop Miscanthus MI. The emission of NO_x during co-firing is at the level of the measured emission during the combustion of LC lignite mixture, i.e. at the level of 310 to 320 mg/m_n^3 and with small variations depending on the type and content of biomass in the mixture with lignite - this fact has been scientifically known for a long time and was also confirmed in these studies. In particular, the NO_x emission during combustion of LC lignite mixture is 320 mg/m_n^3 , while the average NO_x emission during co-firing with biomass is 315 mg/m_n^3 . In addition, compared to the current NO_x emission at unit 6 in TE Tuzla, these emissions are at the same level, which is again additional evidence of the adequately established key settings of research at the laboratory plant in relation to real operation. These are, first of all, the mean process temperature, the coefficient of excess air for combustion and the application of the primary measure of staged supply of that air in the furnace.

In terms of SO_2 emissions, the total sulphur content and especially the combustible sulphur content in the LC lignite mixture ($S_{\text{tot}}=1.57\%$, and $S_{\text{com}}=0.90\%$) when burning that fuel at a relatively lower process temperature of 1250 °C results in an expected SO_2 emission at the level of 2,360 to close to 2,500 mg/m_n^3 , which is comparable to the emission from a real plant when burning the subject lignite mixture LC. At the same time, it can be seen that the mentioned relatively lower temperature of the process favours a better binding of sulphur to the alkali from the ash. Here too, it is additionally visible that there is no significant change in SO_2 emission with regard to the type and content of biomass in the mixture with lignite - the emission decreases quite slightly with the increase in the proportion of biomass in the mixture. So, for example, SO_2 emission during co-firing with a total of 25% biomass (15% waste woody biomass and 10% Miscanthus) in a mixture with lignite is only 150 mg/m_n^3 lower (or only 6%) compared to the emission when burning a mixture of LC lignite under the same conditions, $e_{\text{LC-SO}_2}=2,490 \text{ mg}/\text{m}_n^3$, Figure 2.

Due to the relatively lower combustion process temperature, the slightly less favourable granulation of both types of biomass compared to the LC lignite mixture, and the greater mass content of biomass in the mixture with LC (biomass content in the mixture from 15% to 25%), slightly higher CO emissions were measured here at co-firing in relation to the emission during the combustion of the LC lignite mixture, Figure 3 - see the CO emission values at the biomass content in the mixture of 15%, 20% and 25%: 300 mg/m_n^3 , 320 mg/m_n^3 and 346 mg/m_n^3 .

That CO emission during combustion of LC is at the level of 130 mg/m_n^3 . This is certainly connected with slightly lower NO_x emissions and especially CO_2 emissions in co-firing regimes with a proportion of biomass in the mixture $\geq 20\%$, Figure 3. More specifically, in co-firing with 25% biomass in the mixture (of which 15% is WB and 10% MI) emission of NO_x and CO_2 is 310 mg/m_n^3 , and 0.253 kg/m_n^3 . It should also be emphasized here that the structure of the MI ground, compared to the ground of WB, is different, it is more fibrous, and that the rest of the MI fraction on a sieve with a perforation of 1 mm is 0.83%, while

through a sieve with a perforation of 90 μm passed 14.03% of MI fractions, [20].

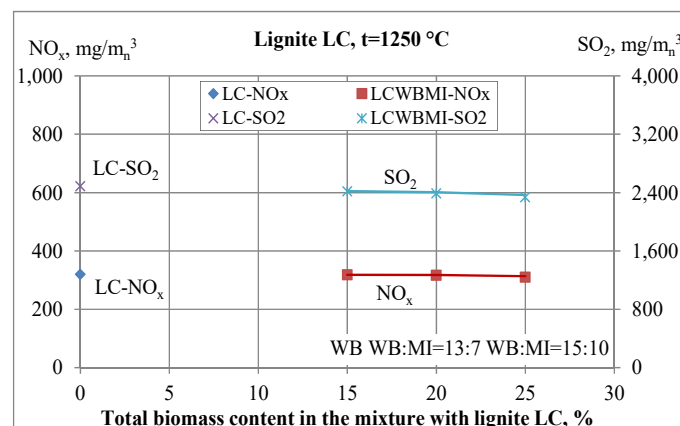


Figure 2. NO_x and SO_2 emissions for the lignite coal LC, woody biomass WB and Miscanthus MI

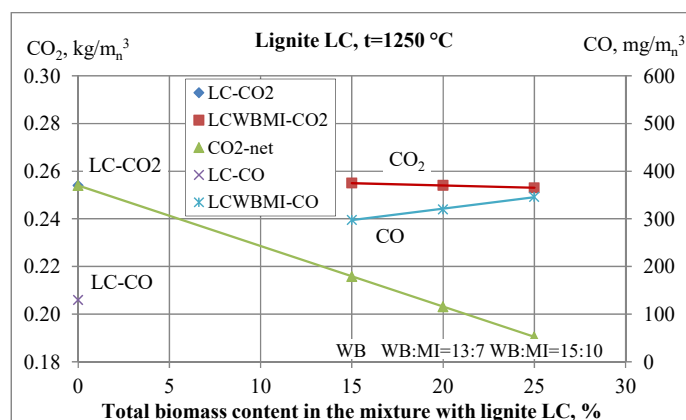


Figure 3. CO_2 and CO emissions for the lignite coal LC, woody biomass WB and Miscanthus MI

When designing a furnace and choosing a combustion technology, it is essential to know a wider range of properties of ash from fuel, especially the properties with regard to the ash's propensity for fouling and slagging. Therefore, for a more reliable assessment of the behaviour of ash in the combustion process, it is necessary, in addition to the assessment through classic empirical criteria based on the composition of the ash, to supplement this knowledge beforehand through laboratory or operational research. These findings in the current era of decarbonization are equally important for existing plants when there is a need to introduce renewable fuels into operation. In this regard, the following Figure 4 shows the results of the chemical analysis of the composition of ash from a mixture of lignite and the composition of slag resulting from the co-firing of that LC with 15% of WB (LC:WB=85:15) and LC with 15% WB and 10% MI (LC:WB:MI=75:15:10). Biomass in a mixture with LC not only changes the total ash in the mixture (reduces it), but also changes the chemical composition of that ash. In addition to that, during the combustion process there is an overcomposition of

components from the ash in terms of location and structure of the solid sample. From Figure 4 it is evident that MI in the mixture, compared to WB, mitigates the reduction of SiO_2 and Fe_2O_3 , while it contributes to the increase of CaO , MgO , Na_2O and K_2O components - see also [13], [17-18], [24-25].

As a result of the change in the chemical composition of the ash by adding biomass to the mixture with LC, the physical properties of the ash and thus the characteristic temperature of the ash also change. In this case, the content of SiO_2 , which significantly determines these characteristic temperatures, is 59.01% in lignite, slightly below 7% in WB, and almost 68% in MI - [13], [20], [25].

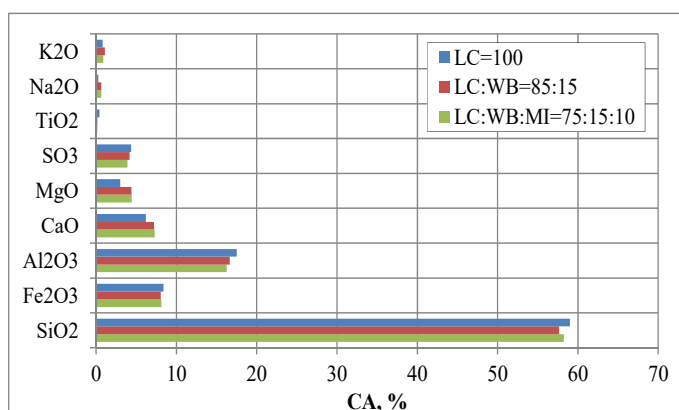


Figure 4. Chemical analysis (CA) of ash from LC lignite and slag during co-firing with different types and content of biomass

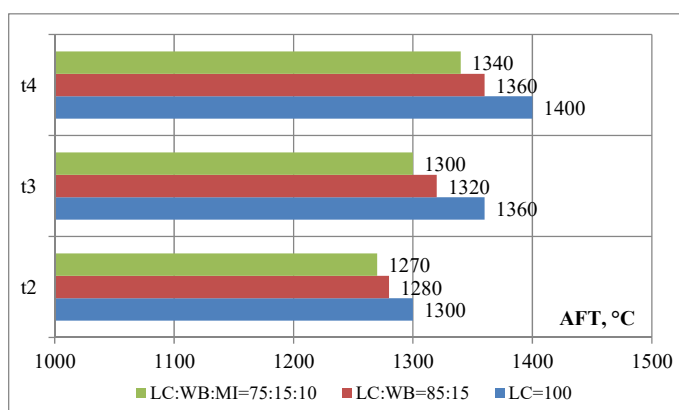


Figure 5. Ash fusion temperature (AFT) from lignite coal LC and slag during co-firing LC with types and content of biomass in the mixture; t2 - softening, t3 - hemisphere, t4 - flowing

In addition, there is also a significant difference in the content of Fe_2O_3 in the component fuels - this content is 8.38% in LC, only 1.05% in WB, and 4% in MI. The difference in Al_2O_3 content is even more pronounced - it is 17.53% in LC, 0.23% in WB and only 0.1% in MI. On the contrary, the content of CaO , MgO , Na_2O and K_2O compounds is significantly higher in biomass ash, especially in waste wood biomass. All this, in general, with an increase in the content of either one or both types of biomass, contributes to a decrease in the characteristic ash temperatures in the fuel mixture, Figure. 5.

Furthermore, regardless of the type and content of biomass in the lignite mixture, all samples of ash deposits from the furnace formed during co-firing regimes in the given process settings are loose - the deposit can be easily removed from the ceramic tablet already at a smaller tilt of the tablet, due to gravity, Figure 6.



Figure 6. Samples of deposits of ash from the furnace and slag at the exit from the furnace during the co-firing of LC lignite with different types and content of biomass in the mixture – see also [9] and [25]

And all the slag samples taken at the exit from the furnace are in a loose state and without the appearance of initial fused particles - the slag particles are slightly larger during co-firing compared to the combustion of the lignite mixture. Overall, for treated mixtures up to 25% biomass content by mass in the applied co-firing conditions, there is no occurrence of ash slagging in the furnace, Figure 6, [20].

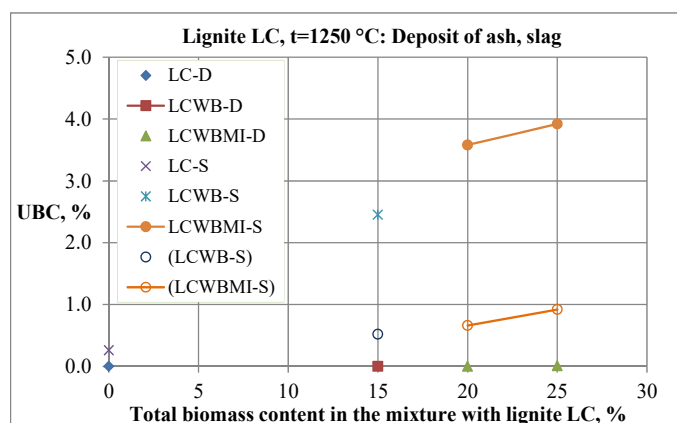


Figure 7. Unburnt carbon content (UBC) in deposit and slag samples from LC lignite co-firing with different types and biomass content in the mixture

Regarding the efficiency of the combustion process, observed through the content of combustible substances in the slag and ash samples at the exit from the furnace, the research results show that it is possible to establish a practically acceptable combustion, Figure 7.

It primarily shows the measured very low carbon content, or even equal to 0, in the ash deposit samples from the combustion chamber. The slightly higher values of the carbon content in the slag obtained in the co-firing regimes with $\geq 20\%$ biomass in the mixture indicate that in the treated combustion conditions there is an insufficiently long path or insufficient time for a more complete combustion of larger fuel particles, specifically biomass, i.e. that in the given settings there is no conditions for a more efficient combustion phase. However, by changing the thermal load of the combustion chamber, i.e. by reducing the consumption of the same fuel mixtures by 50%, this indicator of combustion efficiency improves significantly - in Figure 7, see the results of the UBC analysis of slag for those combustion regimes, labels: (LCWB-S) and (LCWBMI-S) where $UBC < 1\%$. Additionally, in the conditions of real operation with in-flight combustion and in the case of significant heat loss, it is possible to reduce it to a practically acceptable level (below 2%) by introducing an additional grate for afterburning - establishment of combined combustion.

b) Brown coal BC and biomass, $t=1450\text{ }^{\circ}\text{C}$:

Emission of pollutants, deposit, slag and ash

In contrast to the previous case, this process temperature basically corresponds to the pulverized-fuel combustion technology with slag tap furnace. In this regard, Figure 8 shows the results of NO_x and SO_2 emissions during combustion of brown coal BC and co-firing of different types and proportions of biomass with brown coal. Considering that the temperature of the process is high, consequently the binding of sulphur to the alkali from the ash is also lower, which with a rather high content of sulphur in the basic mixture of brown coal BC ($S_{\text{com}}=1.09\%$), generates SO_2 emissions at the expected high level and in the range of 6,000 to 6,400 mg/m_n^3 . Nevertheless, these are slightly lower SO_2 emissions compared to the same emission during the combustion of the BC brown coal mixture, where this emission is at the level of around 6,800 mg/m_n^3 . As for the NO_x emission, it can be noted that this emission during co-firing is in the range between 700 and 740 mg/m_n^3 , which is somewhat lower compared to the NO_x emission measured during the combustion of a mixture of brown coals $e_{\text{BC}}=750\text{ } \text{mg}/\text{m}_n^3$ - in real terms in the operation of block 6 of the Kakanj TPP, that emission is in the range of 750÷850 mg/m_n^3 . Therefore, the co-firing of coal and biomass practically does not reduce the level of NO_x emissions, or the reduction is very slight compared to the combustion of only brown coal - see also [17-18].

As expected, relatively low CO emissions ($<150\text{ } \text{mg}/\text{m}_n^3$), were measured here, primarily due to the high combustion temperature in all regimes, Figure 9.

At the same time, it is noticeable that the CO emission increases with the increase in biomass content in the mixture with coal. This phenomenon can be linked to a significantly higher content of volatiles in the biomass (WB has almost 50%, and MI over 70%) compared to BC coal ($<30\%$), as well as to the grinding quality of certain primary fuels in the mixture - at both types of biomass have a significantly higher content of larger slag fractions compared to brown coal. E.g. the share of brown coal

fractions that passed through the 90 μm sieve is 50.41%, while it is 13% for MI and only 5% for WB. However, this emission trend also corresponds well to the NO_x emission trend for all test mixtures. On the other hand, in accordance with the necessary and current decarbonization, it is very important to point out here that the net emission of CO_2 during the co-firing of fossil coal with biomass decreases in proportion to the content of biomass in the mixture.

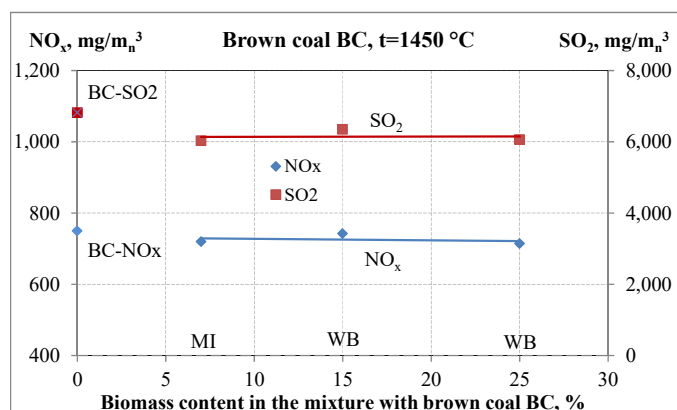


Figure 8. NO_x and SO_2 emissions for the brown coal BC, woody biomass WB and Miscanthus MI

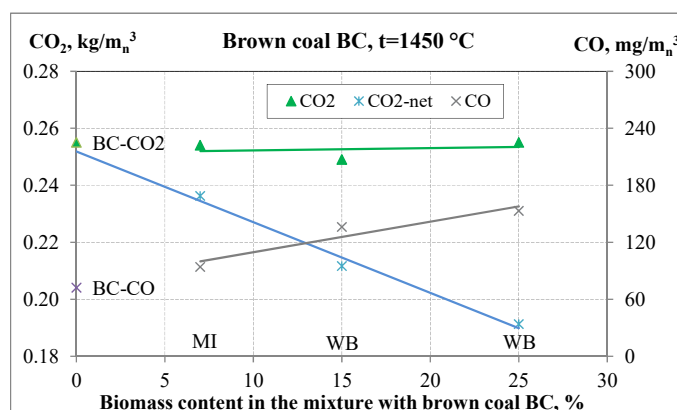


Figure 9. CO_2 and CO emissions for the brown coal BC, woody biomass WB and Miscanthus MI



Figure 10. Samples of deposits and slag during co-firing of biomass with coal BC - see also [22]

In this set of test regimes, samples of ash deposits from the

furnace as well as samples of slag at the exit from the furnace were excluded, Figure 10. In this case, the ash deposit is always in a molten state and upon cooling it creates a hard and hard-to-separate deposit from the surface of the ceramic tablet, which in laboratory research represents the uncooled surface in the furnace. In contrast, the sample of the formed deposit from the slightly rounded tip of the probe, which is constantly cooled by water, has a completely loose granular structure. Furthermore, in all samples of slag from the bottom of the hearth, a significant proportion of larger fused pieces is visible, which is a regular occurrence in the burning of BC brown coal. From the above, it can be concluded that, from the aspect of ash properties, it is possible to efficiently co-firing with unhindered removal of slag in a liquid state - the ash spillage temperature from brown coal BC is 1350 °C. Therefore, it is clear that even during co-firing, the occurrence of slagging is possible - practically to the same extent and in the same manner as during the combustion of the brown coal BC. The carbon content in the deposit is on average almost 0%, and in the slag below 0.5%.

IV CONCLUSION

The research results clearly show that treated renewable and CO₂ neutral fuels, waste woody biomass and Miscanthus as a fast-growing energy crop are suitable and promising for application with the aim of at least partial decarbonization and the establishment of a sustainable thermal energy sector in the current time of energy transition. This is especially important for developing countries whose energy system is based predominantly on the use of their own coal resources. Research has shown that in different technological combustion conditions, it is possible to use treated types of biomass unhindered, up to 25% of the mixture with lignite or brown coal. As CO₂ - neutral fuels, the use of these types of biomass generally reduces net CO₂ emissions in proportion to its share in the coal mixture. In this particular case, it was shown that stable and smooth combustion of the fuels in question can be performed with acceptable and enviable energy efficiency - CO emission below 350 mg/m_n³ with UBC<1%. More precisely, such an efficient process of conversion of primary energy from fuel can be established in existing furnace with pulverized-fuel combustion technology, regardless of the mode of removal of slag from the combustor, dry or liquid. At the same time, in real conditions, it is possible to further improve the efficiency of the combustion process with high-quality thermal and mechanical fuel preparation. The emission of NO_x during co-firing is at the emission level when burning the basic mixture of coal, lignite or brown coal, and practically does not depend on the type and content of biomass in the mixture. Specifically, under the given combustion conditions, the NO_x emission for lignite mixtures is at the level of 320 mg/m_n³ and for brown coal mixtures up to 740 mg/m_n³. Further, the SO₂ emission is practically quite high in both cases. It mainly depends on the combustion temperature and sulphur content, especially combustible in the basic fuel - in lignite or brown coal, and almost insignificantly on the type and content of biomass in the mixture with coal. When burning lignite mixtures, the SO₂ emission is up to 2,500 mg/m_n³, and with brown coal mixtures up to 6400 mg/m_n³ - brown coal has a fairly high content of total sulphur, 2.46%. Although the content of biomass in the mixture with coal directly changes the chemical

and physical properties of the total ash in the mixture, the results of the research show that the co-firing of the fuels can be carried out smoothly under the established conditions and from the aspect of the behaviour of the ash from the mixture in the process. More precisely, the presence of these two types of biomass does not worsen the process in terms of slagging/fouling heating surfaces in the boiler. For the combustion of mixtures with lignite, all solid samples of ash deposits removed from the combustion zone, as well as all samples of slag and ash at the exit from the furnace, in a loose and highly dispersed state without initial fused particles, which are a prerequisite for the intensification of unwanted contamination of heating surfaces. Also, the presence of biomass, when co-firing with brown coal, does not worsen the basic behaviour of coal ash.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Part of the results presented in this paper arose during research within the implementation of three on-going projects:

- *Experimental research on the possibility of using alternative fuels in the direction of the necessary energy transition of Bosnia and Herzegovina,*
- *Waste to energy in Adria region for sustainability improvement,* financed by the Ministry of Science, Higher Education and Youth of Sarajevo Canton for 2021. and 2022.,
- *Education of students through a research project on the possibility of using waste as an energy fuel,* which is financed by the Ministry of Civil Affairs of Bosnia and Herzegovina within the Program for the preparation of projects and potential candidates for funds from the HORIZONT fund for 2022,

which were significantly helped by the University of Sarajevo - Faculty of Mechanical Engineering, and we sincerely thank them all as researchers.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/2030agenda> [pristupljeno 26.02.2023]
- [2] RESET: European Green Deal is chance for energy transition in BiH, <https://balkangreenenergynews.com/reset-european-green-deal-is-chance-for-energy-transition-in-bih/> [pristupljeno 26.02.2023]
- [3] Okvirna energetska strategija Bosne i Hercegovine do 2035. godine, http://www.mvteo.gov.ba/data/Home/Dokumenti/Energetika/Okvirna_energetska_strategija_Bosne_i_Hercegovine_do_2035_BIH_FINALNA.PDF, [pristupljeno 20.02.2023]
- [4] European Union 2020: Energy Policy Review, <https://www.iea.org/reports/european-union-2020> [pristupljeno 20.02.2023]
- [5] Global Energy & CO₂ Status Report 2019, IEA, <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019> [pristupljeno 20.02.2023]
- [6] <https://balkangreenenergynews.com/rs/tema/zelena-agenda-za-zapadni-balkan/>, [pristupljeno 20.02.2023]
- [7] Zhukov, E.B., Puzirev, E.M., Menyayev, K.V. Co-combustion technology of coal and wood waste, in Proc. 8th International Symposium on Coal Combustion, Clean Coal Technology and Sustainable Development ISCC 2015, Singapore, pp. 165-172, 2016. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2023-0_22
- [8] Milovanović, Z., Papić, Lj., Dumonjić-Milovanović, S., Milasinović, A., Knežević, D.M. Unconventional, improved and new technologies for the production of useful forms of energy, in *Sustainable energy planning: Technologies and energy efficiency*, DQM monograph library Quality and reliability in practice, Ch. 9, pp 151-178, 2017.

- [9] Lekić, A., Smajević, I., Hodžić, N., et al. *Advanced Decentralised Energy Generation Systems in Western Balkans* - ADEG, Projekt FP6, (2004-2007) National Technical University of Athens, Institut IVD Stuttgart, Fakultet Strojarsva i Brodogradnje Zagreb, Mašinski fakultet Sarajevo, Institut Vinča, IST Portugal, 2007. <https://cordis.europa.eu/project/id/509187>
- [10] Hodžić, N., Metović, S., Kazagić, A. Effects of primary measures in combustion chamber on cofiring of coal with woody biomass, in: Hadžikadić, M., Avdaković, S. (Eds.), *Advanced Technologies, Systems, and Applications II. Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol 28, pp. 1102-1111, Springer, Cham, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71321-2_93
- [11] Hodžić, N., Metović, S., Kazagić, A. Lab-scale tests as support to selection of sustainable coal combustion technology - Case study: Support to design of TPP Kakanj, Unit 8-, in: Karabegović I. (Ed.), *New Technologies, Development and Application*, NT 2018. *Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol 42, pp 377-385, Springer, Cham, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-319-90893-9_45
- [12] The impact of coal quality on electricity production costs and the price of coal; Study; In Bosnian, Client: JP Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo, Executor: Faculty of Mechanical Engineering Sarajevo and Mining Institute d.d. Tuzla, Sarajevo, 2014.
- [13] Hodžić, N. *Research on co-combustion of coal and biomass aimed at reducing emissions by primary measures in the furnace*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Sarajevo, 2016.
- [14] Buddhike, N.M., Suyin, G., Carol, E., Hoon, K.N. Biomass as an energy source in coal co-firing and its feasibility enhancement via pre-treatment techniques, *Fuel Processing Technology*, Vol. 159, pp. 287-305, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.01.029>
- [15] Demirbas, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 171-192, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.02.002>
- [16] Demirbas, A. Carbon Dioxide Emissions and Carbonation Sensors, *Journal Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 30, No. 1, pp. 70-78, 2008. <https://doi.org/10.1080/00908310600628263>
- [17] Hodžić, N. *Combustion of coal and waste wood biomass in flight with the application of primary measures in the burner - laboratory research with a proposal for application*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Sarajevo, 2021.
- [18] Kazagić, A. *Research on the combustion of pulverized Bosnian coals aimed at the selection of new and improvement of existing combustion technologies in thermal power plants*, Faculty of Mechanical Engineering, University of Sarajevo, Sarajevo, 2009.
- [19] Nussbaumer, T. Combustion and co-combustion of biomass: Fundamentals, technologies and primary measures for emission reduction, *Energy Fuels*, Vol. 17, No. 6, pp. 1510-1521, 2003. <https://doi.org/10.1021/ef030031q>
- [20] Final report: *For the Feasibility Study on waste wood and agricultural biomass firing of JP Elektroprivreda BiH Thermal Power Plants* (2016), BMZ no. 2013.67.176, VPC GmbH Kraftwerkstraße 22 03226 Vetschau / Spreewald,
- [21] Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) (recast) (Text with EEA relevance), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32010L0075> [pristupljeno 21.02.2023]
- [22] Hodžić, N., Kadić, K., Kazagić, A. Emissions of flue gases in staged cofiring of coal with waste woody biomass using natural gas - reburning technology, *International Journal of Engineering Science Invention (IJESI)*, Vol. 11, No. 11, pp. 15-21, 2022. <https://doi.org/10.35629/6734>
- [23] Hodžić, N., Kadić, K., Kazagić, A. Effects of natural gas application in combustion of pulverized solid fuels - reburning technology, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 1-6, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.01H>
- [24] Purbasari, A., Samadhi, T.W., Bindar, Y. Thermal and ash characterization of Indonesian bamboo and its potential for solid fuel and waste valorization, *International Journal of Renewable Energy Development*, Vol.5, No. 2, pp. 95-100, 2016. <https://doi.org/10.14710/ijred.5.2.95-100>
- [25] Hodžić, N., Kazagić, A., Kadić, K. Analysis of the behavior of the ash depending on the temperature of combustion and air supply system. In: Karabegović I. (Ed.), *New Technologies, Development and Application IV. NT 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Cham., Vol. 233, pp. 365-373, 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75275-0_41
- [26] Nussbaumer, T. Combustion and co-combustion of biomass: Fundamentals, technologies and primary measures for emission reduction, *Energy Fuels*, Vol. 17, No. 6, pp. 1510-1521, 2003. <https://doi.org/10.1021/ef030031q>
- [27] Gyeong-Min, K., Jae Hyung, C., Chung-Hwan, J., Dong-Ha, L. Effects of cofiring coal and biomass fuel on the pulverized coal injection combustion zone in blast furnaces, *Energies*, Vol. 15, No. 2, pp. 655, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15020655>
- [28] Hodžić, N., Kazagić, A., Metović, S. Influence of Over Fire Air System on NO_x Emissions - An Experimental Case Study, *Thermal Science*, Vol. 23, No. 3B, pp. 2037-2045, 2019. <https://doi.org/10.2298/TSCI180619238H>
- [29] Hodžić, N., Kazagić, A., Smajević, I. Influence of multiple air staging and reburning on NO_x emissions during co-firing of low rank brown coal with woody biomass and natural gas, *Applied Energy*, Vol. 168, pp. 38-47, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.081>
- [30] Kazagić, A., Hodžić, N., Metović, S. Co-ombustion of low-rank coal with woody biomass and miscanthus: an experimental study, *Energies*, Vol. 11, No. 3, pp. 601, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11030601>
- [31] Fakudze, S., Chen, J. A critical review on co-hydrothermal carbonization of biomass and fossil-based feed-stocks for cleaner solid fuel production: Synergistic effects and environmental benefits, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 457, 141004, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141004>
- [32] Chae, T., Lee, J., Lee, Y., Yang, W., Ryu, C. Pilot-scale experimental study on impacts of biomass cofiring methods to NO_x emission from pulverized coal boilers - Part 2: NO_x Reduction Capability through Reburning versus Cofiring, *Energies*, Vol. 14, No. 20, pp. 6552, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14206552>

AUTORI/AUTHORS

Dr. sc. Nihad Hodžić - Associate professor, University of Sarajevo - Mechanical Engineering Faculty, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, hodzic@mef.unsa.ba, ORCID [0000-0003-2188-9139](https://orcid.org/0000-0003-2188-9139)

MS Kenan Kadić, JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Power utility Power plant Kakanj, Kakanj, Bosnia and Herzegovina,, ke.kadic@epbih.ba, ORCID [0000-0002-8860-4102](https://orcid.org/0000-0002-8860-4102)

Dr. sc. Anes Kazagić, JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Power utility Department for strategic development, Bosnia and Herzegovina,, a.kazagic@epbih.ba, ORCID [0000-0002-8350-9528](https://orcid.org/0000-0002-8350-9528)

Water and Electricity Consumption and Carbon Footprint of Washing Machines

Potrošnja vode, električne energije i ugljenični otisak veš mašina

Filip Nastić, Dušan Gordić, Davor Končalović, Vladimir Vukašinović, Jelena Nikolić, Nebojša Jurišević

Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac

Abstract - Considering the relatively high share of households in global final energy and water consumption, washing machines are home appliances with a significant potential for electricity and water saving. The potential depends on the energy rating of a washing machine and the consumption habits of consumers in a household. Therefore, a survey was conducted to determine the laundry habits of domestic consumers and the characteristics of their washing machines. Considering collected information, the annual consumption of water and electrical energy and carbon footprint caused by the use of washing machines can be estimated and compared with the rest of the world. It was concluded that laundry washing causes around 10% and 4% of total water and energy consumption in the Republic of Serbia, respectively, with a carbon footprint of 423.33 ktCO₂.

Index Terms – Carbon footprint, Consumer habits, Energy efficiency, Saving potential, Sustainability, Washing machines

Rezime – Relativno visok udeo domaćinstava u globalnoj finalnoj potrošnji energije i vode, ukazuje na potencijal veš mašina sa aspekta uštede električne energije i vode. Pomenuti potencijal zavisi od karakteristika veš mašina, kao i od potrošačkih navika korisnika. Shodno tome, anketa je sprovedena sa ciljem da se utvrde potrošačke navike korisnika u Republici Srbiji kao i karakteristike njihovih veš mašina. Nakon prikupljanja potrebnih podataka procenjena je godišnja potrošnja vode, električne energije i odgovarajući karbonski otisak. Dobijeni rezultati su upoređeni sa referentnim uzorcima. Zaključeno je da veš mašine u Republici Srbiji učestvuju u okvirno 10% i 4% ukupne potrošnje vode i električne energije, respektivno, sa ugljeničnim otiskom od 423.33 ktCO₂.

Ključne reči – karbonski otisak, potrošačke navike, energetska efikasnost, potencijal uštede, održivost, veš mašine

I INTRODUCTION

Climate changes, air pollution, human health, environmental pollution, available drinking water, and available energy are currently some of the biggest problems the world is facing caused by improper human behaviour towards energy and natural resources [1]. The mentioned problems can be partly solved with adequate energy and water management in households. According to Eurostat, households shared 27% of final energy

consumption in the European Union in 2020 [2]. According to the Statistical Office of the Republic of Serbia [3], the average household consumed around 5,050 kWh of electricity in 2020, while the average household in Europe consumed around 15,119 kWh [4]. Energy and water consumption in households mostly depend on the consumption habits of members. Taking that into account, it can be assumed that households carry a huge potential for energy and water savings. As claimed by Wood & Newborough [5] there are three general routes for reducing energy consumption and CO₂ emissions in the residential sector:

1. Replace the existing housing stock with low-energy buildings designed primarily to minimize heating and cooling loads;
2. Develop, and achieve widespread replication for, low-energy domestic equipment (e.g. appliances, lighting, and IT);
3. Promote and achieve „energy-conscious” behaviour among the users.

Out of these three proposed routes, the second and third could offer significant changes with less economic effort than the first one, especially in countries with a lower level of development. This study will focus, on one specific home appliance – washing machines, characterized by its significant electricity and water consumption. Götz and Tholen [6] stated that washing laundry is one of the most widespread housework tasks worldwide, with around 840 million domestic washing machines consuming more than 92 TWh of electricity and 19 billion m³ of water, and emitting more than 62 MtCO₂.

According to Pakula and Stamminger [7] the electricity and water consumption for laundry washing in private households is determined by the technology of the washing machines, the number of washes, the chosen washing temperature, and the load size. Analysing the electrical energy consumption of washing machines Milani et al. [8] showed a positive correlation between the energy consumption of washing machines and the year of purchase. This correlation can be explained by considering that technology improves over the years increasing efficiency and reducing energy consumption per cycle. Monitoring the washing machines market in Europe, Mischel et al. [9] demonstrated that washing machines made after 2010 use significantly less energy, for example, washing machines made in 2009 averagely used around 226 kWh per year, while washing machines made in 2014

averagely used around 185 kWh per year. Fatih & Orphan [10] analysed home appliances' load profiles and power consumption. They concluded that most of the energy consumed by the washing machine is used for water heating. For example, for the cotton and synthetics washing program at 40°C at full load, 90.3% of the power consumption was caused by the water heater. As stated by GINETEX (the International Association for Textile Care Labelling) [11], the proper use of the washing machine implies:

- Washing at a lower temperature which still ensures a satisfactory result;
- Reducing the washing temperature from 40 to 30°C may reduce approximately 30% of the consumed energy;
- Always use the entire load capacity of the washing machine in use (a half-loaded machine will consume 50 to 70% more energy per kg of textiles);
- A quick wash cycle may serve another 20% of the energy consumption;
- The use of washing temperatures higher than 40°C may help to remove difficult stains but lead to significantly higher energy consumption (60°C + 50%, 90°C more than double the energy used).

To summarize the overview, a variety of factors (primarily, age and consumer habits) influence the electricity and water consumption of washing machines. The goal of this work is to determine the laundry habits of domestic consumers in the

Republic of Serbia and the characteristics of their washing machines, and then considering the collected information to estimate the consumption of water and electrical energy and carbon footprint caused by the use of washing machines.

II SURVEY ON WASHING MACHINES

The internet survey was conducted using Google Forms [12] platform, with the goal of collecting information about washing machine characteristics and laundry washing habits of the citizens in the Republic of Serbia. The survey was shared using social networks and popular messaging platforms. The number of collected samples is 306, with slightly more female respondents (61.44%). The age distribution of the respondents is shown in table 1.

Table 1. The age distribution of the respondents

Age	0 – 18	19 – 29	30 – 44	45 – 59	60 – 79
Share	3.26%	41.83%	35.29%	16.67%	2.61%

Question 1: Which company made your washing machine? (Figure 1)?

The results of the survey show that washing machines produced by 3 companies („Gorenje“ (33.99%), „Beko“ (18.82%), and „Candy“ (9.57%)) have a share of more than 60% of the market. The average capacity of used washing machines is 7 kg.

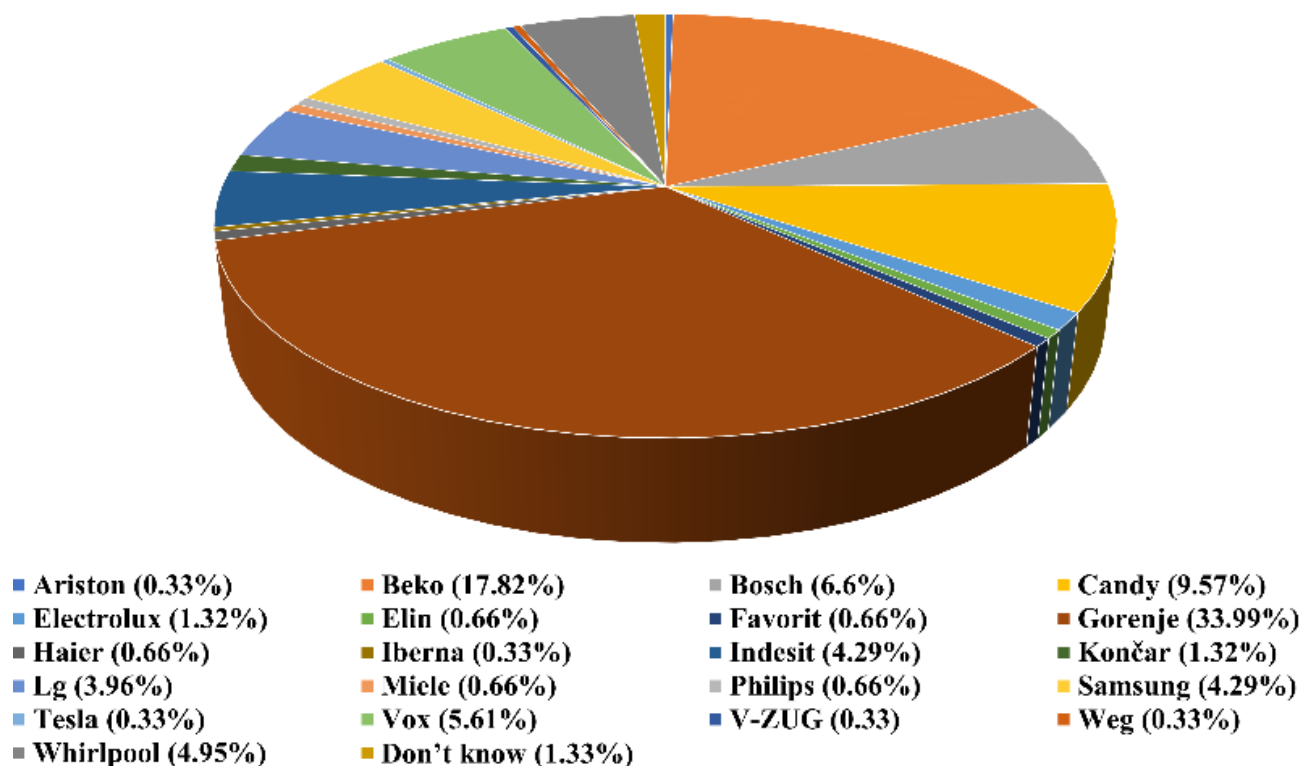


Figure 1. Manufacturers of the washing machines

Question 2: How old is your washing machine (Table 2)?

Table 2. Age of the washing machines

Answer	Share
0 – 2 years	25.49%
3 – 5 years	32.03%
6 – 8 years	14.38%
9 – 10 years	4.58%
10+ years	17.65%
Don't know	5.87%

Answers indicate that most of the washing machines are between 3 and 5 years old (32.03%). Approximately, every fourth washing machine was bought in the last two years, while every sixth machine is older than 10 years. According to the survey, the average age of washing machines is around 7 years, which corresponds to the average age in German households [7].

Question 3: How many times a week do you wash your clothes at 30°C and 40°C (Table 3)?

Table 3. Number of washes per week at 30°C and 40°C

Answer	Share
0	4.58%
1 - 2	42.48%
3 - 4	30.07%
5	11.76%
5+	11.11%

It is noticeable that most people wash at 30°C and 40°C between 1 and 4 times a week (72.55%). According to the results of the survey average number of washes at 30°C and 40°C is 3 times a week.

Question 4: How many times a week do you wash your clothes at 60°C (Table 4)?

Table 4. Number of washes per week at 60°C

Answer	Share
0	18.95%
1 - 2	57.19%
3 - 4	15.36%
5	4.9%
5+	3.6%

Similarly to 30°C and 40°C, most people wash their laundry 1 to 4 times a week at 60°C (72.55%). The average number of washes

at 60°C is around 1.8 times a week.

Question 5: How many times a week do you wash your clothes at 90°C (Table 5)?

Table 5. Number of washes per week at 90°C

Answer	Share
0	19.93%
1 - 2	63.4%
3 - 4	11.44%
5	2.94%
5+	2.29%

According to answers, a high share of respondents does not use the 90°C regime, but among the people using it, the most of them wash 1 to 4 times a week (74.84%). The average number of washes at 90°C is 1.5 times a week.

Question 6: How many times a month do you wash your white laundry at partial load (Table 6)?

Table 6. Number of monthly washes at partial load (white laundry)

Answer	Share
0	27.12%
1 - 2	28.1%
3 - 5	23.53%
6 - 10	14.38%
10+	5.56%

There is a high share of people with responsible consuming habits washing white laundry at partial loads at most 2 times a month (55.22%). Due to the bad consuming habits of the rest of the respondents, the average number of washes at partial load for white laundry is 4 times a month.

Question 7: How many times a month do you wash your colourful laundry at partial load (Table 7)?

Table 7. Number of monthly washes at partial load (colourful laundry)

Answer	Share
0	22.22%
1 - 2	15.69%
3 - 5	26.14%
6 - 10	19.93%
10+	14.7%

In the case of colourful laundry, people pay less attention due to lower washing temperatures. More than a third of respondents (37.91%) showed responsible consuming habits by washing colourful laundry at partial load at most 2 times a month. The average number of washes of colourful laundry at partial load is 5.5 times a month.

Considering the results of the survey, the following can be stated:

- The average capacity of the washing machines is 7 kg;
- The average age of the washing machines is 7 years;
- Average number of washes on 30°C and 40°C, 60°C, and 90°C is 3, 1.8, 1.5 times a week, respectively;
- Around a quarter of respondents showed responsible consuming habits, avoiding more than 2 washes a month at a partial load;
- Average number of washes for white and colourful laundry at partial load is 4 and 5.5 times a month respectively.

III ESTIMATING THE ENERGY AND WATER CONSUMPTION

The annual energy and water consumption for laundry washing for the Republic of Serbia estimation framework is shown in Figure 2.

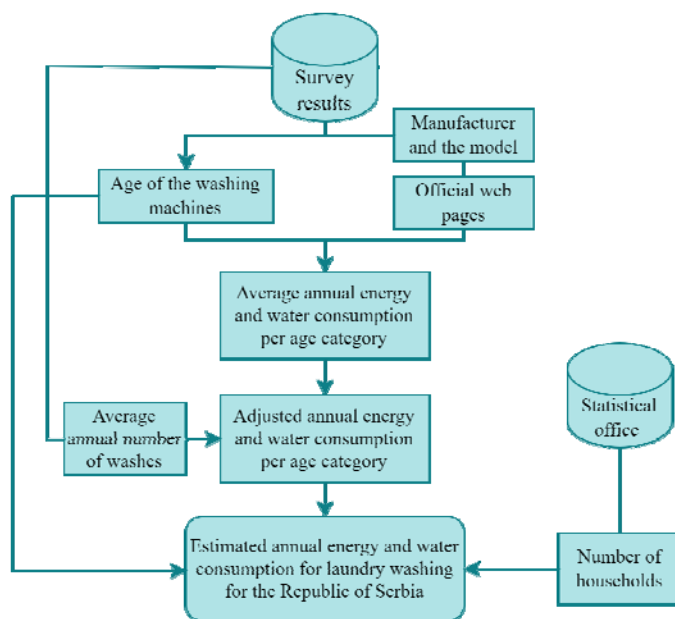


Figure 2. The framework of the estimation methodology

Three sources of data were used for estimating. The majority of data is obtained from the survey (the age distribution of washing machines, the manufacturer and model, and the number of washes), the number of households owning a washing machine was estimated using data from the Statistical Office of the Republic of Serbia [3], while consumption characteristics of the washing machines are collected using The Internet. The first step is the calculation of the average annual water and energy consumption per age category using the annual water and energy consumption based on standard 220 washing cycles given by the

manufacturers of the washing machines. The total annual water and energy consumption for laundry washing can be estimated by taking into account the number of households in the Republic of Serbia that own a washing machine, the percentage share of every washing machine age category, and the average annual water and energy consumption per age category. The calculated average annual energy consumption is based on standard 220 washing cycles, but considering the survey results, the average number of washes in the Republic of Serbia is around 6 times a week, which is 312 cycles yearly. This number of annual washing cycles is very high, considering the fact that an average household in the region of Germany, Austria, and Switzerland uses around 211 wash cycles per year for a four-person household [13]. Figure 3 shows the number of annual wash cycles per household worldwide.

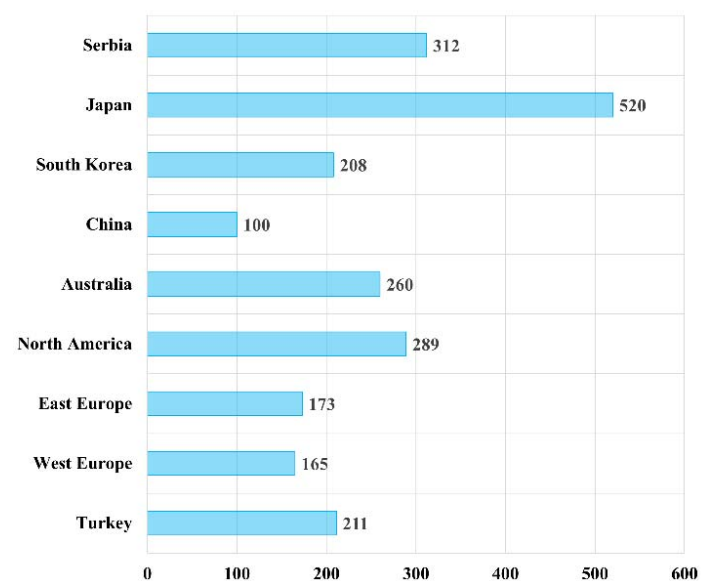


Figure 3. The number of annual wash cycles per household worldwide [7]

Table 8 shows the average annual energy and water consumption per age category (based on standard 220 washing cycles [14]).

Table 8. Average annual energy and water consumption per age category

Age category	Average annual energy consumption [kWh]	Average annual water consumption [l]
0 – 2 years	136	9,806
3 – 5 years	153	9,568
6 – 8 years	172	10,017
9 – 10 years	218	11,012
10+ years	240	11,828

Table 9 shows the adjusted average annual energy and water consumption per age category for the Republic of Serbia (based on 312 washing cycles).

Table 9. Adjusted average annual energy and water consumption per age category

Age category	Adjusted average annual energy consumption [kWh]	Adjusted average annual water consumption [l]
0 – 2 years	193	13,907
3 – 5 years	217	13,569
6 – 8 years	244	14,206
9 – 10 years	309	15,617
10+ years	340	16,775

According to the results of the 2022 Census of Population, Households, and Dwelling done by the Statistical Office of the Republic of Serbia [3], the total number of enumerated households is around 2,520,854. In the Republic of Serbia, 95.8% of households own a washing machine [3], which is around 2,414,978 households. Considering the analysed sample, the number of households using each age category of washing machines can be determined, as well as the total energy and water consumption by age category (Table 10).

Table 10. The number of households and total energy consumption per washing machine age category

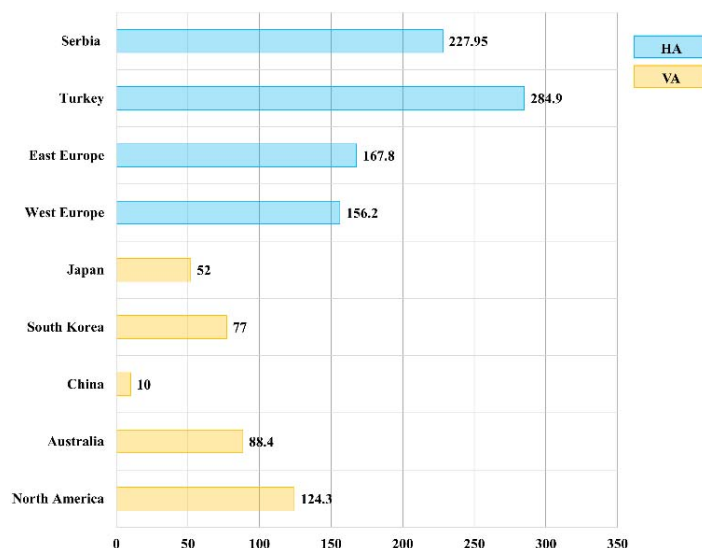
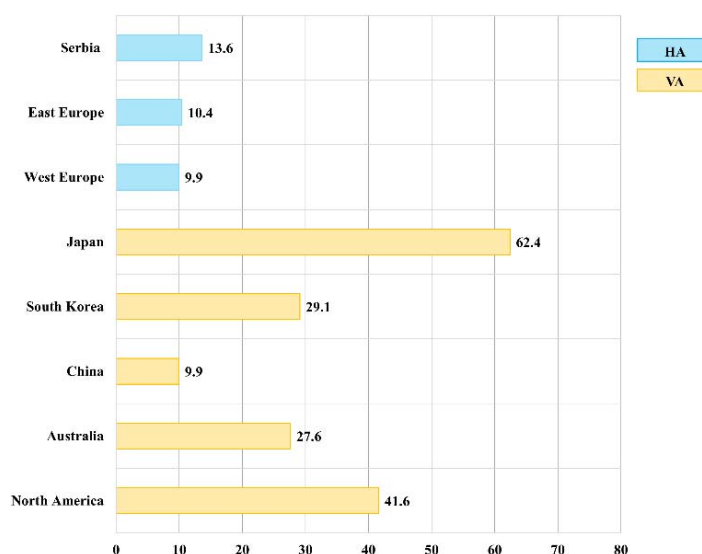
Age category	Number of households	Total energy consumption [MWh]	Total water consumption [m ³]
0 – 2 years	615,578	118,806.53	8,560,841.75
3 – 5 years	773,517	167,853.29	10,495,858.3
6 – 8 years	347,274	847,34.82	4,933,372.12
9 – 10 years	110,606	341,77.25	1,727,333.78
10+ years	426,244	144,922.83	7,150,236.68
Total		550,494.72	32,867,642.65

Results in table 10 show that in the Republic of Serbia, the citizens annually use around 550.49 GWh of electricity and around 32.867 Mm³ of water for laundry washing, which is around 227.95 kWh of electricity and 13.6 m³ of water per household.

According to the Statistical Office of the Republic of Serbia households consumed around 13,876.635 GWh of electrical energy [15] and 330 Mm³ of drinking water [16], in 2021, which means that households used around 4% of totally consumed electricity and 10% of totally consumed drinking water on laundry washing.

Analysing the electricity and water consumption for laundry washing by washing machines worldwide, Pakula and Stamminger [7] showed that energy consumption in the washing process varies worldwide. Figures 4 and 5 show the comparison of obtained results in the Republic of Serbia and worldwide. The technology of washing machines is predefining their consumption characteristics. Drum-type machines (HA) use in general less water, but more energy, while impeller-type

machines (VA) use significantly less energy because in most VA machines the washing water is not heated (typically 20°C) [17], but according to Ramasubramanian and Tiruthani [18], VA machines consume twice as much water as HA machines.

**Figure 4.** Comparison of annual electricity consumption for laundry washing worldwide [kWh]**Figure 5.** Comparison of annual water consumption for laundry washing worldwide [m³]

It is noticeable that the households in the Republic of Serbia consume more energy for laundry washing than Eastern and Western European households (on average 30%). Households in Turkey consume on average 284.9 kWh of electricity annually, which can be justified by the fact that Turkish households wash more than 75% of their laundry at water temperatures higher than 50°C and, out of this, 25% at more than 85°C. The fact that information on worldwide electricity use is from before 2010 makes Serbia's situation less favourable and raises the possibility

that things are worse than they appear. When it comes to water usage (Figure 5), households in the Republic of Serbia consume marginally more than the European average. Japanese households use the highest amount of water for laundry washing, but reusing warm water from the bathtub in the washing machine is usual. For example, 58% of the total water used for laundry washing in Japan in 2010 was reused bath water [19].

Gordic et al. [20] demonstrated that the average residual grid electricity emissions factor for the Republic of Serbia (2016 – 2020) is 0.769 kgCO₂e/kWh. Considering the electrical energy consumption for laundry washing, and the average residual grid electricity emissions factor, the calculated carbon footprint of domestic washing machines in the Republic of Serbia is around 423.33 ktCO₂. According to [21], a tree can absorb approximately around 25 kg of CO₂ per year. This means that 16,933,200 trees are needed to absorb the amount of CO₂ emitted by using washing machines in the Republic of Serbia. Considering the average tree density in the forests of Serbia (939 trees/ha [22]), that is around 180 km² of forests.

IV CONSUMER HABITS

Consumer habits have a huge influence on general electricity consumption in households. Using the lowest washing temperature that yields a desirable outcome and running the fully loaded machine only are the two components of proper machine usage. Table 11 (which includes the Republic of Serbia survey findings) displays the most popular washing machine technologies, load per cycle, and wash temperatures globally.

Table 11. Most frequently used washing machine technology, load per cycle, and wash temperatures per region [7]

<i>Region/Country</i>	<i>Most frequently used technology</i>	<i>Average load per cycle [kg]</i>	<i>Most frequently used wash temperatures (°C)</i>
Republic of Serbia	Horizontal axis	5 – 6	30 and 40
West Europe	Horizontal axis	3 – 4	40
East Europe	Horizontal axis	3 – 4	40
North America	Vertical axis	3 – 4	14 – 48
Australia	Vertical axis	1.3 - 2	20 – 40
China	Vertical axis	1.3 - 2	Cold water
South Korea	Vertical axis	1.3 - 2	Cold water
Japan	Vertical axis	3	Cold water

Most Europeans, including those in the Republic of Serbia, wash their clothes between 30°C and 40°C. According to the survey, the average washing temperature in Serbia is 60°C, at 80% load. Despite having the greatest number of annual cycles, Japanese households only use 50 kWh per household to wash their laundry. This fact illustrates the influence of washing

temperature on the energy consumption of washing machines. Lowering the washing temperature significantly more impacts electricity consumption than increasing the machine's loading, according to [17].

The results of the survey show that citizens in Serbia wash white and colourful laundry at half load an average of 4 and 5 times a month, respectively, which is 108 washes in total yearly. Using only full load, the number of 108 half-load washes can be reduced to around 54 full-load washes, simultaneously reducing the total number of washes from 312 to 258. These changes in consumer habits can contribute to the reduction of electricity (-98 GWh) and water (-5.85 Mm³) consumption, as well as the reduction of the carbon footprint (-75.35 ktCO₂).

V CONCLUSION

The overall finding is that water and electricity consumption in the Republic of Serbia is not considerably different from that of other countries that employ horizontal-axis washing machines. However, households in the Republic of Serbia wash laundry unjustifiably more frequently at higher average temperatures than in other European countries. In the Republic of Serbia, domestic laundry washing accounts for around 10% and 4% of household water and electricity usage.

In order to reduce the consumption of electricity and water for washing, specific policy measures, which promote responsible consumption habits – washing only at full load and washing at lower temperatures, are needed.

This research has two limitations. First, the approach used for collecting the answers is not suitable for the elders. According to the Statistical Office of the Republic of Serbia, around a third of the population is older than 60 years, while the share of this age group in the survey sample is around 2.6%. This finding suggests that overall water and electricity usage and carbon footprint may exceed the estimated levels. Second, indoor and machine drying of laundry were not included in the estimation of electricity use and carbon footprint, which could be a topic for further study.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Babić, M. Istraživanje mogućih scenarija energetske budućnosti Republike Srbije uz pomoć backcasting methodology i softvera Energovizija MB, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 22, No. 1-2, pp. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.001B>
- [2] Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat> [pristupljeno 27.12.2022]
- [3] Statistical Office of the Republic of Serbia, Energy consumption in households, <https://www.stat.gov.rs/media/345275/energy-consumption-in-households-in-republic-of-serbia-2020.pdf> [pristupljeno 27.12.2022]
- [4] Enerdata, <https://www.enerdata.net/> [pristupljeno 27.12.2022]
- [5] Wood, G., Newborough, M. Dynamic energy-consumption indicators for domestic appliances: Environment, behaviour and design, Energy and Buildings, Vol. 35, No. 8, pp. 821-841, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00241-4](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00241-4)
- [6] Götz, T., Tholen, L. Stock Model Based Bottom-up Accounting for Washing Machines: Worldwide Energy,

- Water and Greenhouse Gas Saving Potentials 2010 - 2030, Tenside Surfactants Detergents, Vol. 53, No. 5, pp. 410-416, 2016. <https://doi.org/10.3139/113.110460>
- [7] Pakula, C., Stamminger, R. Electricity and water consumption for laundry washing by washing machine worldwide, Energy Efficiency, Vol. 3, pp. 365-382, 2010. <https://doi.org/10.1007/s12053-009-9072-8>
- [8] Milani, A., Camarda, C., Savoldi, L. A simplified model for the electrical energy consumption of washing machines, Journal of Building Engineering, Vol. 2, pp. 69-76, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.04.007>
- [9] Michel, A., Josephy, B., Bush, E., Attali, S., Zuloaga F.R. Monitoring the washing machines market in Europe, 2015. [Microsoft Word - EEDAL_147_Monitoring-WaMa_Final.docx \(topten.eu\)](#) [pristupljeno 28.1.2023]
- [10] Issi, F., Kaplan, O. The determination of load profiles and power consumptions of home appliances, Energies, Vol. 11, No. 3, pp. 607, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11030607>
- [11] Ginetex, <https://www.ginetex.net/> [pristupljeno 28.1.2023]
- [12] Google Forms, <https://google.com/forms/> [pristupljeno 10.1.2023]
- [13] Rüdener, I., Griebhammer, R., Götz, K., Birzle-Harder, B. Waschmaschinen Produkt-Nachhaltigkeitsanalyse von Waschmaschinen und Waschprozessen, Öko-Institut, 2004. [Waschmaschine und Wäschetrockner | Umweltbundesamt](#) [pristupljeno 28.1.2023]
- [14] Commission delegated regulation (EU) No. 1061/2010, Official Journal of the European Union, 2010. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:314:0047:0063:EN:PDF> [pristupljeno 28.1.2023]
- [15] Statistical Office of the Republic of Serbia, Energy Balances, 2021. <https://publikacije.stat.gov.rs/G2023/Pdf/G20235693.pdf> [pristupljeno 15.1.2023]
- [16] Statistical Office of the Republic of Serbia, Snabdevanje pitkom vodom i otpadne vode iz naselja, 2021 (Supply of drinking water and waste water from settlements, 2021). <https://publikacije.stat.gov.rs/G2022/Html/G20221129.html> [pristupljeno 15.1.2023]
- [17] Gooijer, H., Stamminger, R. Water and energy consumption in domestic laundering worldwide - a review, Tenside Surfactants Detergents, Vol. 53, No. 5, pp. 402-409, 2016. <http://doi.org/10.3139/113.110456>
- [18] Ramasubramanian, M.K., Tiruthani, K. A capacitive displacement sensing technique for early detection of unbalanced loads in a washing machine, Sensors, Vol. 9, No. 12, pp. 9559-9571, 2009. <https://doi.org/10.3390/s91209559>
- [19] Nakamura K. Defining the future of highly eco-friendly washing through innovation, in Proc. *The 7th World Conference on Detergents*, Montreux, Switzerland, 6. October 2010. https://jsda.org/w/e_engls/jsda_e/revised_101006WCD_nakamura_JSDA.pdf [pristupljeno 20.1.2023]
- [20] Gordić, D., Nikolic, J., Vukasinovic, V., Josijević, M., Aleksić, A.D. Offsetting carbon emissions from household electricity consumption in Europe, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 175, 113154, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113154>
- [21] How much CO2 does a tree absorb?, <https://ecotree.green/en/how-much-co2-does-a-tree-absorb> [pristupljeno 20.1.2023]
- [22] Banković, S., Ranković, N. The national forest inventory of the Republic of Serbia: The growing stock of the Republic of Serbia. Ministry of Agriculture, Forestry and Water Management of the Republic of Serbia - Forest Directorate Belgrade, 2009. <https://upravazasume.gov.rs/wp-content/uploads/2015/12/The-national-forest-inventory-of-the-Republic-of-Serbia-1.pdf> [pristupljeno 20.1.2023]

AUTORI/AUTHORS

- Filip Nastić** – junior researcher, Faculty of Engineering University of Kragujevac, filip.nastic@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2164-6658](https://orcid.org/0000-0002-2164-6658)
- Dušan Gordić** – professor, Faculty of Engineering University of Kragujevac, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)
- Davor Končalović** – associate professor, Faculty of Engineering University of Kragujevac, davor.koncalovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-1207-2653](https://orcid.org/0000-0003-1207-2653)
- Vladimir Vukašinović** – associate professor, Faculty of Engineering University of Kragujevac, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)
- Jelena Nikolić** – research associate, Faculty of Engineering University of Kragujevac, jelena.nikolic@fink.rs, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)
- Nebojša Jurišević** – scientific associate, Faculty of Engineering University of Kragujevac, jurisevic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1609-6313](https://orcid.org/0000-0002-1609-6313)

Industrial Waste Heat Potential for Meeting Heat Demand in the Republic of Serbia

Potencijal industrijske otpadne toplote za zadovoljenje toplotnih potreba u Republici Srbiji

Dejan Ivezić, Marija Živković

University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology

Abstract - Final energy consumption in the industrial sector accounts for almost 25% of energy-related final energy consumption in the Republic of Serbia. It is estimated that 50-70% of energy consumption in industry, is intended to heat production in various industrial processes. Some of the produced heat is irreversibly wasted: through walls of process equipment, as the energy of flue gases, wastewater, etc.

Utilization of waste heat for meeting heating needs, within or outside of an industrial facility, although possible and recommended, is a challenging task. Carriers of waste heat may be different (flue gases from the combustion process, liquid fluids from the washing, drying or cooling process, etc.), as well as their temperature range (from below 50°C to over 500°C). Availability of waste heat is highly dependent on industrial processes, while potential consumers often may be distanced from an industrial site.

The paper presents the results of the evaluation of waste heat potential for some industrial subbranches in Serbia, based on a previously developed methodology. Based on data about energy consumption in selected subbranches of industry, and the temperature of waste heat carriers, the theoretical potential of this alternative source for direct utilization or utilization by compression heat pumps in district heating systems is determined.

Index Terms - Waste heat, Industry, Heat demand

Rezime - Finalna potrošnja energije u industrijskom sektoru čini skoro 25% finalne potrošnje energije u Republici Srbiji. Procenjuje se da je 50-70% potrošnje energije u industriji namenjeno proizvodnji toplotne energije u različitim industrijskim procesima. Deo proizvedene toplotne energije se nepovratno gubi kao energija odvedena u okolinu: prenosom toplote kroz zidove procesne opreme, dimnim gasovim, otpadnim vodama itd.

Korišćenjem otpadne toplote povećava se efikasnost korišćenja primarne energije i smanjuje ukupna potreba za energijom. Otpadna toplota se može koristiti u samom industrijskom objektu ukoliko postoji takva potreba, ili van njega. Raspoložive temperature otpadne toplote su različite (od ispod 50°C do preko 500°C), kao i sami nosioci otpadne toplote (dimni gasovi iz procesa sagorevanja, tečni fluidi iz procesa pranja, sušenja ili

hlađenja i dr.). Dostupnost otpadne toplote u velikoj meri zavisi od tipa industrijskog procesa, dok potencijalni potrošači često mogu biti udaljeni od lokacije industrijskog objekta.

U radu su prikazane procene potencijala otpadne toplote za pojedine industrijske grane u Srbiji, primenom prethodno razvijene metodologije. Na osnovu podataka o potrošnji energije u odabranim granama industrije i temperaturama nosioca otpadne toplote, određen je teoretski potencijal ovog izvora energije za direktno korišćenje, ili korišćenje putem kompresorskih toplotnih pumpi u sistemima daljinskog grejanja.

Ključne reči – otpadna toplota, industrija, toplotne potrebe

I INTRODUCTION

The waste heat from industrial site is considered as a part of the heat content of all streams (gas, water, air, etc.) which are discharged from an industrial process at a given moment and that can be internally or externally usable, technically and economically [1]. Sources for waste heat generation in industries can be a single machine or whole systems that release waste heat into the environment. These sources include furnaces, wastewater from washing, drying or cooling processes, and also refrigeration systems, motors or the exhaust air from production halls [2]. Depending on its characteristics, waste heat can be used for power generation, and for heating/cooling (directly without upgrading or after upgrading, by heat pumps).

In this paper, the waste heat potential from industrial sites in Serbia for using in district systems for heating/cooling is considered. The assessment of technical potential of this alternative energy source is based on data of energy consumption in industry presented in an official energy balance for 2021 [3]. Using top-down approach developed in [4] the amounts of energy that could be used directly in district heating system or by using compression heat pumps are determined.

The paper is organized in sections. After introduction section, final energy consumption and heat consumption in Serbian industry are presented in sections II and III. General methodology for industrial waste heat assessment is presented in a section IV. The results of implementation of a selected methodology and assessment of technical potential of industrial waste heat for utilization in district heating systems are presented

in a section V. Conclusion remarks and suggestion for further work are presented in a section VI.

II ENERGY CONSUMPTION IN INDUSTRY IN SERBIA

Energy consumption in industry accounts about 22-25% of final energy consumption in Serbia. Historical data related to structure of consumption of the industry sector by energy source are presented in Figure 1. Annual consumption in industry in the analysed period (2012-2021) was in the range of 22,727 GWh in the year 2014 up to 28,473 in 2021. Final energy consumption in industry shows the relation with GDP growth rate. In addition,

the increasing trend in electricity consumption is observed, while the consumption of oil products and coal are declining. Electricity has the highest share in the energy mix (37.9%), followed by natural gas (24.8%), oil derivatives (12.2%), bioenergy (9.1%) and heat (9%) (Figure 2).

The main energy consumers are the following industrial sub-sectors: Food, Beverages & Tobacco (19%), Iron & Steel (16%), Non-metallic minerals (16%), and Chemical & petrochemical (15%) sectors (Figure 3).

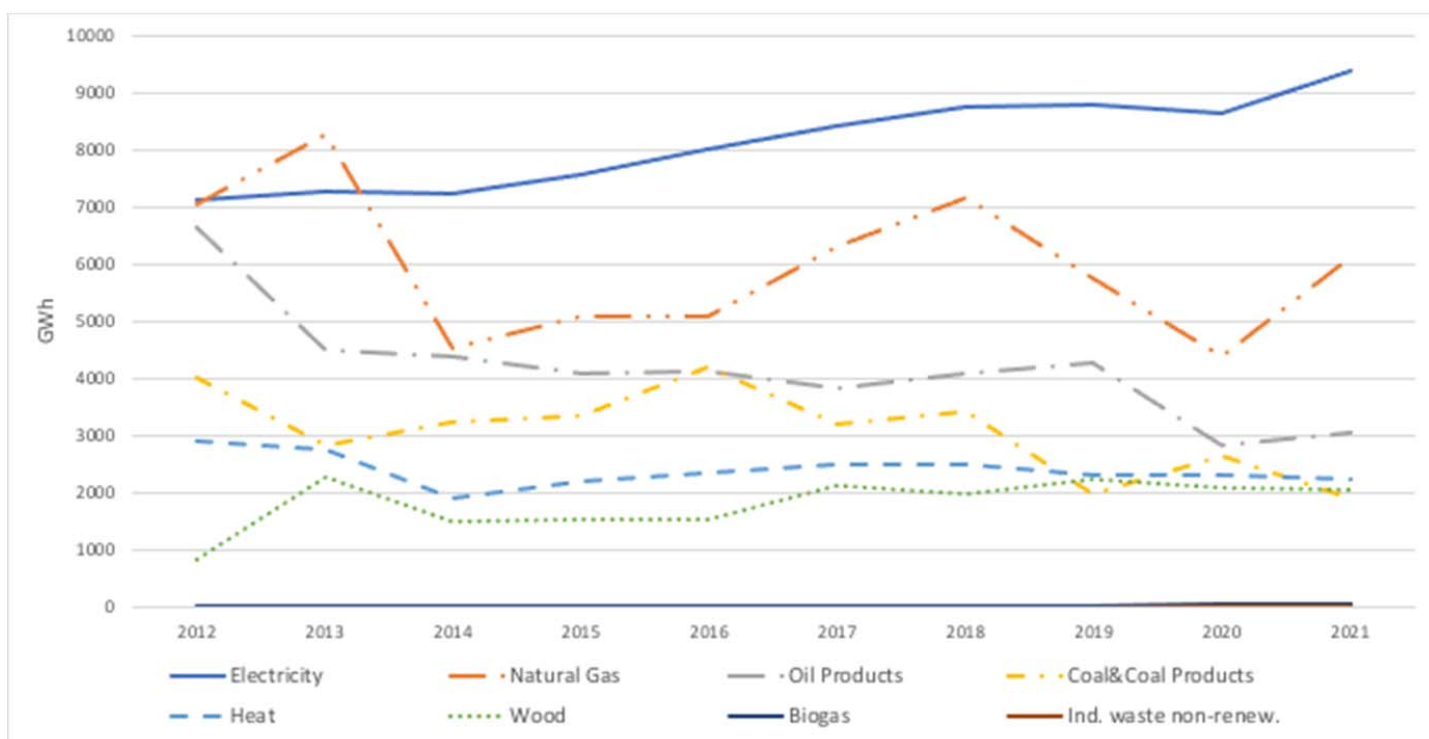


Figure 1. Final energy consumption in industry for period 2012-2021, by energy source, in ktoe, [3]

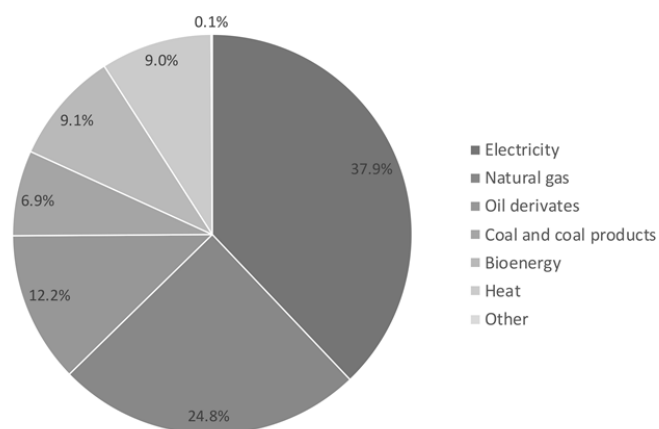


Figure 2. Structure of consumption in industry 2021, by energy source [3]

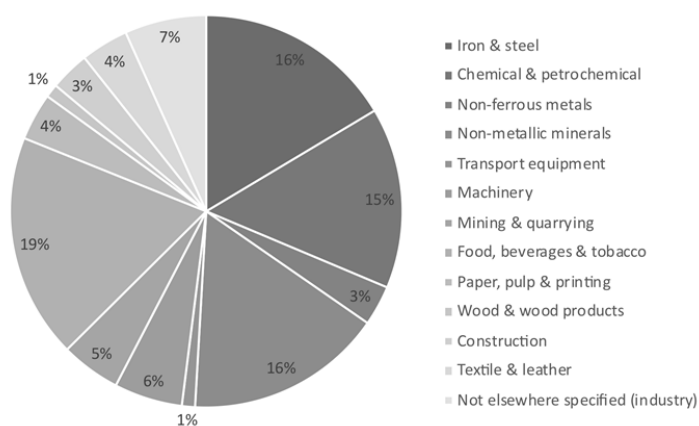


Figure 3. Structure of consumption in industry 2021, by sub-sector [3]

III HEAT CONSUMPTION IN INDUSTRY IN SERBIA

Heat consumption in industry is related to industrial process heat and energy used for space heating. Industrial process heat is defined as thermal energy used directly in the preparation or treatment of materials used to produce manufactured goods [5]. Data about derived heat by industrial sub-sectors in 2021 are presented in Table 1. These are the amounts of thermal energy supplied to the industry from external sources (e.g., district heating systems).

Table 1. Derived heat and shares of industry sub-sectors in Serbia (2021), [3]

Sub-sector	Heat	
	[GWh]	%
Iron and steel	651	29.1%
Chemical and petrochemical	694	31.0%
Non-ferrous metals	82	3.7%
Non-metallic minerals	14	0.6%
Transport equipment	10	0.4%
Machinery	6	0.3%
Mining and quarrying	0	0.0%
Food, beverages and tobacco	311	13.9%
Paper, pulp and printing	199	8.9%
Wood and wood products	0.2	0.0%
Construction	0	0.0%
Textiles and leather	13	0.6%
Not elsewhere specified (Industry)	259	11.6%
Total	1980.2	100.0%

Energy consumption of combustible energy sources is dominantly related to heat production at the place of consumption, except for gasoline and diesel, whose utilization is subjected to internal combustion engines. Table 2 presents data about produced heat due to direct utilization of fuels. For the calculation of useful heat, harmonized efficiency reference values for separate production of heat were applied [6].

Table 2. Heat consumption in industry, Serbia (2021)

Sub-sector	Produced heat (combustion of fuels)
	[GWh]
Iron and steel	1,755
Chemical and petrochemical	1,452
Non-ferrous metals	323
Non-metallic minerals	1,986
Transport equipment	46
Machinery	425
Mining and quarrying	22
Food, beverages and tobacco	2,307
Paper, pulp and printing	312
Wood and wood products	85
Construction	14
Textiles and leather	529
Not elsewhere specified (Industry)	330
Total	9,587

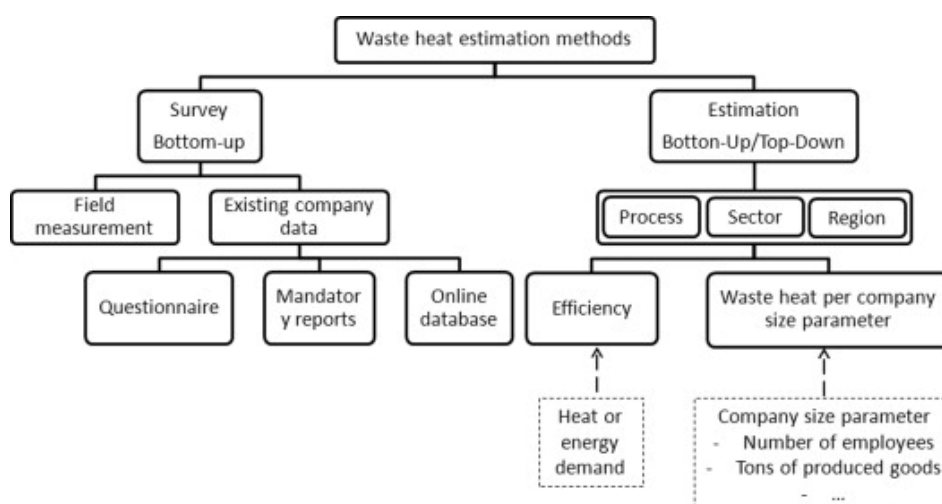


Figure 4. Classification of approaches for industrial waste heat determination [2]

IV METHODOLOGY FOR WASTE HEAT ASSESSMENT

The data about waste or surplus heat from industrial facilities is not systematically recorded in international and national energy

statistics. Furthermore, waste heat recovery potential is sector-specific and even for a same product depends on site-specific process routes [7]. Therefore, different approaches to estimating the industrial waste heat potential may be applied (Figure 4). In

general, these approaches can be considered as top-down and bottom-up.

A top-down approach is based on the use of primary energy, the assumptions about energy efficiency and energy distribution. It allows only rough estimation of the potential of waste heat in different industry sectors, without conclusions about the temperature and availability of waste heat.

Bottom-up approach is based on specific data on representative companies collected through questionnaires or even measurements. Depending on the level of detail of the questionnaire, this method allows conclusions to be drawn about the technical potential of a particular company or sector. Measurements are by far the most complex method. Several companies/sites need to be reviewed and re-measured and there may be a conflict with the confidentiality of process data [8]. Mentioned approaches could also be combined.

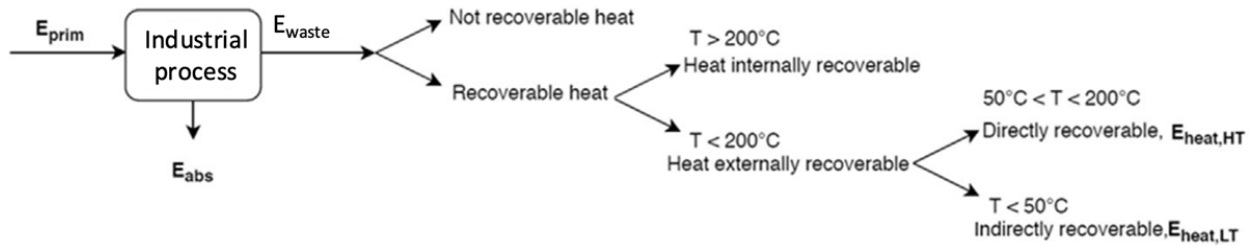


Figure 5. Procedure for calculating the industrial waste heat, recoverable in a district heating system [4]

For the estimation of waste heat recoverable in district heating systems the procedure proposed in [4] will be used. It is based on the energy input of the industrial facility and it is a combination of bottom-up and top-down approaches. The scheme of the procedure is presented in Figure 5.

Applying the first law of thermodynamics to an industrial process gives:

$$E_{prim} = E_{abs} + E_{waste} [MWh] \quad (1)$$

Where:

E_{prim} is the primary energy input consumed by the production site,

E_{abs} is the energy absorbed by the industrial process - the process energy used for the realization of the final product, and

E_{waste} indicates all the waste heat which is not embedded in the final product and that is usually dissipated in the environment.

According to the temperature level at which this waste heat is produced, the last term in the equation (1) can be divided, as follows [9]:

$$E_{waste} = E_{heat,steam} + E_{heat,HT} + E_{heat,LT} + E_{heat,lost} [MWh] \quad (2)$$

Where:

$E_{heat,steam}$ is high temperature waste heat (above 200°C) coming from steam processes,

$E_{heat,HT}$ is high temperature water recoverable waste heat (mainly heat coming from flue gases at a temperature above 90°C),

$E_{heat,LT}$ is low temperature water recoverable waste heat (mainly heat resulting from cooling processes with a temperature around 40°C that requires a temperature lift by compression heat pumps to be used in DH), and

$E_{heat,lost}$ represents a fraction of irreversible losses.

The level of temperature considered here is relative to the purpose of the recovery. The average operational temperature of DH around approximately 90°C is adopted. A bottom-up approach has been applied in [9] to identify the amount of every component of equation (2) for each industrial sector investigated, so that it has been possible to identify the coefficients η_{steam} , η_{HT} , η_{LT} and η_{loss} allowing the calculation of each component starting from primary energy:

$$E_{waste} = E_{prim}(\eta_{steam} + \eta_{HT} + \eta_{LT} + \eta_{lost}) [MWh] \quad (3)$$

The sum of the three recoverable components represents theoretical potential:

$$E_{heat.th} = E_{prim}(\eta_{steam} + \eta_{HT} + \eta_{LT}) [MWh] \quad (4)$$

In order to calculate the technical potential, some recovery factors η_{tech} need to be applied; they consider the technological efficiencies in the recovery process, such as heat exchanger efficiency, and the eventual temperature upgrade so that the equation (4) can be rewritten as:

$$E_{heat.tech} = \eta_{tech}(E_{heat,steam} + E_{heat,HT} + \eta_{HP}E_{heat,LT}) [MWh] \quad (5)$$

The technical recovery potential of waste heat calculated by (5) represents the fully recoverable waste heat considering heat quality and technological efficiency.

A final step that has been conducted is a simplified method to take into account the time correspondence between waste heat availability and the heat demand in DH. In fact, the time dependent profile of heat effluents in the production plants is often quite flat and so it does not match with the required heat profile by users in a DH system. Therefore, to have a full recovery of $E_{heat.tech}$ an important storage capacity would be required.

In this paper, the recovery in DH is precautionarily considered without the introduction of seasonal storages so that the correspondence in time is taken into account by considering the ratio between the equivalent operating hours of the industrial process, usually around 7,000 ($oh_{process}$), and of DH, which have been considered as 2,500 (oh_{DH}) for Serbia, so that the practical potential heat recovery in DH should be calculated as follows:

$$E_{heat,tech} = \eta_{tech} \left(\frac{25\% E_{heat,steam} + E_{heat,HT} + \eta_{HP} E_{heat,LT}}{oh_{DH}/oh_{process}} \right) \cdot [MWh] \quad (6)$$

In the previous equation, only the fraction (25%) of waste heat coming from steam processes is considered to be available for external waste heat recovery [4]. It was rational to assume that the majority of the high-level temperature waste heat is going to be recovered internally.

The equation (6) can be rewritten considering the technological integration in DH, which is direct in case of high temperature levels of waste heat, or indirect, needing a compression heat pump, in case of low temperature waste heat, so that the final heat recoverable in DH can be calculated as follows:

$$E_{heat,DH} = E_{heat,HT,DH} + \eta_{HP} E_{heat,LT,DH} = E_{prim} (\eta_{DH,HT} + \eta_{DH,LT} \eta_{HP}) \cdot oh_{DH}/oh_{process} [MWh] \quad (7)$$

Where

$$\eta_{DH,HT} = \eta_{tech} (25\% \eta_{steam} + \eta_{HT}), \text{ and}$$

$$\eta_{DH,LT} = \eta_{tech} \eta_{LT}$$

Table 3. Recovery coefficients defined by industrial sector, according to the temperatures of both the heat source and district heating system [9]

Activity Sector	Waste heat				DH recovery	
	η_{steam}	η_{HT}	η_{LT}	η_{loss}	$\eta_{DH,HT}$	$\eta_{DH,LT}$
Fuel supply and refineries	–	–	–	–	28.1	–
Food products and beverages	18.2	3.6	28.1	2.1	6.1	21.1
Pulp, papers and printing	36.1	7.9	0.5	1.8	12.7	0.3
Basic chemicals	8.3	11.2	6.5	–	9.9	4.9
Other non-metallic mineral products	6.4	11	2.6	–	9.5	2.0
Capital goods manufacturing	7.8	7.8	7.8	2.6	7.3	5.9
Fine chemical products	12.5	16.8	9.8	–	14.9	7.3
Iron and steel	3.5	3.5	3.5	1.2	3.3	2.7
Fabricated metals products	4.5	4.5	4.5	1.5	4.2	3.3
Textile	7.8	7.8	7.8	2.6	7.3	5.9
Others	15.6	15.6	15.6	5.2	14.6	11.7

The coefficients used in the calculation of waste heat, for the specific industrial sub-sectors, are presented in Table 3.

V INDUSTRIAL WASTE HEAT POTENTIAL FOR UTILIZATION IN DISTRICT HEATING SYSTEMS IN SERBIA

The determination of waste heat potential of the industry sector in Serbia is a relatively “new” topic [10]. There is no systematic research, and collecting data about the potential in different sub-sectors. In [4,7,9,10,11], for the cases when data from individual industrial installations are not available, the proposed methodology for determination of industrial waste heat were based on combined approach and on using of site-specific data contained in the EU ETS database for determination of primary energy consumption (E_{prim}). However, such data are not available for Serbia. Therefore, in this paper, for the estimation of primary energy input consumed by the specific industry sub-sectors the data from national energy balances will be used. It is assumed that the primary energy consumption in the specific sub-sector is equal to final energy consumption reduced by final electricity and heat consumption. This assumption means that the electricity is used mainly for purposes with the low ability for energy recovery (mechanical work, lighting, etc.), and that the heat is used with a high efficiency. The primary energy consumption in Serbian industry subsectors with the potential for direct use in district heating systems, estimated by previously explained methodology, is presented in Table 4.

Table 4. Estimation of primary energy consumption by the specific industry sub-sectors in the Republic of Serbia in 2021

Industry sub-sector	E_{prim} (GWh)
Iron and steel	2,070.9
Chemical and petrochemical	1,761.2
Non-ferrous metals	411.2
Non-metallic minerals	2,583.8
Transport equipment	59.3
Machinery	568.5
Food, beverages and tobacco	2,982.5
Paper, pulp and printing	372.0
Wood and wood products	130.1
Textiles and leather	653.9
Not elsewhere specified (Industry)	419.1

The result, the estimation of waste heat from industrial sites in the Republic of Serbia that could be recovered directly in district heating systems, obtained by the proposed methodology and by using equation (7) is presented in Table 5.

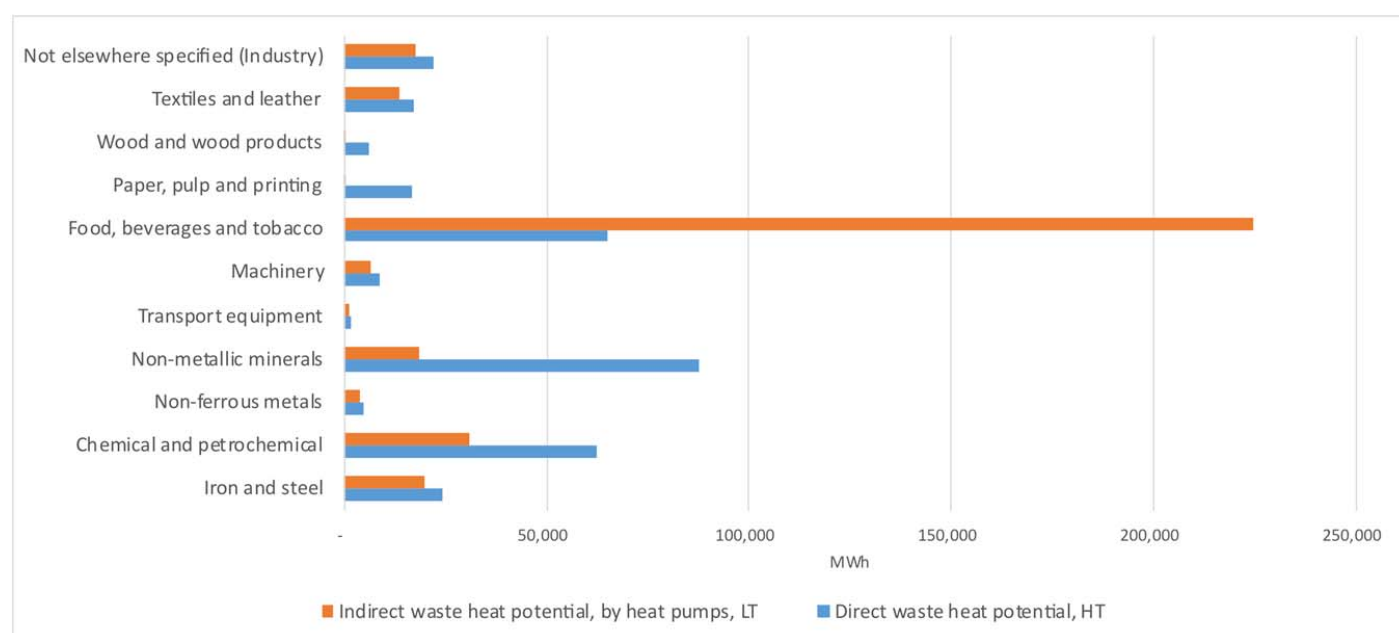


Figure 6. Waste heat from industrial sites in the Serbia that could be recovered directly in district heating systems

Table 5. Waste heat from industrial sites in Serbia that could be recovered directly in district heating systems

Industry sub-sector	High temperature water recoverable waste heat	Low temperature water recoverable waste heat	Total heat for district heating systems*
	$E_{\text{heat,HT,DH}}$ (GWh)	$E_{\text{heat,LT,DH}}$ (GWh)	$E_{\text{heat,DH}}$ (GWh)
Iron and steel	24	20	51
Chemical and petrochemical	62	31	103
Non-ferrous metals	5	4	10
Non-metallic minerals	88	18	112
Transport equipment	1	1	3
Machinery	8	7	17
Food, beverages and tobacco	65	225	364
Paper, pulp and printing	17	0.4	17
Wood and wood products	6	0.1	6
Textiles and leather	17	14	35
Not elsewhere specified	22	18	45
Total	316	338.5	763

*Recovery of low-temperature waste heat was assumed by utilization of compression heat pumps with COP = 4.

Obtained results show that the total available heat from this renewable source could be estimated to be 765 GWh per year. It corresponds to 11.1% of total heat produced in all district heating

plants in Serbia in 2021 [13].

VI CONCLUSION

The intention of this paper was to point out the potential of industrial waste heat as the source of alternative renewable energy available for utilization in Serbian district heating systems. The optimal way for this potential determination is in a combination of top-down and bottom-up approaches. Due to the lack of studies and surveys related to the quality and quantity of industrial waste heat, the top-down approach was used in this research, supplemented by quality indicators taken over from available research in selected EU countries. The accepted approach allowed partly overcoming the problems related to an exclusively top-down approach. Some results related to the temperature of waste heat are obtained.

Obtained results indicate that, theoretically, approximately 4,6% of the heat produced in district heating systems in Serbia by combustion of fossil fuels could be directly substituted by industrial waste heat available at temperatures between 50°C and 200°C. An additional 6,5% of heat demand could be met by the utilization of compression heat pumps. These heat pumps would use waste heat available with temperature lower than 50°C. It was shown that the Food, beverages and tobacco, Non-metallic minerals, and Chemical and petrochemical are industry sub-sectors with the most significant waste energy potential.

However, although very significant, presented potentials are still only hypothetical. The approach used couldn't show the feasibility of waste heat utilization in district heating systems. This means that further, more detailed researches are necessary. These researches should be conducted for every district heating system in Serbia and should include surveys of industrial facilities in their vicinity. Only by detailed analysis of companies' data regards to energy consumption and technologies

for energy utilization (obtained by questionnaires, mandatory reports, measurement, etc.) the real technical and economic potential of industrial waste heat could be determined.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Berntsson, T., Åsblad, A. Industrial Excess Heat Recovery –Technologies and Applications. Final report Phase 1, 5 May 2015. <https://iea-industry.org/app/uploads/annex-15-final-report-phase-1-appendix-1.pdf> [pristupljeno 04.02.2023]
- [2] Brueckner, S., Miró, L., Cabeza, L., Pehnt, M., Laevemann, E. Methods to estimate the industrial waste heat potential of regions – A categorization and literature review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 38, pp. 164-171, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.078>
- [3] Energy Balances, Republic of Serbia, <https://stat.gov.rs/en-us/oblasti/energetika/tabele/> [pristupljeno 04.02.2023]
- [4] Dénarié, A., Fattori, F., Spirito, G., Macchi, S., Francesco, V., Motta, C.M., Persson, U. Assessment of waste and renewable heat recovery in DH through GIS mapping: The national potential in Italy, Smart Energy, Vol. 1, 100008, 2001. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100008>
- [5] Patil, P., Patil, P.D., Srivastava, A. State-of-the-art of solar thermal industrial process heat technologies for use in developing countries, in Proc. *ENERGEX '84, The Global Energy Forum*, Regina, Saskatchewan, Canada, pp. 577-583, 14-19 May 1984. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-025407-4.50105-8>
- [6] COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2015/2402 of 12 October 2015 reviewing harmonized efficiency reference values for separate production of electricity and heat in application of Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Implementing Decision 2011/877/EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R2402&rid=1> [pristupljeno 04.02.2023]
- [7] Jakubcionis, M., Santamaria, M., Kavvadias, K., Piers De Ravesechoot, R., Moles, C., Carlsson, J. *Best practices and informal guidance on how to implement the Comprehensive Assessment at Member State level*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. <https://doi.org/10.2790/79453>
- [8] Possibilities of using waste heat and waste cooling in the heating and/or cooling sector and the assessment of Estonia's potential for efficient district heating and cooling, Final report, KPMG, 2021 https://energy.ec.europa.eu/system/files/2021-10/et_ca_2020_en.pdf [pristupljeno 04.02.2023]
- [9] Berthou, M., Bory, D. Overview of waste heat in the industry in France, in Proc. *eccee 2012 Industrial Summer Study proceedings*, Arnhem, The Netherlands, pp. 453-459, 11-14 September 2012.
- [10] Josijević, M. *Mapiranje i iskorišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji (Mapping and utilization of waste heat in the food processing industry)*, University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Kragujevac, 2020.
- [11] Persson, U., Möller, B., Werner, S. Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions, Energy Policy, Vol. 74, pp. 663-681, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.015>
- [12] McKenna, R.C., Norman, J.B. Spatial modelling of industrial heat loads and recovery potentials in the UK, Energy Policy, Vol. 38, No. 10, pp. 5878-5891, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.042>
- [13] Annual report of district heating business association “Toplane Srbije” https://www.toplanesrbije.org.rs/uploads/ck_editor/files/izvestaj%202021.pdf [pristupljeno 04.02.2023]

AUTORI/AUTHORS

Dejan Ivezić - full professor, University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, dejan.ivezic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2659-0662](https://orcid.org/0000-0003-2659-0662)

Marija Živković - full professor, University of Belgrade - Faculty of Mining and Geology, marija.zivkovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-3534-5271](https://orcid.org/0000-0003-3534-5271)

Rekonfiguracija i otočna kompenzacija u prisustvu distribuiranih izvora u razgranatoj distributivnoj mreži

Distribution Network Reconfiguration and Capacitor Switching in the Presence of Distributed Resources in Large Scale Distribution System

Branko Stojanović*, Tomislav Rajić**, Darko Šošić**

* Tehnički opitni centar, Beograd, Srbija

** Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija

Rezime - Distributivna preduzeća su svedoci mnogih promena u današnje vreme. Kada je potrebno da naponi čvorova mreže budu unutar tolerancija 0.9-1,1 r.j. a da ulazni faktor snage bude veći od 0,85 sve tri moderne strategije pametne mreže kao što su rekonfiguracija, otočna kompenzacija i prisustvo distribuirane proizvodnje (DG) moraju biti angažovane. Čak i u tom slučaju prisustvo teretne naponske sklopke (OLTC) u napojnom čvoru je neophodno. U ovom radu prikazana je tehnička analiza 21 realnih operativnih slučajeva hibridnim algoritmom simuliranog kaljenja (SA) i minimalno razgranatog stabla (MST). MST je primenjen na rekonfiguraciju a SA naknadno na kompenzaciju. Transparentna grafička metoda Monte Carlo za lokaciju distribuiranih generatora i kondenzatorskih baterija je prosta i jedinstvena. Pretpostavka je da su distribuirane jedinice već prisutne na samom početku. Gauss-ova i Weibull-ova raspodela za promenu potrošnje i izlazne snage vetro generatora kao i dnevni dijagrami potrošnje za radni i neradni dan i insolacija solarnih jedinica je uključena u analizu. Minimizira se funkcija cilja koju sačinjavaju gubici aktivne snage, cena kondenzatora i neisporučene električne energije. Primer mreža je IEEE mreža sa 118 čvorova i 132 grane (15 spojnih grana) koje sve mogu da komutuju koja je razgranata s obzirom na svoju veličinu. Uniformna raspodela vetro generatora i postavljanje kondenzatorskih baterija u skladu sa funkcijom cilja, koje variraju iz sata u sat je nerealistična. Predložena je realnija sa fiksnim čvorovima za lokaciju vetro generatora, solarnih panela i kondenzatora, koji su najčešće posećeni. Krajnja funkcija cilja obuhvata cenu gubitaka vršne snage, ugrađenih kondenzatora, isporučene električne energije, komutacija i neisporučene električne energije za period od mesec ipo dana (1008 sati rada mreže).

Ključne reči - rekonfiguracija, kondenzatorske baterije, distribuirani izvori, simulirano kaljenje, minimalno razgranato stablo

Abstract - Distribution utilities witness many changes nowadays. If the network voltages must be in 0.9-1.1 p.u. limits and grid input power factor greater than 0.85 all three modern strategies of smart distribution network as reconfiguration, capacitors switching and presence of distribution generation (DG) ought to

be applied. Even in this case On Load Tap Changer (OLTC) in the supplying substation has to be used. In this paper, detailed technical analysis of 21 realistic operation cases is presented by hybrid algorithm of Minimum spanning tree (MST) plus Simulated Annealing (SA). MST is used for tackling reconfiguration first and SA for capacitor switching afterwards. Implemented transparent graphical Monte Carlo method for locating of distributed generators and capacitor banks is unique and simple. Assumption is that DG is already present. Gauss and Weibull changing nodal loads and wind generators output, respectively as well as daily load curves for working and weekend day with insolation of solar panels are included in analysis. The objective function comprising of the cost of power losses, price of capacitors and undelivered energy is minimized. IEEE 118 bus network is analyzed which has 118 nodes and 132 branches (15 ties), all of which can commute, that is considered to be large scale. The basic switching logic of uniform distribution of wind generators to the nodes and capacitors in accordance with objective function, that changes every hour is unrealistic. More realistic one was issued with fixed nodes for allocation of DG and capacitors (the most frequently visited nodes). The programme final objective function indicates the price of peak power losses, losses of delivered electrical energy, of the banks, of undelivered electrical energy and commutations for the period of month and a half (1008 network operating hours).

Index Terms - Reconfiguration, Capacitor banks, Distributed resources, Simulated annealing, Minimum spanning tree

I UVOD

Rekonfiguraciji distributivne mreže već duže vremena se posvećuje naročita pažnja. U iznalaženju optimalne konfiguracije potrebno je definisati funkciju cilja i ograničenja. Zbog širokog opsega u kome se kreće odnos R/X vodova poseban je naglasak na gubicima aktivne snage. Zbog koordinacije relejne zaštite i velikih struja kratkih spojeva poželjno je da je mreža radialna. U literaturi se sreću različiti pristupi ovom problemu. Neki su heuristični [1, 2], drugi metaheuristični [3, 4] zasnovani na veštačkim [5, 6] ili matematičkim metodama [7, 8]. Pristupi su jednokriterijumski ili višekriterijumski što je bolje. Mešovito celobrojno nelinearno

programiranje koje uzima u obzir različite nivoe potrošnje tokom dana [9], metaheuristični pčelinji algoritam [10] ili višekriterijumsko fuzzy programiranje [11] su neki od njih.

Ovaj rad prikazuje novu hibridnu metodu iznalaženja rešenja bliskog optimalnom za problem rekonfiguracije distributivne mreže i otočne kompenzacije uz prisustvo distribuiranih generatora (DG) u samom startu proračuna, metodom minimalno razgranatog stabla (MST) i simuliranog kaljenja (SA) na primeru razgranate mreže kod koje je najveći problem određivanje fiksnog položaja kondenzatorskih baterija za širok radni period. U ovom slučaju Monte Carlo grafička metoda nije lako primenljiva zbog složenijih dijagrama uključenosti za kondenzatorske baterije, pa se one moraju sukcesivno dodavati (videti različite scenarije) sve dok ušteda raste.

U proračun je uključen i dozvoljeni broj komutacija za rasklopnu opremu u toku jednog dana što je retko analizirano u literaturi [8]. Poznato je da se sa velikim brojem komutacija ona lakše kviri i smanjuje joj se radni vek tako da se mora ranije zameniti.

U radu se definiše optimalni položaj za postavljanje kondenzatorskih baterija radi popravke ulaznog faktora snage mreže kao i smanjenje gubitaka aktivne snage uz minimizaciju troška na neisporučenu električnu energiju što je sve sadržano u pojedinačnoj funkciji cilja.

Većina članaka koja uključuje DG tretira samo vetru ili solarne generatore a retko oba tipa što je urađeno u ovom radu.

Rekonfiguracija distributivne mreže rešavana je velikim brojem heurističnih i metaheurističnih algoritama kao što su genetski algoritam, tabu pretraživanje, mravlji algoritam, metoda delimičnog roja, diferencijalna evolucija, itd. Za problem rekonfiguracije koji se rešava na početku proračuna (pre kompenzacije), u ovom radu, upotrebljena je MST metoda zbog izuzetne brzine proračuna. U literaturi se navodi da je za mrežu od 10476 čvorova vreme proračuna 1.4 sekundi [12]. MST metoda iznalazi gubitke aktivne snage koji su bliski minimalnim i jedna je od retkih koja se može primeniti za razgranate distributivne mreže. Kompenzacija se rešava metodom simuliranog kaljenja koja je za nju vrlo pogodna i zbog odsustva, kod nje, ograničenja radijalnosti mreže mnogo brža nego kod rešavanja problema rekonfiguracije istom metodom (SA). Usvojeni broj iteracija od 3000 kod primenjenog nehomogenog algoritma SA je umeren i sličan bi bio za napred navedene heuristične i metaheuristične metode tako da se njihovom primenom ne bi dobila neka veća ušteda u vremenu proračuna niti bolji kvalitet rešenja.

II PROMENLJIVOST POTROŠNJE, BRZINA VETRA I SOLARNA IRADIJACIJA

U ovom radu razmatraju se dnevni dijagrami potrošnje za radni i neradni dan bazirani na jednogodišnjem merenju u jednom napojnom razvodnom postrojenju u Beogradu (Slika 1 i 2).

Kako ne postoji 8760 merenja za godinu dana generatorom slučajnih brojeva simulirana je stohastičnost potrošnje. Korišćenjem Gauss-Laplace raspodele predstavljena je slučajnost potrošnje svakog sata. Relativne vrednosti osciluju oko srednje vrednosti u skladu sa ovom distribucijom. Verovatnoća je predstavljena formulom (1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

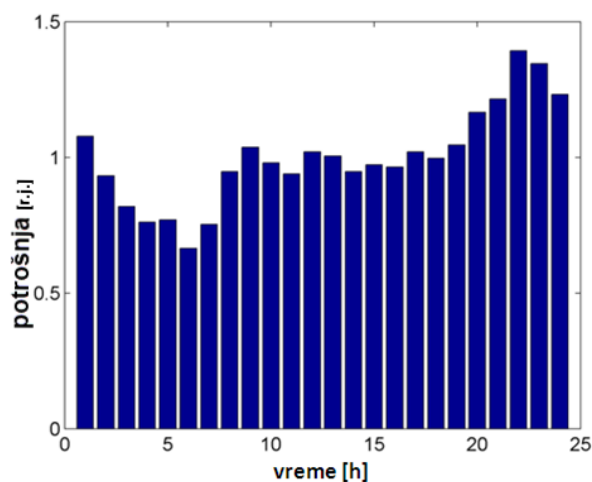
gde su:

$f(x)$ - funkcija gustine raspodele verovatnoća,

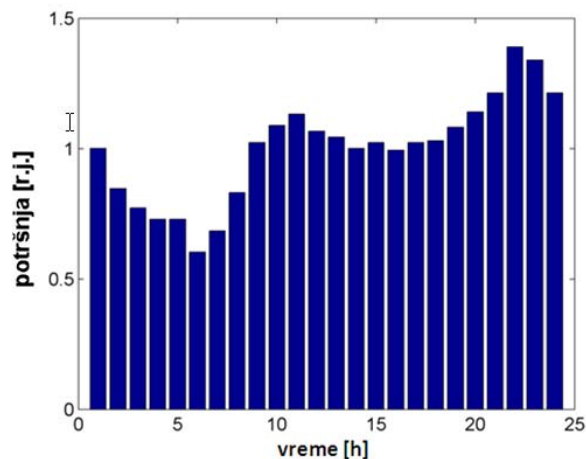
m - očekivana vrednost potrošnje u jednom čvoru i

σ - standardna devijacija, odstupanje od očekivane vrednosti.

Za σ je usvojeno 10%.



Slika 1. Tipična kriva potrošnje za radni dan



Slika 2. Tipična kriva potrošnje za neradni dan

Korišćena je IEEE 118 test mreža (118 čvorova i 132 grane). Ukupna aktivna i reaktivna potrošnja iznose 22,7097 MW i 17,0411 MVar respektivno. Nominalne potrošnje čvorova date su u apsolutnim vrednostima. Merenja su u relativnim jedinicama. Proizvod relativne vrednosti i nominalne potrošnje ulaze u proračun tako da se dobija realno stanje pri čemu je nesigurnost potrošnje uzeta u obzir.

Upotrebljena je Weibull raspodela za simulaciju vetra turbine čija snaga zavisi od brzine vetra. Formira se funkcija gustine raspodele verovatnoće sa dva parametra [13], jednakost (2).

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (2)$$

gde su:

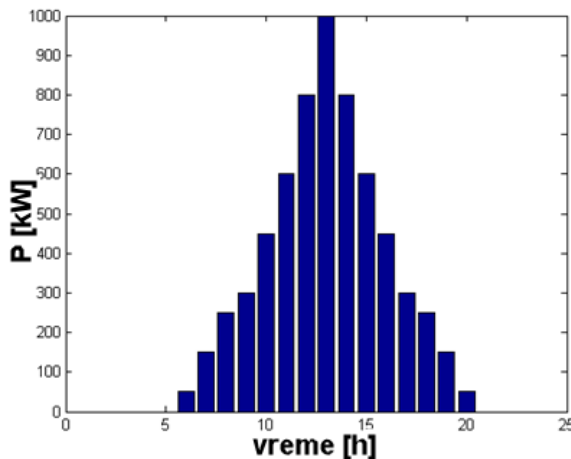
v - brzina vetra [m/s],

A - parametar Weibull-ove skale u m/s, mera za karakterističnu brzinu vetra. A je proporcionalno srednjoj brzini vetra i

k - parametar Weibull-ove formule. Određuje oblik Weibull-ove raspodele i obično ima vrednost između 1 i 3. Mala vrednost za k označava vrlo promenljive vetrove.

Za nominalnu snagu vetro turbine usvojeno 1 MW i ima ih dve koje se uniformno raspoređuju po čvorovima mreže u prvoj fazi proračuna, ovo čini 10% aktivne potrošnje (22,7097 MW).

Idealna solarna iradijacija za jedan dan podrazumeva simetričan dijagram. Oblačnost je prisutna u realnosti tako da dijagrami nisu isti za svaki dan. Insolacija tokom dana maksimalna je u 13 sati. Ona odstupa od simetrične krive u opsegu od 1 do 10 % svakog sata zbog oblačnosti. Tokom noći proizvodnja iz solarnih panela je nula.



Slika 3. Insolacija solarnog panela pridruženog čvoru 50

Pretpostavljeno je da su distribuirani generatori prisutni u samom startu (na početku) proračuna i da se tek naknadno (posle toga) vrši optimizacija. Dobro je poznato da adekvatno postavljeni i projektovani DG mogu doprineti smanjenju gubitaka, poboljšanju napona i pouzdanosti i odlaganju u znavljanju sistema. S druge strane loše postavljanje ovih jedinica može dovesti do prenapona, reverzibilnih tokova snaga i povećanih gubitaka u vodovima. Za različite lokacije DG-a u mreži dobile bi se različite optimalne konfiguracije i različite vrednosti za mesta i veličine postavljanja kondenzatorskih baterija (dijagrami na Slikama 5-9). Cilj optimizacione metode bio je da se za postavljene DG-e (uniformna raspodela po čvorovima za vetro generatore) dobiju konfiguracije mreže i lokacije i vrednosti kondenzatorskih baterija za minimiziranu funkciju cilja (3) za svaki sat rada. U drugoj fazi proračuna vrši se realistično postavljanje sa fiksnim čvorovima i vrednostima za ove jedinice za 1008 sati rada mreže. Usvojena su dva vetro generatora i dva solarna panela u samom startu. Pretpostavljeno je da su svi oni u istom geografskom području tako da su brzine vetra i solarna

iradijacija iste za obe jedinice. Za postavljanje vetro generatora biraju se najposećeniji čvorovi nakon njihove uniformne raspodele za 1008 sati rada mreže (Monte Carlo grafička metoda). Solarni paneli raspoređeni su u dva najopterećenija čvora aktivnom snagom (čvor 50. 918,37 kW i čvor 111. 918,03 kW), snage 1 MW, Slika 3.

Uzeto je da je nivo penetracije (ukupna maksimalna snaga DG-a) 4 MW što je približno 20% od aktivne nazivne potrošnje (22,7097 MW). Snage DG-a se menjaju po Weibull-ovoj raspodeli i u skladu sa dijagramom insolacije. Za scenario 13 dobijeni su minimalni gubici aktivne snage oko 200 kW što govori u prilog tome da je nivo penetracije DG-a dobro izabran. Baš zbog stohastičnosti potrošnje veće snage DG-a dovele bi do reverzibilnih tokova snaga i oscilovanja usvojenog Newton-Raphson-ovog algoritma tokova snaga u nekim od 1008 sati rada mreže što su autori iskusili na primeru reference [14]. Jasno je da bi se za snage DG-a drugačije od usvojenih dobile različite optimalne konfiguracije mreže i različite vrednosti i mesta za ugradnju kondenzatorskih baterija zbog promene injektiranih snaga u čvorovima mreže. Ovo bi bio još jedan primer zametne metode probaj i odbaci kojom bi se dobila najbolja varijanta.

III PRIMENJENI OPTIMIZACIONI ALGORITMI

Prvo se posmatra rekonfiguracija za koju je primenjen MST algoritam. Njime se postižu minimalni gubici aktivne snage bliski globalnom optimumu. Nakon toga vrši se kompenzacija SA metodom [13] koja je mnogo vremenski zahtevnija (reda nekoliko sati) pa se ne primenjuje simultano za razgranatu mrežu. Efikasni algoritam tokova snaga je u MATPOWER okruženju (tačni Newton-ov iterativni postupak [15]). Kod MST-a dobija se radijalna mreža a algoritam tokova snaga primenjuje samo jedanput što je razlog njegove skalabilnosti. Usvojeni su sledeći parametri nehomogene SA metode: početna temperatura ($T_{početno}$) 5000 °C, dužina Markov-ljevog lanca 3000, pravilo snižavanja temperature $T=0,95 \cdot T$ i stopa prihvatanja 0,001. Posmatra se 1008 sati rada mreže (broj sati rada mora biti deljiv sa 24, tako je koncipiran program proračuna). Algoritam MST se može ukratko opisati:

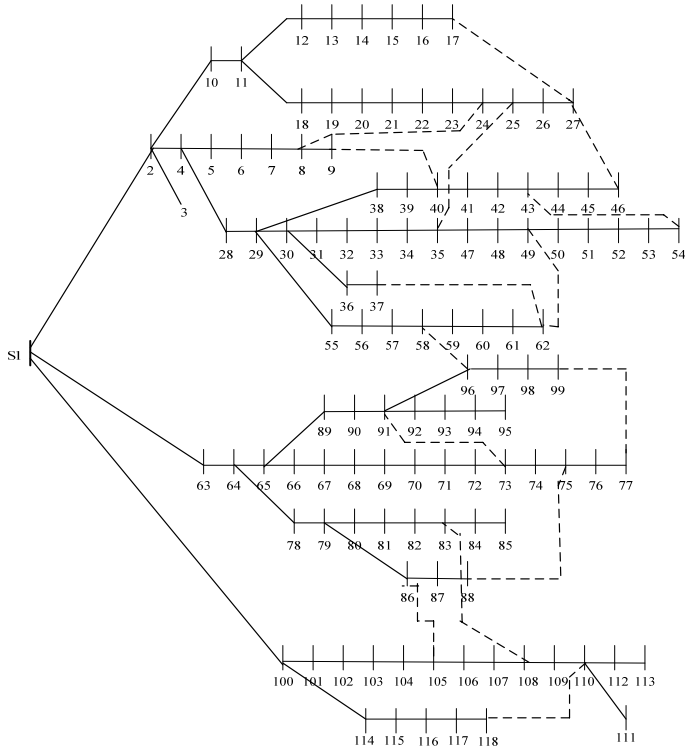
- za potpuno upetljanu mrežu odrede se efektivne struje grana koje postaju težinski koeficijenti za svaku granu grafa mreže,
- kreće se od balansnog čvora koji se označava sa brojem 1,
- zatvara se grana sa najvećim težinskim koeficijentom a da pri tome ne nastane petlja,
- novodobijeni čvor se ubeležava u skup čvorova,
- ako su pređeni svi čvorovi mreže algoritam se zaustavlja,
- ako nisu nastavlja se istom logikom dok se ne pređu svi čvorovi mreže.

Za mrežu primer [16] vreme proračuna je gotovo trenutno ($O(\log N)$), gde je N broj čvorova.

IV PODACI O TEST MREŽI

Testirana mreža je razgranata, simetrična, nazivnog napona 11 kV (Slika 4) i ima 118 čvorova, 117 sekcioni (puna linija) i 15 spojnih grana (isprekidana linija) od kojih svaka može da komutuje. Podaci o IEEE 118 mreži dati su u [16]. Ukupni gubici snage nazivnog režima su 1298,1 kW. Mreža nije dobro kompenzovana, ulazni faktor snage $\cos \phi$ is 0,7998 (< 0,85).

Pretpostavljeno je da su maksimalne tolerancije za napone čvorova $\pm 10\%$ (od 11 kV). Najniži napon mreže je 0,869 r.j. u čvoru 77. Kondenzatorske baterije snage 300 kVAr dodeljuju se svim čvorovima mreže sem balansasnom u skladu sa funkcijom cilja. Dozvoljene efektivne struje grana su: 1 (1,9 kA), 2 (0,9 kA), 3 (1,85 kA), 4-7 (0,95 kA), 8-26 (0,9 kA), 27 i 28 (1,45 kA), 29-34 (1,25 kA), 35-45 (0,9 kA), 46-53 (1,25 kA), 54-61 (0,9 kA), 62 i 63 (1,45 kA), 64-76 (1,25 kA), 77-98 (0,9 kA), 99-109 (1,25 kA), 110 (0,9 kA), 111 i 112 (1,25 kA) i 113-132 (0,9 kA), cifre izvan zagrada označavaju redni broj grane.



Slika 4. Test mreža IEEE 118

V FUNKCIJE CILJA, OGRANIČENJA, OPERACIONI INDEKSI I DOZVOLJENI BROJ KOMUTACIJA PO GRANI

Funkcija cilja za svaki sat rada:

$$EOLDD_{i,j}[\$] = E1_{i,j} \cdot 0,15 + 120 \cdot P_{loss,i,j} + C_{int,i,j} = FINALCOST_{i,j} \quad (3)$$

gde su:

$E1_{i,j}$ [\$] - cena kondenzatorskih baterija,
 0,15 - godišnja stopa cene kondenzatorskih baterija [17],
 120 [\$ / kW] - cena gubitaka aktivne snage,
 $P_{loss,i,j}$ [kW] - gubici aktivne snage,
 $C_{int,i,j}$ [\$] - trošak na neisporučenu električnu energiju [18],
 j - oznaka koja se odnosi na tekući sat i
 i - oznaka koja se odnosi na redni broj scenarija.

Uštede svakog sata se sračunavaju po:

$$SAVINGS_{i,j} = INITIAL_{i,j} - FINALCOST_{i,j} \quad (4)$$

$INITIAL_{i,j}$ - inicijalna funkcija cilja za polaznu konfiguraciju (bez komutacija i bez kondenzatorskih baterija).

Funkcija cilja uštede za ceo posmatani period od 1008 sati:

$$ENERGYSAVINGS_i [\$] = 120 \cdot \max(P_{loss,initial,i,j}) +$$

$$+ 0,03 \cdot \sum_{j=1}^{N^{hours}} P_{loss,initial,i,j} + \sum_{j=1}^{N^{hours}} C_{int,initial,i,j} -$$

$$+ [0,15 \cdot E1_{i,j} + 120 \cdot \max(P_{loss,i,j}) +$$

$$+ 0,03 \cdot \sum_{j=1}^{N^{hours}} P_{loss,i,j} + \sum_{j=1}^{N^{hours}} C_{int,i,j} + C_{com,i}] \quad (5)$$

gde su:

0,03 [\$ / kWh] - cena gubitaka na isporučenu električnu energiju i
 $C_{com,i}$ - cena komutacija (cena jedne komutacije je 1\$ ili 50\$).

Ograničenja:

$$V^{\min} \leq V_{k,i,j} \leq V^{\max} \quad \forall k \in N, i \in I, j \in J \quad (6)$$

gde su:

$V^{\min}, V^{\max}$ [V] - dozvoljena minimalna i maksimalna vrednost napona mreže,
 V_k [V] - napon čvora k u r.j.,
 N - ukupan broj čvorova mreže,
 I - skup svih scenarija,
 J - skup svih sati rada mreže.

$$I_{k,i,j} \leq I_{k,i,j}^{\max} \quad \forall k \in N_b, i \in I, j \in J \quad (7)$$

$I_k^{\max}$ [A] - maksimalna dozvoljena struja grane k ,

I_k [A] - vrednost struje grane k ,

N_b - ukupan broj grana mreže.

$$Q_{bmin,i,j} \leq Q_{b,i,j} \leq Q_{bmax,i,j} \quad i = 4, -14, 16, 18, 20 \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$Q_{bmax,i,j} = Q_{initial,i,j} + Q_{dem,i,j} \quad i = 4, -14, 16, 18, 20 \quad \forall j \in J \quad (9)$$

Jednačina (9) pretpostavlja da mreža ne bude prekompenzovana.

$$Q_{bmin,i,j} = Q_{initial,i,j} + Q_{dem,i,j} - P_{00,i,j} \cdot \frac{\sqrt{1-0,85^2}}{0,85}$$

$$i = 4, -14, 16, 18, 20 \quad \forall j \in J \quad (10)$$

Da bi se imao ulazni faktor snage veći od 0,85 primenjuje se jednačina (10) [19]. U jednačinama (9) i (10) zanemarene su dozorne admitanse mreže, što je validno za test mrežu. U jednačinama (8-10) upotrebljene su sledeće oznake:

Q_b - ukupna snaga instaliranih kondenzatorskih baterija,

Q_{bmax} - maksimalna ukupna snaga instaliranih kondenzatorskih baterija,

$Q_{initial}$ - reaktivna snaga za polaznu konfiguraciju bez instaliranih kondenzatora,

Q_{dem} - potrošnja reaktivne snage mreže,

Q_{bmin} - minimalna ukupna snaga instaliranih kondenzatorskih baterija,

P_{00} - injektirana aktivna snaga u balansni čvor mreže.

Jednačine balansa snaga u čvorovima mreže (11) - (14):

$$P_{ij} = \text{tap}^2 V_i^2 G_{ij} - \text{tap}^2 V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (11)$$

$$Q_{ij} = -\text{tap}^2 V_i^2 B_{ij} - \text{tap}^2 V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (12)$$

$$P_{slack} + \sum_{d=1}^{NDG} P_{DG}(d) = \sum_{i=1}^{N-slack} P_{dem}(i) + \sum_{ij=1}^{N_{br}} P_{loss}(ij) \quad (13)$$

$$Q_{slack} + \sum_{k=1}^{NCB} Q_{CB}(k) = \sum_{i=1}^{N-slack} Q_{dem}(i) + \sum_{ij=1}^{N_{br}} Q_{loss}(ij) \quad (14)$$

U jednačinama (11-14) upotrebljene su sledeće oznake:

i, j - predajni i prijemni čvor grane ij ,
 P_{ij} - aktivna snaga injektirana iz čvora i grane ij ,
 Q_{ij} - reaktivna snaga injektirana iz čvora i grane ij ,
 tap - položaj teretne naponske sklopke u r.j. (1 ili 1,025 r.j.),
 V_i - napon čvora i kada nije primenjena regulacija,
 G_{ij} - konduktansa grane ij ,
 B_{ij} - susceptansa grane ij ,
 δ_i - fazni stav napona u čvoru i ,
 P_{slack} - aktivna snaga injektirana u balansni čvor,
 Q_{slack} - reaktivna snaga injektirana u balansni čvor,
 NDG - broj distribuiranih generatora,
 P_{DG} - snaga distribuiranog generatora,
 NCB - broj kondenzatorskih baterija,
 Q_{CB} - snaga kondenzatorske baterije,
 P_{dem} - aktivna potrošnja čvora (Gauss-ova raspodela),
 Q_{dem} - reaktivna potrošnja čvora (Gauss-ova raspodela),
 N_{br} - ukupan broj uključenih grana,
 $P_{loss}(ij)$ - gubitak aktivne snage grane ij ,
 $Q_{loss}(ij)$ - gubitak reaktivne snage grane ij .

Broj otepa teretne naponske sklopke je standardizovan. Analizirane su vrednosti u koracima od 2,5% nazivnog napona (-5%, -2,5%, 0%, 2,5% i 5%). U normalnom radnom režimu bira se otep u nultom položaju (nazivni napon). Dozvoljene su tolerancije napona od 0,9 do 1,1 r.j. Ove granice su zadovoljene u slučaju da je položaj teretne sklopke 2,5%. Položaj od 1,05 r.j. doveo bi mrežu u radni režim kada je V_{max} mreže veće od 1,05 r.j. tako da se uži opseg napona za rad mreže od 0,95-1,05 r.j. nije mogao usvojiti.

Cena kondenzatorskih baterija data je tabelarno (stepenastom funkcijom, Tabela 1) po koracima reaktivnih snaga baterije:

Tabela 1. Cena kondenzatorske baterije (\$)

snaga baterije	> 0, ≤ 300 kVAr	> 300, ≤ 600 kVAr	> 600, ≤ 900 kVAr	> 900, ≤ 1200 kVAr	> 1200 kVAr
cena	1900\$	3200\$	4500\$	5400\$	6000\$
Cena održavanja i montaže uključena je u fiksni deo cene kondenzatorske baterije					

Ukupni indeks naponske slike je:

$$TVPI_i = \frac{\sum_{j=1}^{N^{hours}} VPI_{i,j}}{N^{hours}} \quad (15)$$

Pojedinačni indeks naponske slike je :

$$VPI_{i,j} = \sum_{k=1}^N |1 - V_{k,i,j}| \quad (16)$$

N - broj čvorova mreže,

$V_{k,i,j}$ - napon čvora k u relativnim jedinicama (r.j.) i

$VPI_{i,j}^n$ - pojedinačni indeks naponske slike za polaznu konfiguraciju.

Ukupni indeks gubitaka aktivne snage je:

$$TPLI_i = \frac{\sum_{j=1}^{N^{hours}} PLI_{i,j}}{N^{hours}} \quad (17)$$

$$PLI_{i,j} = \sum_{b=1}^{N_b} r_b \cdot I_{b,i,j}^2 \quad (18)$$

N_b - ukupan broj grana,

r_b - aktivna otpornost grane b i

$I_{b,i,j}$ - vrednost struje grane b .

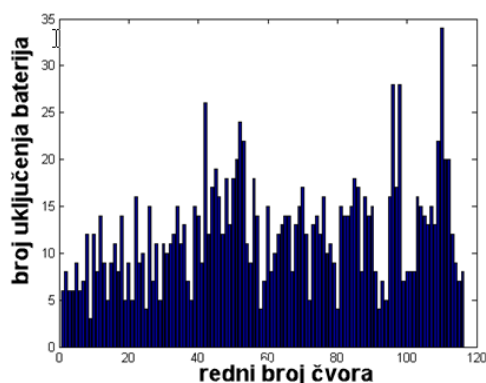
Za cenu komutacija uzeta je vrednost od 1\$ i posebno 50\$ (boldovana vrednost iz Tabele 2). Ona je zanemarena u funkciji cilja (3) jer je u najgorem slučaju vrednost komutacija u jednom satu (15·2·50\$)=1,500\$ što se može zanemariti u odnosu na vrednost gubitaka aktivne snage pomnožene sa penalizacionim faktorom 120\$/kW čime se dobija vrednost veća za red veličine (reda 104\$). Da bi se uvažila cena komutacija za svih 1008 sati rada mreže ona je uključena u izraz za funkciju cilja uštede za ceo posmatrani period (5). Uvedeno je ograničenje maksimalnog broja komutacija po jednom komutujućem elementu tokom 24 sata rada mreže. Usvojeno je da je on isti za sve komutujuće elemente i da iznosi 6. Za rad mreže od 24 sata i prekidač koji treba da radi 15 godina predviđa se maksimalni broj komutacija od 6, 4 za rekonfiguraciju i 2 za eventualnu restauraciju. Očigledno je da porastom cene jedne komutacije opada funkcija cilja (5) i da je poželjno da cena komutacija bude što manja.

VI PRIBLIŽAVANJE PODOBNOM REŠENJU

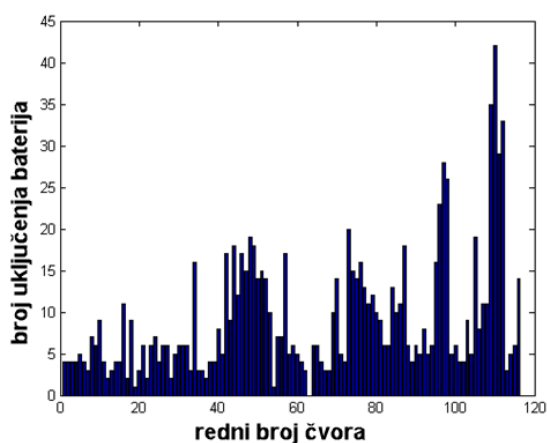
Pre rekonfiguracije i kompenzacije u mreži su instalisana dva vetrogeneratora maksimalne snage od po 1 MW svaki, što čini oko 10% aktivne potrošnje (22,7097 MW) i solarni paneli maksimalne snage od po 1 MW svaki i to u najopterećenijim čvorovima mreže, čvor 50 (0,91837 MW, 1,2015 MVar) i čvor 111 (0,91803 MW i 0,89855 MVar), što je bio kriterijum za

izbor obnovljivih izvora. Pri simuliranju rekonfiguracije i kompenzacije, kada se uniformno raspodeljuju vetrogeneratori po čvorovima mreže dobijeno je da su najčešće posećivani čvorovi (vetrogeneratorima) 27 i 102. U ovom slučaju minimalni gubici aktivne snage mreže iznosili su oko $P_{loss}=200$ kW što govori u prilog tome da su maksimalne snage distribuiranih izvora dobro procenjene.

Simulacija je izvršena za položaj teretne naponske sklopke (OLTC) u napojnom čvoru mreže 1,00 i 1,025 r.j. Pri položaju 1,00 r.j. za 1008 sati rada mreže dobilo se da je $V_{min}=0,8995$ r.j. što nije u opsegu 0,9-1,1 r.j. koji je usvojen za važeći pa je simulacija nastavljena sa otepcem od 1,025 r.j. kada je $V_{min}=0,9238$ r.j. što je zadovoljilo. Maksimalna struja je za 26,0423 A bila manja od deklarisanе pa su se najčešće posećivani čvorovi vetrogeneratorima odredili u ovom radnom režimu (položaj otepa 1,025 r.j.).



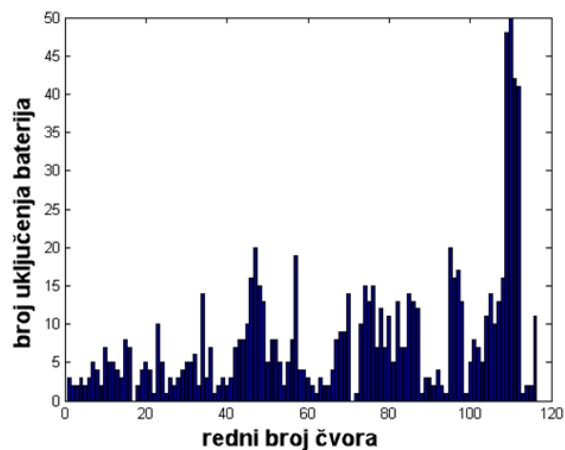
Slika 5. Broj uključenja kondenzatorske baterije od 300 kVAr-a za 1008 sati rada mreže



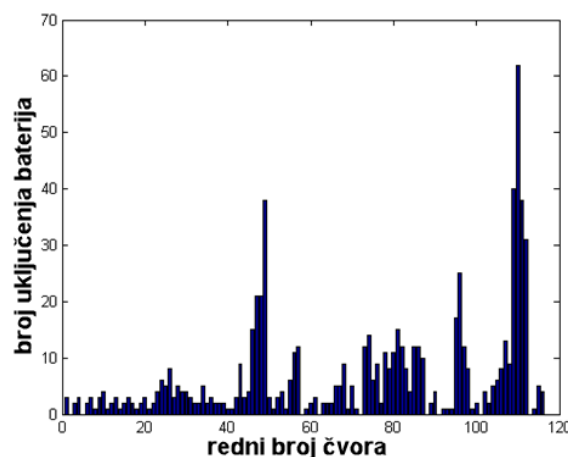
Slika 6. Broj uključenja kondenzatorske baterije od 600 kVAr-a za 1008 sati rada mreže

Simulacija sa fiksnim kondenzatorskim baterijama i fiksnim čvorovima za njihovo instaliranje izvršena je sukcesivno, postepenim dodavanjem sve većeg broja baterija u čvorovima mreže koji su najposećeniji sa njihovog aspekta pri čemu se je krenulo od kondenzatorskih baterija snage 1200 kVAr-a, pa 600 kVAr-a i na kraju 300 kVAr-a. Sve dok je rasla funkcija cilja

(ENERGYSAVINGS, (5)) dodavane su baterije, da bi se sa ovim prekinulo čim je ona počela da opada. U Tabeli 2 su navedeni čvorovi za postavljanje baterija kada balansni (nulti) čvor nije uzet u obzir. Ovaj algoritam nazvan je Monte Carlo grafička metoda (Slike 5 – 9).



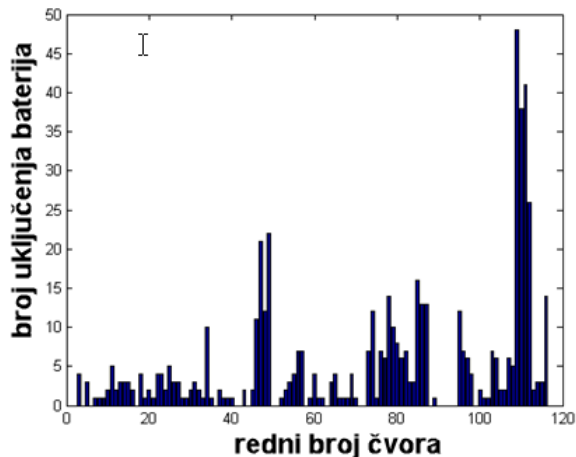
Slika 7. Broj uključenja kondenzatorske baterije od 900 kVAr-a za 1008 sati rada mreže



Slika 8. Broj uključenja kondenzatorske baterije od 1200 kVAr-a za 1008 sati rada mreže

Osnovna ideja pri simulaciji je bila da se prvo vrši rekonfiguracija sa prisutnim distribuiranim izvorima primenom metode minimalno razgranatog stabla a tek onda kompenzacija kondenzatorskim baterijama. Primena algoritma simuliranog kaljenja za simultanu metodu je otpala jer za ovu mrežu rekonfiguracija za jedan nivo potrošnje traje 17 dana i ne daje zadovoljavajuće rezultate. Usvojeno je da u mreži primeru postoji dovoljno rasprezanje između optimalne rekonfiguracije i kompenzacije zbog čega se ove dve metode mogu primeniti odvojeno u procesu dosezanja optimuma što ne mora biti slučaj u sistemima sa kompleksnijom petljastom strukturom [20]. Za početni, vremenski najzahtevniji program (kada „šetaju“ vetrogeneratori i kondenzatorske baterije, kompenzacija vrši metodom simuliranog kaljenja, ICOUNT 3000) program u MATLAB-u R2010a sa MATPOWER algoritmom za proračun

tokova snaga na računaru PRIME LIDER BAYONET PC; AMD Ryzen5 2600 3,4 do 3,9 GHz; 2x32 GB RAM traje oko 15 sati i 36 min (1008 iteracija) a svaka simulacija pri fiksnim čvorovima za vetrogeneratore i kondenzatorske baterije traje 1 min CPU vremena (takođe 1008 iteracija) zbog skalabilnosti algoritma minimalno razgranatog stabla.

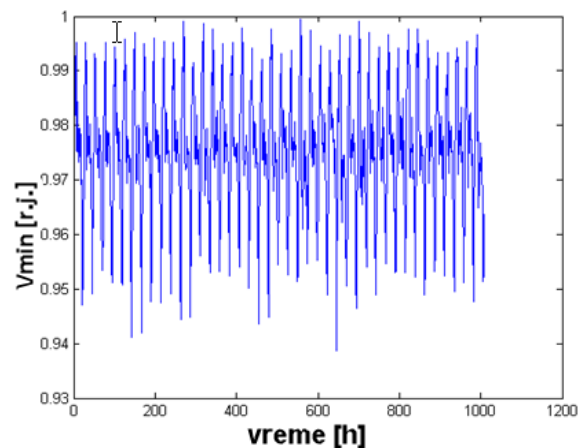


Slika 9. Broj uključenja kondenzatorske baterije od 1500 kVAr-a za 1008 sati rada mreže

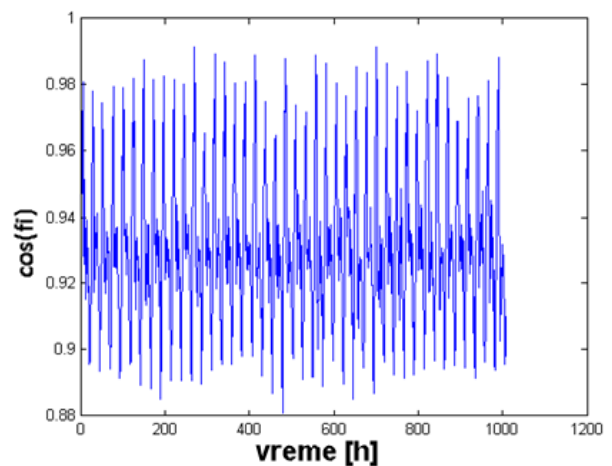
VII REZULTATI I DISKUSIJA

Iz Tabele 2 očigledno je da je najbolji scenario 13 (zasenčen žuto). On zadovoljava sve tehničke zahteve u pogledu dozvoljenih napona u čvorovima mreže (usvojeno je da napon može da varira u opsegu 0,9-1,1 r.j.), Slika 10. Takođe zadovoljene su vrednosti i za maksimalnim dozvoljenim strujama, minimalno odstupanje struje je 15,7131 A (toliko je manja od dozvoljene efektivne vrednosti). Mreža ima i dobar ulazni faktor snage ($>0,85$ koliko je usvojeno za minimalnu dozvoljenu vrednost) i nije prekompenzovana (Slika 11 i 12). Sa ekonomskog aspekta ovo je i najjeftiniji scenario sa cenom od 7,039,300\$ odnosno 7,090,015\$ (cena komutacija 50\$ boldovano) i maksimalnom uštedom od 869,180\$ i najmanjim troškovima na neisporučenu energiju (6,816,900\$). Kod ove analize cena teretne naponske sklopke nije uzeta u obzir. Treba uočiti da je razlika u ceni scenarija 21 i 17, 250 100\$ što treba usvojiti za faktor korekcije (uvećanja) uštede za scenarije 13, 15, 16 i 17 kao i svih scenarija u kojima se vrši rekonfiguracija i kompenzacija a položaj teretne sklopke je 1.025 r.j. Rekonfiguracija je u svim scenarijima ista (vrši se na početku za iste vrednosti polaznih konfiguracija). Napominjemo da je rekonfiguracija odvojena od kompenzacije koja se izvršava nakon rekonfiguracije. Postepenim dodavanjem kondenzatorskih baterija polako rastu i naponi mreže, popravljaju se faktor snage i povećavaju se minimalne razlike u odnosu na usvojene nazivne struje mreže.

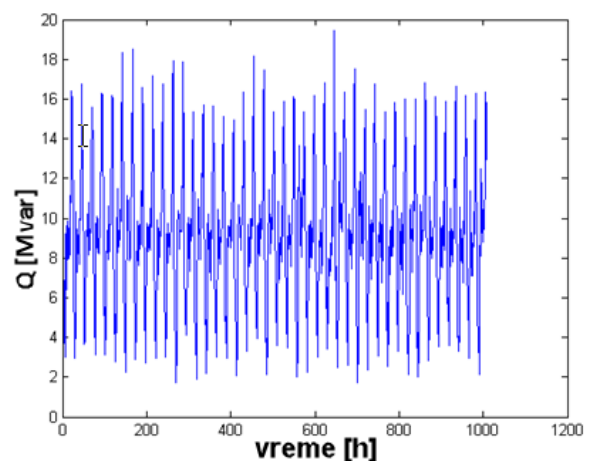
Važna napomena u vezi sa slikama 10-12 je da promenljive na njima osciluju oko očekivanih srednjih vrednosti što je uzrokovano Gauss-ovm rapodelom potrošnje u čvorovima mreže. Treba uočiti da se određene grane nikad ne otvaraju (scenariji 1-15, 18, 19) tako da na njima prekidači nisu potrebni što daje dodatne uštede.



Slika 10. Minimalni napon mreže u funkciji od sati - scenario 13



Slika 11. $\cos\phi$ u funkciji od sati - scenario 13



Slika 12. Ulazna reaktivna snaga u funkciji od sati – scenario 13

Iz Tabele 2 vidi se da kompenzacija novim kondenzatorskim baterijama ima i određeno ograničenje u dodavanju baterija iste snage. Kad cena počne da raste treba poslednju kondenzatorsku bateriju određene snage zameniti sa baterijom manje snage i time postići precizniju regulaciju kako tehničkih tako i ekonomskih parametara sve dok je ovo dodavanje ekonomski opravdano (ovo se vidi na primerima scenarija 4, 5 i 6).

Tabela 2. Rezultati za 1008 puta puštan program za različite scenarije

Scenario/ baterija kVAr/ (čvor bez nultog)	Ulazno	Energy OLTC cena nije uključena	Energy Savings OLTC cena nije uključena	TVPI	TPLI	Komutacije	Δ Polazno	Δ Krajnje	Umax polazno	Umax krajnje	Umin krajnje	cos ϕ	Qulazno	Trošak na neisporučenu električnu energiju
Redni broj	r.j.	\$	\$	r.j.	r.j.	\$	A	A	r.j.	r.j.	r.j.		prekompenzovana	\$
1 1200(49) 1200 (110)	1,025	7 157 400 7 208 115	751 120 700 405	-	-	1035 51 750	-21,1647	- 154,7816	1,0293	1,0250	0,9249	<0,85	nije	6 895 700
2 1200(49) 1200(110) 1200(96)	1,025	7 124 800 7 175 515	783 720 733 005	-	-	1035 51 750	-21,1647	-87,1631	1,0293	1,0250	0,9293	<0,85	nije	6 874 400
3 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81)	1,025	7 105 500 7 156 215	803 000 752 285	-	-	1035 51 750	-21,1647	-87,1631	1,0293	1,0250	0,9330	<0,85	nije	6 864 700
4 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74)	1,025	7 092 600 7 143 315	815 970 765 255	-	-	1035 51 750	-21,1647	-87,1631	1,0293	1,0250	0,9330	>0,85	nije	6 858 600
5 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 1200(57)	1,025	093 600 144 315	814 890 764 175	-	-	1035 51 750	-21,1647	-30,0800	1,0293	1,0250	0,9332	>0,85	nije	6 861 600
6 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48)	1,025	7 086 300 7 137 015	822 270 771 555	-	-	1035 51 750	-21,1647	-56,6923	1,0293	1,0250	0,9331	>0,85	nije	6 855 000
7 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57)	1,025	084 100 134 815	824 410 773 695	-	-	1035 51 750	-21,1647	-28,0560	1,0293	1,0250	0,9332	>0,85	nije	6 854 600
8 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 600(34)	1,025	7 098 300 7 149 015	810 210 759 495	-	-	1035 51 750	-21,1647	-1,0316	1,0293	1,0250	0,9333	>0,85	nije	6 870 000
9 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(34)	1,025	7 089 000 7 139 715	819 570 768 855	-	-	1035 51 750	-21,1647	-14,2943	1,0293	1,0250	0,9332	>0,85	nije	6 860 100

10 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42)	1,025	7 060 900 7 111 615	847 650 796 935	-	-	1035 51 750	-21,1647	-12,5887	1,0293	1,0250	0,9386	>0,85	nije	6 834 300
11 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52)	1,025	7 041 300 7 092 015	867 180 816 465	-	-	1035 51 750	-21,1647	2,2059	1,0293	1,0250	0,9386	>0,85	nije	6 817 200
12 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52) 300(45)	1,025	7 040 400 7 091 115	868 100 817 385	-	-	1035 51 750	-21,1647	15,7131	1,0293	1,0250	0,9386	>0,85	nije	6 817 400
13 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52) 300(45) 300(85)	1,025	7 039 300 7 090 015	869 180 818 465	-	-	1035 51 750	-21,1647	15,7131	1,0293	1,0250	0,9386	>0,85	nije	6 816 900
14 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52) 300(45) 300(85) 300(22)	1,025	7 040 000 7 090 715	868 550 817 835	-	-	1035 51 750	-21,1647	28,3938	1,0293	1,0250	0,9386	>0,85	nije	6 818 100
15	1,025	7 297 900 7 348 615	610 600 559 885	-	-	1035 51 750	-21,1647	- 227,0822	1,0293	1,0250	0,9177	<0,85	nije	7 007 700
16 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52) 300(45) 300(85)	1,025	7 639 185	269 385	-	-	-	-21,1647	180,0811	1,0293	1,0297	0,8487	>0,85	nije	7 314 900
17	1,025	7 908 485	-	-	-	-	-21,1647	-21,1647	1,0293	1,0293	0,8078	<0,85	nije	7 467 500

18 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52) 300(45) 300(85)	1,000	7 234 400 7 285 115	924 160 873 445	0,5519	0,4969	1035 51 750	-76,9871	-35,9142	1,0044	1,000	0,9110	>0,85	nije	6 999 700
19	1,000	7 508 100 7 558 815	650 480 599 765	0,7508	0,6793	1035 51 750	-76,9871	- 286,7567	1,0044	1,000	0,8893	<0,85	nije	7 200 700
20 1200(49) 1200(110) 1200(96) 1200(81) 1200(74) 600(48) 600(57) 300(42) 300(52) 300(45) 300(85)	1,000	7 864 185	294 365	0,7366	0,6835	-	-76,9871	132,0758	1,0044	1,0048	0,8173	>0,85	nije	7 519 300
21	1,000	8 158 585	-	1	1	-	-76,9871	-76,9871	1,0044	1,0044	0,7741	<0,85	nije	7 686 700

Napomena: Energy je izraz u srednjoj zagradi jednačine (5).

Konačan zaključak na osnovu Tabele 2 je da novo dodavanje kondenzatorske baterije od 300 kVAr-a nakon scenarija 13 (scenario 14) dovodi do povećavanja u ceni i da tu treba stati, odnosno da je optimalan scenario 13. Na ovaj način dobija se rešenje blisko globalnom optimumu za širok dijapazon (1008 sati) realnog rada mreže. Optimizacija je tako zamišljena da se minimizira funkcija cilja (3) za svaki sat rada mreže (uzeto da ih ima 1008). Minimizacijom svakog sata dobija se globalni optimum koji je nerealan jer se vetro generatori „šetaju“ (uniformna raspodela po čvorovima mreže) kao i kondenzatorske baterije. Usvajanjem fiksnih čvorova za lociranje vetro generatora i baterija kao i njihovih veličina na osnovu najveće posećenosti čvorova mreže, Monte Carlo grafičkom metodom koja je logična mada ne i sasvim precizna dobija se rešenje blisko globalnom optimumu za širok period realnog rada mreže.

U narednoj analizi biće upoređeno osam scenarija (13, 15-21), Tabela 2. Ovo su scenariji kod kojih je uključena rekonfiguracija, kompenzacija, distribuirana proizvodnja u samom startu, kao i teretna naponska sklopka u napojnom razvodnom postrojenju i odsustvo pojedinih od navedenih strategija radi njihove procene. U pogledu dozvoljenog odstupanja napona zadovoljavaju scenariji 13, 15 i 18 i najbolji je napon mreže za scenario 13 (minimalna vrednost napona čvora je 0.9386 r.j.). U pogledu dobre dimenzionisanosti provodnika grana sa aspekta maksimalno dozvoljenih struja zadovoljavaju scenariji 13, 16 i 20, pri čemu najveća rezerva postoji kod scenarija 16, što bi značilo da bi u pogledu maksimalnih razlika u odnosu na dozvoljene struje grana ovaj scenario bio najbolji. U pogledu dobrog ulaznog faktora snage ($\cos\phi$) zadovoljavaju scenariji 13, 16, 18 i 20 čime je potvrđena činjenica da se kompenzacijom mreže uvek može popraviti ulazni faktor snage. Indeksi TVPI i TPLI se tačno mogu odrediti samo za scenarije 18, 19, 20 i 21 i najbolji su za scenario 18.

VIII ZAKLJUČAK

U ovom članku razmatra se rekonfiguracija distributivne mreže sa otočnom kompenzacijom uz prisustvo vetro generatora i solarnih panela (u samome startu) pomoću MST algoritma na primeru razgranate distributivne mreže IEEE sa 118 čvorova. Izvršena analiza pokazuje da se znatne uštede mogu postići pri čemu se u analizu uključuje i dnevni dijagram potrošnje. Monte Carlo grafička metoda za postavljanje kondenzatorskih baterija kod razgranate mreže mora se primenjivati sukcesivno dok funkcija cilja raste što je jedna varijanta dinamičkog programiranja [21]. Krajnji $\cos\phi$ za najbolje scenarije je veći od 0,85 dok je polazni manji. Mreža nije prekompenzovana. Krajnji naponski profil je bolji od polaznog. Za scenarije 13, 15 i 18 najmanji napon mreže je veći od 0,9 r.j. Krajnji gubici su mnogo bolji od polaznih. Postignuta je značajna ušteda u isporučenoj električnoj energiji. Sa trajanjem programa od 15,5 sati (simulacija rada za 1008 sati) razvijeni algoritam se može upotrebiti u fazi planiranja. Neke grane se nikada ne otvaraju tako da na njima nisu neophodni prekidači što donosi dodatne uštede. Može se zaključiti da dobijeni rezultati prezentovani slikama i tabelama potvrđuju validnost Monte Carlo grafičke metode sprovedene pomoću MST algoritma. Pri izvršenim analizama cena teretne naponske sklopke nije uzeta u obzir. Glavni doprinosi ovog rada su:

- stohastički prikaz promene potrošnje u čvorovima mreže (Gauss-ova raspodela),
- stohastički prikaz promene snage vetro generatora u čvorovima mreže (Weibull-ova raspodela),
- uniformna raspodela vetro generatora po čvorovima mreže pre izbora čvorova gde se oni stalno, za ceo period (1008 sati) rada mreže postavljaju,

- uključenje teretne naponske sklopke u napojnom čvoru mreže,
- postizanje ulaznog faktora snage mreže iznad 0,85 primenom kondenzatorskih baterija,
- primena višestruke funkcije cilja koja pored gubitaka vršne snage i cene kondenzatorskih baterija uključuje i cenu gubitaka na električnu energiju, cenu na neisporučenu električnu energiju i cenu komutacija,
- ograničenje broja komutacija na maksimalno 6 u toku 24 sata po jednom komutujućem elementu,
- transparentnost primenjene grafičke Monte Carlo metode za postavljanje vetro generatora i kondenzatorskih baterija u čvorovima mreže,
- primena metode minimalno razgranatog stabla, MST (Kruskal i Prim) na problem rekonfiguracije uz naknadnu primenu metode simuliranog kaljenja na problem kompenzacije mreže,
- uključenje dnevnog dijagrama potrošnje sa neradnim i radnim danima pri analizi potrošnje mreže,
- uključenje solarnih panela sa dijagramom insolacije u najopterećenijim čvorovima mreže i
- široki vremenski dijapazon analize rada mreže (1008 sati) uz zadovoljenje svih tehničkih ograničenja (minimalnih napona čvorova, maksimalnih dozvoljenih vrednosti struja grana i neprekompensovanosti mreže).

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Civanlar, S. Grainger, J.J., Yin, H., Lee, S.S.H. Distribution feeder reconfiguration for loss reduction, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, pp. 1217-1223, 1988. <https://doi.org/10.1109/61.193906>
- [2] Shirmohammadi, D., Hong, H.W. Reconfiguration of electric distribution networks for resistive line losses reduction, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 2, pp. 1492-1498, 1989. <https://doi.org/10.1109/61.25637>
- [3] Xu, X., Wang, C., Feng, X. A taboo search approach for distribution network reconfiguration based on GIS, in Proc. 2009 International Workshop on Intelligent Systems and Applications, Wuhan, China, pp. 1-4, 23-24 May 2009. <https://doi.org/10.1109/IWISA.2009.5072681>
- [4] Asrari, A., Lotfifard, S., Payam, M.S. Pareto dominance-based multiobjective optimization method for distribution network reconfiguration, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 7, No. 3, pp. 1401-1410, 2016. <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2468683>
- [5] Salehi, J., Oskuee, M.R.J., Amini, A. Stochastic multi-objective modeling of simultaneous reconfiguration of power distribution network and allocation of DG's and capacitors, International Journal of Ambient Energy, Vol. 39, No. 6, pp.1-15, 2017. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1280084>
- [6] Souza, S.S.F., Romero, R., Franco, J.F. Artificial immune networks Copt-aiNet and Opt-aiNet applied to the reconfiguration problem of radial electrical distribution systems, Electric Power Systems Research, Vol. 119, pp. 304-312, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.10.012>
- [7] Taylor, J.A., Hover, F.S. Convex models of distribution system reconfiguration, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 27, No. 3, pp. 1407-1413, 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2184307>
- [8] Kovački, N., Vidović, P., Sarić, A. Scalable algorithm for the dynamic reconfiguration of the distribution network using the Lagrange relaxation approach, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 94, pp. 188-202, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.07.005>
- [9] De Oliveira, L.W., Carneiro, Jr.S., de Oliveira, E.J., Pereira, J.L.R., Silva, Jr.I.C., Costa, J.S. Optimal reconfiguration and capacitor allocation in radial distribution systems for energy loss minimization, Electrical Power and Energy Systems, Vol. 32, No. 8, pp. 840-848, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2010.01.030>
- [10] Sayadi, F., Esmaeli, S., Keynia, F. Feeder reconfiguration and capacitor allocation in the presence of non-linear loads using new P-PSO algorithm, IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 10, No. 10, pp. 2316-2326, 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2015.0936>
- [11] Syahputra, R., Robandi, I., Ashari, M. Optimal distribution network reconfiguration with penetration of distributed energy resources, in Proc. 1st International Conference on Information Technology, Computer and Electrical Engineering (ICITACEE), Semarang, Indonesia, pp. 388-393, 8 November 2014. <https://doi.org/10.1109/ICITACEE.2014.7065777>
- [12] Ahmadi, H., Marti, J.R. Minimum-loss network reconfiguration: A minimum spanning tree problem, Sustainable Energy, Grids and Networks, Vol. 1, pp. 1-9, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2014.10.001>
- [13] Stojanović, B., Rajić, T. Rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija uz prisustvo vetro generatora, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 23, No. 4, pp. 45-52, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.45S>
- [14] Stojanović, B., Rajić, T., Šošić, D. Rekonfiguracija distributivne mreže i otočna kompenzacija uz prisustvo vetro generatora i solarnih panela, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 4, pp. 12-21, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.12S>
- [15] Zimmerman, R.D., Murillo-Sanchez, C.E. MATPOWER 6.0 User's Manual, 2016. <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-6.0.pdf> [pristupljeno 05.03.2023]
- [16] Zhang, D., Fu, Z., Zhang, L. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems, Electric Power Systems Research, Vol. 77, No. 5-6, pp. 685-694, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2006.06.005>
- [17] Stojanović, B. Primena metode „simuliranog kaljenja“ na problem kompenzacije reaktivne snage u simetričnim radijalnim razgranatim distributivnim mrežama, Elektropriroda, No. 3, pp. 35-49, 2004.
- [18] Nahman, J., Perić, D. Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 790-795, 2008. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.920047>
- [19] Stojanović, B. Simulated annealing method and its application to capacitor placement problem in radial distribution networks, University of electrical engineering, Belgrade, 1997.
- [20] Jiang, D., Baldick, R. Optimal electric distribution system switch reconfiguration and capacitor control, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, pp. 890-897, 1996. <https://doi.org/10.1109/59.496171>
- [21] Sarić, A. Primena metode veštačke inteligencije za rešavanje problema kompenzacije reaktivne snage i regulacije napona u distributivnim sistemima, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 1997.

AUTORI/AUTHORS

mr Branko Stojanović - magistar elektrotehnike, Tehnički opitni centar, Beograd, stojanovic.branko@rocketmail.com, ORCID [0000-0002-9846-4684](https://orcid.org/0000-0002-9846-4684)

dr Tomislav Rajić - docent, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, rajic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4796-4117](https://orcid.org/0000-0003-4796-4117)

dr Darko Šošić - vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, sosic@etf.rs, ORCID [0000-0001-9029-8979](https://orcid.org/0000-0001-9029-8979)

Energo koncept *Yaodong* podzemnih zgrada u XXI veku na teritoriji Srbije

Energy Concept of *Yaodong* Underground Buildings in the XXI Century on the Territory of Serbia

Aleksandar Nešović*, Danijela Nikolić*, Nebojša Lukić*

* University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Serbia

Rezime – Zbog svog zanimljivog arhitektonskog rešenja, podzemne zgrade *Yaodong* kao da nude balans između prirodnih i stvorenih parametara lokacije (s jedne strane) i ambijentalnog komfora (s druge strane). U prvom delu rada definisan je koncept *Yaodong* (vreme nastanka, geografsko poreklo, kategorizacija, prostorna organizacija enterijera, geometrijske karakteristike, itd.). U drugom delu, autori predstavljaju konkretan model podzemne konstrukcije *Yaodong* koristeći softver *Google SketchUp*. Zatim vrše simulaciju potrošnje finalne i primarne energije u zgradi koristeći *EnergyPlus* softver i vremensku datoteku za grad Kragujevac. Iako je ovaj tip gradnje karakterističan za severozapadnu Kinu, autori su mišljenja da pomenuti građevinski dizajn može biti i od nacionalnog značaja, pogotovo kada se u obzir uzme činjenica da je potrošnja finalne (i primarne) energije poslednjih godina na svom vrhuncu, što, između ostalog, važi i za stambeni sektor.

KLjučne reči – Energija, *EnergyPlus*, Podzemna zgrada, Simulacija, *Yaodong* koncept.

Abstract – Due to their interesting architectural solution, *Yaodong* underground buildings seem to offer a balance between the natural and created parameters of the locations (on the one side) and ambient comfort (on the other side). In the first part of the paper, the *Yaodong* concept is defined (time of creation, geographical origin, categorization, the spatial organization of the interior, geometrical characteristics, etc.). In the second part of the work, the Authors develop a concrete model (in the *Google SketchUp* software) of the traditional *Yaodong* underground building, and then simulate (in the *EnergyPlus* software) the consumption of final and primary energy in the same, while using a weather file for the city of Kragujevac. Although this type of construction is characteristic of north-western China, the authors think that the mentioned construction design can be of national importance, especially when taking into account the fact that the consumption of final (and primary) energy of the last year at its peak, which also applies to the residential sector.

Index Terms – Energy, *EnergyPlus*, Underground building, Simulation, *Yaodong* concept.

I *YAODONG* ARHITEKTONSKI KONCEPT

Yaodong arhitektonski koncept nastao je pre više od 6000 godina u severozapadnom delu Kine [1], na visoravni Les¹ (Slika 1). Oštri klimatski uslovi (sa toplim letima i hladnim i suvim zimama [2]) u kombinaciji sa specifičnom konfiguracijom terena, primorali su tadašnje stanovnike da razviju podzemni sistem gradnje stambenih objekata, koji se održao i do danas, sa preko 40 miliona korisnika [3].



Slika 1. Visoravan Les na severozapadu Kine [4]

Yaodong podzemni² sistem gradnje bazira se, ili na ukopavanju stambenih objekata u stenama (litičasti predeli, Slika 2), ili na ukopavanju stambenih objekata u terenu (ravničarski predeli, Slika 3) [5].



Slika 2. *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u stenama [6]

¹ Provincije Ningsja, Šensi, Šansi, Gansu i Unutrašnja Mongolija.

² U bukvalnom prevodu, *Yaodong* znači zgrada-pećina.

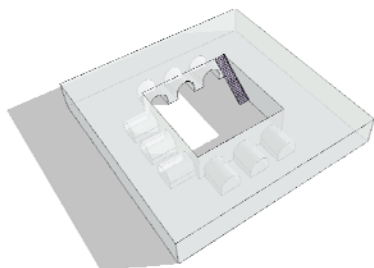


Slika 3. *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenima [7]

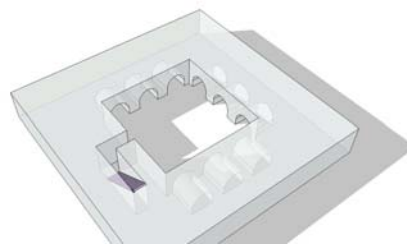
Yaodong podzemne zgrade prvog tipa (Slika 2) prvobitno su koristile kamene litice (spoljašnji, tj. primarni građevinski materijal) u kombinaciji sa drvenim ramovima (unutrašnji, sekundarni građevinski materijal). Prostorije su bile zasvođene, a zidovi sa unutrašnje strane obloženi glinom. Otvori (izrađeni od drveta) na južnoj strani bili su lučnog oblika [8-10]. *Yaodong* podzemne zgrade drugog tipa (Slika 3) sastoje se od centralnog podzemnog dvorišta (vertikalno iskopanog na ravničarskom terenu) i većeg broja zasvođenih prostorija (pećinskog tipa) u koje se ulazi iz centralnog dvorišta. To znači da su sve prostorije pod zemljom, tj. ispod nulte kote u ravni ravničarskog terena. Centralno dvorište u osnovi obično ima pravougaoni ili kvadratni oblik. Prostorije za boravak ljudi orijentisane su lučnim otvorima ka jugu (na severnoj strani dvorišta). Lučni otvori pomoćnih prostorija (skladišta, ostave, prostorije za držanje živine, i sl.) raspoređeni su na preostalim (istočnim, zapadnim i južnim) stranama centralnog dvorišta [8-10]. Namena svake *Yaodong* zgrade (Slika 1, Slika 2) je ista [8-11]: zaštita od vremenskih prilika i neprijatelja, optimizacija ambijentalnog komfora (manja potrošnja energije za grejanje zimi, odnosno za klimatizaciju ljeti), minimiziranje dodatnog ulaganja energije, vremena i materijala (u fazi izrade i eksploatacije objekata), maksimiziranje korišćenja prirodnih (Sunce, vetar, zelenilo i zemljište) i stvorenih (položaj, oblik i orijentacija zgrade i stvorena mikroklima) parametara lokacije, itd. Zbog niza navedenih pozitivnih karakteristika, koncept *Yaodong*, kroz popularizaciju i širu implementaciju, mogao bi da bude dodatno sredstvo za prevazilaženje energetske tranzicije [12, 13] u cilju dostizanja održivih razvoja [14], kako na nacionalnim, tako i na globalnim nivoima.

II YADONG ARHITEKTONSKI DIZAJN

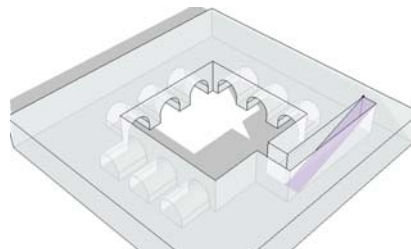
I među *Yaodong* podzemnim zgradama ukopanim u terenima postoje razlike. One se prvenstveno zasnivaju na pristupnim rešenjima centralnom podzemnom dvorištu (Slika 4-8).



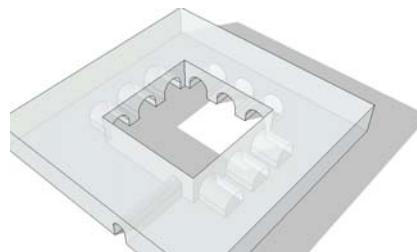
Slika 4. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa unutrašnjim pristupnim stepeništem [10, 11]



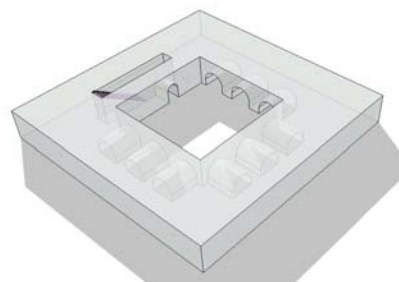
Slika 5. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa spoljašnjim pristupnim stepeništem [10, 11]



Slika 6. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa spoljašnjom pristupnom kosinom [10, 11]



Slika 7. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa tunelskim pristupom [10, 11]

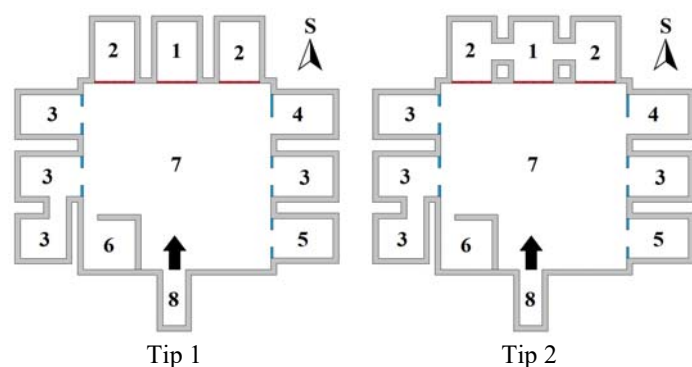


Slika 8. *Yaodong* podzemna zgrada ukopana u terenu sa kombinovanim (tunel sa spoljašnjim stepeništem/spoljašnjom kosinom) pristupom [10, 11]

Unutrašnja prostorna organizacija *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenu može se videti na narednim slikama (Slika 9, Slika 10).

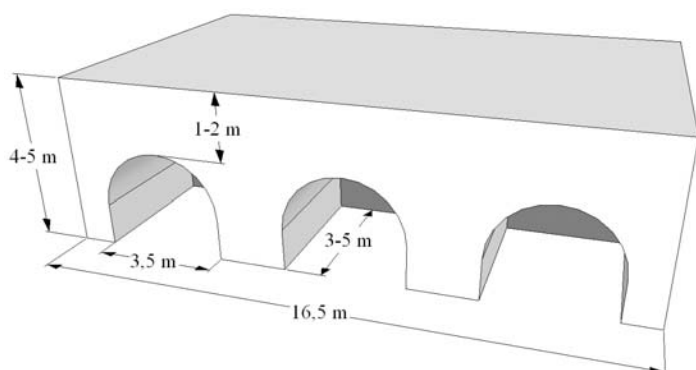
Dimenzije centralnog podzemnog dvorišta zavise od broja prostorija, tj. od broja članova domaćinstva. Prostorije na severnoj strani dvorišta međusobno mogu biti fizički odvojene (Slika 9, Tip 1), ili spojene uskim lučnim prolazima (Slika 9, Tip 2). Upotreba zastakljenja na otvorima pomenutih prostorija (prostorije namenjene ljudima) je obavezna. Za fizičko odvajanje

preostalih prostorija (pomoćne prostorije, svinjac, živinarnik, toalet) od centralnog dvorišta uglavnom se koriste paravani [10].



Slika 9. Osnova *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenu sa rasporedom prostorija [10, 11]

1 – dnevna soba, 2 – spavaća soba, 3 – pomoćna prostorija (kuhinja, ostava, ...), 4 – svinjac, 5 – živinarnik, 6 – toalet, 7 – centralno podzemno dvorište, 8 – ulaz



Slika 10. Izgled fasade *Yaodong* podzemne zgrade ukopane u terenu na severnoj strani centralnog podzemnog dvorišta (prostorije namenjene boravku ljudi) [10, 15]

Širina prostorija uglavnom je 3,5 m, visina do 3 m, a dubina od 3-5 m. Veća dubina prostorija negativno bi uticala na nivo dnevnog osvetljenja, ali i na toplotne dobitke u zimskom periodu. Gornja tačka prostorije je od nulte kote udaljenja 1-2 m, ali rastojanje može da bude i veće (Slika 10) [10, 15].

III ENERGYPLUS MODEL

U ovoj numeričkoj studiji, fokus se stavlja na analizu potrošnje finalne i primarne energije za grejanje³ *Youdong* podzemne zgrade (lociranoj na teritoriji grada Kragujevca, Tabela 1 [16]) tokom grejnog perioda (od 15. oktobra do 15. aprila), što znači da se u obzir uzimaju samo prostorije u kojima borave ljudi – prostorije na severnoj strani centralnog podzemnog dvorišta, otvorima okrenute ka jugu (Slika 9, prostorije 1 i 2). Uzimajući u obzir geometrijske karakteristike centralnog podzemnog dvorišta [17] i navedenih prostorija (Slika 10), odgovarajuće građevinske materijale (lokalno dostupne, Tabela 2), razrađena su dva

simulaciona modela (Slika 11a-c), jedan za slučaj kada su prostorije fizički odvojene (Tip 1), drugi kada su fizički spojene (Tip 2).

Tabela 1. Meteorološki podaci za grad Kragujevac [16]

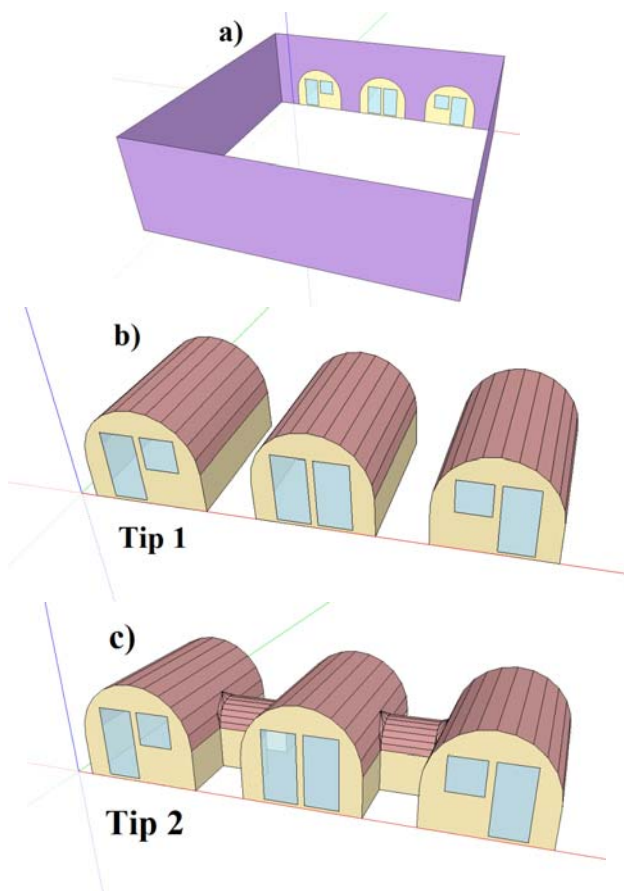
Mesec	Temperatura [°C]	Solarno zračenje [W/m ²]	
		Direktno	Difuzno
I	-0,24	63,63	33,30
II	0,88	86,66	49,39
III	5,57	106,12	77,08
IV	10,87	149,02	92,65
V	16,06	176,45	113,30
VI	18,85	208,94	109,50
VII	20,78	228,12	110,60
VIII	20,38	215,40	96,25
IX	16,68	166,92	75,54
X	11,18	119,43	57,34
XI	6,08	64,51	39,83
XII	1,13	58,86	28,66

Tabela 2. Građevinska fizika *Yaodong* podzemne zgrade

Materijal	d [m]	k [W/mK]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/kgK]
ZS-I, ZS-Z, ZS-S (istočni, zapadni i severni spoljašnji zidovi)				
Hidroizolacija	0,002	0,19	1100	1460
Puna opeka	0,25	0,64	1600	920
Krečni malter	0,025	0,81	1600	1050
POD (pod)				
Armirani beton	0,04	2,04	2400	960
Hidroizolacija	0,002	0,19	1100	1460
Nearmirani beton	0,15	0,93	1800	960
Cementna košuljica	0,04	1,4	2100	1050
KR (krov)				
Hidroizolacija	0,002	0,19	1100	1460
Nearmirani beton	0,05	0,93	1800	960
Cementna košuljica	0,04	1,4	2100	1050
Puna opeka	0,25	0,64	1600	920
Krečni malter	0,025	0,81	1600	1050
ZS-J (južni spoljašnji zid)				
Jednoslojno staklo	0,004	0,9	2500	800
Drveni ram	0,035	0,14	550	2090

Broj izmena vazduha ($n=0,76$) usvojen je prema preporukama u [18]. U istom izvoru može se naći koeficijent transformacije primarne energije (za električnu energiju $R_{EL}=2,5$).

³ Sve prostorije su opremljene individualnim električnim grejnim telima.



Slika 11. Simulacioni scenario

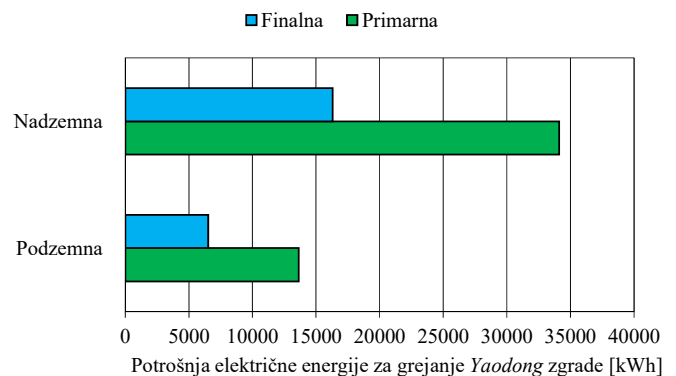
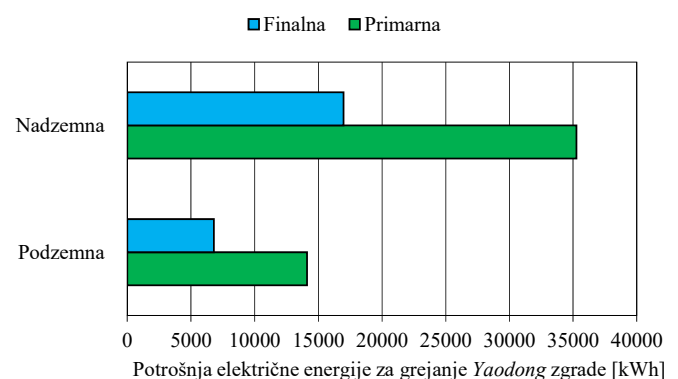
IV REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na Slici 12 prikazana je sezonska potrošnja finalne i primarne energije tokom grejne sezone u nadzemnoj⁴ i podzemnoj *Yaodong* zgradi koja se sastoji od fizički odvojenih prostorija (Tip 1). Potrošnja finalne i primarne energije u nadzemnoj i podzemnoj *Yaodong* zgradi sa fizički spojenim prostorijama (Tip 2), tokom istog perioda, predstavljena je na Slici 13.

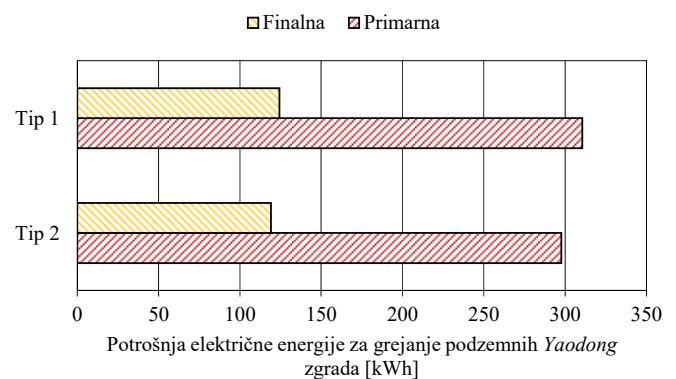
Potrošnja finalne (električne) energije u nadzemnoj *Yaodong* zgradi (Slika 11b, Tip 1) tokom grejne sezone iznosi 13645,88 kWh (Slika 12). U podzemnoj *Yaodong* zgradi, zahvaljujući benefitima korišćenja prirodnih i stvorenih parametara lokacije, potrošnja finalne energije može se redukovati i preko 50% (6522,74 kWh). Energetski benefiti korišćenja podzemnih *Yaodong* zgrada još su veći, ako se sagleda šira slika (kroz potrošnju primarne energije): 34114,7 kWh (za nadzemnu kuću), 16306,85 kWh (za podzemnu kuću).

U slučaju nešto zahtevnijeg građevinskog poduhvata (Slika 11c, Tip 2), potrošnja finalne energije u *Yaodong* zgradi iznosila bi (Slika 13): 14106,94 kWh (za nadzemnu zgradu), 6787,91 kWh (za podzemnu zgradu). To znači da bi potrošnja primarne energije u ovom slučaju bila redukovana za 51,88%, tj. sa 35267,35 kWh na 16969,78 kWh.

⁴ *Yaodong* zgrada koja nije zaklonjena i ukopana (prekrivena, nasuta) u terenu, već ima otvoren položaj, što znači da je izložena vremenskim prilikama, prvenstveno vetru i solarnom zračenju.

Slika 12. Sezonska potrošnja finalne i primarne energije u nadzemnoj i podzemnoj *Yaodong* zgradi (Tip 1)Slika 13. Sezonska potrošnja finalne i primarne energije u nadzemnoj i podzemnoj *Yaodong* zgradi (Tip 2)

Ako se međusobno uporede podzemne (Tip 1 i Tip 2) *Yaodong* zgrade (Slika 12, Slika 13), potrošnja električne energije u zgradi Tipa 2 veća je od potrošnje u zgradi Tipa 1 (finalna za 4,07%, primarna za 662,93 kWh).

Slika 14. Sezonska potrošnja finalne i primarne energije u podzemnim *Yaodong* zgradama (Tip 1, Tip 2)

Ako se prilikom poređenja podzemnih *Yaodong* zgrada Tipa 1 i Tipa 2 u obzir uzme indikator specifične potrošnje električne energije ($A_{POD}=52,5 \text{ m}^2$ za Tip 1, $A_{POD}=57 \text{ m}^2$ za Tip 2), tada se dolazi do sledećih rezultata (Slika 14): za zgradu Tipa 1 (124,24 kWh/m² finalne, 310,6 kWh/m² primarne), za zgradu Tipa 2 (119,09 kWh/m² finalne, 297,73 kWh/m² primarne). Drugim rečima, potrošnja električne energije u podzemnoj *Yaodong*

zgradi Tipa 2 manja je za 4,32% od potrošnje u podzemnoj *Yaodong* zgradi Tipa 1.

VIII ZAKLJUČAK

U ovom radu numerički je analizirana potrošnja finalne i primarne energije u tradicionalnoj podzemnoj *Yaodong* zgradi lociranoj na teritoriji grada Kragujevca. Glavni cilj istraživanja je skretanje pažnje na potencijal korišćenja ovog arhitektonskog koncepta na teritoriji Republike Srbije.

Iako su rezultati simulacija (u softveru *EnergyPlus*) pokazali da se u podzemnim *Yaodong* zgradama troši dosta manje energije (u ovom konkretnom slučaju uštede su nešto veće od 50%) nego u nadzemnim zgradama istog geometrijskog dizajna, eventualna buduća primena ovog koncepta na teritoriji Republike Srbije zahtevala bi multidisciplinarno sagledavanje problematike, što podrazumeva uzimanje u obzir i drugih indikatora, pored energetske: ekološki, ekonomski, sociološki, psihološki, istorijski, kulturološki, itd.

ZAHVALNICA

Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja nastalih u okviru projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, broj TR 33015. Zahvaljujemo se Ministarstvu na finansijskoj podršci tokom ovog istraživanja.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Living Inside the Earth: the Yaodong, cave buildings in China. <https://socks-studio.com/2021/06/21/living-inside-the-earth-the-yaodong-cave-buildings-in-china/> [pristupljeno 15. 02. 2023]
- [2] Northern China's yaodong last centuries. <https://archive.shine.cn/sunday/now-and-then/Northern-Chinas-yaodong-last-centuries/shdaily.shtml> [pristupljeno 24. 02. 2023]
- [3] Milanović, A. *Razvoj podzemnih stambenih objekata i njihova savremena primena u Srbiji*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [4] 12 Regions of China: The Loess Plateau. <https://thediplomat.com/2017/07/12-regions-of-china-the-loess-plateau/> [pristupljeno 01. 02. 2023]
- [5] Golany, G.S. *Earth-sheltered habitat: history, architecture, and urban design*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1983
- [6] Yaodong (Loess Cave House). <https://www.asiaculturaltravel.co.uk/yaodong-loess-cave-house/> [pristupljeno 10. 02. 2023]
- [7] Take a look at China's sunken courtyard houses, where people traditionally lived in pit homes carved into the ground. <https://www.insider.com/china-cave-dwellings-pit-homes-dikengyuan-yaodong-photos-2022-4> [pristupljeno 10. 02. 2023]
- [8] Anselm, A.J. Passive annual heat storage principles in earth-sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing, *Energy and Buildings*, Vol. 40, No. 7, pp. 1214-1219, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.11.002>
- [9] Zhang, L., Lau, R., Yan, L., Li, X., Zang, R., Leung, H.H., Chen, P., Wang, X. Unique traditional villages on the Loess Plateau of China: historic evolution and challenges to sustainable development of silo-caves, *Heritage Science*, Vol. 9, No. 118, pp. 1-19, 2021. <https://doi.org/10.1186/s40494-021-00591-4>
- [10] Anselm, A.J. Earth shelters; A review of energy conservation properties in earth-sheltered housing, in: Ahmed, A.Z. (Ed.), *Energy Conservation*, Ch. 5, pp. 125-48, InTech, [Place of publication not identified], 2012. <https://doi.org/10.5772/51873>
- [11] Wang, F., Yu, F., Zhu, X., Pan, X., Sun, R., Cai, H. Disappearing gradually and unconsciously in rural China: Research on the sunken courtyard and the reasons for change in Shanxian County, Henan Province, *Journal of Rural Studies*, Vol. 47, Part B, pp. 630-649, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2016.05.011>
- [12] Đukić, P. Pravična tranzicija energetike Srbije – održivost reformi u uslovima nove globalne krize, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 53-62, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.53D>
- [13] Vasić, G. Šta to povezuje energetske tranzicije i ruralni razvoj u Srbiji?, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 55-59, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.55G>
- [14] Raković, R., Petrović Bećirević, S. Energetski menadžment i ciljevi održivog razvoja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 2, pp. 46-53, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.46R>
- [15] Benardos, A., Athanasiadis, I., Katsoulakos, N. Modern earth sheltered constructions: A paradigm of green engineering, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 41, pp. 46-52, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2013.11.008>
- [16] <https://designbuilder.co.uk/cahelp/Content/Instructions.htm> [pristupljeno: 7. 1. 2023]
- [17] <https://earth.google.com/web/@34.64734532,111.29470894,694.00912518a,195.13737761d,35y,0h,0t,0r> [pristupljeno 27. 1. 2023]
- [18] Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada Republike Srbije (Službeni glasnik Republike Srbije, br. 61/2011). https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskoj_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 27.01.2023]

AUTORI/AUTHORS

msr Aleksandar Nešović - istraživač-saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, aca.nesovic@gmail.com, ORCID [0000-0002-1690-2389](https://orcid.org/0000-0002-1690-2389)

dr Danijela Nikolić - vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, danijelan@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-3267-3974](https://orcid.org/0000-0003-3267-3974)

dr Nebojša Lukić - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka, lukic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1923-5200](https://orcid.org/0000-0002-1923-5200)

Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetskej tranziciji

The Role of Communities of Renewable Energy Sources in the Energy Transition

Miloš Kuzman*, Dunja Grujić**

* Udruženje za pravo energetike Srbije, Pjarona De Mondezira 30, Beograd

** Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Bulevar umetnosti 12, Novi Beograd

Rezime - Svedoci smo učestalih globalnih nastojanja koja teže ubrzanju energetske tranzicije. Ona su poslednjih godina posledica intenzivnih klimatskih promena, sve većeg zagađenja vazduha i vode, ali i rasta cena električne energije i prirodnog gasa na tržištu. Takva nastojanja promoviše i nov set energetske propisa, koji je donet pre više od dve godine, uvođenjem novih instituta koji bi trebalo da doprinesu „zelenijoj“ slici Republike Srbije. Jedan od tih instituta je i zajednica obnovljivih izvora energije definisana Zakonom o korišćenju obnovljivih izvora energije, koja omogućava većem broju lica koji su članovi zajednice zadovoljenje energetske potrebe na održiv način. U ovom radu biće analizirani mogući modeli organizovanja rada zajednica obnovljivih izvora energije, postojeća zakonska regulativa i preduslovi za njihovo funkcionisanje na tržištu Republike Srbije. Pored toga razmatraće se efikasni načini proizvodnje i potrošnje električne energije u okviru zajednice obnovljivih izvora energije uz analizu mogućnosti skladištenja, agregiranja i razvoja punionica za vozila sa električnim ili kombinovanim električnim i drugim pogonom. Takođe će biti reči o uticaju zajednica obnovljivih izvora energije na poslovanje operatora distributivnog sistema, snabdevača i drugih učesnika na tržištu. Na kraju, sagledaće se prednosti i izazovi koje članovi zajednice obnovljivih izvora energije mogu imati usled zajedničkog udruživanja.

Cljučne reči - zajednica obnovljivih izvora energije, energetska tranzicija, energetska efikasnost, obnovljivi izvori energije, klimatske promene

Abstract - We are witnessing frequent global efforts aimed at accelerated energy transition. In recent years, they have been the consequence of intense climate changes, increasing air and water pollution, but also of the rise in electricity and natural gas prices on the market. Such efforts have also been promoted by the new set of regulations adopted more than two years ago, which defined the new institutes that should contribute to the greener image of the Republic of Serbia. One of those institutes is the community of renewable energy sources, which was introduced by the Law on the Use of Renewable Energy Sources, with the purpose of enabling more entities, who are members of the community, to meet their energy needs in a sustainable way. This paper will analyse possible models of organising the work of communities of renewable energy sources, the existing legal

regulations and prerequisites that are necessary for their functioning on the market of the Republic of Serbia. In addition, efficient methods of production and consumption of electricity within the community of renewable energy sources will be considered, along with the analysis of the possibility of storage, aggregation and development of charging stations for electric and/or hybrid vehicles. The impact of communities of renewable energy sources on the work of the distribution system operator, suppliers and other market participants will also be discussed. Finally, the advantages and challenges that members of the renewable energy community may have due to their joint association will be reviewed.

Index Terms - community of renewable energy sources, energy transition, energy efficiency, renewable energy sources, climate change

I UVOD

Većina država sveta se nalazi na putu energetske tranzicije. U pojedinim slučajevima ona se odvija brže dok je u nekim državama ona tek u početku. Različita su mišljenja o tome na koji način je potrebno sprovesti energetske tranzicije u konkretnim primerima ali je jedno sigurno, kurs sprovođenja energetske tranzicije je uspostavljen i teško je zamisliti da bi isti u skorije vreme mogao biti zaokrenut.

Razlozi koji govore u prilog hitnog sprovođenja energetske tranzicije su brojni. Najčešći razlog koji se navodi je da energetska tranzicija doprinosi smanjenju posledica klimatskih promena, koje su sve razornije i ostavljaju sve teže posledice. Drugi razlozi govore o ograničenosti neobnovljivih izvora energije i potrebi da oni u najkraćem roku budu zamenjeni obnovljivim izvorima energije. Pominju se i razlozi koji se odnose na energetske efikasnost i potrebu da se energija racionalnije i ekonomičnije koristi.

U prethodnoj deceniji u brojnim državama sveta razvijani su različiti mehanizmi za sprovođenje energetske tranzicije koji su iznedrili više instituta. Jedan značajan broj njih je prepoznat u propisima Evropske Unije i poslednjih godina doživljava svoju punu ekspanziju kao što su kupci-proizvođači, skladištari električne energije (u daljem tekstu: el. en.) i agregatori. Svaki od njih, u skladu sa efektima koje proizvode, kao što su poboljšanje

stabilnosti elektroenergetskog sistema (u daljem tekstu: EES) ili optimizacija proizvodnje i potrošnje el. en., predstavlja činioca u energetske tranzicije.

Jedan od takvih instituta koji je uveden Direktivom Evropske Unije 2018/2001 o podsticanju korišćenja energije iz obnovljivih izvora od 11. decembra 2018. godine (u daljem tekstu: Direktiva) [1], a koji je u određenoj meri prenet u Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/2021 u daljem tekstu: Zakon) [2], su zajednice obnovljivih izvora energije (u daljem tekstu: ZOIE). Cilj organizovanja ovakvih zajednica je podrška korišćenju obnovljivih izvora energije i poboljšanja energetske efikasnosti sa ciljem kako ubrzanja energetske tranzicije, tako i ostvarivanja socio ekonomskih i ekoloških ciljeva samih zajednica.

U ovom radu će biti predstavljen institut ZOIE, kako u domaćem tako i u zakonodavstvu i praksi drugih država. Pažnja će biti posvećena i međuzavisnosti učesnika na tržištu el. en. i prednostima ZOIE u kontekstu ove međuzavisnosti, za šta će biti dati i odgovarajući modeli. Navedeni modeli ukazuju i na sve pogodnosti koje ZOIE mogu ostvariti na tržištu el. en.. Na kraju će biti dat osvrt na buduću ulogu ZOIE u efikasnom sprovođenju energetske tranzicije kao i na dugoročne prednosti ZOIE na same članove zajednice.

II ŠTA SU ZAJEDNICE OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Zakon ZOIE definiše kao pravno lice osnovano na principu otvorenog i dobrovoljnog učešća svojih članova, nad kojim kontrolu vrše članovi čije je prebivalište ili sedište u blizini mesta postrojenja na obnovljive izvore energije čiji je vlasnik to pravno lice ili koje to pravno lice razvija.¹ Iz navedene definicije sledi da ZOIE može biti isključivo pravno lice, te je pretpostavka da će usled fleksibilnosti forme i u skladu sa postojećom praksom to najčešće biti društvo sa ograničenom odgovornošću. Bitno je napomenuti da članovi ZOIE moraju biti stacionirani u blizini mesta gde se elektrana nalazi, što predstavlja pravni standard i mogući predmet budućih tumačenja.

Čini se da bi blizinu postrojenja od sedišta odnosno prebivališta samog člana trebalo posmatrati u kontekstu nekoliko faktora, kao što su snaga elektrane, da li elektrana pokriva potrošnju stambenih zgrada ili individualnih domaćinstava, položaj terena na kome se nalazi elektrana i niza drugih faktora koji bi se posmatrali u konkretnom slučaju. Propisano je i da ZOIE ne mora nužno biti vlasnik elektrane ali je mora razvijati. Pod razvijanjem bi se prvenstveno moglo posmatrati planiranje instalisanje snage i rada elektrane, njeno projektovanje i izgradnja i upravljanje elektranom, ali i dalje ostaje nedoumica šta bi se sve moglo posmatrati kao razvijanje postrojenja. Ono što je takođe veoma bitno je da elektrana mora koristiti obnovljive izvore energije za proizvodnju el. en., što govori u prilog činjenici da je ovaj institut jedan od onih koji doprinose ubrzanju energetske tranzicije.

Kada se govori o članovima ZOIE, Zakon propisuje da to mogu biti fizička ili pravna lica, kao i jedinice lokalne samouprave i drugi vidovi mesne samouprave, kao i privredna društva odnosno preduzetnici pod uslovom da proizvodnja el. en. iz obnovljivih

izvora ne predstavlja njihovu pretežnu komercijalnu ili profesionalnu delatnost. Predviđeno je da član ZOIE zadržava status krajnjeg kupca, i ne podleže neopravdanim ili diskriminatorskim uslovima ili postupcima koji bi sprečili njegovo učešće u ZOIE.² Ovakva zakonska definicija otvara mogućnost da čitav spektar krajnjih kupaca definisanih Zakonom i drugim energetske propisima [3] uzme učešće u ZOIE kao što je npr. kupac-proizvođač ili punionica električnih vozila. Članovi pod određenim uslovima mogu biti i privredna društva, što pokazuje intenciju zakonodavca da što veći broj subjekata bude uključen u ZOIE i doprinese ostvarivanju ciljeva koji se promovišu ovim institutom.

Kad je o ciljevima reč, Zakon u članu 64 kao primarni cilj osnivanja ZOIE određuje zadovoljenje energetske potreba članova ZOIE na održiv način koji obuhvata ekološke, ekonomske ili socijalne koristi za članove, kao i za lokalnu zajednicu i društvo, radi kog cilja ZOIE razvija, investira i realizuje projekte obnovljivih izvora energije i energetske efikasnosti. Primećuje se da je ovaj cilj široko definisan i da u sebi sadrži čitav niz ciljeva odnosno pozitivnih efekata koji članovima može doneti udruživanje u ZOIE. U nastavku rada će biti ukazano i na koristi koje EES može imati od ZOIE, koje nikako ne smemo zanemariti. Kako bi članovima ZOIE bila pružena dodatna motivacija za osnivanje ZOIE, Zakon predviđa da ZOIE može da stekne status privremenog povlašćenog proizvođača, odnosno status povlašćenog proizvođača i status proizvođača el. en. iz obnovljivih izvora i dobije podsticajne mere u skladu sa Zakonom. U vezi sa navedenim a i generalno, ZOIE su Zakonom data prava: a) na proizvodnju, potrošnju, skladištenje i prodaju obnovljive energije; b) na pristup svim tržištima energije, direktno ili preko agregatora, na nediskriminatoran način i c) druga prava i obaveze povlašćenog proizvođača u skladu sa Zakonom.³ Ovako široko postavljen krug prava daje ZOIE mogućnost da se pozicionira kako na lokalnom tako i na regionalnom tržištu el. en., odnosno da uspešnim poslovođstvom ostvari optimalnu ekonomsku korist za svoje članove. Sa druge strane, uključivanjem na tržišnu utakmicu ZOIE mora biti na oprezu usled sve većih fluktuacija na tržištima el. en. koje zahtevaju sve veću umešnost pri rukovođenju procesima.

Iako pojedine odredbe Zakona mogu predstavljati predmet tumačenja, Zakon daje jasne polazne osnove za započinjanje rada prve ZOIE u Republici Srbiji. Ono što nedostaje je usklađivanje sektorskih podzakonskih propisa odnosno eventualno donošenje novih koji bi omogućili da se ZOIE nesmetano registruju i puste u rad. Potrebno je stoga što skorije zaokruživanje zakonodavne celine u kontekstu ZOIE kako bi ovaj institut zaživeo u Republici Srbiji i pružio očekivane efekte.

III UPOREDNI PRIKAZ PROPISA O ZAJEDNICAMA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Kako je već navedeno, Zakon je zasnovan na odredbama Direktive. Međutim, Zakon nije u potpunosti preneo odredbe Direktive, a pojedine odredbe je propisao na drugačiji način. To se već vidi iz same definicije ZOIE iz Direktive, u kojoj jasno stoji da

¹ Član 62. Zakona.

² Član 63. Zakona.

³ Članovi 65. i 66. Zakona.

prvenstveni cilj ZOIE nije ostvarivanje finansijske koristi, što ne propisuju odredbe Zakona iako bi se tako nešto iz zakona moglo zaključiti.

Bitna razlika između Zakona i Direktive u vezi sa ZOIE je i to što Direktiva predviđa da članovi ZOIE mogu biti samo mala i srednja privredna društva,⁴ dok Zakon mogućnost članstva daje svim privrednim društvima pod uslovom da proizvodnja el. en. iz obnovljivih izvora ne predstavlja njihovu pretežnu komercijalnu ili profesionalnu delatnost. Čini se da rešenje iz Zakona više odgovara cilju koji je čini se Direktiva želela da postigne, a to je da članovi ZOIE ne mogu biti ona privredna društva koja zbog svoje komparativne prednosti mogu narušiti pravila konkurencije na tržištu el. en..

Jedna od razlika je i to što Direktiva eksplicitno propisuje da se organima lokalne samouprave pruža regulatorna podrška i podrška u podizanju kapaciteta kako bi se omogućilo osnivanje i razvijanje ZOIE, kao i podrška da direktno budu članovi ZOIE,⁵ što se ne predviđa Zakonom. Iako će osnivanje ZOIE svakako imati institucionalnu podršku u Republici Srbiji, celishodno bi bilo da je Zakon ovako nešto propisao kako bi se i na ovaj način pružila dodatna podrška razvoju ZOIE u Republici Srbiji.

Nisu sve države Evropske Unije na isti način izvršile preuzimanje odredbi Direktive u svoje zakonodavstvo. Primer za to je Savezna Republika Nemačka koja je u poslednjim izmenama Zakona o podsticanju obnovljivih izvora energije (*Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023)*, (u daljem tekstu EEG) iz januara 2023. godine [4], između ostalog izvršila izmene u delu koji se odnosi na ZOIE. U skladu sa odredbama EEG⁶, ZOIE predstavlja privredno društvo gde, između ostalog, najmanje 50 fizičkih lica moraju biti članovi, gde najmanje 75% glasačkih prava moraju imati fizička lica koja imaju prebivalište u radijusu od 50 kilometara od postrojenja⁷, gde pored fizičkih lica članovi mogu biti mala i srednja privredna društva i lokalne samouprave, i gde ni jedan član ne može posedovati više od 10% glasačkih prava odnosno akcija. U članu 22b) EEG je dodatno razrađen sistem premija odnosno izuzetaka od premija za ZOIE.

Prethodno navedenu definiciju je moguće komentarisati sa aspekta sistema premija koji se dodeljuju ZOIE kao i dugogodišnjoj tradiciji razvoja i poslovanja ZOIE u Saveznoj Republici Nemačkoj. Prethodna zakonska rešenja su sadržala liberalnije odredbe u kontekstu toga ko sve može biti član ZOIE, kao i u kontekstu načina i iznosu dodeljivanja premija. Kako je brojnost ZOIE sve veća, zakonodavac je zaključio da je potrebno pooštriti uslove za osnivanje ZOIE, a sve između ostalog u cilju efikasnijeg sprovođenja energetske tranzicije kao i postulata da cilj osnivanja ZOIE nije ostvarivanje dobiti. Ukoliko dođe do učestalijeg razvoja ZOIE u Republici Srbiji, može se očekivati da se u sledećim izmenama i dopunama Zakona nađu neka rešenja iz EEG.

⁴ Član 2 tačka 16 Direktive.

⁵ Član 22 stav 4 tačka h) Direktive.

⁶ Član 3, tačka 15 EEG.

⁷ Rastojanje od 50 km se računa od spoljnih granica postrojenja kada je u pitanju solarna elektrana, odnosno centra stuba svake turbine kada je u pitanju vetroelektrana.

Republika Hrvatska je takođe izvršila usklađivanje svog zakonodavstva sa odredbama Direktive donošenjem Zakona o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji ("Narodne novine", br. 138/2021 u dajem tekstu: ZOVK) [5]. ZOVK određuje ZOIE kao pravna lica koja su, u skladu s važećim zakonodavstvom osnovana na dobrovoljnoj bazi, nezavisna, i pod stvarnom kontrolom akcionara ili članova lociranih u blizini projekata iz obnovljivih izvora energije čiji je to pravno lice vlasnik ili ih ona razvija, čiji su akcionari ili članovi fizička lica, mala i srednja preduzeća ili jedinice lokalne ili regionalne samouprave, a čija je prvobitna svrha pružanje ekološke, društvene ili socijalne koristi ZOIE za svoje akcionare ili članove ili za lokalna područja na kojima deluje, a ne ostvarenje finansijske dobiti.⁸ Navedena definicija je skoro identična odredbama iz Direktive, a od definicije iz Zakona se prvenstveno razlikuje po tome što samo mala i srednja privredna društva mogu biti članovi ZOIE i po tome što u definiciji izričito stoji da prvobitna svrha osnivanja ZOIE nije sticanje finansijske koristi.

Članom 51. ZOVK je propisano da ukoliko ukupna priključna snaga svih proizvodnih postrojenja na jednom obračunskom mernom mestu, ili više mernih mesta u ZOIE u slučaju više obračunskih mernih mesta, ne prelazi 500 kW, snabdevači el. en. su dužni da od njih preuzimaju viškove el. en. ukoliko su kumulativno ispunjeni i drugi uslovi iz navedenog člana. Na ovaj način ZOVK dodatno podstiče razvijanje mreže ZOIE u Republici Hrvatskoj, te garantuje otkupljivanje viškova el. en. od strane snabdevača samo za ZOIE relativno niske instalisane snage. Dodatno u članu 53. ZOVK propisuje uslove pod kojima krajnji kupci mogu biti članovi ZOIE, propisuje njihova prava kao i uslove pod kojima mogu ostvariti podsticaje. Svi ovi uslovi su u velikoj meri saobrazni kako odredbama Zakona, tako i odredbama Direktive.

Odredbe ZOVK propisuju slične uslove za osnivanje i rad ZOIE kao i odredbe Direktive, i slične su i odredbama Zakona. EEG predviđa znatno striktnije uslove za osnivanje i operabilnost ZOIE u odnosu na Zakon što ima svoje opravdanje u činjenici da je institut ZOIE razvijen u Saveznoj Republici Nemačkoj već duži vremenski period, te je bilo uslova da na osnovu prethodnih analiza EEG predvidi model koji je prethodno analiziran. Nakon nekoliko godina razvoja ZOIE u Republici Srbiji, biće prostora da se analizira postojeća praksa u Republici Srbiji i eventualno u nekoj narednoj izmeni Zakona izmene i dopune odredbe koje se odnose na ZOIE kako bi se unapredio njihov dalji razvoj u cilju pre svega ubrzanja energetske tranzicije.

IV PRIMER MOGUĆNOSTI RAZVOJA ZOIE

U okviru ovog rada, na konkretnom primeru, biće analizirana mogućnost razvoja ZOIE, međusobni odnosi članova ZOIE, prednosti koje ZOIE donosi svojim članovima, mogućnosti za dodatne uštede članova ZOIE, kao i uticaj ZOIE na operatora distributivnog sistema (u daljem tekstu: ODS).

1 Krajnji kupci kao članovi ZOIE

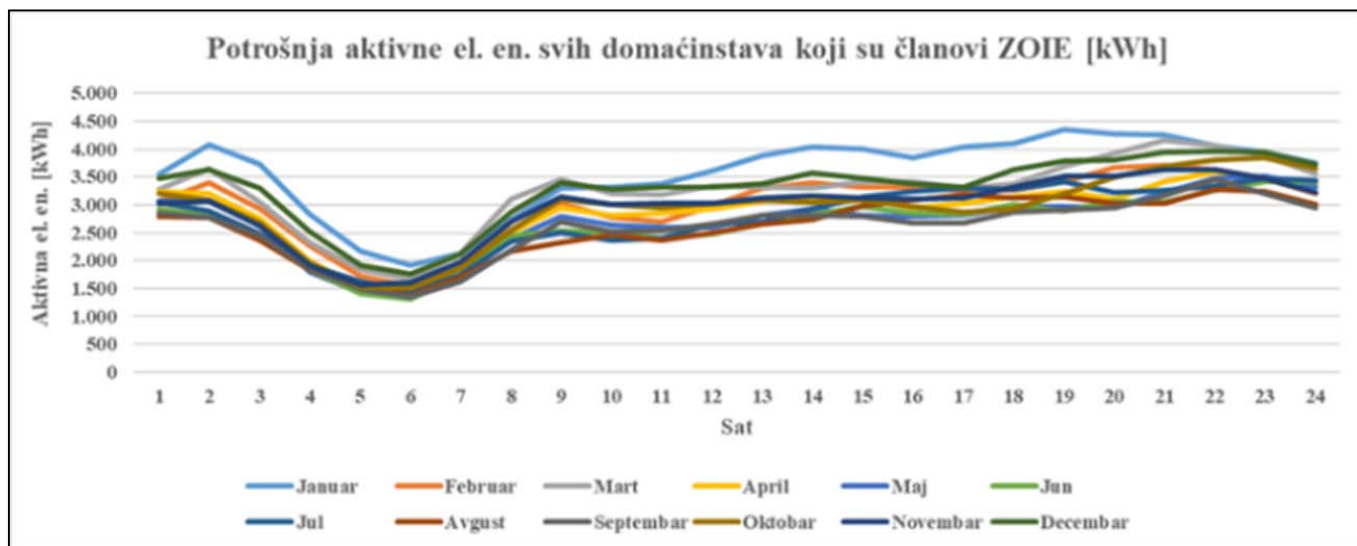
U okviru ovog rada posmatrana je satna potrošnja aktivne el. en. u toku 2022. godine za ukupno 200 domaćinstava (kategorija

⁸ Član 5 stav 1 tačka 63 ZOVK.

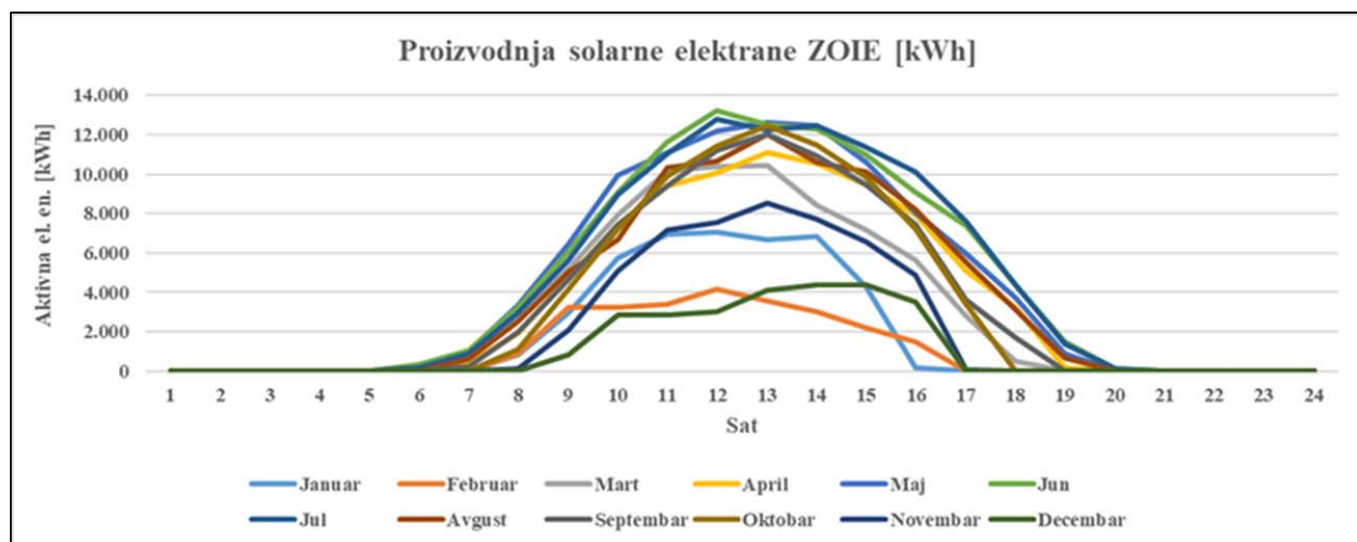
korisnika sistema „široka potrošnja“, grupa po nameni „domaćinstvo“ [6]) koja se napajaju iz jedne transformatorske stanice na teritoriji Beograda. Zbirna satna potrošnja svih 200 domaćinstava na mesečnom nivou u toku 2022. godine prikazana je na slici 1.

Ukupna potrošnja električne energije posmatranih domaćinstava u 2022. godini iznosila je 841.499 kWh. Prosečna mesečna

potrošnja električne energije posmatranih domaćinstava je 350,6 kWh što je na nivou prosečne potrošnje domaćinstava u Republici Srbiji [7]. U datom uzorku od 200 domaćinstava pojedina nemaju potrošnju električne energije, dok neka imaju značajno veću potrošnju električne energije od prosečne, tako da se dati primer može smatrati reprezentativnim za domaćinstva na području cele Republike Srbije.



Slika 1. Zbirna satna potrošnja posmatranih 200 domaćinstava na mesečnom nivou u toku 2022. godine

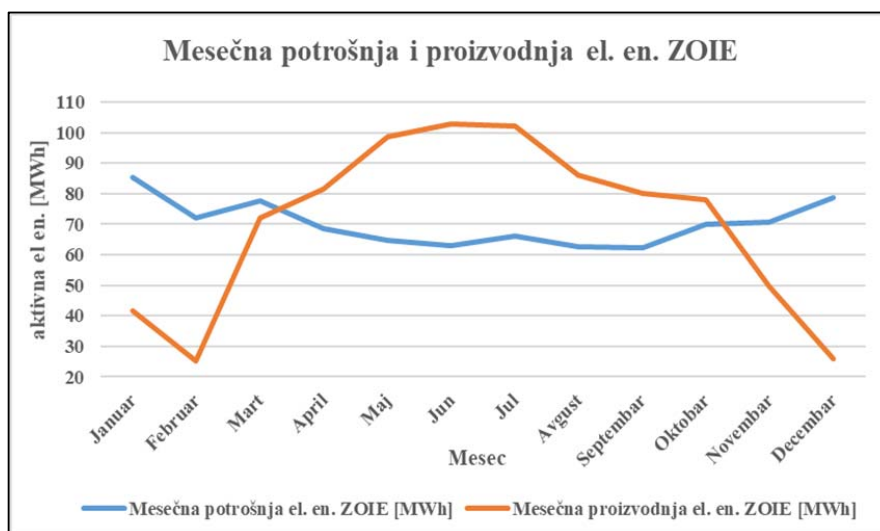


Slika 2. Zbirna satna proizvodnja solarne elektrane na mesečnom nivou

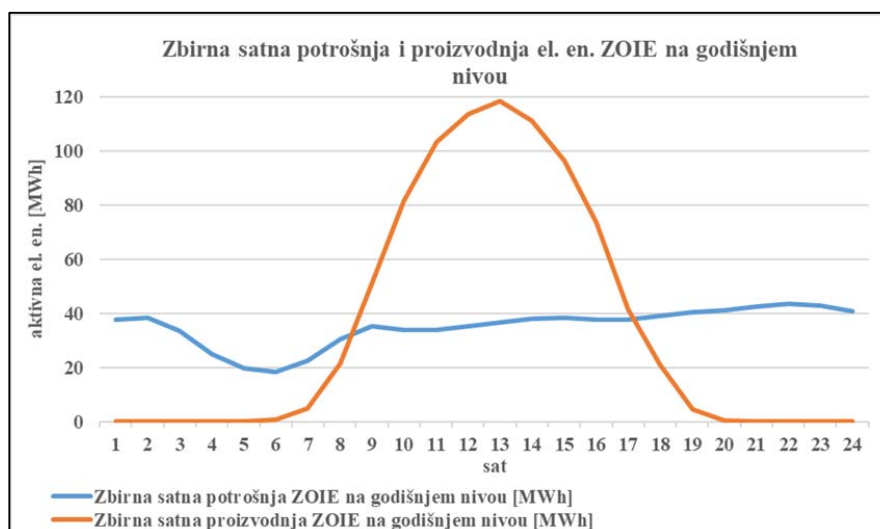
Posmatrana domaćinstva bi se mogla udružiti kao članovi jedne ZOIE koje razvija solarnu elektranu⁹ nad kojim bi kontrolu vršili

⁹ Za potrebe ovog rada za postrojenje za proizvodnju el. en. iz obnovljivih izvora energije izabrana je solarna elektrana zbog relativno niskih investicionih troškova, kao i relativno malih potreba za održavanjem. Takođe, do trenutka pisanja ovog rada svi kupci-proizvođači priključeni na EES su za svoje proizvodne objekte izabrali upravo solarne elektrane [8] što potvrđuje opravdanost izbora solarne elektrane kao proizvodnog objekta ZOIE.

članovi ZOIE [2]. S obzirom na to da je Zakonom [2] definisano da članovi ZOIE moraju imati prebivalište u blizini mesta postrojenja na obnovljive izvore, solarna elektrana mora biti izgrađena u neposrednoj blizini posmatranih domaćinstava koja su članovi ZOIE, a u idealnom slučaju priključena na transformatorsku stanicu iz koje se napajaju posmatrana domaćinstva. Na taj način bi se na održiv način sprovela osnovna ideja korišćenja obnovljivih izvora energije za zadovoljenje energetske potrebe članova ZOIE.



Slika 3. Mesečna potrošnja i proizvodnja el. en. ZOIE



Slika 4. Zbirna satna potrošnja i proizvodnja el. en. ZOIE na godišnjem nivou

2 Optimalna instalisana snaga solarne elektrane ZOIE

Kako je već navedeno primarni cilj osnivanja ZOIE je korišćenje obnovljivih izvora energije za zadovoljenje energetske potrebe članova ZOIE na održiv način koji obuhvata ekološke, ekonomske ili socijalne koristi za članove, kao i za lokalnu zajednicu i društvo. Kako bi se ovaj cilj ispunio neophodno je da proizvodnja solarne elektrane na godišnjem nivou zadovolji potrebe za el. en. članova ZOIE. Dakle, neophodno je odrediti optimalnu instalisanu snagu solarne elektrane tako da ona na godišnjem nivou proizvede onoliko el. en. koliko članovi ZOIE, u ovom slučaju 200 posmatranih domaćinstava, potroše. Optimalna snaga solarne elektrane se računa na godišnjem nivou jer je proizvodnja solarne elektrane znatno viša u letnjim mesecima, kada je potrošnja domaćinstava niža, i obrnuto (slike 3 i 4).

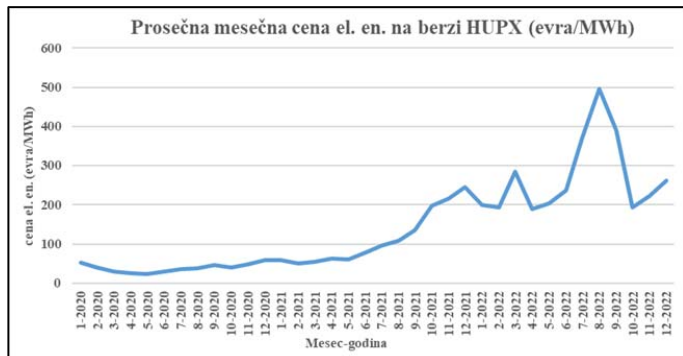
Za određivanje optimalne instalisane snage fotonaponske elektrane neophodno je poznavati resurse solarne energije na

ciljnoj mikrolokaciji, geografsku širinu, karakteristike elemenata sistema i ambijentalne uslove [9]. Pomoću programskog paketa PV GIS i njegovih integrisanih online baza podataka [10] određeno je da je optimalna snaga solarne elektrane za posmatranu ZOIE 750 kW. Takođe, iz paketa PVGIS preuzeta je satna proizvodnja solarne elektrane instalisane snage 750 kW koja se nalazi na lokaciji posmatranih domaćinstava. Zbirna satna proizvodnja pomenute solarne elektrane na mesečnom nivou prikazana je slici 2.

Ukoliko se uporede zbirna satna potrošnja članova ZOIE i proizvodnja solarne elektrane ZOIE (slika 3) može se primetiti da je u periodu od aprila do oktobra proizvodnja el. en. značajno veća od potrošnje dok je u ostalim mesecima situacija obrnuta. Takođe, prepoznaje se nepodudaranje proizvodnje i potrošnje el. en. ZOIE i na satnom nivou (slika 4) tj. u periodu dana kada solarna elektrana proizvodi el. en. potrošnja članova ZOIE je niža i obrnuto. S obzirom na navedeno, poređenje godišnje proizvodnje i potrošnje prilikom izbora optimalne snage solarne elektrane je opravdano.

3 Troškovi i prihodi članova ZOIE

U posljednjem periodu došlo je do naglog i značajnog povećanja cena el. en. na tržištu el. en. što se može videti i sa slike 5 gde su kao primer date cene el. en. na berzi HUPX u periodu od 2019. do 2022. godine [11].



Slika 5. Prosečna mesečna cena el. en. na berzi HUPX 2019-2022. godina

U cilju zaštite najmanjih potrošača el. en. u Republici Srbiji definisano je da domaćinstva i mali kupci¹⁰ imaju pravo na garantovano snabdevanje po regulisanim cenama [3] koje su značajno niže od tržišnih. Prosečna cena el. en. u Republici Srbiji za krajnje kupce koji imaju pravo na garantovano snabdevanje po regulisanim cenama (domaćinstva i mali kupci) [3] iznosi bez poreza i taksi 9,50 din/kWh (odnosno 13,31 din/kWh sa porezima i taksama - akcizama, PDV-om, naknadama za pristup distributivnom EES (u daljem tekstu: DEES), naknadama za podsticaj povlašćenih proizvođača, naknadama za unapređenje energetske efikasnosti i drugim taksama) [12, 13].

Kako je ranije navedeno članovi ZOIE zadržavaju status krajnjeg kupca, tj. u konkretnom primeru svih 200 posmatranih domaćinstava zadržavaju status krajnjeg kupca kategorije „široka potrošnja“, grupa po nameni „domaćinstvo“ sa ugovorima sa potpunim snabdevanjem¹¹ sa garantovanim snabdevačem¹² [2, 3] pri čemu celokupnu el. en. za sopstvenu potrošnju preuzimaju iz DEES.

Na osnovu navedene cene i potrošnje el. en. članova ZOIE procenjeni su mesečni troškovi svakog pojedinačnog člana ZOIE kao i svih zajedno. S obzirom na potrošnju aktivne el. en. (841.499 kWh u toku 2022. godine) ukupni troškovi posmatranih 200 domaćinstava na godišnjem nivou su 11,2 miliona dinara,

¹⁰ Mali kupci el. en. su krajnji kupci (pravna lica i preduzetnici) koji imaju manje od 50 zaposlenih, ukupan godišnji prihod u iznosu do 10 miliona evra u dinarskoj protivvrednosti, čiji su svi objekti priključeni na distributivni sistem el. en. napona nižeg od 1 kV i čija je potrošnja el. en. u prethodnoj kalendarskoj godini do 30.000 kWh [3].

¹¹ Potpuno snabdevanje je prodaja el. en. kod koje količina el. en. za obračunski period nije utvrđena ugovorom o snabdevanju, već krajnji kupac ima pravo da odredi količinu, na osnovu ostvarene potrošnje na mestu primopredaje. Za jedno mesto primopredaje i za isti period snabdevanja može se zaključiti samo jedan ugovor o potpunom snabdevanju. Snabdevač je dužan da pre početka snabdevanja uredi pristup sistemu i balansnu odgovornost za mesto primopredaje krajnjeg kupca sa kojim ima zaključen ugovor o potpunom snabdevanju [3].

¹² Pretpostavka je da je snabdevač svih 200 domaćinstava garantovani snabdevač s obzirom na to da je cena el. en. garantovanog snabdevača značajno niža od tržišne.

odnosno 95,2 hiljada evra po kursu od 117,6 dinara za jedan evro. Takođe izvršen je i proračun troškova svakog pojedinačnog domaćinstva na mesečnom i godišnjem nivou.

Kako je već navedeno ZOIE čiji članovi razvijaju elektranu koja proizvodi el. en. iz obnovljivih izvora energije imaju mogućnost da za pomenutu elektranu dobiju status povlašćenog proizvođača, privremeno povlašćenog proizvođača, odnosno proizvođača el. en. iz obnovljivih izvora energije [2]. Uslovi za izgradnju elektrane u okviru ZOIE, njeno priključenje na DEES, kao i za sticanje statusa povlašćenog, privremeno povlašćenog, odnosno proizvođača el. en. iz obnovljivih izvora energije za posmatranu elektranu su identični uslovima za bilo koju drugu elektranu koja proizvodi el. en. iz obnovljivih izvora energije [2,3,14,15].

S obzirom na prethodno navedeno celokupna el. en. koju proizvede elektranu u okviru ZOIE se isporučuje u DEES, odnosno prodaje na tržištu el. en. Shodno navedenom, izračunati su prihodi od proizvodnje solarne elektrane ukoliko bi se proizvedena el. en. prodavala po:

- ceni povlašćenog proizvođača solarne elektrane na tlu [16, 17],
- 60% cene povlašćenog proizvođača,
- satnim cenama sa berze HUPX (slika 5) [11].

Zbirni troškovi i prihodi ZOIE od prodaje el. en. po različitim cenama prikazani su na slikama 6 i 7.

Ukoliko bi ZOIE prodavala el. en. na berzi, prihodi bi očekivano bili značajniji od prihoda u prethodno opisanim situacijama, na godišnjem nivou čak 2,5 puta veći od troškova ZOIE. Međutim, prodaja el. en. na berzi uslovljena je brojnim obavezama proizvođača kao što su registracija na berzi el. en. i regulisanje balansne odgovornosti [3, 18].

Ukoliko se pretpostavi da je potrebna investicija za izgradnju solarne elektrane optimalne instalisane snage 750.000 evra i da je životni vek solarne elektrane (u daljem tekstu: VSE) 25 godina, pri čemu se njena proizvodnja svake godine smanjuje za 0,5 %, izračunat je period otplate za sva tri modela prodajnih cena el. en. Takođe, izračunate su i uštede ZOIE u toku VSE uz pretpostavku da se troškovi za el. en. članova ZOIE povećavaju za 3% iz godine u godinu. Očekivano je da će u narednom periodu cena el. en. nastaviti da raste (videti sliku 5) te je opravdano očekivati porast troškova ZOIE, ali i porast prihoda od prodaje proizvedene el. en.

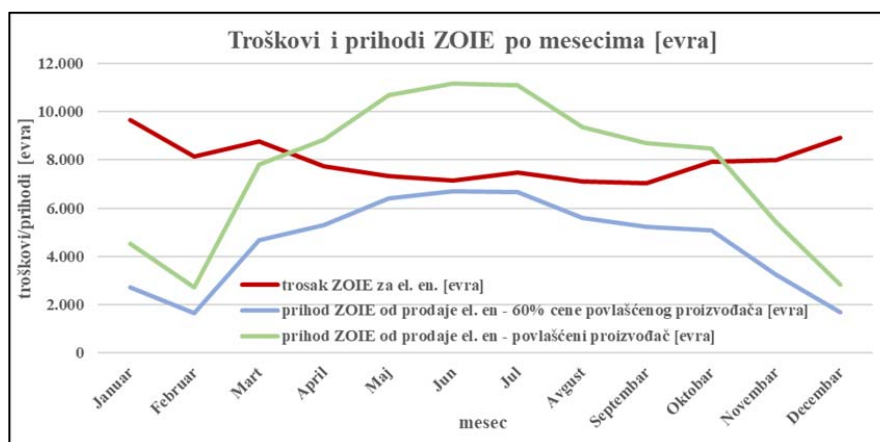
Na slici 8 prikazani su troškovi i prihodi ZOIE u toku VSE, a na slici 9 visina investicije za solarnu elektranu ZOIE, period povrata investicije i prihod nakon perioda povrata investicije.

Sa slike 8 može se primetiti da članovi ZOIE mogu imati veće prihode od troškova samo u slučaju prodaje el. en. na berzi, međutim, kako je već rečeno, to sa sobom nosi veliki broj obaveza i dosta neizvesnosti. Procenjeni period otplate je oko 3,2 godine.

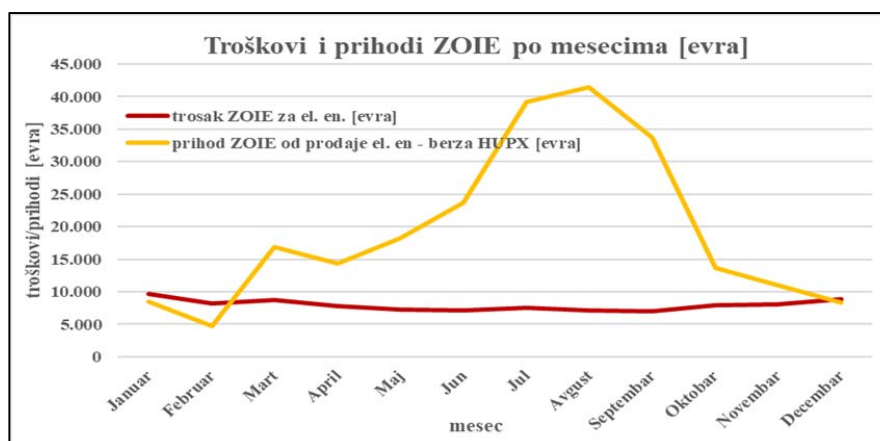
Međutim, značajne uštede u VSE se mogu ostvariti i dugoročnijim ugovorima o otkupu el. en. koji sa sobom nose sigurne, unapred ugovorene otkupne cene el. en. Ukoliko bi ugovorena cena bila jednaka ceni za povlašćene proizvođače, period otplate solarne elektrane bi bio oko 8,3 godina, a smanjenje troškova članova ZOIE bi bilo 62%. Čak i sa

ugovorenom cenom od samo 60% cene povlašćenog proizvođača članovi ZOIE bi imali zavidne uštede - smanjenje troškova bi

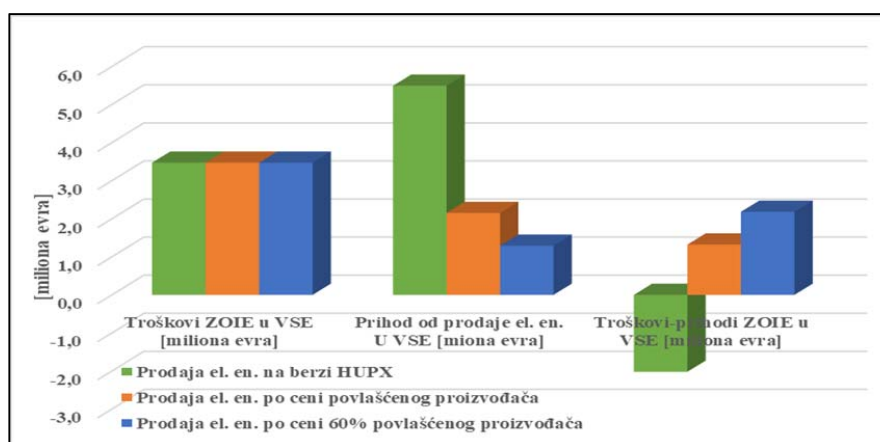
bilo oko 37% što nije zanemarivo, a period otplate solarne elektrane oko 14,1 godine.



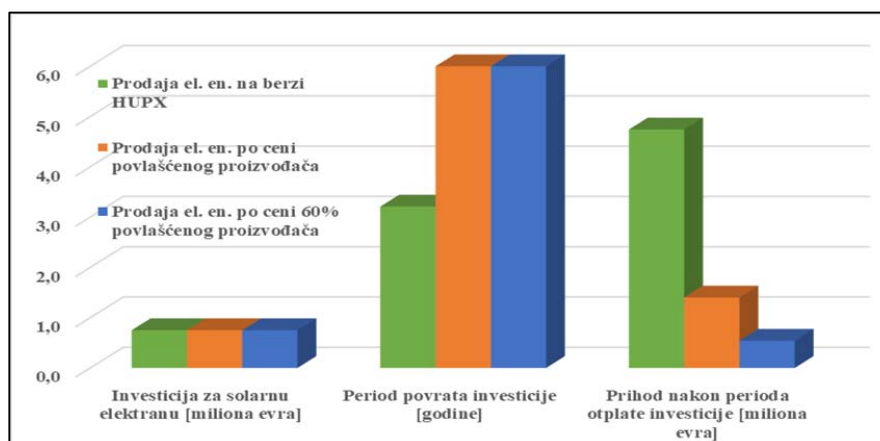
Slika 6. Troškovi i prihodi ZOIE na mesečnom nivou u slučaju prodaje proizvedene el. en. po 100% i 60% cene povlašćenog proizvođača



Slika 7. Troškovi i prihodi ZOIE na mesečnom nivou u slučaju prodaje proizvedene el. en. na berzi HUPX



Slika 8. Troškovi i prihodi ZOIE u toku VSE



Slika 9. Visina investicije za solarnu elektranu ZOIE, period povrata investicije i prihod nakon perioda povrata investicije

4 Odnosi članova ZOIE sa drugim učesnicima na tržištu el. en. i mogućnosti dodatnih ušteda

S obzirom na to da svaki član ZOIE zadržava status krajnjeg kupca el. en. pri čemu zadržava i svoja prava i obaveze, svaki od članova ZOIE od svog snabdevača i nakon formiranja ZOIE nastavlja da dobija račun za celokupnu utrošenu el. en. uz sve pripadajuće poreze i takse. Prihod od prodaje ukupne proizvedene el. en. se deli na članove ZOIE u skladu sa ugovorom između članova ZOIE. Očekivano je da se prihod između članova ZOIE deli proporcionalno investiciji u solarnu elektranu svakog člana, ali su mogući i drugi modaliteti.

Svaki od članova ZOIE, kao i svaki drugi krajnji kupac, ima potpunu slobodu izbora snabdevača [3, 19] pri čemu za sebe u uslovima razvijenog tržišta el. en. može tražiti pogodnije uslove snabdevanja. Takođe, članovi ZOIE se mogu opredeliti da izaberu agregatora sa kojim će zaključiti ugovor o agregiranju i na taj način dodatno povećati svoje uštede. Takođe, i snabdevači mogu vršiti funkciju agregiranja, mada to nerado čine jer su njihovi interesi često sukobljeni [20].

Pored opisanog, članovi ZOIE mogu imati dodatne uštede, ukoliko bi smanjili potrošnju el. en. kao i ukoliko bi poboljšali svoju energetska efikasnost što je upravo i jedan od ciljeva ZOIE [2]. Ukoliko bi, u konkretnom primeru, članovi posmatrane ZOIE za svega 10% smanjili svoju potrošnju troškovi ZOIE u VSE, uz ranije date pretpostavke povećanja cena i smanjenja efikasnosti elektrane iz godine u godinu, bi se smanjili za 0,35 miliona evra. S obzirom na to da se celokupna el. en. koju proizvede elektrana ZOIE isporučuje u DEES i prodaje na tržištu el. en. prihod ZOIE bi ostali isti. Opisano naročito može imati uticaja na domaćinstva koja su nakon izgradnje elektrane bitno smanjila svoju potrošnju el. en. i koja su značajno investirala u solarnu elektranu u skladu sa svojom ranijom potrošnjom. Takva domaćinstva imaju značajnu mesečnu nadoknadu od prodaje proizvedene el. en. iz solarne elektrane i bitno smanjene troškove za utrošenu el. en.

Takođe, povećanje prihoda se može postići i skladištenjem el. en. u periodima nižih cena i njenim isporučivanjem u DEES u periodima viših cena el. en. Takođe, u cilju smanjenja troškova, odnosno povećanja prihoda, članovi ZOIE mogu koristiti i baterije električnih vozila koje mogu puniti u periodima nižih cena el. en. i

iz kojih mogu napajati svoje objekte u periodima viših cena el. en. [21, 22].

Pored toga, ukoliko bi pojedini, ili u najboljem slučaju svi, članovi ZOIE sa agregatorom zaključili i ugovore o agregiranju mogli bi preko agregatora da zajednički učestvuju na tržištu el. en. Na taj način bi uz minimalna prilagođenja u svojoj potrošnji mogli da doprinesu smanjenju troškova debalansa svojoj balansno odgovornoj strani i dodatne prihode agregatoru što bi rezultovalo dodatnim prihodima za same članove ZOIE [23].

Između ostalog, pojedini ili svi članovi ZOIE mogu postati kupci-proizvođači izgradnjom sopstvenog proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora pri čemu svoju potrošnju mogu prilagoditi proizvodnji sopstvenog proizvodnog objekta ili izgraditi sopstvena skladišta el. en. i učestvovati u agregiranju pri čemu mogu sebi obezbediti dodatne uštede odnosno prihode [2,24].

Preciznim planiranjem razvoja ZOIE u budućnosti, planiranjem potrošnje el. en, određivanjem stepena fleksibilne potrošnje, kao i unapređenjem energetske efikasnosti može se značajno smanjiti investicija u proizvodni objekat iz obnovljivih izvora i eventualno skladište jer će se njihovi kapaciteti projektovati u skladu sa realnim potrebama ZOIE imajući u vidu plan razvoja članova ZOIE. Na taj način investicija će biti optimalna, a koristi za članove i lokalnu zajednicu značajniji [25].

Pored svega navedenog, ukoliko ZOIE ne dobije status povlašćenog proizvođača el. en., ZOIE može ostvariti pravo na garancije porekla el. en.

5 Mogućnosti učešća lokalnih samouprava u organizovanju ZOIE

U organizovanju ZOIE pored samostalnog organizovanja mogu učestvovati i lokalne samouprave. Već neko vreme postoje lokalni projekti unapređenja centralnog grejanja (primer [26]) pri čemu se grejanje vrši dogrevanjem tople vode iz geotermalnih izvora ili na biomasu. Takođe, pažnja se pridaje i unapređenju energetske efikasnosti kroz subvencije za izolaciju i stolariju (primer [27]). Pored navedenog, postoje i subvencije za izgradnju proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora za domaćinstva koja se opredele da steknu status kupca-proizvođača (primer [28]). Upravo sve navedeno predstavlja dobru polaznu osnovu za razvoj ZOIE.

Uz unapređen sistem centralnog grejanja, poboljšanje energetske efikasnosti i ulaganje u postrojenja za proizvodnju el. en. iz obnovljivih izvora lokalne samouprave mogu doprineti daljem razvoju novih ZOIE (pri čemu kvartovi ili cela naselja mogu postati ZOIE). Od takvog načina udruživanja, korist bi imali članovi ZOIE ali i svi građani u smislu smanjenja zagađenja životne sredine (naročito vazduha, vode i zemlje) i smanjenja posledica klimatskih promena.

Sve navedeno dobija svoj pun smisao u slučaju izgradnje novih stambenih jedinica gde bi o svemu navedenom trebalo unapred povesti dužnu pažnju i na taj način unaprediti uslove za život ljudi.

Može se zaključiti da će u narednom periodu lokalnim samoupravama pripasti fundamentalna uloga u ubrzavanju modela decentralizovane proizvodnje i deljenja energije iz OIE [29].

6 Članovi ZOIE koji nisu domaćinstva i mali kupci

Prikazani primer obradio je solarnu elektranu i članove ZOIE koji su domaćinstva. Ukoliko bi članovi ZOIE bili krajnji kupci koji nemaju pravo na garantovano snabdevanje, odnosno koji nisu domaćinstva i mali kupci [3], tj. el. en. kupuju od komercijalnih snabdevača kojima je cena el. en. značajno viša¹³ [30], udruživanje u ZOIE, skladištenje i agregiranje ima još više prednosti u smislu ušteda i dodatnih prihoda.

Kao što je ranije navedeno u pojedinim zemljama Evropske Unije, postoje ograničenja u smislu da članovi ZOIE mogu biti samo mala i srednja privredna društva [1]. Za sada u Republici Srbiji slična ograničenja ne postoje [2] tako da se velika, industrijska postrojenja mogu udružiti u ZOIE sa krajnjim kupcima koji se nalaze u njihovoj neposrednoj blizini, na korist svih članova ZOIE, kao i šire zajednice.

V UTICAJ ZOIE NA ODS

Pretpostavka je da će većina ZOIE kao proizvodni objekat imati solarnu elektranu pri čemu je očekivano nepodudaranje potrošnje i proizvodnje el. en. ZOIE koje je ilustrovano slikama 3 i 4. Pored toga, sve veći broj proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora se priključuje na DEES. Opisano stavlja ODS pred brojne izazove u smislu većeg opterećenja DEES, povećanja gubitaka el. en., otežanog upravljanja DEES i potrebom za dodatnim investicijama u DEES i prenosni EES [31].

Kako bi se opisani problemi smanjili ili eliminisali potrebno je u što većoj meri uskladiti potrošnju članova ZOIE sa proizvodnjom njene solarne elektrane. To se može učiniti:

- upravljanjem potrošnjom – tako što će se potrošnja iz perioda u kojima solarna elektrana ne proizvodi el. en. pomeriti u periode kada proizvodi,
- skladištenjem el. en. kako bi se uskladištila el. en. kada za njom nema potrebe u ZOIE i koristila kada za to ima potrebe, kao i
- agregiranjem – opisano u poglavlju 4.4. Na opisan način ZOIE samostalno ili posredstvom agregatora mogu doprineti fleksibilnosti DEES.

Takođe, predlaže se promena cena pristupa DEES tako da umesto postojeće dve tarife postoje bar četiri tarife pri čemu bi najviše cene bile u periodu najvećeg opterećenja DEES i obrnuto [21, 23]. Pored toga, i snabdevači mogu nuditi ugovore sa dinamičkim cenama, koje bi pratile ponudu i potražnju el. en. tj. pratile opterećenje EES [32]. Na taj način bi krajnji kupci prirodno „pomerili“ svoju potrošnju iz perioda viših cena u periode nižih cena i na taj način doprinosili radu ODS.

ZOIE može osim solarne elektrane instalirati i bilo koju drugu proizvodnu jedinicu iz obnovljivih izvora. Tako su se npr. izuzetno kompatibilnim pokazali hibridni sistemi solarnih (proizvodnja danju) i vetroelektrana (značajnija proizvodnja noću), a naročito u kombinaciji sa hidroelektranama i elektranama na biomasu (koje mogu imati konstantnu proizvodnju). Ovakvi hibridni sistemi mogu doprineti većim uštedama samih članova ZOIE u smislu smanjenja troškova debalansa njihove balansno odgovorne strane, ali i većih povećanja prihoda od pružanja usluga fleksibilnosti, a naročito uz kombinaciju skladištenja el. en. [33].

VI PREDUSLOVI ZA RAZVOJ ZOIE

Kako bi se omogućio potpuni razvoj ZOIE neophodno je raditi na automatizaciji i digitalizaciji distributivne mreže, kao i na unapređenju merne infrastrukture u smislu ugradnje pametnih mernih sistema kako bi na petnaestominutnom nivou (na nivou DEES u 2021. godini samo 2,46% brojila od ukupno svih ugrađenih brojila za krajnje kupce imalo je funkcionalnost daljinskog očitavanja od strane ODS [7]) mogla da se prati potrošnja odnosno proizvodnja članova ZOIE kako bi im se omogućilo pružanje usluge fleksibilnosti, ali i ravnopravna raspodela troškova odnosno prihoda. Takođe, potrebno je stvoriti tehničke preduoslove, gde je to neophodno, za upravljanje potrošnjom odnosno proizvodnjom.

Dakle, kako bi ZOIE dobile svoj puni smisao uslovi za ZOIE moraju biti definisani kako bi pozitivno uticali i na rad ODS, na uštede članova ZOIE, ali u korist cele zajednice. Takođe, neophodno je podizati svest o ekologiji, zaštiti životne sredine kao i važnosti štednje el. en. i energetske efikasnosti i ulagati sredstva u njeno unapređenje.

ZOIE će u budućnosti doprineti ubrzanju decentralizaciji proizvodnje el. en. i fleksibilnosti EES. Takođe omogućice velikom broju krajnjih kupaca da budu deo energetske tranzicije, na primer kroz učešće u izgradnji proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora el. en. ili kroz mehanizme pružanja usluga fleksibilnosti. Navedeno će dovesti do učešća većeg broja krajnjih kupaca (naročito imajući u vidu domaćinstva) u odlučivanju o proizvodnji el. en. iz obnovljivih izvora, distribuciji i potrošnji el. en. [34].

Iako se često u praksi sreću ZOIE koje nemaju inicijalnu nameru ubrzanja energetske tranzicije, već isključivo ostvarivanje profita, sve one su itekako važan faktor u energetske tranziciji [35]. Potrebno je raditi na promociji opisanog modela ZOIE, ali i na podizanju svesti lokalnih samouprava o važnosti ove teme, kao i o koristima za lokalnu ali i globalnu zajednicu, kako bi se određeni deo javnih sredstava izdvajao u ovu svrhu.

¹³ U trenutku pisanja ovog rada preporuka Vlade RS za cenu el. en. na komercijalnom snabdevanju je iznosila 102,6 evra za 1 MWh.

Energetsku tranziciju je neophodno posmatrati u kombinaciji sa značajnim tehnološkim, ekološkim, ekonomskim i socijalnim faktorima [36]. Značajno je napomenuti da je energetska tranzicija složen, dugotrajan i skup proces, i zahteva tehnološke promene, ali i promene ličnih navika, te su potrebne stalne stimulacije i podsticaji kako bi se ona uspešno sproveda [37].

Pored ZOIE, koje su razmatrane u okviru ovog rada, važno je spomenuti da postoje i drugi vidovi udruživanja koji takođe mogu doprineti energetske tranziciji kao što su, na primer, energetske zajednice [38].

VII ZAKLJUČAK

Iako primarni cilj članova ZOIE nije ostvarivanje profita, on svakako predstavlja jedan od motiva da neko postane član ZOIE. Svakako bi članovi od udruživanja u ZOIE mogli da očekuju uštede prilikom upotrebe el. en. kao i povećanje energetske efikasnosti. U određenju meri će svakako kod članova biti prisutan i motiv da se udružuje u ZOIE zarad ostvarivanja opšteg dobra, povećanja procenta obnovljivih izvora energije u energetske miksu i pomoć pri ubrzanju energetske tranzicije.

Pored koristi koje članovi mogu ostvariti, prisutna je i korist po Republiku Srbiju jer se između ostalog razvojem mreže ZOIE ubrzava ostvarivanje međunarodnih ciljeva u oblasti energetike na koje se Republika Srbija obavezala. Zbog toga bi u interesu Republike Srbije bilo da razmišlja o predviđanju posebnih podsticaja za razvoj ZOIE pored onih koje imaju krajnji kupci el. en. odnosno druge podsticaje koje svaki član može imati u skladu sa postojećim propisima.

Iz navedenog se čini verovatnim da u narednom vremenskom periodu sledi osnivanje većeg broja ZOIE u Republici Srbiji. Modeli prikazani u ovom radu svakako mogu biti od koristi fizičkim i pravnim licima koja nameravaju da postanu članovi ZOIE, kao i donosiocima odluka koji bi eventualno mogli da preuzmu neka rešenja iz propisa Savezne Republike Nemačke kako bi se predloženi modeli mogli efikasnije razvijati. Takođe, bilo bi od koristi da se šira naučna i stručna javnost uključi u debatu na teme koje ovaj rad obrađuje, kako bi u budućnosti na efikasniji način došli do ostvarivanja ciljeva koji se proklamuju propisima o ZOIE.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Directive (EU) 2018/2001 of the European parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, Official Journal of the European Union, No. L 328/82, 2018. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2018.328.01.0082.01.ENG [pristupljeno 20.02.2023]
- [2] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/2021), Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2021/40/2/reg> [pristupljeno 20.02.2023]
- [3] Zakon o energetici ("Službeni glasnik RS", br. 145/14, 95/18 – dr. Zakon, 40/21). https://www.paragraf.rs/proposisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 20.02.2023]
- [4] Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023). https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html [pristupljeno 20.02.2023]
- [5] Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji ("Narodne novine", br. 138/2021). https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2021_12_138_2272.html [pristupljeno 20.02.2023]
- [6] Metodologija za određivanje cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije („Službeni glasnik RS“, broj 105/12). <http://aers.rs/FILES/Metodologije/2012-10-31%20Metodologija%20distribucija%20EE%20SG%20105-12.pdf>, [pristupljeno 20.02.2023]
- [7] Izveštaj o radu Agencije za energetiku za 2021. godinu. <https://www.aers.rs/FILES/Izvestaji/Godisnji/Izvestaj%20Agencije%202021.pdf> [pristupljeno 20.02.2023]
- [8] Registar kupaca-proizvođača, Elektro distribucija Srbije d.o.o. Beograd http://edbnabavke.edb.rs/registar_kupaca/DOMACINSTVA/DOMACINSTVA.pdf, http://edbnabavke.edb.rs/registar_kupaca/STAMBENA_ZAJEDNICA/STAMBENA_ZAJEDNICA.pdf, http://edbnabavke.edb.rs/registar_kupaca/OSTALI_KP/OSTALI_KP.pdf, [pristupljeno 20.02.2023]
- [9] Grujić D., Đurišić Ž. Uslovi razvoja projekta solarne elektrane u sklopu TS Beograd 20, in Proc. 32. Cigre savetovanje Energetska tranzicija i Smart grid, R C6 01, 17-21 maj Zlatibor, Srbija, 2015. <http://www.cigresrbija.rs/doc/savetovanja/32/Spisak%20radova%20sa%20izvestajima%20strucnih%20izvestilaca%2032.%20savetovanje%20CIGRE%20Srbija.pdf> [pristupljeno 20.02.2023]
- [10] Climate online baze podataka. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 20.02.2023]
- [11] HUPX Historical data. <https://hupx.hu/en/market-data/dam/historical-data> [pristupljeno 20.02.2023]
- [12] Odluka o regulisanoj ceni električne energije za garantovano snabdevanje. <https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/2023-01-01%20odluka%20EPS%20struja.pdf>, [pristupljeno 20.02.2023]
- [13] Nova cena električne energije za garantovano snabdevanje. <https://www.aers.rs/Index.asp?l=1&a=541&id=331> [pristupljeno 20.02.2023]
- [14] Pravila o radu distributivnog sistema, jul 2017. godine. http://aers.rs/FILES/AktiAERS/AERSDajeSaglasnost/2017-07-19_Pravila%20o%20radu%20ED-ODS%20EPS%20distr.pdf [pristupljeno 20.02.2023]
- [15] Zakon o planiranju i izgradnji, ("Sl. glasnik RS", br. 72/2009, 81/2009 - ispr., 64/2010 - odluka US, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - odluka US, 50/2013 - odluka US, 98/2013 - odluka US, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 - dr. zakon, 9/2020 i 52/2021). https://www.paragraf.rs/proposisi/zakon_o_planiranju_i_izgradnji.html [pristupljeno 20.02.2023]
- [16] Korigovane podsticajne otkupne cene iz člana 4. Uredbe o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoeфикаsne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije. <https://www.eps.rs/cir/snaddevanje/Documents/Tabela%20iz%20clana%204%20Uredbe%20o%20podsticajnim%20cenama%20od%20marta%202023.pdf> [pristupljeno 20.02.2023]
- [17] Uredba o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoeфикаsne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije, <https://www.aers.rs/FILES/OIE/2016-06-15%20Uredba%20o%20merama%20podsticaja%20za%20proizvodjace%20elektricne%20energije%20SG%2056-2016.pdf>, [pristupljeno 20.02.2023]
- [18] Pravila o radu tržišta električne energije, novembar 2022. godine, <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/12/Pravila-o-rad-trzista-elektricne.pdf> [pristupljeno 20.02.2023]
- [19] Pravila o promeni snabdevača, februar 2017. godine. https://www.aers.rs/FILES/Pravila/2017-02-14_Interno%20preciscen%20tekst%20Pravila%20o%20promeni%20snabdevaca.pdf [pristupljeno 20.02.2023]
- [20] Vukovljak M., Janković M. Novi učesnici na tržištu električne energije, in Proc. 35. Cigre savetovanje Energetska tranzicija i Smart grid, Zlatibor, Srbija, R C5 03, 3-8. Oktobar 2021. <https://cigresrbija.rs/downloads/35savetovanje/CIGRE%20Spisak%20radova%20sa%20izvestajima%20strucnih%20izvestilaca%202021%20A4.pdf> [pristupljeno 20.02.2023]
- [21] Kuzman M., Grujić D. Punionice električnih vozila na tržištu Republike Srbije, in Proc. 13th Conference on electricity distribution - CIRED 2022, Kopaonik, Srbija, R-4.06, 12-16 September 2022.

- http://ciredserbia.org.rs/Radovi/KO2022/STK%204/R-4.06%20109_Milos%20Kuzman_Dunja%20Grujic_PUNIONICE%20ELEKTRICNIH%20VOZILA%20NA%20TRZISTU%20REPUBLIKE%20SRBIJE.pdf [pristupljeno 20.02.2023]
- [22] Zafar, B., Sami, S.B., Nasri, S., Mahmoud, M. Smart Home Energy Management System Design: A Realistic Autonomous V2H / H2V Hybrid Energy Storage System, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, Vol. 10, No. 6, 2019. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2019.0100630>
- [23] Grujić D., Kuzman M. Modeli funkcionisanja agregatora na tržištu električne energije, in *Proc. 13th Conference on electricity distribution - CIRED 2022*, Kopaonik, Srbija, R-6.09, 12-16 September 2022. http://ciredserbia.org.rs/Radovi/KO2022/STK%206/R-6.09%20136_Dunja%20Grujic_Milos%20Kuzman_MODELI%20FUNKCIONISANJA%20AGREGATORA%20NA%20TRZISTU%20ELEKTRICNE%20ENERGIJE.pdf [pristupljeno 20.02.2023]
- [24] Grujić D., Kuzman M. Modeli korišćenja električne energije kupaca-proizvođača, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 8-16, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.08G>
- [25] Casalicchio V., Manzolini G., Prina M. G., Moser D. From investment optimization to fair benefit distribution in renewable energy community modelling, *Applied Energy*, Vol. 310, 118447, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118447>
- [26] CoolHeating u Šapcu – korišćenje biomase za daljinsko grejanje. <https://balkangreenenergynews.com/rs/coolheating-u-sapcu-koriscenje-biomase-za-daljinsko-grejanje/> [pristupljeno 20.02.2023]
- [27] <https://mre.gov.rs/aktuelnosti/javni-pozivi/javni-poziv-za-dodelu-sredstava-za-finansiranje-programa-energetske-sanacije-stambenih-zgrada-porodичnih-kuća-i-stanova-koji-sprovode-jedinice-lokalne-samouprave-kaoi-gradske-opštine-2022-jp-1-22> [pristupljeno 20.02.2023]
- [28] <https://www.mre.gov.rs/lat/aktuelnosti/javni-pozivi/drugi-javni-poziv-za-dodelu-sredstva-za-sprovođenje-mere-energetske-sanacije-u-domacinstvima-putem-ugradnje-solarnih-panela-za-proizvodnju-električne-energije-za-sopstvene-potrebe---2021-%E2%80%93jp3-21> [pristupljeno 20.02.2023]
- [29] Rimac, G. Uloga i značaj Zajednica obnovljivih izvora energije u energetske tranziciji – neka zapažanja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 4, pp. 64-69, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.64R>
- [30] Cena struje za privredu u Srbiji od 1. januara 103 evra po MWh. <https://balkangreenenergynews.com/rs/cena-struje-za-privredu-u-srbiji-od-1-januara-103-evra-po-mwh/> [pristupljeno 20.02.2023]
- [31] Rajaković N., Tasić D. *Distributivne i industrijske mreže*, Akademska misao, Beograd, 2008.
- [32] Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU, *Official Journal of the European Union*, No. L 158/125, 2019. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944> [pristupljeno 20.02.2023]
- [33] Lowitzsch, J., Hoicka, C.E., Tulder, F.J. Renewable energy communities under the 2019 European Clean Energy Package - Governance model for the energy clusters of the future?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 122, 109489, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109489>
- [34] Heldeweg, M.A., Saintier, S., Renewable energy communities as 'socio-legal institutions': A normative frame for energy decentralization?, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 119, 109518, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109518>
- [35] Dóci, G., Vasileiadou, E., Petersen, A.C. Exploring the transition potential of renewable energy communities, *Futures*, Vol. 66, pp. 85-95, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.01.002>
- [36] Mandić-Lukić, J., Milovanović, Đ., Stipić, M., Petrović-Bećirović, S., Raković, R., Popović-Zdravković, B., Životić, M. Pametna i socijalno odgovorna energetska tranzicija u regionima sa intenzivnom eksploatacijom uglja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 3, pp. 73-79, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.73L>
- [37] Mandić-Lukić, J., Milovanović, Đ., Stipić, M., Raković, R., Petrović-Bećirović, S., Energetska tranzicija - inteligentna, pravedna i ekološki prihvatljiva, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 2, pp. 68-74, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.68ML>
- [38] Parović, M. Razvoj energetske zajednice kao aktivna mera za podsticaj pravedne energetske tranzicije u Republici Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 2, pp. 33-39, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-2.33P>

AUTORI/AUTHORS

Miloš Kuzman, Udruženje za pravo energetike Srbije, milos.kuzman@upes.rs, ORCID [0000-0002-9769-9713](https://orcid.org/0000-0002-9769-9713)
Dunja Grujić, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, dunja.grujic@ods.rs, ORCID [0000-0001-9298-6249](https://orcid.org/0000-0001-9298-6249)

Integrative GHG Assessment in Oil and Gas Industry

Određivanje emisije gasova staklene bašte u industriji nafte i gasa

Aleksandar Mirković*, Marija Živković**, Stevan Đenadić**, Darja Lubarda*, Chinedu Anyanwa*

*MudoZangl Nigeria Ltd.

**University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, Djusina 7, 11000 Belgrade

Abstract - Reducing greenhouse gas emissions is one of the main targets of national strategies in European countries. As a main contributor to emissions, the energy sector is recognized as the most promising to apply measures and actions aimed to decrease GHG emissions. The Oil and Gas industry as a significant contributor to global greenhouse gas emissions is facing a growing need for estimating, mitigating, and reducing the impact of their operations on the atmosphere to stay competitive in a newly arising green economy. The goal to reduce GHG emissions emphasizes the need for identification of the main sources of emission in the Oil and Gas industry. This paper presents the comprehensive blueprint for the development of a greenhouse gas emissions inventory for the case of complex industries such as Oil and Gas, including its specifics related to processes of Oil and Gas production and processing (flaring, fugitive emissions, etc.). The model is implemented for a case of a typical upstream oil and gas company, with the aim to identify the main sources of emission. It was shown that the major source of emission is gas flaring, while the key contributor is uncombusted methane.

Index Terms - Energy transition, Greenhouse gas emissions, Industry, Oil&Gas.

Rezime - Smanjenje emisije gasova staklene bašte jedan je od glavnih ciljeva nacionalnih strategija Evropskih zemalja. Energetski sektor prepoznat je kao glavni sektor koji doprinosi emisijama ali i najperspektivniji za primenu mera i aktivnosti u cilju smanjenja emisija gasova staklene bašte. S obzirom na značajan doprinos globalnom efektu staklene bašte, industrija nafte i gasa se suočava potrebama za procenom, ublažavanjem i smanjenjem uticaja njihovog poslovanja na atmosferu kako bi ostala konkurentna u novonastaloj zelenoj ekonomiji. Cilj smanjenja emisija gasova staklene bašte, ističe potrebu za identifikacijom glavnih izvora emisija u industriji nafte i gasa. Ovaj rad predstavlja sveobuhvatni pristup analize emisija gasova staklene bašte složenih industrija kao što je industrija nafte i gasa, sintetizujući sve specifičnosti vezane za procese proizvodnje i prerade (spaljivanje na baklji, fugalivne emisije, itd.). Model je implementiran za slučaj tipične kompanije za proizvodnju nafte i gasa, s ciljem identifikacije glavnih izvora emisija. Pokazano je da je glavni izvor emisija sagorjevanje gasa, pri čemu ključni doprinos daje neizgoreli metan.

Ključne reči – energetska tranzicija, emisije gasova staklene

bašte, industrija, nafta & gas.

I INTRODUCTION

The global population growth and industrial development, and rising level of living standard have been accompanied by increased demand for various forms of energy. Most of the world's energy is still derived from fossil fuels. In 2021 the share of fossil fuels amounts 80.9%, while the share of biofuels and waste amounts 9.4%, indicating that more than 90% of annually consumed primary energy in the world, is transformed by combustion processes [1].

The problems of climate change and greenhouse gas (hereinafter GHG) concentrations are observed through monitoring various indicators over time. The concentration of CO₂ in the atmosphere has increased from 294 ppm (parts per million) a century ago to the current level of 420 ppm [2, 3]. The concentrations of CO₂ and CH₄ in 2019 were the highest recorded in recent history [4]. It is assumed that human influence has led to the global retreat of glaciers since the 1990s and the retreat of the surface of the Arctic Sea ice between 1979–1988 and 2010–2019 [4]. Global surface temperatures have risen by 1.09°C from 2011–2020 compared to the period of 1850–1900 [5]. Among others, changes observed in extremes such as heat waves, heavy precipitation, droughts, and tropical cyclones have increased [4].

The increase in GHG concentrations in the atmosphere is largely the result of anthropogenic activities. Different countries around the world are organizing themselves to monitor GHG emissions, develop strategic documents, and implement activities focused on reducing negative anthropogenic effects. With the Paris Agreement in 2015, signatory countries achieved international consensus to limit increases in the global average temperature to well below 2°C compared to pre-industrial levels, and to make efforts to limit the temperature increase to 1.5°C compared to pre-industrial levels [6]. The task set before the countries that signed the agreement is not easy to accomplish, as confirmed by emissions data for the period after its signing [7]. Fulfilling undertaken obligations assumes the identification of emission sources, ensuring evaluation of emitted gases, implementation of energy efficiency measures, and switching to renewable energy sources.

The contribution of fossil fuels combustion to energy-related carbon dioxide emission is as follows: coal has the major share of 44%, oil of 33.7%, and natural gas of 21.6% [1]. The Oil and Gas (hereinafter O&G) related activities contribute more than

50% of global GHG energy-related emissions mainly through hydrocarbon extraction, processing, and subsequent combustion processes [1,2,8]. The O&G sector has been continuously impacting the global economy due to intense energy demand, however, it mirrored the GHG emissions too [2]. The abovementioned clearly shows the importance of O&G in meeting energy needs and as such its importance with respect to GHG emissions.

By signing the Paris Agreement, the participating countries are committed to fulfilling stringent emission reduction targets, and large efforts must be made within all sectors of the energy chain: production, transformation, and consumption.

In the previous period, more attention was given to evaluating emissions of the main GHG contributors: the energy transformation sector (for example, electricity generation, and heat production in centralized supply systems) and energy consumption at end users. However, in mitigating climate change all sources of emission need to be assessed and identified, which brings to attention the production and processing of fuels, including the oil and gas industry.

Emissions generated during oil and gas extraction are not negligible. In some countries, this activity is responsible for more than 20% of the country's overall emissions [9]. Thus, the need to reduce emissions is setting ambitious targets to the oil and gas industry [10]. In addition, the oil and gas sector has an indispensable role in the global methane profile, especially the production and gathering stages [11]. In [12] was shown that these activities were the source for about 65% of total fossil methane emissions or one-quarter of global anthropogenic methane emissions.

Recent studies had in focus evaluation of the effects of the implementation of various energy efficiency measures regarding the optimal operation of equipment [13], shifting to low carbon electricity and heat generation by introducing carbon-less intensive fuels, renewable and alternative fuels, or implementation of the more efficient combined cycle [14].

A major reduction of emissions can be achieved if the major sources of emissions are targeted. The ambition of this paper is to identify major sources and provide a breakdown by activity and by consequently emitted greenhouse gas for a typical onshore oil and gas production and processing facility, including fugitive emission and flaring.

The calculation is based on data specifically derived to represent a typical upstream oil and gas company, which encompasses the various activities involved in production and processing. It considers the company's efforts toward reducing flaring by employing the gas processing unit to utilize the gas that would otherwise be flared. Therefore, it provides a comprehensive representation of the typical activities and emissions associated with the upstream sector. However, it should be noted that even with these efforts, some flaring is still associated with oil production.

By utilizing this specific dataset, the paper aims to provide valuable insights into the emissions profile of a common upstream oil and gas company, highlighting the significance of

flaring in the overall emissions inventory and evaluating the magnified methane emissions effect, as a potent greenhouse gas of high global warming potential, which is closely associated to the gas flaring. This information can assist policymakers and industry stakeholders in understanding the impact of gas flaring and stress the importance of developing targeted strategies to further reduce flaring and minimize the environmental impact of oil production.

II METHODOLOGY

There are various sources of GHG emissions, including the exploration and exploitation of energy sources, conversion of primary energy sources into usable forms in refineries and power plants, transmission and distribution of fuels, and the use of fuels in stationary and mobile applications. These activities result in emissions of carbon dioxide (CO₂) from the combustion of fossil fuels, as well as from non-combustion sources. Most of the emissions come from combustion, while a small amount arises as fugitive emissions from extraction, transformation, and transportation of primary energy carriers.

During combustion, most of the carbon is emitted as CO₂, with some released as carbon monoxide (CO), methane (CH₄), and nitrogen oxides (NO_x). The amount of CO₂ emitted depends on the carbon content of the fuel combusted, while the emissions of non-CO₂ gases mainly depend on the combustion technology and parameters.

The methodological approach for estimating CO₂ emissions is classified into tiers, as per the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Three tiers are used for estimating CO₂ emissions, with different tiers used for different source categories based on data availability, measurements, and models.

Tier 1 methodology estimates CO₂ emissions based on the quantity of fuel combusted. This methodology uses average emission factors and assumes that emissions from all sources of combustion can be estimated solely based on the amount of fuel combusted and the average emission factors. Since most of the carbon is emitted as CO₂ during fuel combustion, and only a small amount is emitted as non-CO₂ gases, the tier 1 methodology only considers the quantity of fuel combusted and not the combustion technology, maintenance, and other factors that may affect the emission of non-CO₂ gases.

In addition to the quantity of fuel combusted, tier 1 methodology also considers average emission factors. However, the quality of emission factors differs between gases. For CO₂, the emission factor depends on the carbon content and heating value of the fuel and is not influenced by combustion conditions. On the other hand, emission factors for non-CO₂ gases, such as methane and nitrous oxide, depend on technology and operating conditions and vary significantly between different combustion sources and over time. This leads to large uncertainties in the estimation of emission factors for non-CO₂ gases using tier 1 methodology.

In contrast, the tier 2 methodology represents a more detailed approach to estimating CO₂ emissions compared to the tier 1 methodology, as it uses country-specific emission factors instead of average emission factors. Country-specific factors can vary

between fuels, technologies, individual plants, etc. The use of country-specific emission factors derived from detailed information is expected to reduce the uncertainties in the estimation of emission factors and result in a more accurate estimate of CO₂ emissions.

The most detailed approach to estimating CO₂ emissions is the tier 3 methodology, which uses detailed emission models or measurements and data at the individual plant level to better estimate emissions of non-CO₂ gases.

Emissions from Stationary Combustion

Combustion in stationery (non-transport) processes results in the following GHG emissions: carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄), and nitrous oxide (N₂O). Sources of emissions from stationary combustion include boilers, heaters, furnaces, kilns, ovens, flares, thermal oxidizers, dryers, and any other equipment or machinery that combusts any fuel.

The selected procedure for determining amounts of emitted GHG depends on available input data. Depending on the availability of data, their consistency, and time series different tier approaches are applied. A tier represents a level of methodological complexity.

Tier 1 Approach

Tier 1 represents the least complex approach, while requested input data are of the least extent and complexity. Input data for inventorying emissions from the stationary combustion process are:

- Fuel consumption, i.e., data on the amount of heat energy produced in combustion processes,
- Default emission factor for each gas and each fuel used (Equation 1).

$$E_{GHG, fuel} = FC_{fuel} \cdot EF_{GHG, fuel} \quad (1)$$

where:

$E_{GHG, fuel}$ ($Emissions_{GHG, fuel}$) - Emission of a GHG by type of fuel, [kg];

FC_{fuel} ($Fuel\ Consumption_{fuel}$) - Amount of heat energy produced in combustion processes, [TJ];

$EF_{GHG, fuel}$ ($Emission\ Factor_{GHG, fuel}$) - Average emission factor of a given GHG by type of fuel, [kg/TJ].

Tier 2 Approach

The tier 2 approach is more complex, thus providing more accurate results. Instead of average emission factors, country or region-specific emission factors are applied. In case the physical measurements of emitted GHG are available the inventory compiler can derive the emission factors and use them in this tier, ensuring that all the actions are transparent and well documented. Input data for inventorying emissions from stationary combustion processes are:

- Fuel consumption, i.e., data on the amount of heat energy produced in combustion processes, (Equation 2).
- Country or region emission factor for each gas and each fuel.

$$E_{GHG, fuel} = FC_{fuel} \cdot EF_{GHG, fuel} \quad (2)$$

where:

$E_{GHG, fuel}$ ($Emissions_{GHG, fuel}$) - Emission of a GHG by type of fuel, [kg];

FC_{fuel} ($Fuel\ Consumption_{fuel}$) - Amount of heat energy produced in combustion processes, [TJ];

$EF_{GHG, fuel}$ ($Emission\ Factor_{GHG, fuel}$) - Country-specific or calculated emission factor of a GHG for a specified fuel, [kg/TJ].

Tier 3 Approach

Tier 3 approach, as the most complex, requires a detailed GHG emissions model or measurements at facility level. Due to high information requirements and increased costs this approach is rarely chosen. Input data for inventorying emissions from stationary combustion processes are:

- Fuel consumption, i.e., data on amount heat energy produced in combustion processes, (Equation 3).
- Measured or calculated emission factor for each gas and each fuel.

$$E_{GHG, fuel} = FC_{fuel} \cdot EF_{GHG, fuel} \quad (3)$$

where:

$E_{GHG, fuel}$ ($Emissions_{GHG, fuel}$) - Emission of a GHG by type of fuel, [kg];

FC_{fuel} ($Fuel\ Consumption_{fuel}$) - Amount of heat energy produced in combustion processes, [TJ];

$EF_{GHG, fuel}$ ($Emission\ Factor_{GHG, fuel}$) - Calculated emission factor of a given GHG for a specified fuel, [kg/TJ].

EMISSIONS FROM NON-STATIONARY (MOBILE) COMBUSTION

Mobile sources produce direct GHG emissions of carbon dioxide (CO₂), methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) from the combustion of various fuel types. GHG emissions from mobile combustion are most easily estimated by major transport activity. The source description shows the diversity of mobile sources and the range of characteristics that affect emission factors.

Procedure applied for nonstationary combustion is the same as the one for stationary processes under tier 1 approach but with introduction of default emission factors for non-stationary combustion.

Fugitive Emissions

Fugitive emission refers to intentional or unintentional release of GHG that occurs during the exploration, production, processing, and delivery of fossil fuels to users. Methane leaks being the major source of GHG emissions under this category. Commonly used methodologies in estimating fugitive emissions in O&G operations include:

- Direct Measurement: Requires usage of instrumentation and equipment to measure actual emissions at the source location. This approach provides high accuracy on fugitive emissions but requires specialized equipment and imposes additional costs.
- Emission Factors: The emission factors represent the empirically derived value of GHG released to the atmosphere related to activity levels (e.g., equipment types, facility types, operating hours etc.). Therefore, when multiplied with activity data they yield emissions

estimate. The methodology is of low complexity and widely adopted.

- **Engineering Calculations:** The methodology covers the usage of engineering models, technical domain equations, and general engineering principles to estimate fugitive emissions under certain operating conditions. This approach can be of high complexity.
- **Mass Balance:** The methodology which relies on proper hydrocarbon accounting. The fugitive emissions are estimated as a difference between sums of all hydrocarbon fluid volumes entering facility, and volumes that leave facility.

The simplest and most widely used methodology is based on Facility-Level Average Emission Factors (Equations 4 & 5) [8]. The API Compendium 2021 provides the tables for O&G processing facilities based on Onshore or Offshore types of production. The emission factors are usually expressed with respect to relative concentrations of CH₄ and must be adequately scaled to Methane content in the facility-associated gas composition before being applied. Additionally, CO₂ can also be released from fugitive sources if CO₂ is present in the gas stream. In this case, the Methane emission factor is scaled based on CO₂ content in the gas stream.

$$E_{CH_4} = FT_{oil/gas} \cdot EF_{oil/gas} \cdot \frac{Actual\ CH_4\ mol\ \%}{Reference\ CH_4\ mol\ \%} \quad (4)$$

$$E_{CO_2} = E_{CH_4} \cdot \frac{Mw\ CO_2}{Mw\ CH_4} \cdot \frac{Actual\ CO_2\ mol\ \%}{Reference\ CH_4\ mol\ \%} \quad (5)$$

where:

E_{CH_4} - Emissions of CH₄;
 $FT_{oil/gas}$ - Facility Throughput of oil or gas;
 $EF_{oil/gas}$ - Emissions Factor for oil or gas;
 E_{CO_2} - Emissions of CO₂.

Emissions from gas flaring

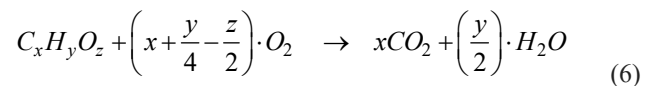
Oil and Gas exploitation processes very often carry a significant appearance of hydrocarbon gases. As transportation and commercialization of the produced gas are very often not economically attractive, companies in these situations tend to combust the produced gas on the production site directly. This process leads to significant emissions of CH₄ and CO₂. Aside from intentional flaring at the production site, the flaring process can take place during hydrocarbon processing as non-routine

flaring.

The gas flaring process is characterized as very often being a non-complete combustion process. This leads to a portion of Methane being directly emitted into the atmosphere and in this way enlarges the overall greenhouse effect.

One of the widely used methodologies for determining emissions from flaring is presented by API Compendium 2021. The methodology recognizes the flare combustion process as incomplete and therefore recommends the usage of Combustion Efficiency. In case that Combustion Efficiency is not provided by the manufacturer, or it is measured, the usage of 98% and 99.5% for Production Flare and Refinery Flare respectively is recommended. This clearly indicates that along with the carbon dioxide emitted from combustion of flared gas, a significant portion of emissions will come from uncombusted methane. The quantity of methane emitted directly depends on methane share in the flared gas composition. In cases when flared gas composition is unknown API Compendium recommends default gas composition (CH₄ - 80 mole%, C₂H₆ - 15 mole%, C₃H₈ - 5 mole%).

The CO₂ emission factor for gas flaring can be most accurately calculated by using the stoichiometric equation [8]:



where:

x - stoichiometric coefficient for carbon;
 y - stoichiometric coefficient for hydrogen;
 z - stoichiometric coefficient for oxygen.

The carbon content of hydrocarbon compound can be calculated using the equation [8]:

$$Wt\%C_j = \frac{\frac{12\ lb\ C}{lb\ mole\ C} \cdot \frac{X\ lb\ mole\ C}{lb\ mole\ C_j}}{Mw_{C_j} \cdot \left(\frac{lb}{lb\ mole}\right)} \cdot 100\% \quad (7)$$

where:

j - any hydrocarbon compound from Equation 6;
 12 - molecular weight of carbon;
 X - Stoichiometric coefficient for carbon;
 Mw - molecular weight of individual hydrocarbon compound.

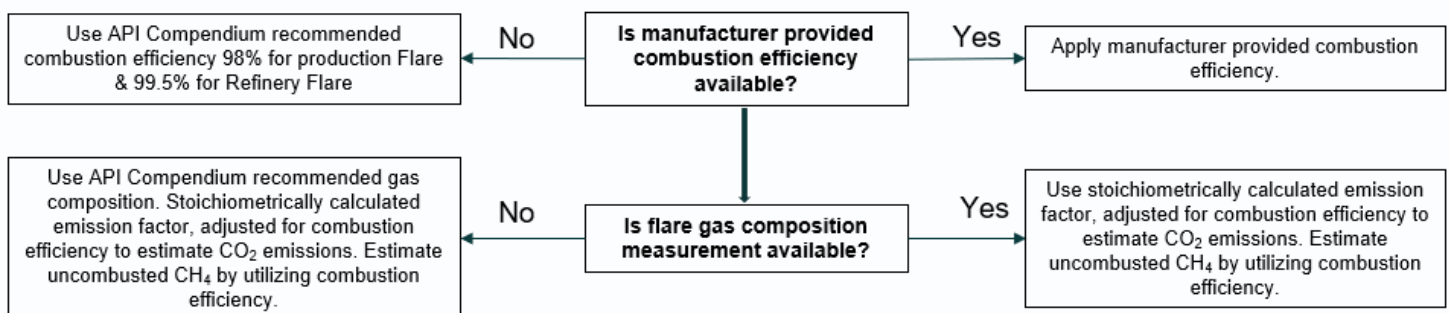


Figure 1. Flare Gas Emissions- Decision Schema

The carbon content of the fuel mixture can be calculated using the equation [8]:

$$Wt\%C_{mixture} = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^{components} (Wt\%_i \cdot Wt\%C_i) \quad (8)$$

where:

$Wt\%_i$ - weight percent of component i ;

$Wt\%C_i$ - carbon content of component i on a weight basis.

The CO₂ emission factor can be calculated by using the following equation [8]:

$$E_{CO_2} = FC \cdot \left(\frac{1}{mol. vol. conv.} \right) \cdot Mw_{mix} \cdot Wt\%C_{mix} \cdot \frac{44}{12} \cdot CF \quad (9)$$

where:

FC - fuel consumed;

$mol. vol. conv.$ - conversion from molar volume to mass (379.3 scf/lbmole or 23.685 m³/kgmole);

Mw_{mix} - molecular weight of mixture;

CF - combustion efficiency.

The emission factor can then be adjusted by flare combustion efficiency. The high-level decision schema based on API Compendium methodology is presented in Figure 1.

III MODEL – CASE STUDY

For the purpose of presenting the mentioned approach in monitoring and calculation of GHG, a realistic case study of an onshore upstream O&G company is created. Within this company, three major emitters are identified: flow station, gas plant, and field offices. The synthetic data used is based on actual data from similar facilities in the industry. This data is used to model the emissions generated by each entity in a realistic way, allowing us to access the total direct (Scope 1) GHG emissions produced by the company. Analysis of the case study results in an integrative manner, gives a better understanding of the environmental impact of the O&G industry, and identifies opportunities for mitigation and reduction of GHG emissions. The detailed emitters activity data is provided in Table 1 and Table 2.

Table 1. Facility Stationary Activity Data

Facility	Year	Stationary Combustion			
		Fuel Gas [MMscf]	Flared Gas [MMscf]	Diesel [liters]	Petrol [liters]
Flowstation	2020	300	800	260000	-
	2021	330	900	220000	-
	2022	340	1050	210000	-
Gas Plant	2020	400	50	10000	-
	2021	440	65	12000	-
	2022	460	70	10000	-
Offices	2020	-	-	110000	-
	2021	-	-	80000	-
	2022	-	-	70000	-

In recent years, the accurate estimate and reporting of GHG emissions has become increasingly important in the O&G industry. This is due in part to growing concerns over climate change and the need to mitigate its effects. As a result, O&G companies are investing more effort in improving the quality of

their data and measurements, particularly in relation to GHG emissions. Until recently, the gas composition of flared gas and fuel gas was not measured in a consistent and reliable manner. This has resulted in incomplete or inaccurate estimates of GHG emissions from these sources. However, with the adoption of new technologies and improved measurement techniques, companies are now able to gather more accurate data on the composition of these gases.

Table 2. Facility Mobile Activity, Throughputs and Glycol Data

Facility	Year	Mobile Combustion		Facility Throughput		Glycol Dehyd.
		Diesel [liters]	Petrol [liters]	Crude Oil [bbl]	Gas [MMscf]	Gas [MMscf]
Flowstation	2020	20000	30000	5000000	-	-
	2021	18000	27000	4700000	-	-
	2022	15000	31000	4400000	-	-
Gas Plant	2020	15000	18000	-	58000	57950
	2021	14000	18000	-	65000	64935
	2022	13000	19000	-	75000	74930
Offices	2020	12000	11000	-	-	-
	2021	10000	13000	-	-	-
	2022	9000	15000	-	-	-

Taking this into account, the case study presented in this paper will assume a single gas composition measurement available for Flowstation and Gas Plant facilities (Table 3). This resembles a realistic case of which inventory compilers can face when compiling emissions inventories for upstream O&G companies. As well this leaves space for further research on how the emissions estimate could vary with gas composition changes, or usage of default gas compositions recommended by API Compendium.

Table 3. Gas Compositions

Component	Flowstation	Gas Plant
(N ₂) Nitrogen	0.62	0.35
(CO ₂) Carbon Dioxide	0.80	1.13
(CH ₄) Methane	81.76	88.53
(C ₂ H ₆) Ethane	8.76	6.34
(C ₃ H ₈) Propane	3.98	2.14
(C ₄ H ₁₀) Isobutane	1.44	0.56
(C ₄ H ₁₀) n-Butane	1.21	0.51
(C ₅ H ₁₂) Isopentane	0.54	0.20
(C ₅ H ₁₂) n-Pentane	0.29	0.12
(C ₆ H ₁₄) Hexanes	0.60	0.12

Accurate GHG modelling requires the use of reliable and up-to-date emission factors. In this study, emission factors from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC 2006 Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) guidelines and the American Petroleum Institute (API) Compendium 2021 are applied. These sources provide a comprehensive and authoritative set of factors for estimating GHG emissions from O&G operations. The emission factors cover a range of activities and sources, including upstream and downstream O&G operations, and are based on the latest scientific research and data. Factors used for the case study are presented in Table 4.

Table 4. Factors used in the model [8,9]

Source	Factors	Values	
API Compendium 2021	Global Warming Potentials (GWP)	CO ₂	1
		CH ₄	28
		N ₂ O	265
API Compendium 2021	Fugitive Emissions	Onshore Oil Production [tCH ₄ /bbl]	0.0002346
		Onshore Gas Production [tCH ₄ /MMscf]	0.02601
		Reference CH ₄ content [%]	78.8
IPCC	Stationary Combustion	Natural Gas [tCO ₂ /TJ]	56.1
		Diesel [tCO ₂ /TJ]	74.1
		Natural Gas [tCH ₄ /TJ]	0.001
		Diesel [tCH ₄ /TJ]	0.003
		Natural Gas [tN ₂ O/TJ]	0.0001
		Diesel [tN ₂ O/TJ]	0.0006
IPCC	Mobile Combustion	Diesel [tCO ₂ /TJ]	74.1
		Petrol [tCO ₂ /TJ]	69.3
		Diesel [tCH ₄ /TJ]	0.003
		Gasoline [tCH ₄ /TJ]	0.003
		Diesel [tN ₂ O/TJ]	0.0006
		Gasoline [tN ₂ O/TJ]	0.0006
API Compendium 2021	Flaring Combustion Efficiency	Production Flare [%]	95
API Compendium 2021	Densities	Diesel [kg/m ³]	847.31
		Petrol [kg/m ³]	742.39
IPCC	Heating Values	Diesel [TJ/t]	0.043
		Petrol [TJ/t]	0.0443
API Compendium 2021	Glycol Dehydrator Emissions	Processed Gas Emissions[tCH ₄ /MMscf-processed]	0.005286

IV RESULTS AND DISCUSSION

Using the input data described in Section 3, the GHG emissions are calculated for the case of the upstream O&G company. The model is developed based on the most up-to-date emission factors available, presented in Table 4. The input data consists of fuel consumptions, flare gas volumes, and facility throughputs. By applying the relevant emission factors to each of these data inputs, the GHG emissions from each source are estimated. The

model output provides a comprehensive view (Figure 2) of the company's GHG emissions profile, broken down by facility and source. Results presented in Figure 2 contain total emissions of CO₂e for Flowstation (a), Gas plant (b) and Office (c). Accurate values of mentioned total emissions per facility and source are provided in Table 5. These estimates can be used to identify areas where emissions can be reduced or mitigated, helping the company to meet its environmental goals and regulatory requirements.

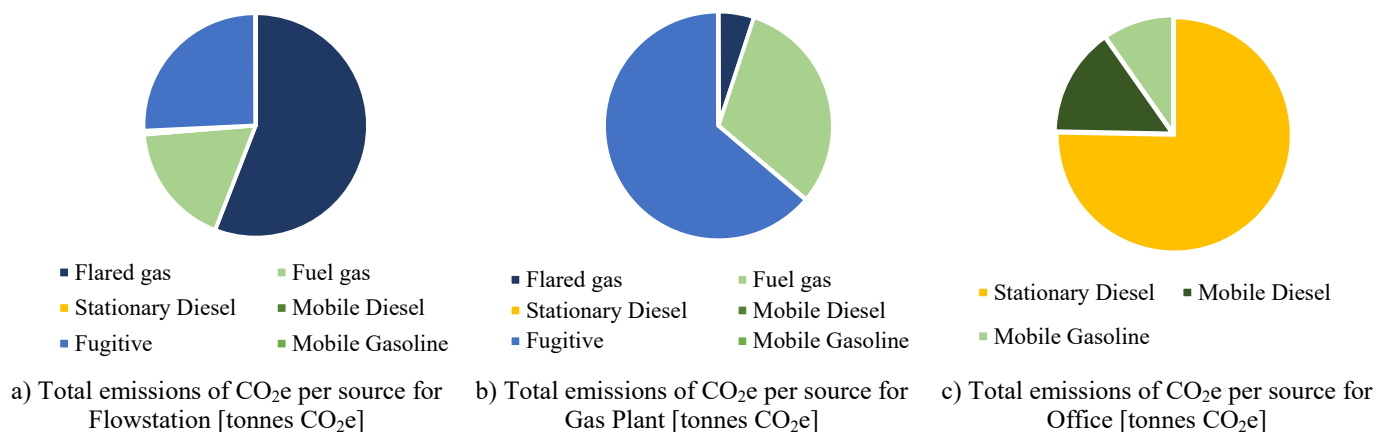


Figure 2. Overview of the company's GHG emissions profile

Table 5. Result of total emissions per facility

Sources	Total Emissions per facility [tonnes CO ₂ e]		
	Flowstation	Gas Plant	Office
Flared gas	209178.91	12785.86	-
Fuel gas	66619.06	79087.24	-
Stationary Diesel	1868.96	86.68	704.25
Mobile Diesel	145.35	115.18	139.87
Fugitive	96191.56	162207.87	-
Mobile Gasoline	205.54	128.46	91.09

Results of total emissions CO₂e per year of analysis for each facility are presented in Figure 3.

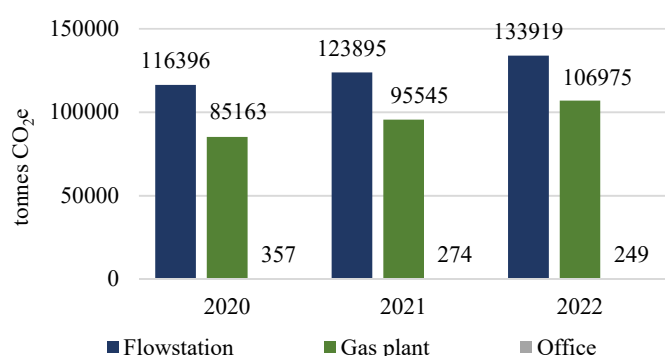


Figure 3. Total emissions CO₂e per year for each facility

Results of emissions overview per source type are presented in Figures 4-7. All values are presented per year and facility in unit tonnes CO₂e.

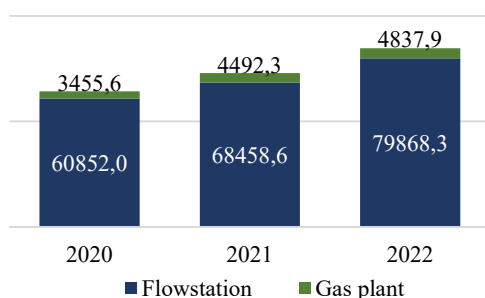


Figure 4. Flare gas CO₂e

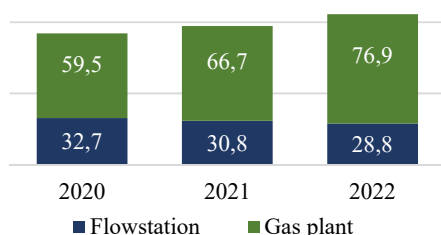


Figure 5. Fugitive gas CO₂e

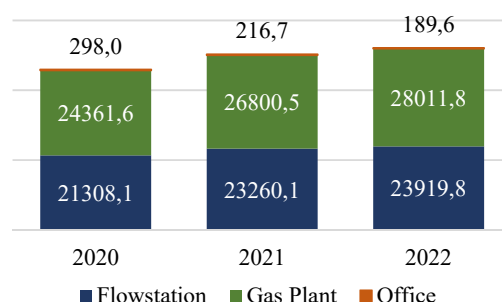


Figure 6. Stationary Combustion emissions of CO₂e

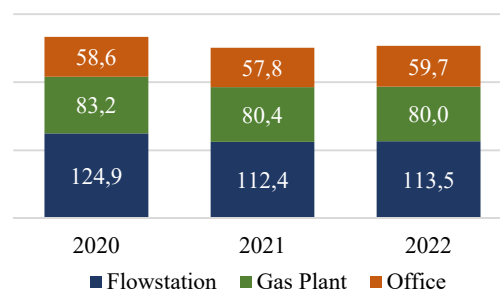


Figure 7. Mobile Combustion emissions of CO₂e

V CONCLUSION

Monitoring and calculation of GHG emissions is the starting point for the long-term goal of preserving the atmosphere. Different industries sectors generate GHG emissions during different stages of exploitation, production, processing, etc. The developed world countries direct their activities in the determination of all negative effects of the process of product creation. Negative effects in some cases cannot be eliminated, but efforts must be made to reduce them to a minimum value. The energy sector is in direct correlation with various industries. The O&G industry has a domain role in the energy sector with a space for optimization of production and processing with the aim of reducing GHG emissions. The first prerequisite is developing the methodology for mapping and calculating emissions.

This paper presented a comprehensive assessment of forming the GHG model for mapping and calculating emissions in the O&G industry. The presented GHG model was verified through Case Study of annual emissions if a typical upstream company where different facilities (Flowstations, Gas Plant, Office) and sources (Flared gas, Fuel gas, Stationary Diesel, Mobile Diesel, Fugitive, Mobile Gasoline) were analysed.

The results of the GHG model clearly indicate that the major source of emissions from the typical upstream O&G company is gas flaring, mainly due to emission of uncombusted methane.

In addition, the presented model highlights the fact that in O&G production, the expected lifecycle of oil reservoirs is such that due to reservoir depletion and pressure drop the gas production surges with time. Companies which do not utilize this gas can therefore expect to see an increase in emissions over time, as more gas is flared or vented. This underscores the importance of developing and implementing effective abatement strategies for gas utilization, such as reinjection or conversion to power

generation. By doing so, companies can reduce their GHG emissions and minimize their environmental impact, while also benefiting from increased energy efficiency and cost savings.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] IEA, Key World Energy Statistics 2021. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf> [pristupljeno 08.02.2023]
- [2] Choudhary, P., Srivastava, R.K., De, S. Integrating Greenhouse gases (GHG) assessment for low carbon economy path: Live case study of Indian national oil company. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 198, pp. 351-363, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.032>
- [3] Ritchie, H., Roser, M., Rosado, P. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions, Our World Data, 2020. <https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions> [pristupljeno 09.02.2023]
- [4] Schulz, C. IPCC Report 2022, AR6: Summary Part 1. https://www.fortomorrow.eu/en/post/ipcc2022-part1?mtm_campaign=ipcc2022-part1&mtm_kwd=20230306&mtm_source=google-ads&mtm_medium=google-ads&mtm_content=en&gclid=EAIaIQobChMIiq_p_5Gs_gIV_41oCR2-8QKVEAAYAiAAEgLnvd_BwE [pristupljeno 10.02.2023]
- [5] AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023, in Proc. *6th Assessment Report during the Panel's 58th Session*, Interlaken, Switzerland, 13-19 March 2023. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/> [pristupljeno 10.02.2023]
- [6] Paris agreement, in Proc. *Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change*, Paris, 12 December 2015. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf [pristupljeno 10.02.2023]
- [7] Fossil CO₂ emissions by country. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2022?vis=pop#emissions_table [pristupljeno 10.02.2023]
- [8] Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the natural gas and oil industry. <https://www.api.org/-/media/files/policy/esg/ghg/api-ghg-compendium-110921.pdf> [pristupljeno 10.02.2023]
- [9] Statistics Norway. Emissions to air. <https://www.ssb.no/en/natur-og-miljo/forurensning-og-klima/statistikk/utslipp-til-luft> [pristupljeno 10.02.2023]
- [10] Carbon Trackers Initiative. Oil majors' net zero plans still far from Paris targets 2021. <https://carbontracker.org/oil-majors-net-zero-plans-still-far-from-paris-targets/> [pristupljeno 10.02.2023]
- [11] Zavala-Araiza, D., Lyon, D.R., Alvarez, R.A. Reconciling divergent estimates of oil and gas methane emissions, *PNAS - The Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 112, No. 51, pp. 15597-15602, 2015. <https://doi.org/10.1073/pnas.1522126112>
- [12] Saunio, M., et al. The global methane budget 2000–2017, *Earth System Science Data*, Vol. 12, No. 3, pp. 1561-1623, 2020. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- [13] Nguyen, T.V., Voldsund, M., Breuhaus, P., Elmegaard, B. Energy efficiency measures for offshore oil and gas platforms, *Energy*, Vol. 117, Part 2, pp. 325-340, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.061>
- [14] Voldsund, M., Reyes-Lúa, A., Fu, C., Ditaranto, M., Neksa, P., Mazzetti, M.J., Brekke, O., Bindingsbø, A.U., Grainger, D., Pettersen, J. Low carbon power generation for offshore oil and gas production, *Energy Conversion and Management: X*, Vol. 17, 100347, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100347>

AUTORI/AUTHORS

Aleksandar Mirković - MSc, petroleum engineering, MudoZangl Nigeria Ltd., aleksandar.mirkovic@mudozangl.com, ORCID [0009-0008-1000-1441](https://orcid.org/0009-0008-1000-1441)
Marija Živković - PhD, full professor, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, marija.zivkovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-5112-8942](https://orcid.org/0000-0001-5112-8942)
Stevan Đenadić - PhD, assistant professor, University of Belgrade, Faculty of Mining and Geology, stevan.djenadic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2835-7151](https://orcid.org/0000-0003-2835-7151) (corresponding author)
Darja Lubarda - MSc, petroleum engineering, MudoZangl Nigeria Ltd. darja.lubarda@mudozangl.com, ORCID [0009-0004-0979-385X](https://orcid.org/0009-0004-0979-385X)
Chinedu Anyanwa - MSc, petroleum engineering, MudoZangl Nigeria Ltd. chinedu.anyanwu@mudozangl.com, ORCID [0009-0002-4760-1308](https://orcid.org/0009-0002-4760-1308)

Daljinski nadzor i kontrola hibridnog postrojenja za navodnjavanje useva na poljoprivrednoj parceli u mestu Belegiš

Remote Monitoring and Control of a Hybrid Power Plant for Irrigation of Crops on an Agricultural Plot in the Town of Belegiš

Željko V. Despotović, Ilija R. Stevanović, Jovan Šumarac

Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Rezime - U radu je prikazana realizacija daljinskog nadzora i kontrole hibridnog postrojenja za navodnjavanje useva na privatnoj poljoprivrednoj parceli površine oko 10ha u mestu Belegiš. Hibridni sistem navodnjavanja je baziran na dominantnom korišćenju obnovljivih izvora energije (OIE), sunca i vetra, uz korišćenje baterijske banke 48V/1000Ah i dizel-električnog agregata 7,5 kW kao nužnog izvora energije. Korišćena pumpa za navodnjavanje je pogonjena je trofaznim asinhronim elektromotorom snage 5,5 kW koji se napaja iz frekventnog regulatora. Frekventna regulacija se koristi za regulaciju pritiska i protoka u sklopu cevovoda za navodnjavanje i obezbeđuje dodatnu efikasnost sistema. U sklopu sistema su realizovani svi potrebni elementi energetske elektronike (solarni i vetro MPPT punjači, invertori i frekventni regulator) koji su međusobno umreženi. Celokupni upravljački sistem je baziran na kontrolnom modulu kojim se vrši kontrola punjenja baterijske banke, kontrola rada invertora kao i akvizicija svih potrebnih merenja u sistemu hibridnog napajanja. Preko ETHERNET porta ovaj modul je povezan sa centralnim računarom koji kontroliše rad celokupnog postrojenja. Ovaj računar je baziran na BEAGLEBONE BLACK procesoru. Ovaj modul ima mogućnost prijema i slanja podataka daljinski preko GSM/GPRS modula putem koga je moguće pratiti sve relevantne parametre sistema, a takođe je moguće daljinski uključiti ili isključiti pojedine funkcionalne blokove i vršiti naprednu kontrolu sistema navodnjavanja.

Ključne reči - OIE, sunce, vetar, hibridno napajanje, nadzor, daljinska kontrola, navodnjavanje, poljoprivreda

Abstract - The paper presents the implementation of remote monitoring and control of a hybrid power plant for irrigation of crops on a private agricultural plot of about 10ha in the town of Belegiš. The hybrid irrigation system is based on the dominant use of renewable energy sources (RES), solar and wind, with the use of a strong 48V/1000Ah battery bank and a 7.5 kW diesel-electric generator as a back-up power source. The used irrigation pump is driven by a three-phase asynchronous electric motor with a power of 5.5 kW, which is supplied by a frequency regulator. Frequency regulation is used to pressure and flow control in the irrigation pipeline and provides additional efficiency of the system. As part of the system, all necessary

elements of power electronics (solar and wind MPPT chargers, inverters and frequency regulator) have been implemented, which are networked together. The entire control system is based on a control module that controls the charging of the battery bank, controls the operation of the inverter, and acquires all the necessary measurements in the hybrid power supply system. Through the ETHERNET port, this module is connected to the central computer that controls the operation of the entire hybrid plant. This computer is based on BEAGLEBONE BLACK processor. This module has the ability to receive and send data remotely via GSM/GPRS, a module through which it is possible to monitor all relevant parameters of the system, and it is also possible to remotely control of the irrigation system.

Index Terms - RES, Solar, Wind, Hybrid power, Monitoring, Remote control, Irrigation, Agriculture

I UVOD

Najveći problem sa kojim se čovečanstvo u ovom trenutku globalno suočava je nedostatak prirodnih resursa za proizvodnju energije. Resursi obnovljive energije i njihove rezerve su glavni pokretači opstanka u savremenom dobu. Sve veća potražnja za električnom energijom i trend koji je preusmeren na nju zahtevaju energetske uređaje koji se mogu koristiti za proizvodnju, distribuciju, pretvaranje i skladištenje energije. Milijarde ljudi u malim selima u zemljama u razvoju trenutno nemaju snabdevanje električnom energijom. U mnogim slučajevima, proširenje elektroenergetske mreže je nepraktično zbog veoma rasute populacije i (ili) zbog geomorfoloških osobina terena gde je stanovništvo naseljeno. Stoga relativno mali, samostalni energetske sistemi na nivou manjih naselja i sela postaju najprihvatljivija opcija. U ovim slučajevima značajno mesto zauzimaju tzv. *hibridni sistemi napajanja*, koji sadrže brojne pretvaračke elemente energetske elektronike (punjače, invertore, bidirekzione ispravljače i sl.) kao i baterijske akumulacione elemente ili skladišta električne energije [1-5].

Razni "hibridi", odnosno kombinacije više obnovljivih izvora energije (OIE) ili čak korišćenje konvencionalnih sistema kao rezervno ili nužno napajanje, su se pokazali kao prihvatljivo rešenje u ovom slučaju. Kombinacije vetrogeneratora, fotonaponskih panela i/ili dizel generatora, sa ili bez punjivih

baterija, trenutno su u fokusu istraživanja i plasiraju se kao najviše isplativo i ekološki najprihvatljivije rešenje. Obzirom da je u ovim sistemima isporuka električne energije iz konvencionalnih izvora ograničena, a u nekim slučajevima ona nije ni moguća, jedino prihvatljivo rešenje napajanja se bazira na hibridnim sistemima. Ovi sistemi se iz prethodno opisanih razloga vezuju za nepristupačne, ruralne i udaljene oblasti, pa se u nekim navodima u literaturi ovi sistemi nazivaju udaljeni hibridni sistemi napajanja [6].

Hibridni sistemi koji se koriste u OIE mogu raditi samostalno ili su povezani na elektroenergetsku mrežu. U ovom drugom slučaju hibridni sistemi imaju brojne prednosti u poređenju sa sistemima sa jednim izvorom, pod uslovom da je elektroenergetska mreža raspoloživa. Usled intermitentne prirode OIE i njihove zavisnosti od uslova okoline i meteo uslova, hibridna kombinacija dva ili više OIE može značajno poboljšati performanse sistema. Neke od najbitnijih prednosti i praktične realizacije su date u literaturi [7, 8].

Glavni cilj u prethodno pomenutim sistemima je obezbediti tzv. „pametni“ protok energije u sistemu OIE, hibridnom sistemu napajanja i sl. Obično se ova optimizacija predviđa u prvoj početnoj fazi, dok se optimizacija ostvaruje u narednoj. Kontrolni sistemi koji se primenjuju u ovim slučajevima se mogu podeliti na (1) centralizovane, (2) distribuirane i (3) hibridne, a u svima njima se podrazumeva da svaki izvor energije poseduje svoj kontrolni sistem koji može da obezbedi optimalan rad odgovarajuće jedinice na osnovu odgovarajućih merenja i stvarnih informacija [9-11].

U okviru ovog rada je prikazana jedna konkretna realizacija sistema daljinskog nadzora i kontrole hibridnog postrojenja koje se koristi za navodnjavanje povrtnarskih kultura na privatnoj poljoprivrednoj parceli površine oko 10 ha u mestu Belegiš. Hibridni sistem navodnjavanja je baziran na dominantnom korišćenju OIE (sunca i vetra), uz korišćenje baterijske banke 48V/1000Ah i dizel-električnog agregata snage 7,5 kW kao pomoćnog izvora energije. Njegova uloga je da obezbedi napajanje potrošača u krajnjoj nuždi kada je baterijska banka ispražnjena a nivo snage OIE redukovao. U sklopu ovog sistema su realizovani svi potrebni elementi energetske elektronike (solarni i vetro MPPT punjači, invertori i frekventni regulator) koji su međusobno povezani komunikacionim interfejsima a celokupni upravljački sistem je baziran na lokalnom kontroleru kojim se vrši kontrola punjenja baterijske banke putem MPPT punjača, zatim kontrola rada invertora kao i akvizicija svih potrebnih merenja u sistemu hibridnog napajanja. Preko ETHERNET porta ovaj modul je povezan sa centralnim kontrolerom baziranom na *BEAGLEBONE BLACK* procesoru, koji kontroliše rad celokupnog postrojenja.

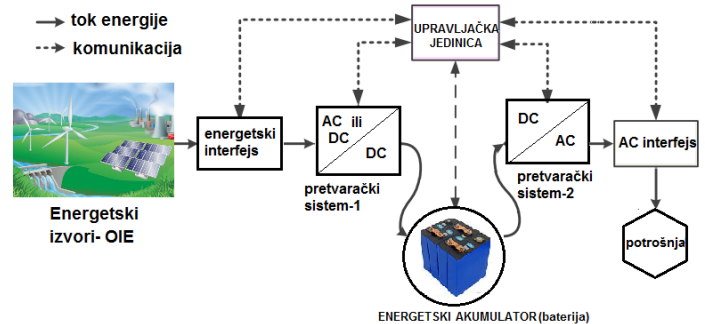
Centralni kontroler ima mogućnost prijema i slanja podataka daljinski preko GSM/GPRS modula putem koga je moguće pratiti sve relevantne parametre sistema, a takođe je moguće daljinski uključiti ili isključiti pojedine funkcionalne blokove i vršiti naprednu kontrolu sistema navodnjavanja.

U nastavku je dat kratak pregled tipova kontrole energije i tipova komunikacija, kao i prenosa podataka u tipičnim hibridnim sistemima napajanja.

II TIPOVI KONTROLE ENERGIJE I KOMUNIKACIJA U HIBRIDNIM SISTEMIMA

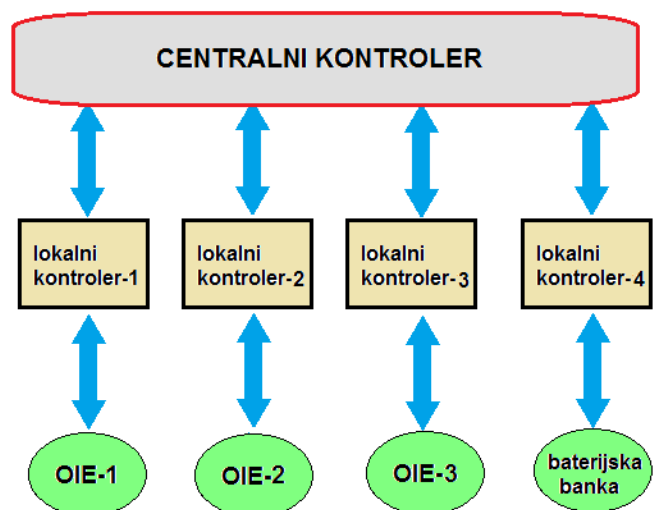
U ovom poglavlju su dati tipični blok dijagrami kontrolnih sistema koji se primenjuju u tipičnim hibridnim sistemima napajanja potrošača iz OIE.

Jedna tipična principna blok šema toka energije i komunikacija za hibridni sistem napajanja je data na Slici 1.



Slika 1. Blok šema sa energetske i komunikacione putanje u jednom tipičnom hibridnom sistemu sa OIE

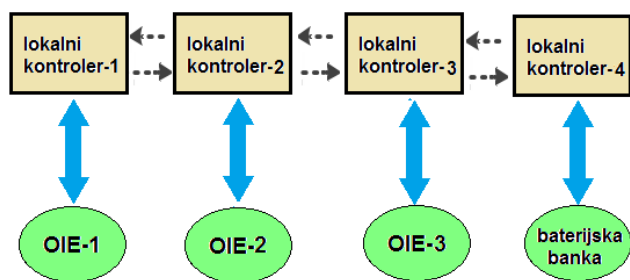
Principski prikaz centralizovanog sistema kontrole je dat na Slici 2. U ovom slučaju sistem se sastoji od jednog centralizovanog kontrolera i nekoliko lokalnih, svaki za različit tip OIE u sistemu i sistema za skladište (akumulaciju) energije. U ovoj konfiguraciji merni signali sa svih energetske izvora u hibridnom sistemu se šalju centralizovanom kontroleru. Centralizovani kontroler je u stvari nadređeni kontroler i on predstavlja u izvesnom smislu „energetski supervizor“, koji donosi odluke o kontrolnim radnjama na osnovu svih izmerenih signala i skupa unapred određenih ciljeva i zahteva uz uvažavanje odgovarajućih ograničenja koja postoje u sistemu OIE.



Slika 2. Centralizovana kontrola u hibridnom sistemu OIE

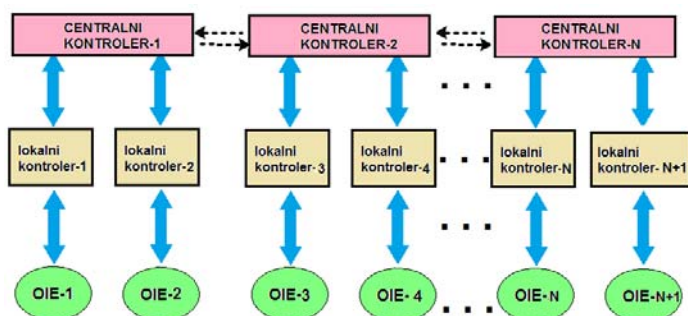
Distribuirana kontrola u hibridnom sistemu OIE je prikazana na Slici 3. Iz svakog od energetske izvora pripadajući lokalni kontroleri dobijaju odgovarajuće merene podatke. Lokalni kontroleri komuniciraju međusobno i daju odgovarajuće odluke u

cilju globalne optimizacije[12,13].



Slika 3. Distribuirana kontrola u hibridnom sistemu OIE

Principski, hibridna kontrola u hibridnom sistemu OIE je data na blok dijagramu na Slici 4. U suštini to je kombinacija dve prethodno opisane koncepcije, centralizovane i distribuirane. U takvoj konfiguraciji OIE su grupisani u okviru integrisanih sistema, u sklopu kojih se primenjuje centralizovana kontrola, dok se distribuiranom kontrolom koordinira svaka grupa. U ovakvoj hibridnoj šemi upravljanja, lokalna optimizacija se postiže centralizovanom kontrolom unutar svake grupe, dok se globalna koordinacija među različitim grupama postiže distribuiranom kontrolom [14].



Slika 4. Hibridna kontrola u hibridnom sistemu OIE

Optimalno upravljanje protokom energije među različitim OIE u hibridnom sistemu je neophodno obzirom da je izlazna snaga iz OIE intermitentna i da zavisi od nekoliko nekontrolisanih uslova (vreme, meteo uslovi, godišnje doba i sl.). Dinamička interakcija između različitih OIE i opterećenja često zahteva pažljivo proučavanje prolaznog odziva koji je karakterističan za ove sisteme.

III OPIS REALIZOVANOG SISTEMA DALJINSKOG NADZORA I KONTROLE HIBRIDNOG NAPAJANJA IZ OIE

Sistem daljinskog nadzora i kontrole hibridnog napajanja potrošača na parceli u Belegišu je prikazan na principskoj blok šemi na Slici 5. Na ovom prikazu je takođe data principska blok šema hibridnog napajanja sistema zalivanja (baziranog na suncu, vetru i DEA), koje se obezbeđuje posredstvom elektroenergetskih i pretvaračkih modula. Sistem napajanja je baziran na uređajima energetske elektronike u okviru koga su zastupljeni svi tipovi elektroenergetskog pretvaranja električne energije (DC/DC, DC/AC, AC/DC) [4,5],[15]. Optimizacija proizvodnje energije iz ovog hibridnog sistema je izvršena u

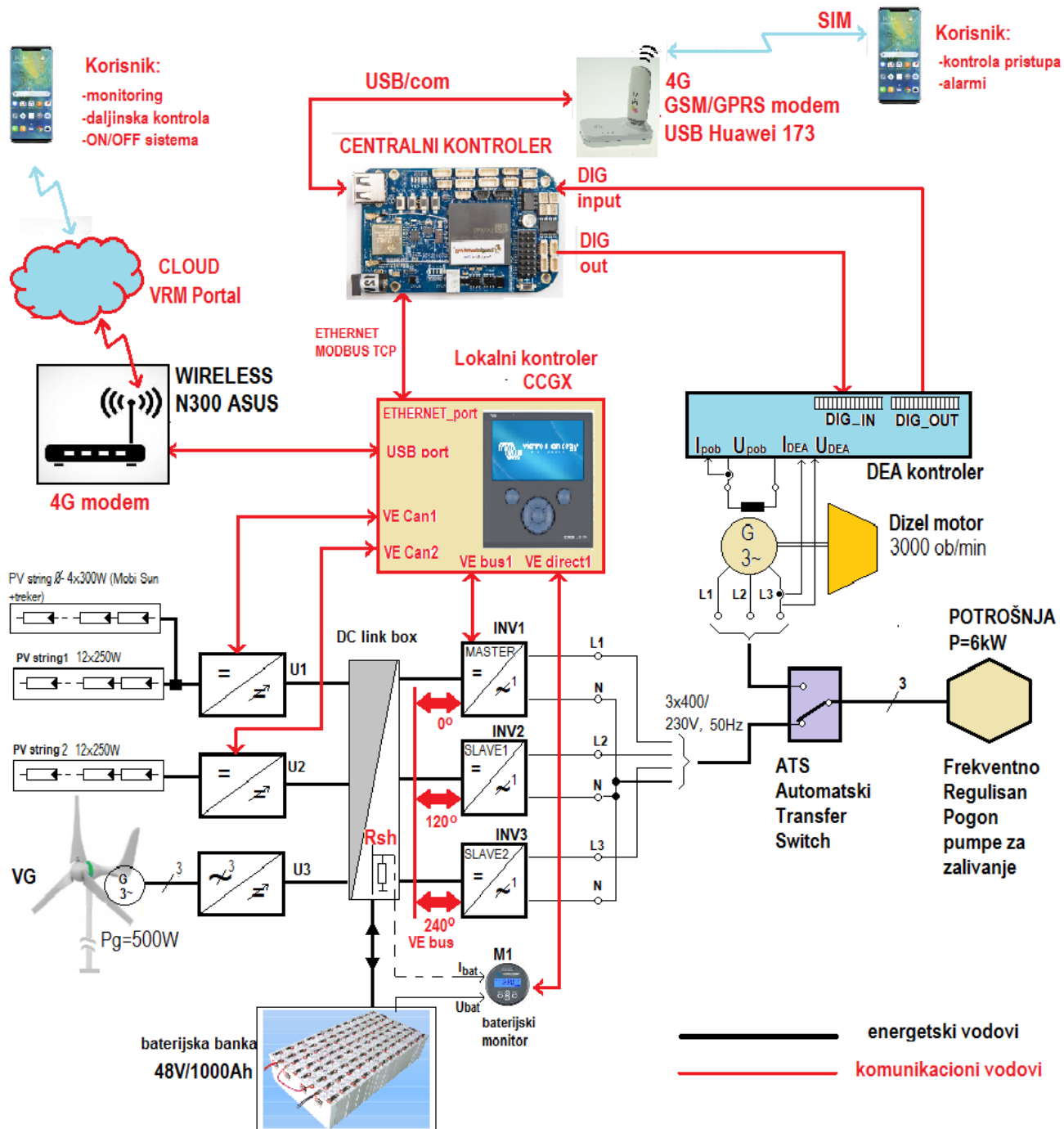
skladu sa sofisticiranim algoritmom koji je predložen u referenci [16]. U ovom radu akcenat je dat na opisu merno-upravljačkog dela sistema. Kontrolni modul kojim se vrši kontrola punjenja baterijske banke, kontrola rada invertora kao i akvizicija svih potrebnih merenja u sistemu hibridnog napajanja, je baziran na hardveru Color Control GX (CCGX) proizvodnje VICTRON. Preko ETHERNET porta ovaj modul je povezan sa centralnim računarom koji kontroliše rad celokupnog postrojenja. Ovaj računar je baziran na BEAGLEBONE BLACK B4 procesoru. Ovaj modul ima mogućnost prijema i slanja podataka daljinski putem GSM/GPRS modula, putem koga je moguće pratiti sve relevantne parametre sistema, a takođe je moguće daljinski uključiti ili isključiti pojedine funkcionalne blokove u sistemu.

U okviru baterijske banke je realizovan specijalan merni digitalni elektronski sklop napona i struje baterijske banke (tzv. „baterijski monitor“), baziran na modulu BMV702 proizvodnje VICTRON, na blok šemi na Slici 5 označen sa +M1. U mernom kolu baterijske banke se koristi energetske merni strujni šant Rsh (merni otpornik u DC sabirnoj priključnoj kutiji), osetljivosti 1mV/1A, za strujni opseg 0-500 A, kojim je obezbeđen monitoring i kontrola stanja baterijske banke. Napon napajanja na DC sabirnicama, kao i signal struje šanta Rsh se direktno vode na modul BMV702 preko UTP /RJ kabla. Ovaj modul je povezan sa kontrolnim modulom CCGX preko porta VE-direct1.

Napajanje CCGX uređaja je ostvareno sa baterijske banke 48Vdc. Opseg DC napajanja ovog modula je 8-70Vdc. Ovaj kontrolni modul ima nekoliko komunikacionih portova: VE-direct1 (preko njega je povezan baterijski monitor BMV702), VE-direct2 (u ovoj aplikaciji se ne koristi), VE-Bus1 (preko njega se ostvaruje komunikacija sa invertorskom grupom, tačnije sa MASTER invertorom INV-1), VE-Can1 (za komunikaciju sa MPPT punjačem U1), VE-Can2 (za komunikaciju sa MPPT punjačem U2). Modul CCGX ima nekoliko portova za povezivanje sa ruterima.

Na LCD displeju „baterijskog monitora“ BMV702 je moguće selektivno očitavati sledeće relevantne veličine: struju punjenja/praznjenja baterije izraženu u [A], napon baterije u [V], trenutnu raspoloživu i procenjenu energiju baterije do krajnje dubine praznjenja, izražene u [kWh], dubinu ispražnjenosti baterija izražene u [%], kao i stanje napunjenosti baterijske banke izražene u [%]. Statusi svih ovih veličina se šalju putem komunikacionog porta VE-direct na modulu CCGX, a sa njega putem ETHERNET konekcije na centralni računar. Centralni računar komunicira sa korisnikom (korisničkim mobilnim telefonom) putem pripadajućeg GSM/GPRS modema.

Kontrolno kolo svakog od invertora je realizovano sa dve povratne sprege, jedna po izlaznom naponu i druga po izlaznoj struji [17-21]. Signali povratne sprege po izlaznom naponu (označen sa V_{out}) i po izlaznoj struji (označen sa I_{out}) se dovode na analogne ulaze kontrolnog kola. Pored opisanih ulaza i izlaza svako od upravljačkih kola invertora ima komunikacioni port preko koga su povezani na zajednički komunikacioni BUS interfejs. Komunikacioni BUS je izveden kao *Can BUS*, pri čemu je ustanovljen i preciziran protokol po kojem „komuniciraju“ invertori. Pri ovome je veoma bitno da jedan od invertora bude MASTER, dok su ostala dva SLAVE1 i SLAVE 2.



Slika 5. Principalska blok šema kontrole i komunikacija u sklopu hibridnog napajanja potrošača u sistemu zalivanja na parceli u mestu Belegiš

U trofaznoj sprezi invertora koja je prikazana na Slici 5 se ostvaruje sinhronizacija invertora na takav način da su fazni pomeraji referentnih signala za upravljačka kola invertora SLAVE1 i SLAVE2 jednaka $\theta+120^\circ$ i $\theta-120^\circ$ respektivno, gde je θ fazni pomeraj MASTER upravljačkog kola. Uobičajeno je da se usvaja da je fazni pomeraj MASTER invertora $\theta=0^\circ$ [20, 21]. Ovaj inverter je putem VEBus komunikacionog porta povezan sa lokalnim kontrolerom CCGX.

Kao rezervni izvor trofaznog napajanja je izveden dizel električni agregat (DEA), koji je pogonjen dizel motorom maksimalne snage od oko 8kW pri brzini obrtanja od oko 3000 ob/min. DEA se koristi isključivo u režimu kada je snaga iz OIE značajno redukovana (u slučaju kada nema vetra i sunčeve insolacije) i kada je baterijska banka ispražnjena ispod dubine pražnjenja od 80% [22].

U slučaju potpunog pražnjenja baterijske banke i redukovane snage iz obnovljivih izvora predviđeno je automatsko uključenje trofaznog napajanja iz DEA putem automatske statičke sklopke (tzv. "Automatic Trasfer Switch"-ATS).

Kontroler DEA na osnovu merenih veličina (napon i struja pobude generatora, napon i struja statora generatora) obezbeđuje kontrolu struje pobude i izlaznih veličina; struje i napona. Digitalni ulazi ovog kontrolera su povezani sa dodatnim modulima DIG_IN i DIG_OUT u sklopu centralnog kontrolera baziranog na BEAGLEBONE BLACK procesoru.

Kontroler CCGX je preko USB komunikacije vezan sa WIRELESS ruterom, koji u stvari predstavlja 4G modem koji je povezan na korisnički CLOUD. Na ovaj način korisnik se putem Interneta loguje na određeni VRM portal i pristupa određenim podacima u sistemu, ali može vršiti i daljinski nadzor i uključenje ili isključenje ključnih delova sistema.

Centralni kontroler BEAGLEBONE BLACK je preko USB/com komunikacije vezan za GSM/GPRS USB modem, preko koga se putem odgovarajuće SIM kartice i putem mobilnog telefona mogu dobijati podaci o sistemu video nadzora, statusima kvarova, statusima u sistemu zalivanja i sl.

III EKSPERIMENTALNI REZULTATI DALJINSKOG NADZORA HIBRIDNOG NAPAJANJA ZA SISTEM NAVODNJAVANJA NA PARCELI „BELEGIŠ“

U ovom poglavlju su predstavljeni neki ključni eksperimentalni rezultati koji se odnose na daljinski nadzor i kontrolu, kao i bilanse proizvedene i potrošene električne energije na dnevnom nivou za karakteristične dane u mesecu Julu 2023. Eksperimentalni rezultati su dobijeni na osnovu logovanja podataka koje je ostvareno putem merno akvizicionog modula CCGX, odnosno putem CLOUD platforme na kojoj je dostupan VRM portal: <https://vrn.victronenergy.com/login>.

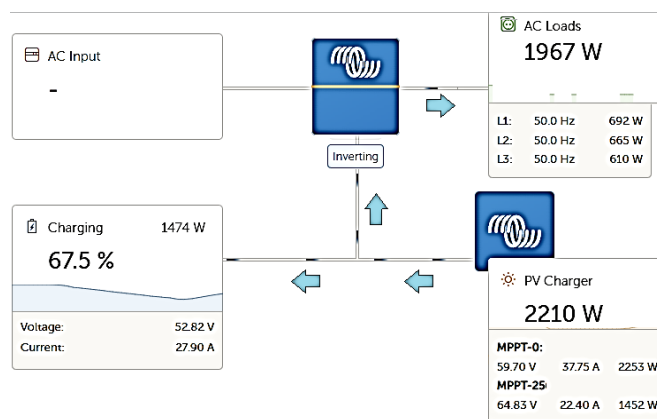
Merenja su vršena za karakteristične dane u Julu mesecu, tokom kojih je vršeno navodnjavanje na parceli u mestu Belegiš. U Tabeli 1 je dat spisak potrošača na ovoj poljoprivrednoj parceli u sistemu navodnjavanja povrtarskih kultura.

Tabela 1. Pregled potrošača električne energije na parceli „Belegiš“ [22]

Potrošač	Snaga (W)
Pumpno postrojenje sa frekventnim regulatorom	5300
Kontroler zalivanja	110
Sistem video-nadzora	100
Wireless ruteri (3 kom.)	30
GSM/GPRS modem (2 kom.)	60
Kola pomoćne elektronike u „stand by“ režimu	100
SUMARNO	5700

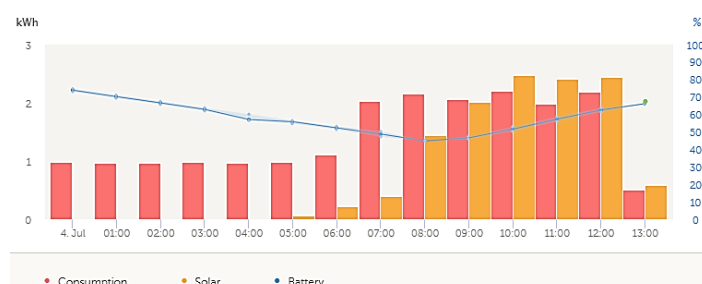
Na Slici 6 je dat grafički prikaz tokova snaga u hibridnom sistemu napajanja pumpnog agregata 5,5 kW, u sistemu navodnjavanja povrtarskih kultura za dan 4 jul 2023. Grafički prikaz je dobijen na osnovu učitavanja podataka sa VRM portala.

Uočava se AC ulaz nije aktivan (AC input=0) što znači da u sistemu nije radio DEA. U trenutku kada je izvršeno učitavanje energetskog stanja sistema (podaci se odnose za vreme 12:00h) trenutna proizvodnja iz solarnih panela je iznosila oko 3700W. Iz MPPT punjača-1 se na izlazu imala snaga 2253W (pri naponu 59,7 V i struji 37,75A), dok se na izlazu MPPT punjača -2 imala snaga 1452 W (pri naponu 64,83 V i struji 22,40 A). Deo od ove zbirne snage od 3700 W, tačnije u iznosu od 1474 W, se predaje baterijskoj banci (pri naponu baterije 52,82 V i struji punjenja baterije od 27,9 A). Stanje napunjenosti baterijske banke SOC% u ovom trenutku je iznosilo 67,5%. Deo snage koji se pri tome predaje DC/AC pretvaraču (invertoru), uz uvažavanje svih gubitaka koji postoje u DC razvodu hibridnog sistema, je 2210 W. Na izlazu invertora, odnosno na AC opterećenju se imala trofazna snaga u iznosu od 1967 W. Po fazama raspodela snage je bila: faza L1 - 692 W, faza L2 - 665 W, faza L3 - 610 W.



Slika 6. Grafički prikaz tokova snaga u sistemu za navodnjavanje na parceli u mestu Belegiš

Na Slici 7. je dat prikaz karakterističnih podataka, odnosno energija izraženih u kWh na dan 4. Jul 2023., i za vremenski interval od 00:00 h do 13:00 h. Prikazane su energija potrošnje, energija proizvodnje iz solarnih panela i energetska stanje baterije. Pored ovoga je dato stanje napunjenosti baterijske banke izraženo u %, odnosno dat je parametar SOC%.



Slika 7. Istorija podataka (potrošnja-solar-baterija) o energijama izraženim u kWh za 4 Jul 2023., za dnevni vremenski interval od 00:00 h do 13:00 h.

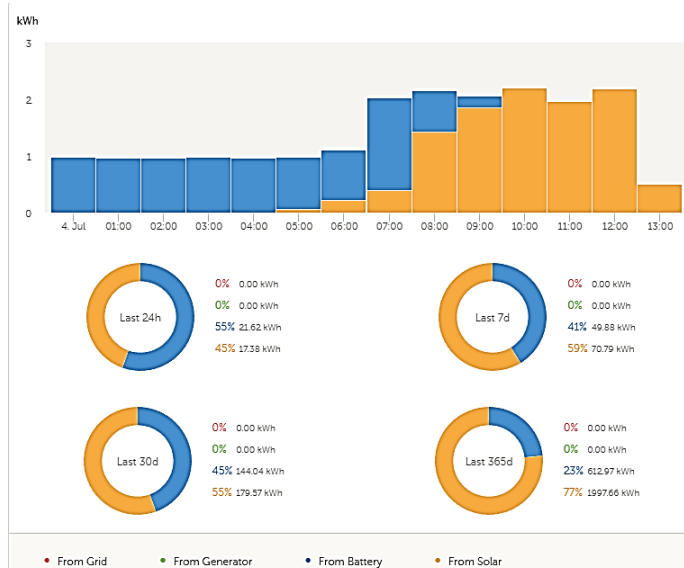
Sa dijagrama prikazanih na Slici 7 se uočava da u vremenskom intervalu 00:00h do 05:00h nema proizvodnje iz solarnih panela obzirom da se radi o periodu noć/svitanje. U tom intervalu se imala približno konstantna potrošnja od 1kW koja se odnosila na

„stand-by“ potrošnju uređaja energetske elektronike, frekventnog regulatora pumpe, sistema za zalivanje, sistema video nadzora i LED reflektora na parceli. Baterija se praznila sa početnih SOC%=80% na vrednost od oko SOC%=60% koja se imala u 05:00h ujutru. Od 05:00 h do 08:00 h se imala relativno mala proizvodnja energije iz solarnih panela, a potrošnja je u tom intervalu porasla sa 1 kW na 2,2 KW tako da je baterija ispražnjena dodatno za 10%, te je u ovom slučaju SOC%=50%. Počev od 09:00 h do 12:00 h dolazi do značajnije proizvodnje energije iz solarnih panela, tako da je pri potrošnji od oko 2,2 kW, napunjenost baterije porasla sa SOC%=50% na SOC%=70%. U intervalu od 12:00 h do 13:00 h je naišla intenzivna oblačnost tako da je i proizvodnja iz solarnih panela značajno opala, AC potrošači su bili usključeni. Treba napomenuti da i u ovom slučaju proizvodnja iz AC izvora, odnosno DEA je bila jednaka nuli, odnosno nije korišćen DEA.

Sumarno gledano u posmatranom intervalu je proizvodnja iz solarnih panela iznosila 12 kWh, a zahtevi za potrošnjom su iznosili 20 kWh. Iz tog razloga je baterijska banka bila opterećena i morala je da nadomesti razliku od 8 kWh, što je i razlog da je njen parametar SOC% na kraju posmatranog vremenskog intervala iznosio 70%, kao što pokazuje dijagram na Slici 7.

Na Slici 8 su date raspodele energije iz solarnih panela i baterijske banke za 4 Jul 2023., i to za vremenski interval od 00:00 h do 13:00 h. Žuti histogram se odnosi na proizvodnju iz solarnih panela, a plavi iz baterijske banke. Zbirni iznos ove dve energije odgovara AC potrošnji koja je iznosila 20 kWh.

Odnos energija iz solarnih panela i baterijske banke u posmatranom intervalu je iznosio 12 kWh/8 kWh.

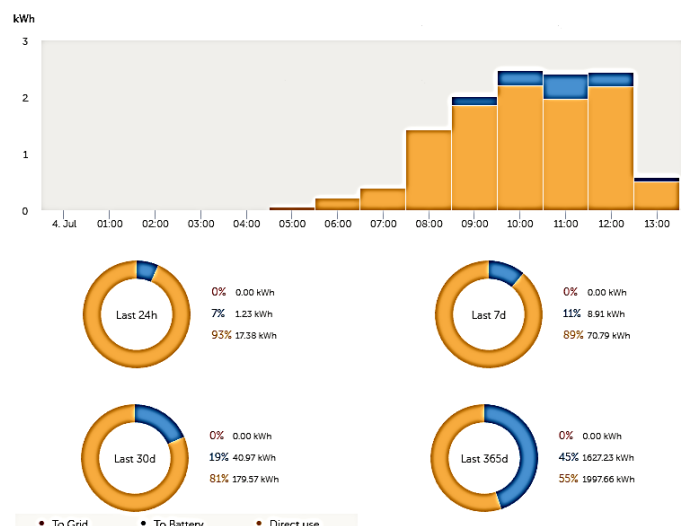


Slika 8. Raspodela energija dobijenih iz baterijske banke i solarnih panela izraženih u (kWh) za 4 Jul 2023., i za vremenski interval od 00:00 h do 13:00 h.

Na Slici 9 je dat prikaz raspodele energije dobijene iz solarnih panela u odnosu na energiju koja je utrošena za punjenje

baterijske banke, izražene u (kWh) za 4 Jul 2023., za vremenski interval od 00:00 h do 13:00 h.

Sa prikazanih dijagrama se uočava da je od 12 kWh koliko je iznosila proizvodnja solarnih panela, 1,2 kWh utrošeno na dopunu baterijske banke, a oko 11 kWh je direktno iskorišćeno za navodnjavanje.



Slika 9. Raspodela energije dobijene iz solarnih panela u odnosu na energiju koja je utrošena za punjenje baterijske banke, izražene u (kWh) za 4 Jul 2023., i za vremenski interval od 00:00 h do 13:00 h.

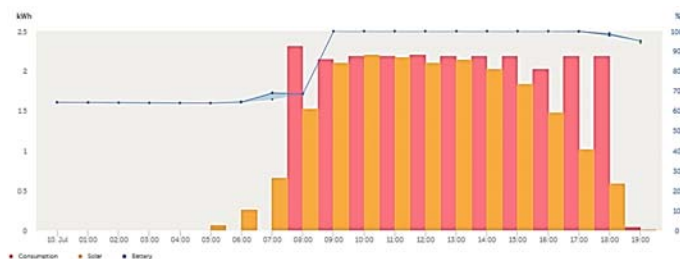


Slika 10. Istorija podataka (potrošnja-solar-baterija) o energiji izraženoj u kWh za 9 Jul 2023., u vremenskom intervalu od 00:00 h do 23:00 h.

Na Slici 10 je dat prikaz karakterističnih podataka, odnosno energija izraženih u (kWh) na dan 9 Jul 2023., za celodnevni interval od 00:00 h do 23:00 h, i to za sledeće energije: energija potrošnje, energija proizvodnje iz solarnih panela i energetska stanje baterije. Pored ovoga je dato stanje napunjenosti baterijske banke izraženo u %, odnosno dat je parametar SOC%. U Intervalu od 08:00 h do 18:00 h snaga potrošnje je iznosila oko 2,5 kW, sa jednim jasno izraženim pikom u 14:00 h kada je snaga iznosila 3,5 kW. U pomenutom intervalu proizvodnja iz solarnih panela je u dobrom delu podmirivala sve potrebe, a stanje baterijske banke, koja je bila prethodno napunjena 100%, se nije značajnije menjalo sve do 18:00 h kada je SOC% počeo da opada jer je proizvodnja iz solarnih panela značajnije bila redukovana.

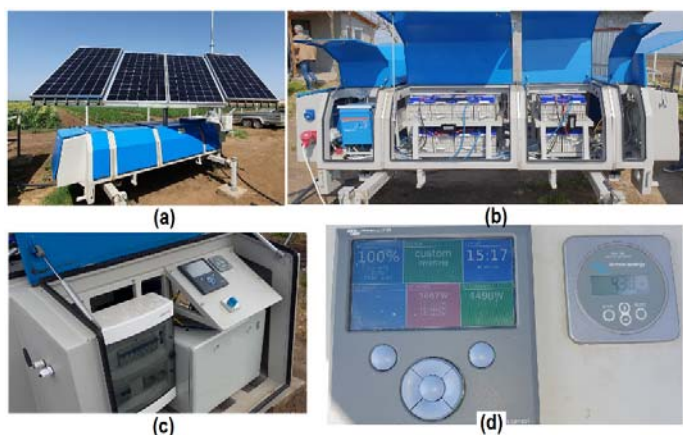
Za ovaj slučaj je interesantan deo intervala od 20:00h do 22:00h kada je vršeno navodnjavanje pojedinih kultura u noćnom periodu (ratarski zahtevi su bili takvi). U ovom intervalu je baterijska banka preuzela ulogu glavnog izvora energije, tako da je oko 23:00 h stanje napunjenosti baterije iznosilo SOC%=60%. U ovom slučaju ukupna potrošnja je iznosila 32 kWh, dok je proizvodnja iz solarnih panela iznosila 19 kWh, a razlika od 13 kWh je nadoknađena iz baterijske banke.

Nastavak režima navodnjavanja je ostvaren 10 jula 2023., tako da je na Slici 11 dat prikaz karakterističnih podataka, odnosno energija izraženih u (kWh) na dan 10 Jula 2023., za interval od 00:00 h do 19:00 h



Slika 11. Istorija podataka (potrošnja-solar-baterija) o energiji izraženoj u kWh za 10 Jul 2023., u vremenskom intervalu od 00:00 h do 19:00 h.

Sa dijagrama na Slici 11. se uočava da je u relativno kratkom vremenskom intervalu od 08:00 h do 10:00 h izvršena dopuna baterijske banke sa stanja napunjenosti od SOC%=65% na stanje napunjenosti SOC%=100%. Blagi pad stanja napunjenosti baterije se uočava nakon 17:00 h, kada je došlo do slabljenja intenziteta sunčevog zračenja, a zahtevi za navodnjavanjem su ostali približno isti kao za protekle vremenske intervale (približno konstantna potrošnja snage od 2,5 kW).



Slika 12. Baterijska banka i prateći uređaji; (a) izgled uređaja MSG sa 4 solarna panela ukupne snage 4x350W, (b) izgled baterijske banke sa pratećim uređajima energetske elektronike (DC7DC, DC/AC), (c) izgled merno upravljačkog pulta sa ugrađenim kontrolerom CCGX i baterijskim monitorom BMV702, (d) eksploatacioni prikaz parametara u radnom režimu hibridnog napajanja[22].

Na Slici 12. je dat prikaz dela realizovanog hibridnog sistema OIE i baterijske banke, kao i pripadajućeg kontrolnog pulta sistema na kojem se nalazi CCGX kontroler, putem koga je posredstvom odgovarajućih modema obezbeđen daljinski prenos podataka i povezivanje na CLOUD platformu (odnosno VRM portal). Na Slici 12(a) je prikazan uređaj Mobilni Solarni Generator (MSG), koji je u ovom slučaju stacioniran na parceli i iskorišćen kao dodatni izvor energije iz 4 solarna panela snage 350 W, koji su montirani na elektromehaničkom kretnom sistemu [22]. Takođe, ovaj uređaj obezbeđuje smeštaj baterijske banke 48V/1000Ah čiji je izgled dat na Slici 12(b). Na Slici 12(c) je prikazan upravljački pult na kome je montiran kontroler CCGX, dok su glavni računar baziran na BEAGLEBONE BLACK procesoru, ruteri, modemi GSM/GPRS i ostala prateća upravljačka i telekomunikaciona oprema smešteni u unutrašnjosti upravljačkog pulta. Na Slici 12(d) je dat prikaz displeja CCGX modula i displeja baterijskog monitora koji obezbeđuje odgovarajuća merenja i nadzor baterijske banke i na osnovu njih putem komunikacionog porta šalje podatke u CCGX.

IV ZAKLJUČAK

U radu je dat pregled tipova nadzora i kontrole u hibridnim sistemima napajanja koji sadrže više OIE i baterijsku banku. Obzirom da je ova oblast postala vrlo popularna u oblasti primene hibridnih sistema napajanja i naročito u sistemima navodnjavanja poljoprivrednih parcela, u radu je dat detaljniji opis jednog predloženog rešenja daljinskog nadzora i kontrole na konkretnoj parceli - videti filmski prikaz na linku: https://www.youtube.com/embed/fl_gVfaVCNY?start=00&end=138.

Predloženo rešenje je omogućilo korisniku da putem GSM/GPRS mreže putem mobilnog telefona i sa udaljene tačke vrši nadzor, uključivanje i isključivanje sistema. Takođe, deo podataka se prebacuje na VRM portal koji se nalazi na CLOUD-u i na taj način je putem Interneta moguće dobijati pojedine podatke iz sistema.

Na kraju su prikazani snimci razvijenog prototipa kontrolnog i komunikacionog dela, kao i ključni eksperimentalni rezultati dobijeni na realizovanom sistemu, praćenjem putem VRM portala.

Rezultati predstavljeni u ovom radu su deo projekta Instituta „Mihajlo Pupin“, "Pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem i prirodnim resursima korišćenjem savremenih tehnologija". Projekat je podržan od strane Razvojne agencije Ujedinjenih Nacija (UN) i Ministarstva zaštite životne sredine Republike Srbije.

Realizovano tehničko rešenje je nagrađeno je kao jedno od 11 najboljih inovativnih i klimatski pametnih rešenja u okviru programa "Lokalni razvoj otporan na klimatske promene" koji Program Ujedinjenih nacija za razvoj (UNDP) sprovodi u partnerstvu sa Ministarstvom zaštite životne sredine, uz finansijsku podršku Globalnog fonda za životnu sredinu (GEF).

Pored Instituta „Mihajlo Pupin“, na projektu je učestvovao i Institut za ekonomiku poljoprivrede - IEP, Beograd, čiji su

saradnici dali značajan doprinos u proceni ekonomske održivosti i detaljnoj izradi tehno-ekonomske analize celokupnog projekta.

Implementacijom daljinskog sistema nadzora i kontrole sistema hibridnog napajanja i sistema za navodnjavanje upotrebom OIE, koji je opisan u ovom radu je dat doprinos u učešću postizanja potpune samoodrživosti sistema navodnjavanja na jednoj konkretno realizovanoj *Smart Land*® poljoprivrednoj parceli u mestu Belegiš.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je delom podržano od strane *Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija*, Republike Srbije kroz u krovni projekat pod Ugovorom br. 451-03-47/2023-01/200103.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Fakham, H., Lu, D., Francois, B. Power Control Design of a battery charger in a Hybrid Active PV generator for load following applications, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 1, pp. 85-94, 2011. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2062475>
- [2] Omar, M.A., Mahmoud, M.M. Design and simulation of a PV system operating in grid-connected and stand-alone modes for areas of daily Grid blackouts, International Journal of Photoenergy, Vol. 2019, 5216583, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5216583>
- [3] Delille, G., François, B. A review of some technical and economic features of energy storage technologies for distribution system integration, Ecological engineering and environment protection, vol. 1, pp. 40-48, 2009. https://www.researchgate.net/publication/228360862_A_review_of_some_technical_and_economic_features_of_energy_storage_technologies_for_distribution_system_integration [pristupljeno 13.02.2023]
- [4] Despotović, Ž., Tajdić, M., Kon, J. Hibridno napajanje telekomunikacione opreme daljinskih mernih stanica u sistemima zaštite od poplava, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 22, No. 1-2, pp. 102-111, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.102D>
- [5] Batic, M., Vitorovic, A., Despotovic, Z. The Consideration of Optimal Control Algorithms for Hybrid Renewable Energy Systems, in Proc. 16. International Conference YU INFO 2010, Kopaonik, Vol. 1/2010, 03-06. Mart 2010. https://www.pupin.rs/RnDProfile/pdf/despotovic-publ_37.pdf [pristupljeno 17.02.2023]
- [6] Barley, C.D., Winn, C.B., Flowers, L., Green, H.J. Optimal control of remote hybrid power systems Part I: simplified model, NREL, Colorado, 1995.
- [7] Esfahani, I.J., Ifaei, P., Kim, J., Yoo, C.K. Design of hybrid renewable energy system with battery/hydrogen storage considering practical power losses: A MEPoPA (Modified Extended-Power Pinch Analysis), Energy, vol. 100(C), pp. 40-50, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.074>
- [8] Nehrir, M.H., Wang, C., Strunz, K., Aki, H., Ramakumar, R., Bing, J., Miao, Z., Salameh, Z. A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: configurations, control and applications, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 2, No. 4, pp. 392-403, 2011. <https://doi.org/10.1109/TSST.2011.2157540>
- [9] Upadhyay, S., Sharma, M.P. A review on configurations, control and sizing methodologies of hybrid energy systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 38, pp. 47- 63, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.057>
- [10] Dimeas, A.L., Hatziaargyriou, N.D. Operation of a multiagent system for microgrid control, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, pp. 1447-55, 2005. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.852060>
- [11] Chauhan, A., Saini, R.P. A review on integrated renewable energy system based power generation for stand-alone applications: configurations, storage options, sizing methodologies and control, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 38, pp. 99-120, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.079>
- [12] Ko, H., Jatskevich, J. Power quality control of wind hybrid power generation system using fuzzy-LQR controller, IEEE Trans. Energy Convers., Vol. 22, No. 2, pp. 516-527, 2007. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.858092>
- [13] Hajizadeh, A., Golkar, M.A. Fuzzy neural control of a hybrid fuel cell/battery distributed power generation system, IET Renewable Power Generation, Vol. 3, No. 4, pp. 402-414, 2009. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2008.0027>
- [14] Jiang, Z., Dougal, R. Hierarchical microgrid paradigm for integration of distributed energy resources, in Proc. IEEE Power and energy society general meeting - Conversion and delivery of electrical energy in the 21st century, Pittsburgh, PA, USA, 20-24 July 2008, pp. 1-8, 2008. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596185>
- [15] Despotović, Ž.V., Stevanović, I.R. Hibridni besprekidni sistem napajanja za navodnjavanje povrtarskih kultura na parceli Grabovac-Obrenovac, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 23, No. 2, pp. 17-25, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.17D>
- [16] Ristić, V., Rajaković, N. Primena Lagranžove optimizacije na problematiku proizvodnje energije iz obnovljivih izvora, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 22, No. 1-2, pp. 145-152, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.145R>
- [17] Dahono, P.A., Tarayana, E. A New Voltage Control Method for Single-Phase PWM Inverters, Journal of Engineering and Technological Sciences, Vol. 43, No. 2, pp. 139-152, 2011. <https://doi.org/10.5614/itbj.eng.sci.2011.43.2.5>
- [18] Monfared, M. A simplified control strategy for single phase UPS inverters, Bulletin of The Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, Vol. 62, No.2, 2014. <https://doi.org/10.2478/bpasts-2014-0037>
- [19] Lazzarin, T.B., Bauer, G.A.T., Barbi, I. A Control Strategy for Parallel Operation of Single-Phase Voltage Source Inverters: Analysis, Design and Experimental Results, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 6, pp. 2194-2204, 2013. <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2193856>
- [20] Despotović, Ž.V., Jovanović, M.D., Stevanović, I., Majstorović, M. Sprezanje i sinhronizacija grupe invertora u "OFF-grid" mobilnom solarnom sistemu, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 18, No. 3-4, pp. 252-260, 2016.
- [21] Majstorović, M., Despotović, Ž.V., Mršević, D., Đurić, B., Milešević, M., Stević, Z. Implementation of MPPT methods with SEPIC converter, in Proc. 19th International IEEE Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) 2020, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 18-20 March 2020. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH48170.2020.9066296>
- [22] Despotovic, Ž., Rodić, A., Stevanović, I.R. Sistem napajanja i pametno upravljanje poljoprivrednim zemljištem korišćenjem obnovljivih izvora energije, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 28-39, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.28D>

AUTORI/AUTHORS

dr Željko V. Despotović - naučni savetnik, Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
msr Ilija R. Stevanović - master inž. mašinstva, Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, ilija.stevanovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-4862-0375](https://orcid.org/0000-0003-4862-0375)
msr Jovan Šumarac - master inž. elektrotehnike, Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu, jovan.sumarac@pupin.rs, ORCID [0000-0002-2924-4813](https://orcid.org/0000-0002-2924-4813)

Analiza uticaja buke u fazi izgradnje i eksploatacije parka vetroelektrana na lokalitetu Kostolca

Analysis of the Impact of Noise during the Construction and Exploitation Phase of the Wind Farm Park in Kostolac

Nikola Stanković

Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“, Balkanska 13, 11 000 Beograd

Rezime - Planirani projekat predstavlja izgradnju kompleksa vetroelektrane Kostolca na prostorima spoljnih odlagališta i jalovišta u Kostolcu, nastala kao posledica rudarskih aktivnosti. Predviđeno je pozicioniranje 20 vetroelektana pojedinačne snage 3,3 MW, tako da je ukupna instalisana snaga 66 MW. Urađena je celokupna investiciona-tehnička dokumentacija koja obuhvata studiju o proceni uticaja projekta na životnu sredinu po nacionalnim zakonodavnim zahtevima kao i međunarodnu studiju o proceni uticaja na životnu sredinu i društvo po zahtevima Nemačke razvojne banke. U radu je data analiza uticaja buke u fazi izgradnje i eksploatacije vetroparka. Primenom mera datih kako u nacionalnoj tako i u međunarodnoj studiji efekti uticaja buke biće minimizirani. Takođe, na osnovu modelovanja i analize intenziteta buke došlo se do zaključka da su mogući uticaji buke od vetroturbine značajno ispod zakonski definisanih nivoa.

Cljučne reči - Vetroelektrana Kostolac, buka, modelovanje, izgradnja, eksploatacija, mere zaštite životne sredine

Abstract - The planned project represents the construction of the Kostolac wind farm complex on the premises of external landfills and tailings in Kostolac, created as a result of mining activities. The positioning of 20 wind turbines with an individual power of 3,3 MW is planned, so that the total installed power is 66 MW. The entire investment-technical documentation was prepared, which includes an environmental impact assessment study (EIA) of the project's according to national legislative requirements, as well as an international study assessment of the impact on the environment and society (ESIA) according to the requirements of the German Development Bank. The paper provides an analysis of the impact of noise during the construction and exploitation phase of the wind farm. By applying the measures given in both national and international studies, the effects of noise will be minimized. Also, based on the modelling and analysis of the noise intensity, it was concluded that the possible impacts of noise from the wind turbine are significantly below the legally defined levels, and it is estimated that the noise intensity will be reduced to the limits provided by the legislation.

Index Terms - Kostolac Wind Power Plant, Noise, Modelling,

Construction, Exploitation, Environmental protection measures

I UVOD

Nacionalnim i međunarodnim dokumentima je definisan osnov za korišćenje obnovljivih izvora energije. U Republici Srbiji energija vetra se može iskoristiti u oblasti košavskog područja, južnog Banata, područja istočne Srbije, istočne strane Kopaonika, područje Zlatibora i Peštera i lokaliteta planinskih prevoja na nadmorskim visinama iznad 800 m [1]. Jedan od strateških pravaca delovanja, naznačeni u nacionalnoj strategiji razvoja energetike Republike Srbije, jeste povećanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije gde pripada i energija vetra [1]. Takođe, jedan od ciljeva jeste da proizvodnja i potrošnja energije imaju što manje negativnih uticaja na životnu sredinu, vodu, vazduh, zemljište, posredno i na čitav lanac ishrane, biodiverzitet i ljudsko zdravlje [1]. Pored pozitivnih uticaja korišćenja energije vetra mogući su i određeni negativni uticaji tokom izgradnje i korišćenja vetroelektrana na životnu sredinu. Mogući negativni uticaji vetroelektrane na životnu sredinu su sledeći [2]:

- uticaj na ornitofaunu i hiropterofaunu,
- uticaj na povećanje intenziteta buke i vibracija,
- uticaj treperenje senki,
- uticaj na predeo,
- uticaj u slučaju akcidentih situacija.

U radu je data analiza uticaja buke tokom perioda izgradnje i eksploatacija budućeg parka vetroelektrana na lokalitetu Kostolac. Jedan od instrumenta za zaštitu životne sredine koji ima najrasprostranjeniju primenu u proceni uticaja na životnu sredinu, ne samo za vetroelektrane, već za sve druge razvojne projekte jeste studija o proceni uticaja projekata na životnu sredinu (engl. Environmental Impact Assessment-EIA) koja je urađena na osnovu važećeg Zakona o proceni uticaja na životnu sredinu i za koju je dobijena saglasnost od nadležnom Ministarstva za zaštitu životne sredine. Pored nacionalne studije, za projekat izgradnje vetroelektrana u Kostolcu, na osnovu zahteva Nemačke razvojne banke (KfW) urađena je i međunarodna studija odnosno procena uticaja na životnu sredinu i društvo (engl. Environmental and Social Impact Assessment - ESIA).

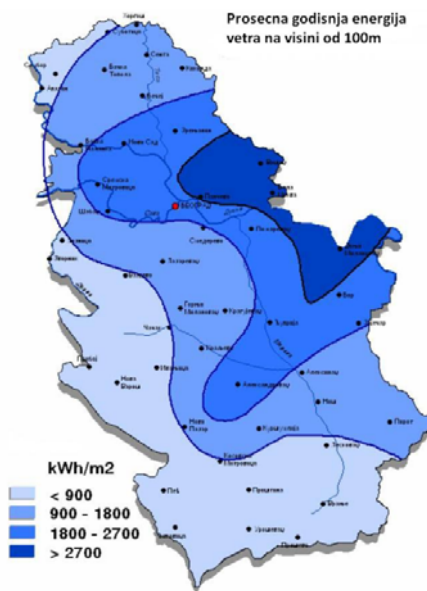
II OPIS LOKACIJE

Prostorni plan područja posebne namene (PPPN) Kostolačkog ugljenog basena definiše potencijalne lokacije na kojima je moguće izgraditi vetroelektrane [3].



Slika 1. Položaj kostolačkog basena na karti Srbije [4]

Područje istraživanja pripada zoni gde prosečna godišnja energija vetra na visini od 100 m iznad tla iznosi od 1800 kWh/m² do 2700 kWh/m² i više. U manjem severoistočnom delu područja se nalazi međunarodno značajno područje za ptice-Labudovo oko i Deliblatska peščara dok je ostali deo basena industrijalizovan te postoje pozitivne okolnosti za instalisanje novih elektroenergetskih kapaciteta [4].



Slika 2. Prosečna godišnja energija vetra (kWh/m²) na visini od 100 m [2]

Ograničenja lokaliteta se ogledaju kroz zastupljena naseljena mesta u smislu uticaja buke vetrogeneratora. Dodatna ograničenja su geologija terena kroz nosivost zemljišta, moguća

arheološka nalazišta, velike površine koje su obeležene kao zone za istraživanje i eksploataciju uglja i kompleksna struktura imovinsko-vlasničkih odnosa [4]. Ipak generalnim projektom sa prethodnom studijom opravdanosti odabrane su 4 potencijalne lokacije za izgradnju parka vetroelektrana i to su: Klenovnik, Petka, Ćirikovac i Drmno. Na slici broj 3., prikazane su lokacije sa obeleženim granicama interesne zone za postavljanje parkova vetroelektrana, naseljena područja i procena zone u kojoj vetrogeneratori emituju nedozvoljeni nivo buke. Na osnovu prikazane slike, može se uočiti da je lokalitet Drmno dovoljno udaljen od naseljenog područja i da nema ograničenja u pogledu izgradnje vetroelektrana [4]. Lokaliteti Petka i Ćirikovac su delimično u području u kojima bi postavljanje vetrotrubine moglo prekoračiti dozvoljeni nivo buke, a lokalitet Klenovnik je najvećom površinom u zoni koja se može smatrati nepovoljnom [4].

Što se tiče potencijala za postavljanje vetroelektrana, najbolji potencijal ima lokacija Drmno, zatim Klenovnik, pa Petka i konačno Ćirikovac (Slika 4) [4]. Kompleks vetroelektrane sa nalazi dominantno na prostorima spoljnih odlagališta i jalovišta u Kostolcu koja su nastala kao posledica rudarskih aktivnosti. Sve funkcionalne celine vetroelektrane nalaze se na teritoriji opštine Požarevac, u okviru katastarskih opština Bradarac (lokalitet Drmno), Klenovnik (deo lokaliteta Petka i deo lokaliteta Klenovnik), Ćirikovac (deo lokaliteta Petka i ceo lokalitet Ćirikovca) i Kostolac selo (deo lokaliteta Klenovnik) [5].

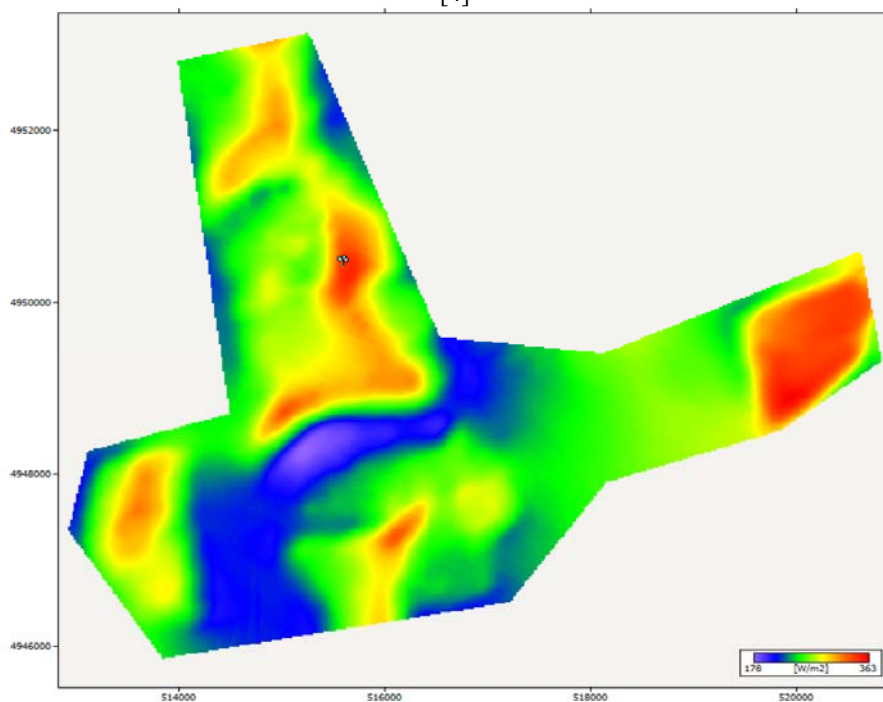
Lokacija Klenovnik predstavlja prirodni deo terena, odnosno Požarevačku gredu koja se na zapadnom delu graniči sa zatvorenim površinskim kopom „Klenovnik“, a na krajnjem jugu sa zatvorenim površinskim kopom „Ćirikovac“. Teren je blago zatalasan sa najvišom kotom oko 174 m.n.v. [4]. Na lokaciji je pored poljskih zemljanih puteva prisutna travna, žbunasta i drvenasta vegetacija. U neposrednoj blizi ove lokacije nema naseljenih mesta. Najbliže naseljeno mesto je Klenovnik, koje je udaljeno oko 1,3 km od ivice lokacije [4]. Lokacija Petka nalazi se istočno od istoimenog naselja u neposrednoj blizini površinskog kopa „Ćirikovac“ i obuhvata površinu od oko 2,64 km² [4]. Lokacija predstavlja izuzetno uspešan primer rekultivacije zemljišta i karakteriše ga obimna vegetacija (šuma), a uočavaju se i obradive površine [4]. Najbliže naseljeno mesto je Petka, koje je udaljeno oko 0,7 km od ivice lokacije [4]. Lokacija Ćirikovac nalazi se na aluvijalnoj ravni reke Mogile, zapadno od toka reke Mlave i istočno od naselja Klenovnik i Kostolac [4]. Lokacija predstavlja spoljno i delom unutrašnje odlagalište jalovine Površinskog kopa „Ćirikovac“ [4]. Obuhvata površinu od oko 1,7 km². Lokacija je obrasla niskim rastinjem, teren je relativno nepregledan i ne uočavaju se obradive površine [4]. U neposrednoj blizini ove lokacije nema naseljenih mesta. Najbliže naseljeno mesto je Ćirikovac, koje je udaljeno oko 1 km od ivice lokacije [4]. Lokacija Drmno nalazi se južno od Površinskog kopa „Drmno“, a istočno od naselja Bradarac [4]. Obuhvata površinu oko 2,4 km². Ova lokacija nalazi se na spoljašnjem odlagalištu jalovine koje je formirano u vidu etaža, kosina i kupastih nagomilanja, različitih širina i visina [4]. Po završetku odlaganja jalovine, lokacija je rekultivisana. U neposrednoj blizini lokacije nema naseljenih mesta. Najbliže naseljeno mesto je Bradarac, udaljeno oko 1,2 km od ivice lokacije [4]. Pojava buke na predmetnom području se vezuje sa

redovnim radom TE Kostolca B, kao i od saobraćajnica koja povezuju naselja u zoni vetroelektrana i neznatnom delom od transportne trake uglja [5]. Izmerene najviše vrednosti buke su

na mernom mestu TEKO B-Viminacijum, dok na mernim mestima „FIO Minel“ i „put ka Kličevcu“ izmerene vrednosti buke ne prelaze 50 dBA [5].



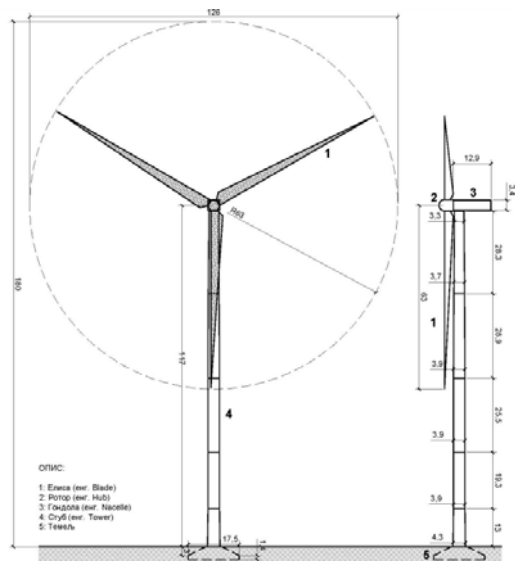
Slika 3. Lokalizacija od interesa u okviru PPPN Kostolačkog ugljenog basena: Klenovnik, Petka, Ćirikovac i Drmino [4]



Slika 4. Mapa gustine snage vetra u zoni interesa Kostolačkog ugljenog basena na visini 90 m od tla, prostorne rezolucije 20 m. [4]

III OPIS PROJEKTA

Kompleks vetroelektrane se sastoji od sledećih funkcionalnih podcelina: vetroagregati koji predstavljaju generatorske jedinice (sastoje se od rotora, gondole, tornja i temelja, naponskog nivoa 690V/35kV), unutrašnje kablovske mreže (podzemni kablovski vodovi naponskog nivoa 35kV), trafo stanice 35/110kV sa komandnom i upravnom zgradom (preko koje se vetroelektrana priključuje na prenosni sistem radi plasmana proizvedene električne energije i odakle se upravlja radom elektrane) i pristupnih puteva (fizički pristup radi transporta opreme, izgradnje i montaže opreme vetroagregata i trafo-stanice; može se poklapati sa trasom unutrašnje kablovske mreže delimično ili u potpunosti) [5]. U kontekstu navedenog, može se konstatovati da se kompleks vetroelektrane sastoji od infrastrukturnih objekata za proizvodnju električne energije (vetroagregati), objekata za prenos električne energije (unutrašnja kablovska mreža i trafo stanica sa upravnom i komandnom zgradom) i saobraćajnih objekata (pristupnih saobraćajnica) [5]. Stubovi i temelji vetroagregata, čija visina može varirati u zavisnosti od izabranog tipa, su ključni objekti kod vetroelektrana [5]. Vetroelektrana na četiri spomenute lokacije, se sastoji od ukupno 20 vetroagregata čija visina ose rotora iznosi 117 metara, a ukupna visina sa elisom u vertikalnom položaju iznosi 180 metara (Slika 5.) [5]. Sedam vetrogeneratora se nalazi na katastarskoj opštini Bradarac, četiri na katastarskoj opštini Klenovnik, šest na katastarskoj opštini Ćirikovac i tri na katastarskoj opštini Kostolac selo [5].



Slika 5. Dispozicija tipskog vetroagregata [5]

IV ANALIZA UTICAJA BUKE U FAZI IZGRADNJE I MERE ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE

U fazi izgradnje vetroelektrane identifikovane su sledeće aktivnosti koje mogu imati nepovoljne uticaje na životnu sredinu [4]:

- priprema terena za izgradnju vetroelektrane,
- izgradnja pristupnih puteva za svaki vetrogenerator,
- izgradnja temeljnih ploča za svaki vetrogenerator,

- doprema osnovne i pomoćne opreme,
- montaža osnovne i pomoćne opreme,
- izgradnja potrebnih infrastrukturnih objekata i zgrada,
- puštanje u pogon i probni rad.

Kod analize uticaja buke od jednog ili više izvora važne su sledeće činjenice [4]:

- intenzitet-nivoa buke se smanjuje sa povećanjem rastojanja od izvora,
- kod više izvora buke srazmerno se povećava energija zvučnog talasa,
- ukoliko postoje dva izvora u jednom prostoru, najveći ukupni nivo buke će da bude jednak nivou buke jačeg izvora,
- izvori sa jednakim nivoom buke proizvode neznatno veći ukupni nivo buke, (npr. dva izvora sa nivoom od po 60 dB daju ukupni nivo buke u prostoru oko 63 dB),
- ljudsko uvo može da razlikuje zvuke čija se jačina razlikuje minimalno sa 3 dB.

Tabela 1. Aktivnosti na projektu u fazi izgradnje i analiza uticaja buke [5]

Aktivnosti na projektu	Predviđeni faktor uticaja - Buka
Rad građevinskih mašina	3/L/I/P
Izgradnja internih saobraćajnih površina	2/L/I/P
Izgradnja trafostanice	2/L/I/P
Temeljenje-fundiranje stubova	2/L/I/P
Postavljanje vetroturbina	2/L/I/P
Postavljanje kablova	1/L/M/P
Realizacija privremenog pretovarnog mesta	1/L/M/P

U tabeli 1, date su aktivnosti na projektu tokom faze izgradnje kao i predviđeni faktor uticaja na životnu sredinu u ovom slučaju buke. Svaka od aktivnosti je ocenjivana prema veličini uticaja od 0 do 5, gde je (0 – nema uočljivo dejstvo, 1-nisko dejstvo, 2-tolerantno dejstvo, 3-srednje visoko dejstvo, 4-visoko dejstvo, 5- vrlo visoko dejstvo). Zatim prema značaju uticaja od L do M (L- uticaj ograničen na lokaciju, O- uticaj od značaja za opštinu, R- uticaj regionalnog karaktera, N-uticaja nacionalnog karaktera, M- uticaja prekograničnog karaktera). Dodatno prema verovatnoći uticaja od M do I (M – uticaj je moguć, verovatnoća manja od 50 %, V – uticaj je verovatan, verovatnoća preko 50 % i I-uticaj izvestan, verovatnoća 100 %) i vremenu trajanja uticaja od P kao povremeni ili privremeni do D kao dugotrajni ili trajni. Aktivnosti su poredane u opadajućem nizu prema veličini uticaja tako da je aktivnost rad građevinski mašina okarakterisan sa brojem 3 odnosno da ova aktivnost ima srednje visoko dejstvo. Dok ostale aktivnosti, izgradnja internih saobraćajnica površina, izgradnja trafostanice, temeljenje-fundiranje stubova i postavljanje vetroturbina imaju tolerantno dejstvo, a postavljanje kablova i realizacija privremenog pretovarnog mesta imaju nisko dejstvo. Kod aktivnosti, rad građevinskih mašina, izgradnja internih

saobraćajnih površina, izgradnja trafostanice, temeljenje-fundiranje stubova i postavljanje vetroturbina, uticaj je izvestan sa verovatnoćom od 100 %, dok aktivnosti, postavljanje kablova i realizacija privremenog pretovarnog mesta imaju moguć uticaj sa verovatnoćom manjom od 50 %. Sve aktivnosti imaju uticaj ograničen na lokaciju sa povremenim trajanjem. U Studiju o proceni uticaja na životnu sredinu su spomenute još dve aktivnosti, korišćenje materijala za izgradnju i postupanje sa otpadnim materijama, koje nisu ocenjene odnosno nemaju uticaja na generisanje buke. Tako da tokom faze izgradnje vetroelektrana mogu se očekivati manji negativni uticaji na povećanje nivoa buke. Ovi uticaji su posledica rada građevinskih mašina i ovakvi uticaji imaju lokalni karakter i povremeno se manifestuju. Za kontrolu i minimiziranje negativnih uticaja buke u fazi izgradnje planiranih i pratećih objekata, IEA [5] i ESIA [9], predlažu su sledeće mere:

- Obavezno je ispoštovati sve pribavljene uslove nadležnih institucija i mere koje su na osnovu njih ugrađene u predmetni Projekat.
- Za vreme izvođenja radova na izgradnji objekata, radi zaštite zdravlja i života ljudi, moraju se sprovesti sve mere zaštite na radu propisane za predviđenu vrstu radova.
- Kretanje mehanizacije i vozila tokom izgradnje ograničiti na projektovane površine saobraćajnica i pristupnih puteva.
- Tokom realizacije projekta ostvariti zaštitu od buke dobrom organizacijom gradilišta i korišćenjem mehanizacije koja ne stvara veliku buku.
- Izgradnju objekata sprovesti u skladu sa važećim tehničkim normativima za izgradnju, uz primenu tehnologija koje ispunjavaju propisane standarde zaštite životne sredine.
- Tokom faze izgradnje sprovesti monitoring primene definisanih mera zaštite za ovu fazu realizacije projekta.
- Vrednosti emisije buke treba uzeti u obzir u procesu izbora modela vetroturbine.
- Nakon odabira modela turbine, trebalo bi ažurirati rezultate procene intenziteta buke i potrebno je izraditi plan smanjenja buke gde bi se iskoristili podaci o buci izabrane vetroturbine.
- Trebalo bi pratiti nivo buke tokom faze izgradnje.
- Poštovati interne procedure JE EPS-a za zaštitu zdravlja i bezbednost na radu, razvijene u skladu sa srpskim zakonskim zahtevima za bezbednost i zdravlje na radu kako bi se obezbedilo da za aktivnosti povezane sa visokim nivoom buke, radnici budu opremljeni sa odgovarajućom ličnom zaštitnom opremom.
- Применити адекватне опште мере за сузбијање буке које би могле да укључују: коришћење добро одржаваних пригушивача и средстава за сузбијање буке за опрему и машине које стварају високу buku, развој редовног распореда одржавања свих возила.
- Pre početka izgradnje, pravilno isplanirati radne aktivnosti kako bi se obezbedilo da bučne aktivnosti budu ograničene između kasnih večernjih i ranih jutarnjih sati (od 22 do 6

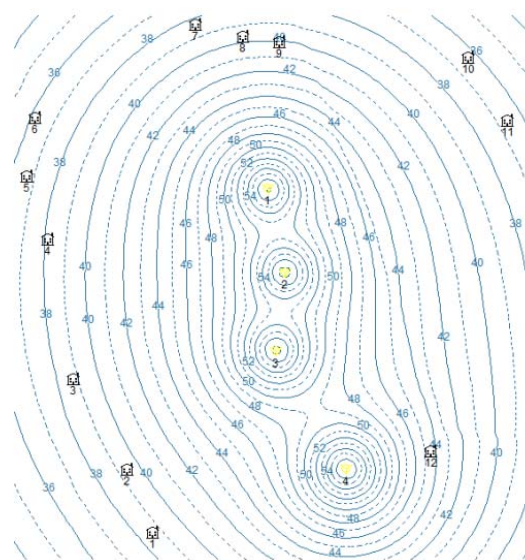
sati), posebno na onim područjima u blizini obližnjih receptora u najvećoj mogućoj meri,

- Neprekidno koordinirajte i obaveštavajte obližnje zajednice o svim očekivanim aktivnostima koje stvaraju veliku buku koje bi mogle da utiču na njih.
- Kamioni i vozila koji prelaze stambena naselja treba da smanje brzinu na maksimalno 30 km/h, a na neasfaltiranim pristupnim putevima na 20 km/h.

V ANALIZA UTICAJA BUKE U FAZI EKSPLOATACIJE I MERE ZAŠTITE ŽIVOTNE SREDINE

Prilikom redovnog rada vetrogeneratora emisija buke dolazi iz dva izvora [6]:

- Aerodinamičkog (usled kretanja elise kroz vazduh)
- Mehaničkog (usled rada mehaničkih elemenata u kućištu-generatora, multiplikatora)

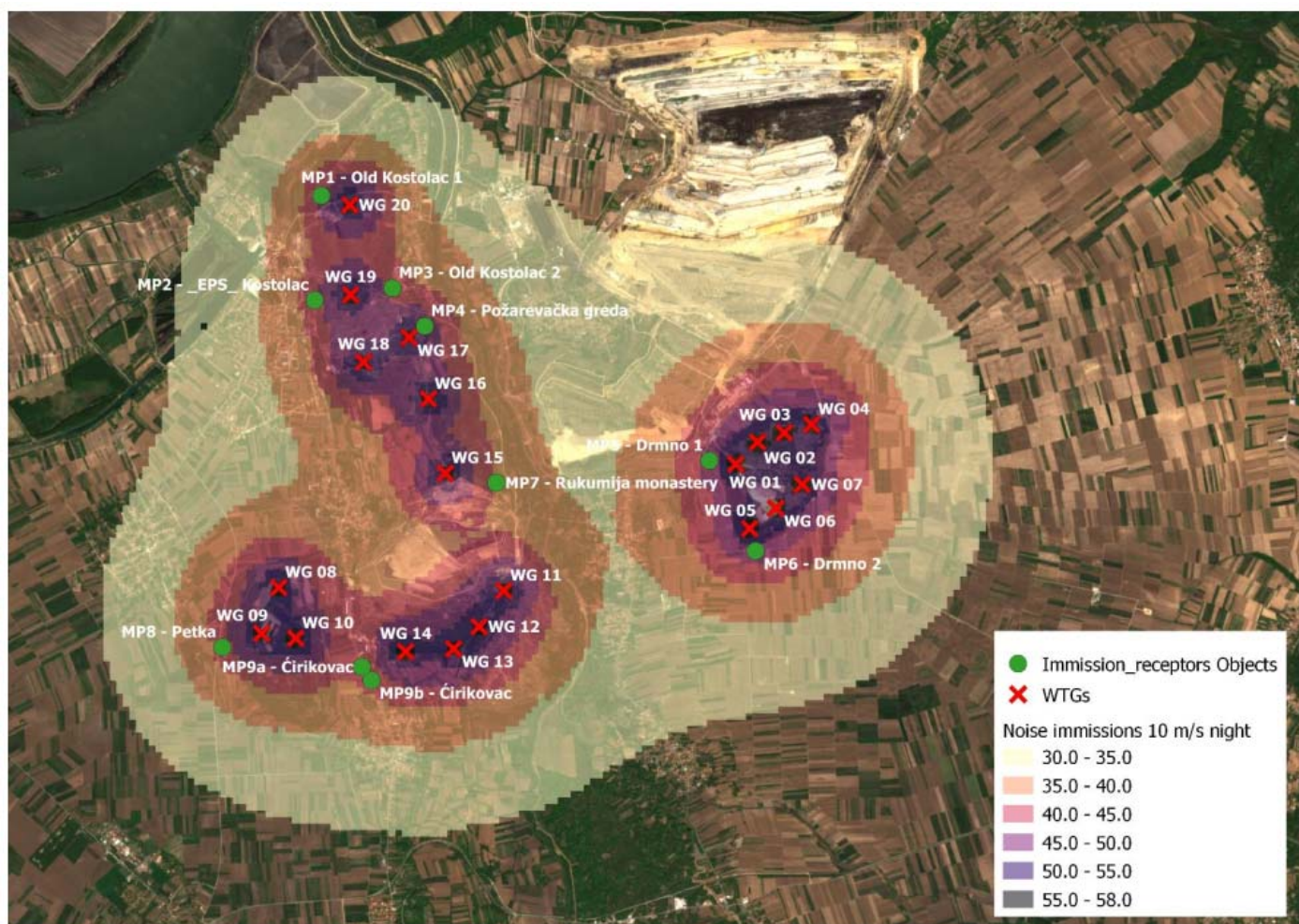


Slika 6. Lokacija Klenovnik, konfiguracija 3- akustične zone u okolini vetroelektrane V112- 3MW [4]

Aerodinamična buka zavisi od konstrukcije i orijentacije lopatica, kao i od jačine vetra odnosno turbulencija [4]. Sa povećanjem udaljenosti od vetrogeneratora, smanjuje se intenzitet buke koju emituje vetrogenerator [5]. Kod aerodinamične buke sa povećanjem rastojanja od izvora buke komponente sa nižom frekvencijom postaju dominantne [4]. Dok se mehanička buka sastoji od zvučnih talasa u uskom opsegu frekvencija što daje intenzitet buke za oko 5 dB u odnosu na buku u širokom opsegu frekvencija [4]. Uticaj buke od vetroelektrana zavisi i od lokacije [4]. Ako je lokacija gde se nalaze vetroelektrane na području sa postojećim intenzitetom buke koji je veći ili jednak intenzitetu buke same vetroelektrane, onda se buke od rada vetroelektrane praktično neće ni registrovati [4]. Mnoge lokacije koje su dobile saglasnost za izgradnju vetroelektrana nalaze u mešovitim industrijsko-rezidencijalnim oblastima [4]. Pored prostornog

aspekta koji je posebno važan sa aspekta sagledavanje intenziteta i uticaja buke, važna je snaga i dimenzija vetrogeneratora [6]. Intenzitet buke emitovan od strane vetroelektrana zavisi i od brzine i pravca vetra [4]. Sa druge strane, ukoliko se receptor nalazi u pravcu niz vetar nivo buke se povećava, a smanjuje se za receptore koji se nalaze u pravcima upravno na pravac duvanja vetra [4]. Generalne preporuke, dokumenta Evropske Unije, definišu graničnu vrednost nivoa buke koju proizvodi vetroturbina na mestu „osetljivog receptora“ od 45 dBA za period dana, ili maksimalno povećanje fona buke za 5 dBA, ali se kao kriterijum bira niža vrednost, dok je tokom noći granična vrednost 43 dBA [4]. Pod pojmom „osetljivog receptora“ podrazumeva se svaki nastanjeni objekat u okolini vetroelektrane, kao i područja za rekreaciju ili od posebnog značaja [4]. Nivo buke između 35-40 dBA se preporučuje u oblastima sa vrlo niskim fonom buke, manjim od 30 dBA [4]. Na osnovu smernica svetske banke za životnu sredinu, zdravlje i bezbednost, za oblast energija vetra, u stambenim, institucionalnim i obrazovanim sredina granična vrednost buke tokom dana (07:00-22:00) je 55 dBA, a noću

(22:00-07:00) 45 dBA [7]. Dok za industrijske i komercijalne oblasti dozvoljeni nivo buke za dan i noć je 70 dBA [7]. Prema Uredbi o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini ("Službeni glasnik RS", br. 75/2010) granični nivo buke na otvorenom prostoru zavisi od namene prostora, odnosno definisano je šest zona [8]. Tako da kompleks planirane vetroelektrane u Kostolcu pripada zoni VI-industrijska zona, dok bi najbliže stambene objekte trebalo tretirati kao zonu III- čisto stambena područja [5]. Imajući u vidu prethodno navedeno, granične vrednosti, nivo dnevne buke je definisan do 55 dB, nivo noćne buke do 45 dB za rad vetrogeneratora pri brzini vetra od 12 m/s na visini od 10 m [4]. Za potrebe modelovanja uticaja buke na području vetroelektrane u Kostolcu odabrane su vetroturbine (tipa Vestas V112, kapaciteta 3 MW, sa visinom stuba od 119 m, i najvećim nivoom zvučne snage od 106,5 dB) u blizini naseljenih mesta i 39 potencijalno ugroženih objekata. Ni na jednoj lokaciji nivo buke ne prelazi 40 dB [4].



Slika 7. Mapa buke za tip turbine Vestas V126 3300 [9]

Na lokaciji Klenovnik (Slika 6.) je urađena posebna analiza sa maksimalnim planiranim brojem vetroelektrana i rezultati pokazuju da jedino u okolini manastira Rukumija (rastojanje od

najbliže vetroelektrane je 541,2 metra) su registrovane vrednosti veće od 40 dB, ali manje od 45 dB [4].

Merenje nivoa buke je urađeno i 2019. godine na 9 mernih mesta

za tip turbine Vestas V126 3300 (Slika 7.) sa visinom stuba od 117 m gde je u model uključena brzina vetra od 4 do 10 m/s [9]. Izračunati nivoi buke emitovani tokom dana i noći od strane vetroturbina se kreću od 40,1 dBA do 49,8 dBA za brzinu vetra od 10 m/s [9]. Najmanji izmereni nivo buke za dan i noć je izmeren na mernom mestu manastir Rukumija, dok je najveći nivo za dan i noć izmeren na mernom mestu Požarevačka greda [9]. Merno mesto „Drmno 2“ je prepoznato kao potencijalni osetljivi receptor jer se radi o napuštenoj stambenoj kući [9].

Buka, kao fizička komponenta, u fazi eksploatacije za veličinu uticaja je ocenjena da ima srednje visoko dejstvo sa brojem 3, sa uticajem koji je ograničen na lokaciju, uticaj izvestan (verovatnoćom od 100%) i sa dugotrajnim vremenom uticaja.

Primenom savremenih generatora, upotrebom „optispeed“ generatora postiže se konstantnost ugaone brzine vetroturbine (16 ob/min) u širokom opsegu brzine vetra, što je jedna od posledica znatno smanjene nivoa buke i vibracije [5]. Uticaj buke tokom perioda od 25 godina eksploatacije će biti minimiziran primenom predviđenih mera [5,9]:

- U slučaju bilo kakvog kvara koji može znatno povećati nivo buke, treba ograničiti ili prekinuti rad i otkloniti kvar.
- Ograničiti ili prekinuti rad vetrogeneratora u periodu jakih naleta vetra u skladu sa tehničkim karakteristikama koje propisuje proizvođač opreme.
- Prilikom eventualne instalacije nove opreme, kao jedan od bitnih parametara treba uzeti u obzir podatke o buci, te nabavljati malobučnu opremu u skladu sa zahtevima Direktive EU za smanjenje emitovane zvučne snage (Direktiva 2000/14/EU o emisiji buke opreme koja se upotrebljava na otvorenom prostoru). Po puštanju u rad, merenjem treba proveriti uticaj buke koja se javlja u prostoru kao posledica rada nove opreme.
- Potrebno je povremeno meriti intenzitet buke na lokaciji i u blizini najbližih stambenih objekata.
- Prilikom puštanja u rad potrebno je izvršiti merenja uticaja buke koja nastaje u prostoru kao rezultat rada nove opreme.
- Osetljivi receptor „Drmno 2“ je trenutno potencijalno osetljiv receptor, zbog činjenice da se radi o napuštenoj stambenoj kući, i kao takav će morati da bude uzet u obzir u planu smanjenja samo u slučaju promene uslova, odnosno njenog upotrebne statusa. Zbog toga je potrebno svakih 6 meseci proveravati da li se status promenio. Shodno tome, ako je kuća u upotrebi, plan smanjenja buke treba prilagoditi.

VI ZAKLJUČAK

Izgradnjom vetroelektrana na lokalitetu Kostolca što znači uvođenje novih obnovljivih izvora energije u energetske bilans zemlje, predstavlja ostvarivanje važnog cilja Republike Srbije koji se odnose na održivi razvoj zemlje [4]. Samim tim Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“ stvara ugled koji u svom radu

koristi obnovljive izvore energije i podržava održivi razvoj Republike Srbije [4]. Dodatno, realizacijom projekta izgradnje vetroelektrane u Kostolcu poboljšaće se privredna aktivnost u lokalnoj samoupravi odnosno opštini Kostolac [4]. Uticaj ili intenzitet buke zavisi od različitih faktora, kao što su prostorni aspekt, tip vetroturbine, brzina vetra, udaljenost od naseljenog područja. Imajući u vidu sve navedeno u vezi uticaja buke prilikom faze izgradnje i eksploatacije, modelom simulacije buke ustanovljeno je da su nivoi buke od vetrogeneratora značajno ispod zakonski propisanih nivoa i da u tom kontekstu neće biti povećanja buke osim na samom izvoru, u neposrednoj blizini vetroturbina [5]. Prostorna dispozicija planirane vetroelektrane Kostolac je veoma povoljna i nema značajnih negativnih uticaja u smislu izloženosti ljudi povećanom intenzitetu buke s obzirom da se najbliži stambeni objekti nalaze na udaljenosti od oko 500 metara, dok je procena da će se intenzitet buke svesti u okvire predviđene legislativom već na 300 metara udaljenosti od vetroturbina [5]. Manje negativne uticaje na povećanje buke moguće je očekivati u toku izgradnje vetroelektrane i ovakvi uticaji su lokalnog karaktera i mogu se javiti samo privremeno [5]. Gledajući prosečnu vrednost veličine uticaja od 1,60 na intenzitet buke predmetnog projekta, ona se nalazi u okvirima niskog dejstva [5]. Apsolutnom primenom navedenih mera tokom faze izgradnje i eksploatacije uticaj buke biće ograničen i sveden na minimum.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, Službeni glasnik RS, broj 101 od 8. decembra 2015.
- [2] Studija energetskog potencijala Srbije za korišćenje sunčevog zračenja i energije vetra, Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd, 2004. http://vetar-sunce.imsi.rs/tekstovi/Studija_EE704-1052A/ [pristupljeno 10.01.2023]
- [3] Uredba o utvrđivanju Prostornog plana područja posebne namene Kostolačkog ugljenog basena, Službeni glasnik RS, br. 1 od 4. januara 2013, 20 od 16. marta 2018.
- [4] Prethodna studija opravdanosti sa generalnim projektom izgradnje parka vetroelektrana na lokalitetu Kostolca, Energoprojekt Entel a.d., Netinvest, Geoalfa, Beograd, 2014.
- [5] Studija o proceni uticaja projekta izgradnje parka vetroelektrana na lokalitetu Kostolca na životnu sredinu, EkoPlan, Netinvest, Beograd, 2018.
- [6] Studija o proceni uticaja na životnu sredinu Projekta infrastrukturnog kompleksa vetrogeneratorskog polja „Čibuk“ u Mramorku, Opština Kovin, Beograd, 2012.
- [7] Environmental, Health, and Safety General Guidelines, World Bank Group, 2007. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/157871484635724258/pdf/112110-WP-Final-General-EHS-Guidelines.pdf> [pristupljeno 10.01.2023]
- [8] Uredba o indikatorima buke, graničnim vrednostima, metodama za ocenjivanje indikatora buke, uznemiravanja i štetnih efekata buke u životnoj sredini, Službeni glasnik RS, broj 75 od 20. oktobra 2010.
- [9] Renewable Energy Project - Kostolac Wind Farm, Environmental and Social Impact Assessment Update Report (ESIA), Fichtner, Stuttgart, Nemačka, 2020

AUTORI/AUTHORS

msr Nikola Stanković – vodeći inženjer za zaštitu životne sredine za TE i TE-TO, Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“, stankovic.nikola@eps.rs, ORCID [0000-0002-8053-4488](https://orcid.org/0000-0002-8053-4488)

Iskustva iz izgradnje solarnih fotonaponskih elektrana na stanicama za snabdevanje gorivom u svojstvu kupca-proizvođača

Experiences in the Construction of Solar Photovoltaic Power Plants Mounted at Fuel Supply Stations as a Prosumer

Rastislav Kragić, Biljana Lovčević-Kureljušić, Valentina Arambašić, Željko Blitva, Nenad V. Pavlović

Naftna industrija Srbije a.d. Novi Sad

Rezime - Izgradnja solarnih fotonaponskih elektrana u Republici Srbiji prema važećoj zakonskoj regulativi, naročito u slučaju postavljanja FNE u sklopu specifičnih objekata sa povećanim rizikom, predstavlja zahtevan proces. U radu će biti prikazana iskustva izgradnje solarnih fotonaponskih elektrana snage do 50 kW na 15 stanica za snabdevanje gorivom koje su u vlasništvu kompanije NIS ad Novi Sad i koje su realizovane u svojstvu kupca-proizvođača. Izazovi koje je trebalo savladati su bili: utvrđivanje originalnog rešenja konfiguracije elektrane bez dodatnih radova na postojećoj krovnoj konstrukciji i uticaja na spoljašnji izgled objekta prema kompanijskom standardu za brendiranje objekata, optimizacija kapaciteta elektrane prema potrošnji objekata, optimizacija troškova, izgradnja FNE u blizini zona opasnosti i druga pitanja u pogledu bezbednosti na radu kako tokom izvođenja radova, tako i u periodu eksploatacije. Rad daje osvrt na mogućnosti pojednostavljenja procedura za priključenje na distributivni sistem električne energije, baziran na stečenim iskustvima. Na osnovu stečenog pozitivnog iskustva Kompanija je u junu 2023 započela projekat izgradnje solarnih FNE na dodatnih 30 stanica za snabdevanje gorivom.

Ključne reči – Solarna fotonaponska elektrana, stanica za snabdevanje gorivom, kupac-proizvođač, bezbednost na radu, rad na visini

Abstract - According to the current regulations, the construction of solar photovoltaic power plants in the Republic of Serbia is a demanding process, particularly when installing them on particular objects that carry a higher risk. The paper will present the experience of building solar photovoltaic power plants with a power of up to 50 kW at 15 petrol stations owned by NIS J.S.C. Novi Sad and implemented as a prosumer. The challenges that had to be overcome were: finding an original solution for the configuration of a power plant without changing the existing structure and affecting the external appearance of the facility according to corporate branding standard, optimizing the capacity of the power plant according to the consumption of the object, optimizing costs, building near danger zones and other issues related to work safety both during the execution of works and during the period of exploitation. The paper also reviews the prospect of simplifying the procedures for connecting to the electricity distribution system based on the experience gained.

NIS J.S.C. has begun investment in construction of solar PV plants at additional 30 petrol stations based on gained experience.

Index Terms - Solar photovoltaic power plant, Fuel supply station, Prosumer, Occupational safety, Work at height

I UVOD

Kao društveno odgovorna kompanija NIS a.d. Novi Sad (u daljem tekstu: Kompanija) je donela stratešku odluku o korišćenju obnovljivih izvora energije (u daljem tekstu: OIE), a Izgradnja solarnih fotonaponskih elektrana (u daljem tekstu: FNE) predstavlja jednu od atraktivnih opcija za brzo dostizanje svih pozitivnih efekata koji se očekuju od investicija u OIE. Osnovni prihodi koji se mogu ostvariti izgradnjom velikih solarnih FNE u Republici Srbiji bazirani su ili na direktnoj prodaji električne energije po tržišnim cenama, ili prodajom električne energije u okviru sistema podsticajnih mera (tržišne premije) što podrazumeva uspešno učešće na tenderu ministarstva zaduženog za poslove energetike koji se organizuju samo za ograničene ukupne kapacitete.

Najveći finansijski efekat izgradnjom solarnih FNE se može ostvariti u svojstvu kupca-proizvođača, što podrazumeva priključenje FNE u paralelni rad sa distributivnim sistemom električne energije (u daljem tekstu: DSEE) sa strane potrošača u odnosu na merno mesto. Dominantni prihod predstavlja ušteda u nabavci električne energije za izabrani objekat gde se FNE instalira. Isporuka električne energije u DSEE je sekundarni izvor prihoda. Ušteda obuhvata, pored izbegnutog troška za nabavku električne energije, sve prateće troškove, kao što su troškovi za pristup sistemu na odgovarajućem naponskom nivou, naknade i akciza. Ukoliko je instalisana snaga FNE optimizovana tako da se najveći deo proizvedene električne energije potroši za potrebe samog objekta, tada se postižu maksimalni ekonomski efekti investicije u FNE.

Stanice za snabdevanje gorivom (u daljem tekstu: SSG) su prepoznate kao veliki potrošači električne energije i pogodni objekti za izgradnju solarnih FNE priključenih po principu kupca-proizvođača. Kompanija u svom portfoliju ima oko 400 SSG, različitih formata i različitih obima potrošnje, uglavnom priključenih na niskonaponsku mrežu (u daljem tekstu: NN). Projekat izgradnje FNE na SSG je podrazumevao fazni pristup.

Najpre je realizovano 8 FNE na SSG (pilot projekat) 2022 godine, a zatim još 7, 2023 godine. Za pripremu koncepta izgradnje FNE na SSG izazovi su bili:

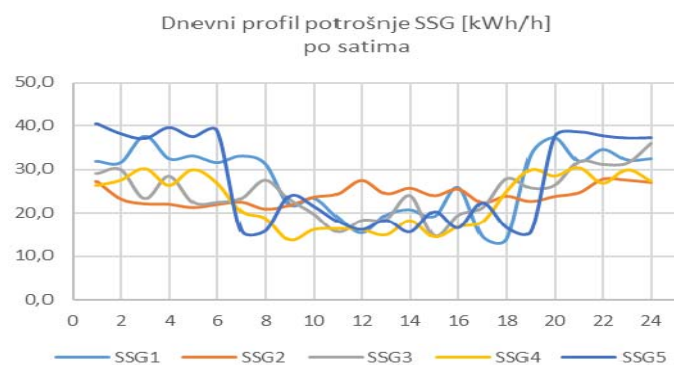
- optimizacija karakteristika tipskih FNE na SSG,
- provera nosivosti krovne konstrukcije,
- protivpožarni aspekti i pitanje bezbednosti,
- procedure priključenja na DSEE.

II OPTIMIZACIJA KARAKTERISTIKA TIPSKIH FNE NA SSG

Od raspoloživih 400 SSG trebalo je najpre izvršiti izbor prvih 8 SSG i napraviti redosled izgradnje FNE. Prvi ključni kriterijum za izbor je bio SSG sa najvećom potrošnjom električne energije u višoj tarifi. Pored kriterijuma visoke potrošnje, pokazalo se da je za uspešnu realizaciju projekta neophodna bila provera i dodatna selekcija na osnovu još nekoliko ključnih aspekata:

- SSG treba da poseduje, u najvećoj mogućoj meri, zadovoljavajući dnevni, nedeljni i godišnji profil potrošnje električne energije;
- na površinama opredeljenim za postavljanje FN panela nema senčenja od strane susednih objekata;
- proveriti nosivost i stabilnost objekta od dodatnog opterećenja FNE;
- izvršiti izbor tipskih objekata (konstrukcija) SSG;
- proveriti kvalitet krovnog pokrivača SSG;
- proveriti da li je SSG još pod garancijom na izvedene radove ili je planirana rekonstrukcija i promena brendinga;
- proveriti imovinsko-pravna pitanja;
- pronaći raspoloživ prostor za smeštaj opreme FNE u objektu SSG.

Metodom eliminacije i selekcijom po navedenim kriterijumima formirana je lista SSG koje mogu biti predmet izgradnje FNE u svojstvu kupca-proizvođača (u daljem tekstu: lista SSG).

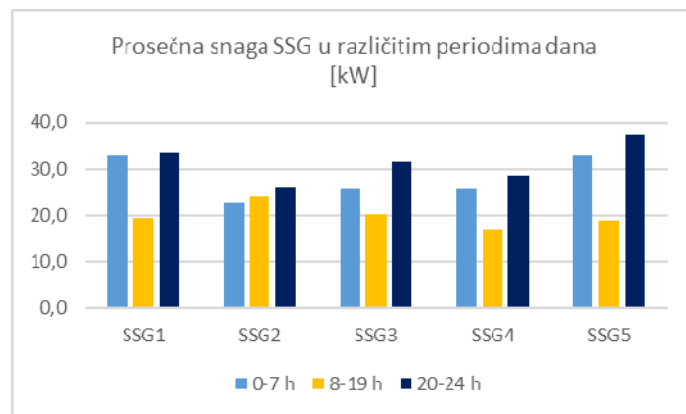


Slika 1. Satni profili potrošnje električne energije na 5 SSG

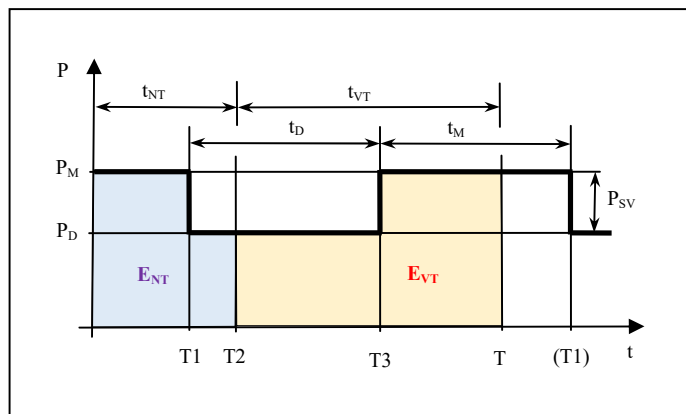
Naredni korak bio je definisanje optimalne instalisane snage FNE za svaku SSG sa liste. Optimizaciju je trebalo izvršiti po principu maksimalnih ekonomskih efekata za svaku pojedinačnu SSG. U cilju brže i jednostavnije analize, prethodno je urađeno uopštavanje profila dnevne potrošnje električne energije. Pokazalo se da u višoj dnevnoj tarifi, najveći broj SSG sa vrha liste ima veoma sličan profil potrošnje električne energije, a koji malo zavisi od doba dana tokom obdanice, kao i od dana u nedelji. Na slici 1 prikazani su tipični dnevni profili potrošnje

električne energije za 5 proizvoljno izabranih SSG u različitim periodima godine i različitim danima u nedelji.

Na dijagramu satnog profila potrošnje SSG (slika 1) može se uočiti da potrošnja električne energije unutar dnevnog i unutar noćnog doba varira u granicama približno $\pm 15\%$, dok se na pojedinim SSG uočava veća prosečna noćna potrošnja od potrošnje tokom obdanice, što se analizom istih podataka sa slike 1 i potvrđuje na slici 2. Razlog povećane noćne potrošnje u odnosu na potrošnju tokom obdanice je rad noćnog osvetljenja na SSG.



Slika 2. Dnevni profili potrošnje električne energije na 5 SSG po periodima dana



Slika 3. Aproksimacija dnevnog profila potrošnje SSG

U cilju lakše analize velikog broja SSG, a koja se bazira samo na osnovu mesečne potrošnje električne energije u višoj tarifi (VT) i potrošnje u nižoj tarifi (NT), pristupilo se aproksimaciji profila dnevne potrošnje na način prikazan na slici 3.

$$E_{VT} = P_{SV} \cdot [(T-T_3) - (1-k) \cdot (T_2-T_1)] + P_D \cdot t_{VT} \quad (1)$$

$$E_{NT} = P_{SV} \cdot [T_2 - k \cdot (T_2-T_1)] + P_D \cdot t_{NT} \quad (2)$$

gde su (za određenu SSG, u jednom konkretnom danu obračunskog perioda):

E_{VT} – dnevna potrošnja energije u višoj tarifi,

E_{NT} – dnevna potrošnja energije u nižoj tarifi,

P_M – prosečna snaga potrošnje tokom noćnog perioda (mraka),

P_{SV} – prosečna snaga potrošnje samog noćnog osvetljenja,

P_D – prosečna snaga dnevne potrošnje, odnosno potrošača tokom celog dana bez uticaja noćnog osvetljenja,

T - dnevni period od 24 h,
 T₁ - vreme isključenja noćnog osvetljenja,
 T₂ - vreme prelaska sa niže na višu tarifu,
 T₃ - vreme uključenja noćnog osvetljenja,
 t_{VT} - trajanje više tarife, 16 h,
 t_{NT} - trajanje niže tarife, 8 h,
 t_D - trajanje perioda dana bez noćnog osvetljenja (dan),
 t_M - trajanje perioda dana sa noćnim osvetljenjem (mrak).

Isključenje noćnog osvetljenja (T₁), u zavisnosti od doba godine, može biti pre ili posle prelaska sa niže na višu tarifu (T₂). U jednakostima (1) i (2) taj fenomen je opisan koeficijentom k, koji ima sledeće osobine:

$$k = 1, \text{ kada je } T_2 > T_1 \quad (3)$$

$$k = 0, \text{ kada je } T_2 \leq T_1 \quad (4)$$

Sređivanjem opisanih jednačina se dobija:

$$P_{SV} = EQ1 / EQ2 \quad (5)$$

$$P_D = (E/T) - (t_M/T) \cdot (EQ_1/EQ_2) \quad (6)$$

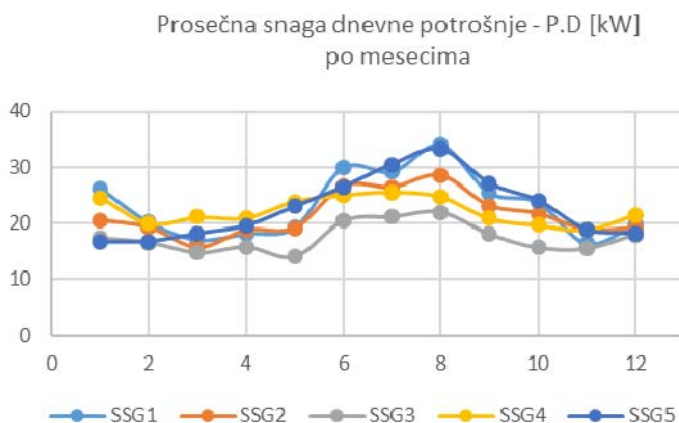
gde je:

$$E = E_{VT} + E_{NT} \quad (\text{dnevna potrošnja energije}) \quad (7)$$

$$EQ_1 = 2 \cdot E_{NT} - E_{VT} \quad (8)$$

$$EQ_2 = 3 \cdot [T_2 - k \cdot (T_2 - T_1)] - t_M \quad (9)$$

Praktično, primenom izvedenih jednakosti i poznavanjem mesečnih potrošnji SSG u VT i NT, kao i vremena uključenja i isključenja noćnog osvetljenja, za svaku SSG od interesa moguće je aproksimirati prosečnu snagu dnevne potrošnje SSG, a što je za potrebe optimizacije solarne FNE na velikom broju SSG dovoljno precizno. Na slici 4 prikazani su rezultati analize za proizvoljnih 5 SSG.



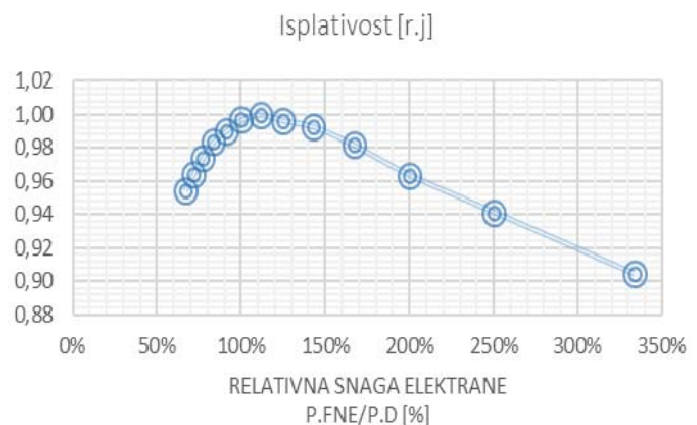
Slika 4. Aproximirani profili potrošnje električne energije na 5 SSG

Na svim analiziranim SSG može se uočiti veća prosečna snaga dnevne potrošnje (bez uticaja noćnog osvetljenja) tokom toplog perioda godine (od juna do septembra), kao i zimski maksimum potrošnje (decembar i januar). Razlog za povećanu potrošnju u letnjem i zimskom periodu je povećan rad rashladnih i grejnih sistema u datim periodima godine. Ovakav godišnji profil prosečnih snaga dnevne potrošnje ide u prilog upotrebi FNE po

principu kupca-proizvođača, imajući u vidu da će i proizvodnja FNE biti najveća upravo tokom letnjeg perioda.

Opređeljeno je da se fotonaponski (u daljem tekstu: FN) paneli polažu pod malim uglom u odnosu na horizontalnu ravan (3°-7°) u dva suprotna smera u odnosu na pravac juga, što će kasnije biti detaljnije objašnjeno. Ovakav raspored se približno može aproksimirati postavljanjem svih FN panela u horizontalan položaj i sva dalja analiza podrazumevaće ovakvu orijentaciju FNE.

Nakon sprovedenih aproksimacija moguće je za svaku SSG odrediti optimalnu snagu FNE, poznajući prosečne snage potrošnje. Po pitanju investicije, povećanje instalisane snage FNE smanjuje specifične investicione troškove (izražene u EUR/kWp FNE). Nasuprot tome, izbor FNE čija snaga invertora prelazi prosečnu snagu dnevne potrošnje povećava udeo proizvedene električne energije koji se plasira u DSEE i prodaje po tržišnim cenama a koje su značajno niže od cene električne energije koja se ostvaruje kroz uštede sopstvenom proizvodnjom iz FNE. Sprovedena analiza je obuhvatila složene ekonomske modele koji za ulazne parametre imaju krivu investicionih cena FNE u funkciji instalisane snage, ukupne cene električne energije pri prodaji i kupovini, kao i preklapanje satnih profila potrošnje električne energije na godišnjem nivou i proizvodnje električne energije iz FNE. Za potrebe ovog rada, na slici 5 prikazani su rezultati navedene analize kao relativni odnos „perioda povraćaja investicije“ (u odnosu na najpovoljniju vrednost) u funkciji relativne snage FNE izražene kao odnos „instalisan snage FNE“ [kWp] i „maksimalne prosečne snage dnevne potrošnje“ [kW].



Slika 5. Isplativost izgradnje FNE na SSG u funkciji relativne snage FNE (u odnosu na snagu dnevne potrošnje SSG - P_D)

Uočava se da se visoka isplativost (preko 96%) postiže izborom instalisane snage u rasponu od 70% do 200% odnosa instalisane snage FN panela i maksimalne dnevne potrošnje SSG (prethodno opisane kao P_D). Optimalne vrednosti preko 99% su u rasponu relativne snage FNE od 90% do 150%.

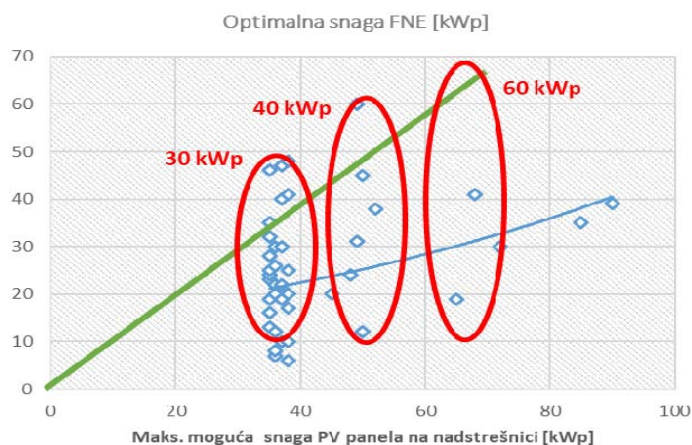
Raspoložive SSG, koje ispunjavaju sve tražene kriterijume za postavljanje FNE, pretežno su građene u standardnim formatima. Veliki format SSG je po pravilu praćen i velikom potrošnjom električne energije. To podrazumeva veliki broj pratećih sadržaja unutar objekta SSG, kao što su restoran, rashladne komore, veliki broj frižidera, kuhinja, klima uređaji, enterijerska unutrašnja

rasveta, razni restoranski uređaji, TV i LED monitori itd. Kako je jedan od zahteva za realizaciju projekta FNE bio da se ne naruši korporativni brendirani izgled SSG, kao idealno mesto za postavljanje FN panela izabrane su nadstrešnice iznad automata za točenje goriva (točiona mesta). Na slici 6 prikazan je tipičan izgled SSG sa pozicijom FN panela na nadstrešnici.



Slika 6. Pozicija FN panela na nadstrešnici iznad točionih mesta

Za sve preliminarno selektovane SSG izračunata je maksimalna snaga FN panela koja se može postaviti na raspoloživi prostor nadstrešnice iznad točionih mesta i urađeno je upoređivanje sa optimalnom snagom FNE za datu SSG. Na slici 7 dat je dijagram optimalnih snaga FNE u funkciji raspoložive (moguće) snage na nadstrešnici SSG.



Slika 7. Optimalne snage FNE u funkciji maksimalno moguće snage na nadstrešnici SSG

Uočavaju se tri grupe objekata (po vertikali na dijagramu) raspoređenih prema standardnim formatima SSG. U cilju što boljeg iskorišćenja raspoloživog prostora nadstrešnice, a imajući u vidu da će se potrošnja električne energije iz godine u godinu povećavati, dok će se realna snaga FN panela smanjivati zbog degradacije poluprovodnika, odlučeno je da se rade tri tipa FNE nominalne snage: 30 kWp, 40 kWp i 60 kWp (+10%/-5%).

Kablovi jednosmerne struje se sa nadstrešnice od FN panela prevode preko lanterne do glavnog objekta, gde je instalisan inverter i priključen na glavni razvodni ormar.

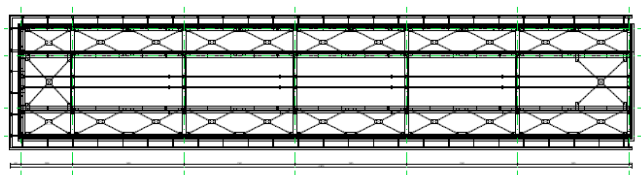
Svi proračuni u vezi sa prognozom proizvodnje FNE urađeni su uz pomoć softverskog alata PVGIS [1], dok su ostali proračuni rađeni u softverskom alatu MS EXCEL [2].

Prvih 8 SSG izgrađeno je i pušteno u rad u periodu mart - septembar 2022. godine, dok je narednih 7 izgrađeno i pušteno u

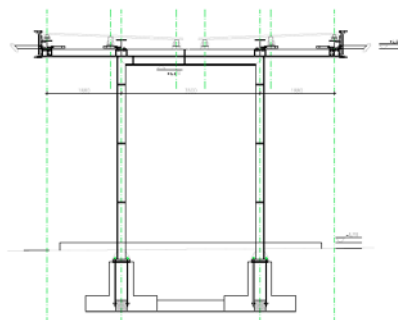
rad u periodu novembar 2022. - april 2023. godine. Ukupna instalisana snaga svih FNE je 533 kWp (ukupna snaga invertora 425 kW). Očekivana proizvodnja električne energije svih FNE je oko 598 MWh/god (zbirne vrednosti proizvodnje za prvih 12 meseci rada svake FNE ponaosob bez obzira na trenutak početka proizvodnje), pri čemu se očekuje da oko 91% proizvodnje bude potrošeno na samim SSG.

III PROVERA NOSIVOSTI KROVNE KONSTRUKCIJE

Objekti na SSG koji su od interesa za izgradnju fotonaponske elektrane su: nadstrešnica iznad točionih mesta (slike 8 i 9) na koju se postavljaju fotonaponski paneli, glavni objekat SSG u koji se postavlja inverter i ostala prateća elektro oprema za FNE i lanterna na koju se postavljaju kablovski regali sa elektro kablovima.



Slika 8. Krovna konstrukcija nadstrešnice iznad točionih mesta



Slika 9. Poprečni presek nadstrešnice iznad točionih mesta

Ključni kriterijum za izbor SSG je nosivost postojeće konstrukcije, odnosno krovne konstrukcije nadstrešnice iznad točionih mesta na koje se postavljaju FN paneli. Konstrukcija nadstrešnice je čelična i sastoji se od ramovskih nosača koje čine stubovi i glavni krovni nosači za koje su kruto vezani poprečni nosači. Veza između poprečnih i podužnih nosača je ostvarena pomoću zavrtnjeva i zavarivanjem. U krovnoj ravni su izvedeni krovni spregovi koji su postavljeni u krajnjim poljima nadstrešnice. Po obodu nadstrešnice su izvedeni čelični nosači koji nose friz sa znakom korporativnog brenda kompanije, čiji se izgled nije smeo narušiti, dok su solarni paneli morali biti postavljeni u ravni krovnog pokrivača, a ispod krajnje visinske kote friza. Krovni pokrivač nadstrešnice je trapezasti plastificirani čelični lim, uobičajeno TR 60/210 debljine lima 0,8 mm. Krovna ravan nadstrešnice je dvovodna, nagiba uobičajeno 4%, orijentisana ka sredini nadstrešnice, gde se nalaze olučne horizontale koje odvođe kišnicu u olučne vertikale koje se nalaze unutar stubova.

Kako bi se proverila nosivost konstrukcije nadstrešnice, prvi korak je bila provera dostupnosti postojeće projektno tehničke dokumentacije koja sadrži statički proračun izgrađenih nadstrešnica na SSG.

Ključni elementi za proveru statičke nosivosti i stabilnosti elemenata konstrukcije su bili krovni pokrivač i čelične rožnjače koji nose krovni pokrivač, a nakon ugradnje FNE i solarnih panela. Dodatno opterećenje usled postavljanja solarnih panela je iznosilo 15 kg/m^2 ($0,15 \text{ kN/m}^2$) uključujući i potkonstrukciju koja je aluminijumska i male je težine. Na pojedinim nadstrešnicama se utvrdilo da su prilikom izbora čeličnog profila rožnjača, zbog određene visine friza, rožnjače bile limitirane sa visinom, te da su stvarni naponi (σ_{stv}) bili u velikoj meri iskorišćeni u odnosu na dopuštene napone (σ_{dop}) (10).

$$\sigma_{\text{stv}}/\sigma_{\text{dop}} \sim 0,9 \div 0,95 \quad (10)$$

Kako nosivost postojeće konstrukcije nadstrešnice ne bi bila ugrožena usled dodatnog opterećenja, zahtevao se statički proračun naročito krovne konstrukcije nadstrešnice usled dodatnog opterećenja FNE. Zbog poznavanja stanja na terenu, zahtev tendera je bio da dodatno opterećenje ne prelazi opterećenje od 15 kg/m^2 , koje je uključivalo i solarne panele i potkonstrukciju uz napomenu da bude aluminijumska koja je znatno manje težine u odnosu na neki drugi tip potkonstrukcije. U toku analize nosivosti ostalih delova noseće konstrukcije, utvrđeno je da glavni krovni nosači i stubovi imaju dovoljnu nosivost i nije bila zahtevana dodatna statička provera.

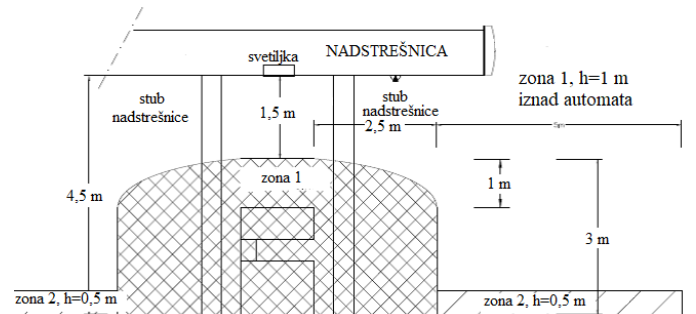
U skladu sa gore navedenim, može se zaključiti da prilikom određivanja položaja solarnih panela na krovnoj površini nadstrešnice utiče više faktora, a pored energetskih neophodno je voditi računa i o dodatnom opterećenju koje nije veliko ako se vodi računa o ograničenjima, ali nije ni malo kada su u pitanju nadstrešnice čija je konstrukcija čelična. Iz tog razloga zahtevalo se da solarni paneli budu postavljeni na površini nadstrešnice između glavnih krovnih nosača, a da se izbegavaju krajnja polja krovnih ravni nadstrešnice koja su konzolna.

IV ZAŠTITA OD POŽARA

Tehnološki proces koji se obavlja u normalnom radu fotonaponskih elektrana ne predstavlja opasnost od požara, a rizik od pojave požara je veoma nizak. Osnovni zadatak prilikom ugradnje FNE na već izgrađenu SSG je bio da FNE ne utiče na sprovedene mere zaštite od požara izgrađene SSG i da svi elementi, definisani navedenim Glavnim projektom zaštite od požara za SSG, ostaju na snazi bez ikakvih izmena.

Prvi korak analize je određivanje položaja solarnih panela i opreme na SSG. Izbor mesta za postavljanje opreme i solarnih panela je da se oni postavljaju izvan zona opasnosti. Na svakoj SSG, s obzirom da se radi o skladištenju i pretakanju lakozapaljivih i eksplozivnih materija [3] definisane su zone opasnosti oko mesta gde se one skladište i pretaču. Zone opasnosti su klasifikovane na tri zone, zona 0, zona 1 i zona 2. Zona opasnosti 0 podrazumeva prostor u kojem je eksplozivna atmosfera prisutna stalno ili duži period vremena (unutrašnjost rezervoara, i sl.). Zona opasnosti 1 podrazumeva prostor u kojem je verovatno da će se eksplozivna atmosfera pojaviti za vreme normalnog pogona, dok zona opasnosti 2 podrazumeva prostor u gde postoji mala verovatnoća da će se eksplozivna atmosfera pojaviti za vreme normalnog pogona, a ako se ipak pojavi, trajaće samo kratko vreme.

U skladu sa specifičnim rizicima, zahtev prilikom određivanja lokacija solarnih panela i elektro opreme je bio da se oprema FNE postavi izvan zona opasnosti, kako bi se isključili potencijalni rizici a pri tom i sprečili dodatni troškovi opreme koja bi u slučaju postavljanja opreme FNE u zonama opasnosti morala biti u Ex izvedbi.



Slika 10. Prikaz zona opasnosti nadstrešnice [4]

Posle definisanja položaja opreme FNE na SSG izvršena je provera negorivosti ugrađenih materijala na objektu, prema stepenu otpornosti zaštite od požara, najpre krovnog pokrivača objekta na koji se postavljaju solarni paneli, a zatim i analiza prostorija glavnog objekta SSG u koje će se postavljati oprema SSG (invertori i elektroormani).

Nakon određivanja ključnih faktora postavljanja FNE na SSG, isporučena oprema je dimenzionisana tako da izdrži sva naprezanja kako u normalnom radu tako i pri kratkim spojevima i da je otporna na uslove koji se mogu javiti u toku eksploatacije, kako bi se smanjila mogućnost oštećenja i nastanka požara.

Solarni paneli i sva oprema uključujući i noseću konstrukciju za postavljanje na krovovima objekata su od negorivih materijala. Paneli su isporučeni takvi da u slučaju pojave vruće tačke sprečavaju pojavu temperature koja može da prouzrokuje rizičnu temperaturu.

U invertorima su integrisani senzori toplote i sistemi za detekciju pojave električnog luka. Takođe, u slučaju kvara ili neispravnosti u radu invertora, u vidu prekoračenja zadatih parametara opterećenja, termičkog naprezanja, pada ili prekomernog povećanja napona ili struje i sl. predviđen je odgovarajući sistem prelaska u sigurnosni režim rada i/ili isključenja uređaja i sistema. U sklopu FNE ugrađeni su svi neophodni tasteri za nužna isključenja.

Kablovi na FNE koji su ugrađeni su negorivi bezhalogeni, a svi kablovi koji povezuju veće deonice između opreme van objekata postavljeni su odgovarajuće metalne kanalice (cevi) uzemljene sa oba kraja. Pri tom FNE je povezana na postojeći sistem gromobranske instalacije.

V MERE BEZBEDNOSTI ZAŠTITE NA RADU PRILIKOM IZGRADNJE FNE NA SSG U RADU

NIS ad Novi Sad kao veoma odgovorna kompanija pored poštovanja zakonske regulative ima visoko razvijene standarde iz oblasti bezbednosti i zdravlja na radu, zaštite od požara i zaštite životne sredine (HSE- *health, safety and environment*). Od svih lica koji rade ili izvode radove na lokacijama kompanije zahteva

se poštovanje zakonskih propisa i naročito HSE standarda. S obzirom da su se radovi izvodili u redovnom radu SSG, pored zaposlenih lica na SSG i izvođača radova, posebna pažnja je bila posvećena zaštiti trećih lica (posetilaca).

Prema Uredbi za bezbednost i zdravlje na radu na privremenim i pokretnim gradilištima [5], prepoznata su dva specifična rizika tokom izgradnje: rad na visini veći od 2 m (1,8 m) i rizik rada u zonama opasnosti. Da bi se izbegli navedeni rizici od izvođača je zahtevano da se dostavi plan izvođenja radova gde je precizno navedeno na koji način će se vršiti izvođenje radova: prilaz radnika na krov nadstrešnice, oprema potrebna za transport solarnih panela i ostale opreme na mesto ugradnje, način rada na visini i način vezivanja radnika na krovu (anker tačke/sidrišta/*Life line* i sl), plan spašavanja, kao i atesti opreme planirane za rad na visini. Na osnovu plana izrađena je kompletna tehnička dokumentacija prema zakonskoj regulativi, izvršene prijave gradilišta i radova i tek nakon usaglašenih svih zahteva pristupilo se izvođenju radova. Kako bi se radovi bezbedno izvodili jedan deo aparata (točionih mesta) je isključen iz rada, a pristup zaposlenima i trećim licima je onemogućen u zoni izvođenja radova. Na slici 11 je prikazano privremeno gradilište tokom izgradnje FNE na SSG.



Slika 11. Izvođenje radova na SSG

VI PROCEDURE PRIKLJUČENJA NA DSEE

2021. godine usvojen je Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije [6], a u narednih godinu dana i niz podzakonskih akata kojima se bliže uređuju pojedine oblasti, između ostalih i Uredba o kupcu-proizvođaču [7]. Time su se stekli puni zakonski okviri za priključenje kupca-proizvođača na elektroenergetski sistem. Oblast koja je među poslednjima definisana obuhvata procedure za priključenje različitih kategorija kupca-proizvođača na DSEE. Za ovaj projekat od interesa je priključenje objekata koji nisu domaćinstva i stambene zajednice za instalisane proizvodne snage fotonaponskih modula od 10,8 kW do 50 kW [8], (u daljem tekstu: procedure). Procedure priključenja oslanjaju se na već postojeća i uhodana pravila i metodologije za druge vrste proizvodnih elektroenergetskih objekata (elektrana), a ujedeno su prilagođena organizacionoj strukturi i internim standardima operatora distributivnog sistema, JP Elektro distribuciji Srbije d.o.o. (u daljem tekstu: EDS).

U ovom poglavlju će biti izneta i obrazložena zapažanja i iskustva autora, sa ciljem unapređenja postojećih procedura i olakšanja rešavanja neophodnih provera u procesu priključenja FNE na DSEE, kako za investitore, tako i za samu EDS. Svi

predlozi pripremljeni su tako da ne remete propisane zakonske odredbe, kao i da ne ugrožavaju sigurnost rada elektroenergetskog sistema u skladu sa važećim standardima. Takođe, ne zahteva se promena organizacione strukture EDS-a, već se predlaže drugačiji pristup rešavanju određenih pitanja.

1. Postojeća procedura podrazumeva ishodovanje separata o priključenju proizvodnog objekta na DSEE, a nakon izrade idejnog projekta sledi ishodovanje odobrenja za priključenje. Imajući u vidu da za instalisane snage FNE do 50 kW u najvećem broju slučajeva nema nepoznanica po pitanju uslova za priključenje, predlaže se da izrada separata bude opcionalna, odnosno samo ukoliko investitor želi da isti ishoduje.
2. Procedura priključenja predviđa kao odvojene korake ishodovanje odobrenja za priključenje i zaključenje ugovora o pružanju usluge za priključenje. Tek po zaključenju ugovora o pružanju usluge za priključenje dostavlja se predračun za uplatu obaveza investitora prema EDS-u. Predlaže se da svi navedeni koraci budu jedinstveni, bez čekanja i odlaganja. Praktično, dostavljanjem odobrenja za priključenje EDS može odmah dostaviti i potpisan ugovor o pružanju usluge o priključenju i odgovarajući predračun, čime se ukupno vreme za navedene korake značajno ubrzava.
3. Po izgradnji proizvodnog objekta investitor podnosi zahtev za zamenu brojila. Nakon toga se sklapa ugovor o potpunom snabdevanju sa izabranim snabdevačem i podnosi zahtev za puštanje proizvodnog objekta u probni rad. Interna komisija EDS-a odlučuje o zahtevu i po pozitivnom odgovoru komisije formira se druga komisija koja izlazi na lokaciju da pregleda objekat. Zapisnik komisije sa terena overava direktor nadležne službe EDS-a i tek nakon toga se može uključiti FNE u probni rad.

Iskustvo autora pokazuje da cela opisan procedura može biti višestruko ubrzana. Odobrenje za priključenje i postojanje priključka objekta (kupca) na DSEE treba da budu dovoljan preduslov za zaključenje ugovora sa snabdevačem. Po zaključenju ugovora sa snabdevačem i podnošenju zahteva za puštanje objekta u probni rad, stiču se uslovi da EDS paralelno ispita ispunjenost uslova iz podnetog zahteva i pripremi komisiju za pregled objekta. Ekipa koja obavlja zamenu brojila i komisija za pregled objekta mogu završiti svoj posao u istom danu, a posebnim ovlašćenjem nadležnog direktora EDS-a komisija može odmah pustiti FNE u probni rad, bez odlaganja.

4. Predviđen je probni rad kupca-proizvođača u trajanju od 6 meseci. Kada se konstatuje da su ispunjeni svi uslovi za trajni rad, EDS odobrava trajni rad proizvodnog objekta kupca-proizvođača. Međutim, u praksi se pokazalo da apsolutno nema potrebe za probnim radom i da elektrane snage do 50 kW mogu odmah biti puštene u trajni rad.

Primenom ovde iznetih predloga značajno bi se ubrzale procedure priključenja objekata iz kategorije kupca-proizvođača koji nisu domaćinstva i stambene zajednice snage od 10,8 kW do 50 kW, a ujedno bi se rasteretili kapaciteti EDS-a.

VII ZAKLJUČAK

Da bi se realizovao jedan energetska projekat na postojećem industrijskom objektu ili objektu specifične namene, potrebno je ispoštovati niz procesa kako bi se objekat bezbedno izvodio, a u toku eksploatacije i bezbedno koristio.

Izgradnjom FNE na 15 SSG pokazalo se da je moguće na postojećim objektima ovakve namene postaviti proizvodne kapacitete i smanjiti troškove za nabavku električne energije. Procene koje su rađene, a ujedno se i potvrđuju praćenjem rada izgrađenih FNE, mogu se ostvariti uštede od 10-20% u nabavci električne energije, zavisno od kapaciteta FNE i potrošnje same SSG. Na osnovu stečenog pozitivnog iskustva Kompanija je u junu 2023 započela projekat izgradnje solarnih FNE na dodatnih 30 stanica za snabdevanje gorivom.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Climate online baze podataka, http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#PVP [pristupljeno 12.02.2023.]
- [2] Microsoft Excel 2010 | Download Excel 2010 | Microsoft Office , <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/previous-versions/microsoft-excel-2010> [pristupljeno 07.02.2023.]
- [3] Zakon o zapaljivim i gorivim tečnostima i zapaljivim gasovima, "Sl. glasnik RS", br. 54/2015
- [4] UPUTSTVO_Mere bezbednosti pri obavljanju poslova u zoni eksplozivnosti i toksičnih gasova, NIS ad Novi Sad, 2017
- [5] Uredba o bezbednosti i zdravlja na radu na privremenim i pokretnim gradilištima, "Sl. glasnik RS", br. 14/2009, 95/2010, 98/2018 i 35/2023 - dr. zakon
- [6] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, "Sl. glasnik RS", br. 40/2021 i 35/2023
- [7] Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupaca proizvođača i snabdevača, "Sl. glasnik RS", br. 83/2021 i 74/2022
- [8] https://elektrodistibucija.rs/usluge/postupak-prikljucenja-na-dsee/postupak-sticanja-statusa-kupca-proizvodjaca/objekti_koji_nisu_domacinstva, [pristupljeno 07.02.2023]

AUTORI/AUTHORS

Rastislav Kragić, dipl. inž. el. teh, rastislav.kragic@nis.rs, ORCID [0009-0005-6328-6901](https://orcid.org/0009-0005-6328-6901)

Biljana Lovčević Kureljušić, dipl. ing. građ., biljana.lovcevic@nis.rs, ORCID [0009-0000-2226-8591](https://orcid.org/0009-0000-2226-8591)

Valentina Arambašić, dipl. inž. arh., valentina.arambasic@nis.rs, ORCID [0009-0007-1855-2339](https://orcid.org/0009-0007-1855-2339)

Željko Blitva, dipl. inž. rudarstva, zeljko.blitva@nis.rs, ORCID [0009-0004-3496-6548](https://orcid.org/0009-0004-3496-6548)

Nenad V. Pavlović, dipl. maš. inž., nenad.v.pavlovic@nis.rs, ORCID [0009-0002-5016-1243](https://orcid.org/0009-0002-5016-1243)

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.3

ENERGIJA, ekonomija, ekologija : list Saveza
energetičara / glavni i odgovorni urednik Dušan Gordić
. - God. 1, br. 1 (1996)- . - Beograd : Savez energetičara,
1996- (Kragujevac : Mašinac). - 29 cm

Tromesečno. - Drugo izdanje na drugom medijumu:
Energija, ekonomija, ekologija (Online) = ISSN 2812-7528
ISSN 0354-8651 = Energija (Beograd)
COBISS.SR-ID 108696839



www.savezenergeticara.org