

KONCEPT ELEKTROENERGETSKI NEZAVISNOG OTOKA U HRVATSKOJ – PRELIMINARNA STUDIJA OTOKA VISA ZERO ELECTRIC ENERGY ISLAND CONCEPT IN CROATIA – PRELIMINARY STUDY FOR THE ISLAND OF VIS

Krešimir Trontl – Dubravko Pevec – Mile Baće, Zagreb, Hrvatska

Hrvatski otoci, s jakim prirodnim potencijalom vjetra i Sunca, moguće su lokacije za intenzivnu uporabu obnovljivih izvora energije. U ovom su radu predstavljeni rezultati preliminarnog istraživanja mogućnosti izvedbe koncepta električno nezavisnog otoka uporabom isključivo obnovljivih izvora energije. Istraživanje je provedeno za otok Vis.

Croatian islands, with strong natural wind and solar potential, are possible locations for extensive usage of renewable energy sources. This paper presents the results of the preliminary investigation of the applicability of renewable energy sources for the zero-energy island concept on Croatian islands, in particular for the central Dalmatian island of Vis.

Ključne riječi: električno nezavisni otok; energija Sunca; energija vjetra; obnovljivi izvori energije; pumpna hidro pohrana
Keywords: pumped hydro storage; renewable energy sources; solar energy; wind energy; zero energy island



1 UVOD

Ministarstvo gospodarstva, rada i poduzetništva Republike Hrvatske nedavno je predstavilo nacrt zelene knjige, odnosno strategiju energetskog razvoja Republike Hrvatske s ciljem definiranja energetske politike i strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2020. godine [1]. Detaljna analiza trenutanih zahtjeva za električnom energijom te predviđanja porasta potrošnje električne energije, uz odgovarajuće proceduralne korake, rezultirala je s tri razvojna scenarija izgradnje novih energetskih postrojenja. Jedna od osnovnih pretpostavki sva tri scenarija je:

“Do 2020. godine predviđa se proizvodnja dodatnih 4 000 GWh iz obnovljivih izvora energije (OIE) s 1 545 MW nove instalirane snage. Pretpostavljeno je da se od 2011. do 2020. godine kapacitet u OIE povećava linearno (154,5 MW/god.)”

U pregledu do 2030. godine strategija sugerira udvostručenje kapaciteta postrojenja koja koriste obnovljive izvore energije (OIE) u odnosu na kapacitet 2020. godine (snaga od 3 000 MW s godišnjom proizvodnjom od 8 000 GWh).

Ciljevi za pojedine obnovljive izvore do 2020. godine, odnosno 2030. godine dani su u tablici 1.

1 INTRODUCTION

Recently, the Croatian Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship introduced the Energy Strategy Green Paper for the Republic of Croatia with the purpose of defining energy policy and future plans for the energy development of the Republic of Croatia by the year 2020 [1]. The comprehensive analysis of the current demands for electric energy, the presumed annual growth rate of electricity demands and the following of numerous guidelines, all resulted in three development scenarios for the construction of new power generation facilities. One of the fundamental building blocks of all the scenarios is the following presumption:

“A further production of 4 000 GWh is expected by 2020 from renewable energy sources (1 545 MW new electricity-generating capacity). It is assumed that between 2011 and 2020 capacities of renewable energy sources (RES) will increase linearly (154.5 MW/god.)”

In an overview up to the year 2030, the strategy suggests that the installed electricity-generating capacities using renewable energy sources (RES) will be doubled in comparison to 2020 (approximately 3 000 MW, and electricity generation of 8 000 GWh).

The objectives for particular sources of renewable energy by the year 2020, as well as 2030 are given in Table 1.

Tablica 1 – Ciljevi za pojedine obnovljive izvore do 2020. godine, odnosno 2030. godine prema Nacrtu zelene knjige [1]
Table 1 – The objectives for particular sources of renewable energy by the year 2020 and 2030 as indicated in the Draft of the Green Paper [1]

Obnovljivi izvor energije / Renewable energy source	Snaga / Power Godina / Year 2020., MW	Snaga / Power Godina / Year 2030., MW
Energija vjetra / Wind	1 200	2 000
Energija biomase / Biomass	140	420
Komunalni otpad / Waste-to-energy plants	40	60
Geotermalna energija / Geothermal	20	30
Energija Sunca / Solar	45	250
Male hidroelektrane / Small hydro	100	140
Ukupno snaga (energija) / Total power (energy)	1 545 MW (4,1 TWh)	2 900 MW (8,0 TWh)

Strategija također utvrđuje i potrebne preduvjete za povećanje iskorištenja obnovljivih izvora energije, razvoj prijenosne i distribucijske mreže, te donošenje odgovarajućih zakonskih propisa. Iz svega navedenog slijedi da je u skoroj budućnosti moguće očekivati intenziviranje uporabe obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije. Hrvatski otoci, s jakim prirodnim potencijalom energije Sunca i vjetra, izgledne su lokacije za intenzivnu uporabu obnovljivih izvora energije. Do sada je proveden

The strategy also establishes guidelines for approaching two aspects that are particularly important for the increase of renewable energy sources exploitation, the development of the transmission and distribution networks, as well as the establishment of an appropriate legislative and regulatory framework. Therefore, it is obvious that a strong boost of utilization of renewable energy sources for electricity production is to be expected in the near future.

cijeli niz studija s ciljem istraživanja mogućnosti uporabe OIE u Hrvatskoj, posebice na otocima.

Većina studija usmjerena je k općoj analizi primjenljivosti OIE [2], odnosno na analizu malih OIE sustava koji nisu spojeni na mrežu [3]. Provedene su i vrlo interesantne studije hibridnih vodik-OIE sustava za otoke [4] i [5]. U zadnje navedenoj studiji detaljno je analizirana mogućnost zadovoljenja zahtjeva za električnom energijom isključivo iz OIE za otok Mljet. Koncept električno nezavisnog otoka koji sve potrebe za električnom energijom zadovoljava iz OIE, istraživana je za različite lokacije i u svijetu [6] i [7].

Cilj je ovoga rada predstaviti rezultate preliminarnih istraživanja mogućnosti primjene koncepta električno nezavisnog otoka u Hrvatskoj, točnije primjena takvog režima na srednje dalmatinski otok Vis. Vodik se kao sredstvo pohrane energije ne razmatra, već se računa s ostalim načinima pohrane energije. Prema, nama dostupnim, informacijama prethodne studije primjenljivosti OIE na hrvatskim otocima djelomično su zanemarile pitanje jakih fluktuacija otočke populacije zbog turističkih aktivnosti. Stoga u radu naglašavamo važnost procjene broja turista.

Gruba procjena zahtjeva za električnom energijom otoka Visa dana je u drugom poglavlju. U trećem poglavlju analizirani su potencijali obnovljivih izvora energije na otoku. Važnost pohrane energije diskutirana je u četvrtom poglavlju, dok se u petom poglavlju diskutiraju rezultati analize i iznose opći zaključci.

2 ZAHTJEVI ZA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM

Ukupna potrošnja električne energije u Hrvatskoj je 2006. godine iznosila 15 061 GWh [8] i [9]. U tablici 2 dana je struktura potrošnje po različitim sektorima.

Croatian islands, with their strong natural wind and solar potential, are possible locations for an extensive usage of renewable energy sources. A number of studies have been conducted in the past with the aim of investigating the possibility of RES usage in Croatia or, specifically, on Croatian islands. Most of the studies were focused on analysing RES applicability in general [2] or on small scale off-grid RES applications [3]. Interesting investigations of hybrid hydrogen-RES systems have also been performed for Croatian islands [4] and [5]. In the latter study, a scenario leading to a 100% RES supply of the electric energy demand of the island of Mljet was carefully investigated. The idea of setting up a zero-energy island based exclusively on renewable energy sources was investigated for islands in different parts of the world as well [6] and [7].

It is the aim of this paper to present the results of the preliminary investigation of the applicability of the RES zero-energy island concept on Croatian islands, in particular the central Dalmatian island of Vis, excluding hydrogen as a means of energy storage, but rather considering other energy storage options. To the best of our knowledge, previous studies of RES applicability on Croatian islands did not thoroughly address the issues of strong population fluctuations throughout the year due to tourism activities. Therefore, we stress the importance of estimating the number of tourists visiting the island.

A rough estimate of the electricity demands on the island of Vis is given in Section 2. In Section 3, renewable energy resources of the island are analyzed. The importance of energy storage is discussed in Section 4. Discussions on the results of the analysis, as well as general conclusions, are given in Section 5.

2 ELECTRICITY DEMANDS

According to [8] and [9] the final demand for electricity in Croatia in the year 2006 was 15 061 GWh. Table 2 lists electricity consumption by different sectors.

Tablica 2 – Potrošnja električne energije po sektorima, u Hrvatskoj 2006. godine [8]
Table 2 – The electricity consumption by different sectors in Croatia for the year 2006 [8]

Sektor / Sector	Potrošnja električne energije / Electricity consumption, GWh
Industrija / Industry	3 455
Promet / Transport	302
Kućanstva (stanovništvo) / Residential (households)	6 520
Usluge / Services	4 455
Poljoprivreda / Agriculture	68
Graditeljstvo / Construction	261
Ukupno / Total	15 061

Uzimajući u obzir broj stanovnika [10] slijedi da je direktna potrošnja električne energije iznosila godišnje 1,5 MWh po stanovniku, odnosno da je ukupna potrošnja električne energije po stanovniku iznosila godišnje približno 3,4 MWh.

Sektor komercijalnih i javnih usluga, s približnom godišnjom potrošnjom od 1 MWh po stanovniku, moguće je dodatno podijeliti na podsektore: restorani, trgovine, uredi i ostalo. Kako je Vis turistička lokacija sektor komercijalnih i javnih usluga prvenstveno se sastoji od dva podsektora – restorana i trgovina. Stoga se u predstojećoj analizi pretpostavlja da je potrošnja električne energije u sektoru komercijalnih i javnih usluga 60 % prosječne potrošnje za taj sektor [6].

Struktura potrošnje električne energije u domaćinstvima na otoku ponešto se razlikuje od strukture potrošnje na kopnu. Detaljni podaci potrošnje energije na hrvatskim otocima dostupni su za 1996. godinu. Otok Vis tada je imao 4 338 stanovnika u 1 477 domaćinstava, a ukupna potrošnja energije u domaćinstvima iznosila je godišnje 73,06 TJ [11]. Struktura energetske potrošnje bila je sljedeća: toplinska energija 60,69 TJ (grijanje 43,45 TJ, topla voda 6,07 TJ; kuhanje 11,17 TJ), ne-toplinska energija 12,11 TJ i hlađenje 0,26 TJ.

Udio električne energije iznosio je 36 % (relativno visoki udio električne energije posljedica je intenzivne uporabe struje za ispunjenje toplinskih zahtjeva), odnosno 26,30 TJ ili 1,68 MWh po stanovniku godišnje. Ukupna hrvatska potrošnja električne energije u domaćinstvima je 1996. godine iznosila 4 898 MWh. Prema [12] Hrvatska je 1996. godine imala približno 4,2 milijuna stanovnika, iz čega slijedi da je prosječna godišnja potrošnja električne energije po stanovniku iznosila 1,17 MWh. Uz pretpostavku istog omjera potrošnje električne energije (1,68 MWh po stanovniku na otoku i 1,17 MWh po stanovniku u Hrvatskoj), prosječna potrošnja električne energije po stanovniku na otoku 2006. godine iznosila je 2,15 MWh. Prema [10] broj stalnih stanovnika otoka Visa je 3 600, no pretpostavljajući porast populacije zbog općeg razvitka otoka, u predstojećoj je analizi pretpostavljeno 5 000 stalnih stanovnika otoka, što rezultira potrošnjom električne energije u domaćinstvima od 10 750 MWh godišnje.

Neke studije [13] sugeriraju da samo u gradu Visu postoji gotovo 1 000 tzv. vikend stanovnika. Kako bi se u predstojećoj analizi uzelo u obzir i moguće povećanje zahtjeva za električnom energijom, pretpostavljeno je da na cijelom otoku postoji 2 000 tzv. vikend stanovnika. Također je pretpostavljeno da takvi stanovnici borave na otoku svaki drugi vikend, odnosno 52 dana godišnje. Stoga je godišnje povećanje potrošnje električne energije, pri čemu je kalkulacija bazirana na dnevnom prosjeku po-

Taking into account the Croatian population [10], the simple calculation indicates that the residential electricity consumption per capita is approximately 1,5 MWh/year, while the total electricity consumption per capita is roughly 3,4 MWh/year.

The sector of commercial and public services, with electricity consumption per capita of approximately 1 MWh/year, can be further divided into restaurants, retail facilities, offices and others. As a tourist location, the commercial sector of the island of Vis is mostly comprised of restaurants and retail facilities. Therefore, the assumption that the per capita electricity consumption of the commercial sector amounts to 60 % of the average consumption for this sector has been used in the proceeding analysis [6].

The structure of energy consumption in households on the islands is somewhat different than the one on the mainland. Detailed energy consumption data for Croatian islands are available for the year 1996 when the island of Vis had 4 338 residents in 1 477 households with the total energy consumption in households of 73,06 TJ per year [11]. The structure of energy consumption was as follows: thermal 60,69 TJ (heating 43,45 TJ; hot water 6,07 TJ; cooking 11,17 TJ), non-thermal 12,11 TJ and cooling 0,26 TJ.

The electricity share in overall consumption was 36 % (relatively high due to intensive usage of electricity for thermal purposes) resulting in the total electricity consumption of 26,30 TJ, or 1,68 MWh per capita. The overall national household electricity consumption in the year 1996 was 4 898 MWh. The Croatian population in the year 1996 can be estimated at around 4,2 million [12], resulting in national average electricity consumption of 1,17 MWh per capita. If the same ratio of electricity consumption (1,68 MWh to 1,17 MWh) is used on data for the year 2006, the household electricity consumption for the island of Vis can be estimated at 2,15 MWh per year per capita. The current population of the island can be estimated at 3 600 permanent residents [10], however to account for a possible increase of population as a result of the island's development in general, an assumption of 5 000 residents was used in the proceeding analysis, resulting in total household electricity consumption of 10 750 MWh per year.

Some researches [13] suggest that up to a 1 000 of so-called weekend residents exist in the town of Vis only. To account for a possible increase in electricity demand, the following assumption was used: the number of weekend residents for the entire island was estimated at 2 000. It was also presumed that they visit the island every other weekend resulting in 52 days spent on the island. The annual increase of electricity consumption

trošnje, izraženo kao

$$2\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{52}{365} \approx 613 \text{ MWh}.$$

Otok Vis pripada kategoriji slabo razvijenih otoka [11]. Stoga ni potrošnja električne energije u industriji (djelomično aktivna tvornica za preradu ribe, zatvorena tekstilna tvornica, aktivno samo 20 % industrije vina), prometu, poljoprivredi i graditeljstvu nije posebice izražena. Niti je za očekivati veliki porast potrošnje električne energije u navedenim sektorima. 1996. godine ukupna potrošnja električne energije u industriji otoka Visa iznosila je 12,23 TJ dok je potrošnja električne energije u kućanstvima iznosila 26,30 TJ. Stoga je pretpostavljeno da bi 10 % povećanje ukupne potrošnje električne energije u svim ostalim sektorima trebalo biti dovoljno za zadovoljenje industrijskih potreba za električnom energijom u budućnosti.

Otok Vis snažno je turističko središte pa je stoga nužna procjena turističke potrošnje električne energije. Turistička sezona, praktično, počinje 15. lipnja i traje do 15. rujna s vrhuncem u periodu 1. do 15. kolovoza. Broj turista na otoku Visu teško je posve precizno procijeniti iz dva osnovna razloga. Prvi je tzv. sivi turizam, odnosno broj turista koji neprijavljeni borave na otoku, a drugi je veliki broj, nekad vojnih, objekata za koje se očekuje prenamjena u turističke svrhe. Kako je ovo preliminarna i relativno gruba analiza mogućnosti izvedbe koncepta električno nezavisnog otoka sa stajališta prirodnih otočkih resursa, broj turista slobodno je procijenjen: za vrhunac turističke sezone pretpostavljen je dvostruki broj turista u odnosu na broj stalnih stanovnika otoka, dok je za preostali period turističke sezone pretpostavljeno da je broj turista identičan broju stalnih stanovnika. Stoga je dodatni zahtjev za električnom energijom, pri čemu je kalkulacija također bazirana na dnevnom prosjeku potrošnje, izražen kao:

$$10\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{15}{365} + 5\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{75}{365} \approx 3\,100 \text{ MWh}.$$

Ukupna potrošnja električne energije može se izraziti kao:

10 750 MWh (potrošnja stalnih stanovnika) + 613 MWh (potrošnja vikend stanovnika) + 3 100 MWh (turistička potrošnja) + 4 000 MWh (potrošnja u sektoru usluga) = 18 463 MWh.

Uzimajući u obzir pretpostavku potrošnje električne energije u industriji (povećanje od 10 %) i ugrađenu rezervu (također povećanje od 10 %) ukupna godišnja potrošnja električne energije procijenjena je na 22,2 GWh. Na godišnjoj razini ta potrošnja odgovara zahtjevu za snagom od 2,5 MWh. Me-

was calculated based on average daily electricity consumption as:

$$2\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{52}{365} \approx 613 \text{ MWh}.$$

The island of Vis belongs to the category of poorly developed islands [11]. The industry (partially active fish factory, closed textile factory, only 20 % of wine industry active), transport, agriculture and construction electricity consumption is not particularly emphasized and the high increase of consumption is not expected in the future. In the year 1996 the total industry energy consumption on the island of Vis was 12,23 TJ with the electricity share of 24 % or 817 MWh (2,94 TJ) [11]. Taking into account the electricity consumption of 26,30 TJ in households in the year 1996, a 10 % increase of the estimated total consumption demand in all other sectors should be adequate to cover the industry electricity demands in the future.

The island of Vis is a strong tourist centre, which requires an estimation of tourist electricity consumption. The tourist season basically starts on June 15, and ends on September 15, with a peak from August 1 till August 15. The number of tourists on the island of Vis is hard to estimate precisely for two main reasons. The first is the so-called grey tourism, i.e. the tourists that are not officially registered, and the second is a large number of former military facilities on the island that are expected to be transformed into tourist facilities in the future. Since this is a preliminary and rough analysis of the zero-energy island concept feasibility from the standpoint of natural resources, we took the liberty of estimating the number of tourist as double the projected number of permanent residents in the peak of the season and equal to the number of residents throughout the rest of the tourist season. That estimation, also based on daily average electricity consumption, results in additional electricity consumption of:

$$10\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{15}{365} + 5\,000 \cdot 2.15 \cdot \frac{75}{365} \approx 3\,100 \text{ MWh}.$$

Therefore, the electricity consumption becomes:

10 750 MWh (permanent residents consumption) + 613 MWh (weekend residents consumption) + 3 100 MWh (tourist consumption) + 4 000 MWh (services electricity consumption) = 18 463 MWh.

Taking into account the industry consumption (10%) and built-in reserve (10 %), one can roughly estimate the total annual electricity consumption to be approximately 22,2 GWh. That consumption corresponds to the power of approximately 2,5 MWh on an annual base. However, due to expected extreme fluctuation of the required power, especially dur-

đutim, zbog očekivanih ekstremnih fluktuacija u zahtjevu za snagom, posebice za vrijeme turističke sezone, proračun potrebne snage baziran na prosječnoj godišnjoj potrošnji nije zadovoljavajući za dizajn sustava električno nezavisnog otoka.

Za očekivati je da će najveća potrošnja električne energije biti tijekom vrhunca turističke sezone. Najveću dnevnu potrošnju u tom periodu moguće je procijeniti temeljem sljedećih pretpostavki:

- broj stalnih stanovnika: 5 000,
- broj vikend stanovnika: 2 000,
- broj turista: 10 000.

Uzimajući u obzir prosječnu dnevnu potrošnju električne energije po stanovniku, uključujući potrošnju sektora usluga od 7,5 kWh, procijenjena ukupna dnevna potrošnja električne energije za vrijeme vrhunca turističke sezone iznosi 127,5 MWh, što u dnevnom prosjeku odgovara snazi od 5,3 MW. Kako je dnevna potrošnja električne energije tijekom ljeta veća od godišnjeg prosjeka, pretpostavljen je faktor opterećenja od 70 % [6], što odgovara maksimalnoj snazi od 7,6 MW. Uz, već prije spomenute, pretpostavke o 10 % povećanju za potrebe industrije i 10 % povećanju zbog rezerve, procijenjen je maksimalni zahtjev za snagom od približno 9 MW.

Za ostatak turističke sezone, uporabom iste proračunske procedure i uz pretpostavku o 5 000 turista, maksimalni zahtjev za snagom procijenjen je na 6,4 MW. Za preostali dio godine snaga od 2,6 MW trebala bi biti dovoljna.

Pregled procijenjenih zahtjeva za snagom tijekom različitih perioda godine dan je na slici 1. Važno je napomenuti da je provedena analiza zahtjeva za električnom snagom i energijom, bazirana na dnevnim prosjecima, relativno gruba, no adekvatna za preliminarnu fazu istraživanja. Do-

ing the tourist season, the annual average power calculated based on the electricity consumption is not an applicable parameter for the zero-energy island system design.

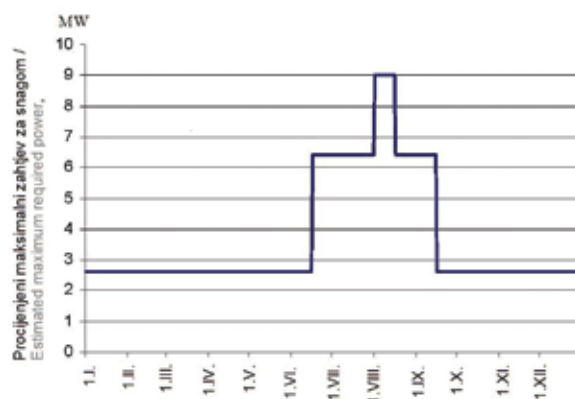
The peak electricity consumption is to be expected during the peak of the tourist season. Daily consumption in that period can be estimated based on following assumptions:

- number of residents is 5 000,
- number of weekend residents is 2 000,
- number of tourists is 10 000.

Taking into account the daily average residential electricity consumption on the island, including the services consumption, of approximately 7,5 kWh per capita, the total daily electricity consumption in the peak is estimated to be 127,5 MWh, corresponding to the power of 5,3 MW on a daily base. Since the daily electricity consumption during the summer is higher than the year's average, the load factor of 70 % has been assumed [6] resulting in a peak of 7,6 MW. Taking into account the industry (10 %) and built-in reserve (10 %), one can roughly estimate the required peak power to approximately 9 MW.

Based on the same calculative procedure as used previously for the peak tourist season period, the required power during the rest of the tourist season, using the assumption of 5 000 tourists on the island, is estimated to be approximately 6,4 MW. Throughout the non-tourist season 2,6 MW should be enough.

The estimated required power for different periods throughout the year is graphically depicted in Figure 1. It is important to emphasize that the performed analysis of the electric energy and power requirements, based on average daily values, is rather rough, but adequate for preliminary stage of investigation. However, the obtained values give a good insight into



Slika 1 — Procijenjeni zahtjevi za maksimalnom snagom tijekom godine
Figure 1 — Estimated maximum required power throughout the year

bivene vrijednosti upućuju na važnost odgovarajućeg modeliranja autonomnog OIE sustava i veliku fleksibilnost koju taj sustav mora posjedovati.

3 POTENCIJAL OBNOVLJIVIH IZVORA OTOKA VISA

Površina otoka Visa (slika 2) iznosi 90,3 km², dok mu je duljina obale 77 km. Smješten je na približno 42°2' sjeverne zemljopisne širine i 16°10' istočne zemljopisne dužine. Ima blagu mediteransku klimu s prosječnom temperaturom od 8,8 °C u siječnju i 24 °C u srpnju.

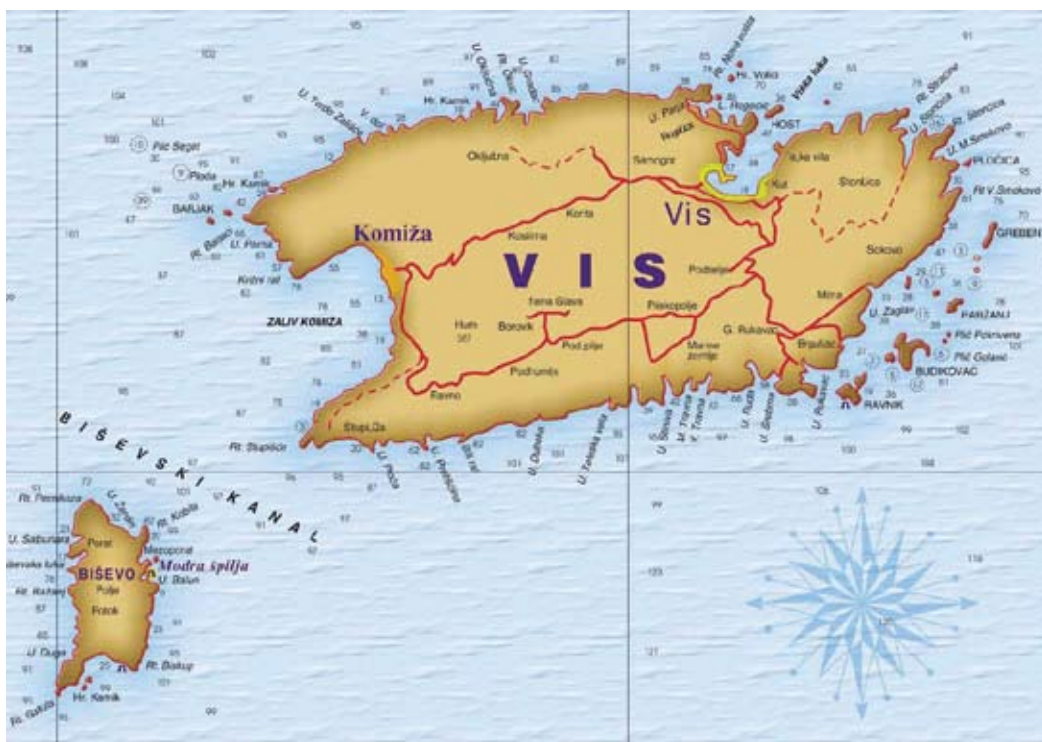
U predstojećoj analizi razmatrana je samo energija Sunca i energija vjetera. Iako je, teoretski, i ostale OIE moguće uzeti u obzir pri modeliranju otočkog OIE sustava, praktično, samo prije spomenute energije Sunca i vjetera imaju adekvatan potencijal.

the importance of proper modelling of the potential self-sustainable RES system, and high flexibility that would be required from such a system.

3 RENEWABLE ENERGY RESOURCES OF THE ISLAND OF VIS

The island of Vis (Figure 2) has an area of 90,3 km², and its coastline is 77 km long. In terms of latitude and longitude the island is located at approximately 43°2' N and 16°10' E. It has a mild Mediterranean climate with an average temperature of 8,8 °C in January and 24 °C in July.

In the proceeding analysis only solar and wind energy shall be discussed in detail. Although, in theory, other RES could be utilized in modelling the island's RES system, in practice only the aforementioned renewable energy sources (solar and wind) have adequate potential.



Slika 2 — Karta otoka Visa
Figure 2 — Map of the island of Vis

3.1 Energija Sunca

Za procjenu otočkog potencijala energije Sunca nužno je poznavanje sunčevog ozračenja. Prema podacima dostupnima za otoke Hvar i Lastovo [14] i [15] procijenjena je mjesečna raspodjela sunčevog ozračenja za otok Vis (tablica 3).

3.1 Solar energy

To estimate the potential of the solar energy available on the island, it is necessary to know the solar irradiation. According to the available information for the islands of Hvar and Lastovo [14] and [15], the monthly distribution of solar irradiation for the island of Vis was estimated (Table 3).

Tablica 3 – Procijenjeno trajanje sijanja Sunca i sunčevo ozračenje za otok Vis
 Table 3 – Estimated sunshine duration and solar irradiation for the island of Vis

Mjesec / Month	Procijenjeno trajanje sijanja Sunca / Estimated average sunshine duration, h/mjesec / h/month	Procijenjeno prosječno dnevno sunčevo ozračenje na optimalno nagnutu plohu okrenutu prema jugu / Estimated average daily solar irradiation on an optimally positioned south oriented surface, kWh/m ²
Siječanj / January	118,7	3,05
Veljača / February	141,4	4,05
Ožujak / March	183,4	4,70
Travanj / April	224,5	5,56
Svibanj / May	279,1	6,30
Lipanj / June	315,5	7,18
Srpanj / July	362,3	7,25
Kolovoz / August	326,1	6,43
Rujan / September	257,2	5,57
Listopad / October	208,7	4,77
Studeni / November	123,6	3,22
Prosinac / December	111,2	2,74
Prosjeck / Average	221,0	5,07
Ukupno godišnje / Total per year	2 651,5	1 849

Iako nedavno objavljene studije sugeriraju da je uporabom novih tehnologija moguće postići efikasnost solarnih ćelija veću od 42 % [16], efikasnost dostupnih solarnih ćelija kreće se od 5 % do 20 %. U predstojećoj analizi pretpostavljena je efikasnost solarnih ćelija od 15 %, kao vrijednost za standardne fotonaponske panele od monokristalnog silicija [6]. Jednostavan proračun pokazuje da je prosječna godišnja snaga koju je moguće postići po kvadratnom metru solarnih ćelija na otoku Visu 32 W/m²:

$$\frac{1\ 849 \cdot 0,15}{24 \cdot 365} \approx 32 \text{ W/m}^2.$$

Na, za dizajn autonomne električne mreže, važnija je raspodjela prosječne mjesečne snage koju je moguće postići, odnosno potrebna površina solarnih ćelija za zadovoljenje zahtjeva prikazanih na slici 1, uz pretpostavku da se upotrebljavaju samo solarne ćelije koje su optimalno pozicionirane i okrenute k jugu. Zanimari li se efikasnost DC/AC konverzije, za zadovoljenje zahtjeva za maksimalnom snagom za vrijeme vrhunca turističke sezone u kolovozu (9 MW), približno je potrebna površina od 0,225 km², pri čemu je proračun baziran na podacima danima u tablici 3.

Stoga bi za uspostavu mreže bazirane isključivo na energiji Sunca bila potrebna površina od približno 475 m x 475 m. U ostatku godine u sustavu bi postojao višak snage.

Although recent studies show that by using novel technologies, solar cell efficiency of more than 42 % can be achieved [16], the currently commercially available solar cells have the efficiency of approximately 5 % to 20 %. As suggested in [6], a 15 % solar cell conversion efficiency has been assumed in the following analysis, as a reasonable efficiency of standard photovoltaic monocrystalline silicon panels. A simple calculation indicates that an average power of approximately 32 W/m² can be obtained per solar cell square meter on the island of Vis:

$$\frac{1\ 849 \cdot 0,15}{24 \cdot 365} \approx 32 \text{ W/m}^2.$$

However, a distribution of average obtainable power per month and the solar cell surface necessary to fulfil the requirements presented in Table 3 (with the assumption that only solar energy is used and that the optimally angled solar cells are facing South) are more important for the design of a self-sustainable grid. To meet the estimated maximum power requirement during the peak tourist season (9 MW) in August, the calculation based on data given in Table 3, without taking into account the efficiency of DC/AC conversion, indicates that approximately 0,225 km² of solar panels are necessary.

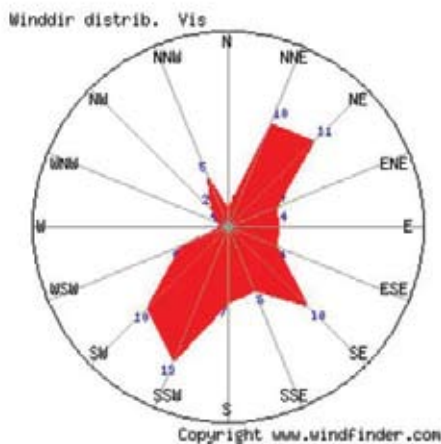
Establishing the grid only on solar energy would therefore require the surface of approximately 475 m x 475 m. During the rest of the year excess power would exist in the system.

3.2 Energija vjetra

Na slici 3 prikazana je godišnja ruža vjetrova otoka Visa, dok su u tablici 4 dani nautički podaci mjesečne brzine vjetra [17]. Prevladavajući su sjeveroistočni i jugozapadni vjetrovi s godišnjom prosječnom brzinom od 3,6 m/s.

3.2 Wind energy

The annual wind rose for the island of Vis is given in Figure 3, while in Table 4 nautical values for average monthly wind speeds are given [17]. The prevailing wind directions are NE and SW with the annual average speed of 3,6 m/s.



Slika 3 – Godišnja ruža vjetrova otoka Visa
Figure 3 – Annual wind rose for the island of Vis

Tablica 4 – Prosječna mjesečna brzina vjetra na otoku Visu (nautički podaci)
Table 4 – Monthly averaged wind speed for the island of Vis (nautical values)

Mjesec / Month	Prosječna brzina vjetra / Average wind speed, m/s
Siječanj / January	3,6
Veljača / February	3,6
Ožujak / March	4,1
Travanj / April	3,6
Svibanj / May	4,1
Lipanj / June	3,1
Srpanj / July	3,1
Kolovoz / August	3,1
Rujan / September	3,6
Listopad / October	3,6
Studeni / November	4,1
Prosinac / December	3,6

Na nekim su lokacijama na otoku brzine vjetrova veće i stoga su te lokacije pogodnije za iskorištenje energije vjetra.

The average wind speeds are higher on some locations on the island, which are therefore more suitable for wind turbine electricity production.

S obzirom na mogućnost eksploatacije energije vjetra, dvije su lokacije na otoku detaljno istraživane (Široko brdo i Hum) [18] i [19]. Za obje su lokacije analizirani različiti scenariji. Prema jednom od analiziranih scenarija za lokaciju Široko

Two locations on the island (Široko brdo and Hum) have been thoroughly studied [18] and [19] regarding possible wind energy exploitation. For both locations, a number of different scenarios has been analysed. On the location of Široko brdo, situated

brdo, smještenoj na sjeverozapadnoj strani otoka, s prosječnom brzinom vjetra od 8,3 m/s na 10 m iznad tla, šest vjetro-turbina svaka snage 1,5 MW, godišnje bi mogle proizvesti približno 30 GWh električne energije. Na lokaciji Hum, smještenoj na zapadnoj strani otoka s prosječnom brzinom vjetra od 7,8 m/s na 10 m iznad tla, prema jednom od analiziranih scenarija pet vjetro-turbina svaka snage 15 MW godišnje bi mogle proizvesti približno 25 GWh električne energije. Iako su oba scenarija izrazito optimistična s predviđanjem 30 % raspoloživosti vjetroagregata, ipak sugeriraju da na otoku postoji adekvatni prirodni potencijal vjetra za zadovoljenje potreba nametnutih konceptom električno nezavisnog otoka.

Bitno je napomenuti da je Vlada Republike Hrvatske 2004. godine donijela Uredbu o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog područja mora, prema kojoj na otocima nije dopušteno planiranje i izgradnja građevina za iskorištavanje snage vjetra za električnu energiju [20]. Stoga eventualno iskorištenje energije vjetra za proizvodnju električne energije na otoku Visu zahtijeva i odgovarajuće promjene važećih pravilnika i propisa.

4 POHRANA ENERGIJE

Podaci dani u prethodnim poglavljima sugeriraju da na otoku Visu postoje adekvatni prirodni potencijali za razmatranje mogućnosti uspostave koncepta električno nezavisnog otoka. Iako je teoretski moguće uspostaviti autonomni OIE sustav bez sredstava pohrane energije, zbog varijabilne karakteristike sunčevog i vjetro potencijala, takav bi sustav bio izrazito nestabilan. Bez obzira na rezervu ugrađenu u sustav, on ne bi bio pouzdan. Stoga je važno razmotriti i pitanje pohrane energije.

Već je spomenuto da je hibridni vodik-OIE sustav pomno razmatran za moguću primjenu na hrvatskim otocima. Glavna je prednost takvog sustava gustoća energije vodika i njegova primjenljivost za druge namjene, osim proizvodnje električne energije (grijanje i promet). S druge pak strane, glavni je nedostatak tehnologije vodik-gorive ćelije ukupna efikasnost od približno 30 % do 40 %, kao i visoka cijena.

Nedavno je provedena detaljna analiza različitih tehnologija pohrane energije koje je moguće primijeniti za autonomnu otočku električnu mrežu [21]. Za otoke Egejskog arhipelaga u Grčkoj analizirano je šest različitih sustava pohrane energije (pumpna hidro pohrana – PHP, pohrana energije komprimiranim zrakom, pohrana energije zamašnjacima, akumulatorska pohrana energije, baterijska pohrana energije i vodikove gorive ćelije

on the NW side of the island with the average wind speed of 8,3 m/s measured 10 m above the ground, in one of the analysed scenarios six 1,5 MW wind turbines could produce approximately 30 GWh of electricity per year. On the location of Hum, situated on the W side of the island with the average wind speed of 7,8 m/s measured 10 m above the ground, in one of the analysed scenarios five 15 MW wind turbines could produce approximately 25 GWh of electricity per year. Although both scenarios are rather optimistic, with a wind turbine capacity factor of more than 30 %, they indicate that adequate wind potential to fulfil the requirements of the zero electric energy island concept exists on the island.

It is important to emphasize that, in the year 2004, the Croatian government adopted a regulation on the protection of the coastal region [20]. According to that particular regulation, planning and construction of structures for harvesting wind energy and its utilization in electricity production is forbidden. Therefore, wind energy exploitation for electricity production on the island of Vis would require changes in current legislative and regulatory framework.

4 ENERGY STORAGE

Data given in previous paragraphs indicate that there is adequate renewable energy potential on the island of Vis to discuss the possibility of a zero electric energy island concept. Although, it is theoretically possible to set up a self-sustainable RES system without energy storage, such a system would be highly unstable due to the intermittent character of solar and wind potential. Regardless of the reserve built into the system it would still be unreliable. Therefore, it is important to discuss the issue of energy storage.

As mentioned earlier, hybrid hydrogen-RES systems have been analysed for possible application on Croatian islands. The main advantages of such systems are a high energy density of hydrogen, and its applicability for purposes other than electricity production (heating and transport). The main disadvantages of hydrogen fuel cell technology are the overall efficiency rate, which is approximately 30 % to 40 %, as well as its price.

Recently, a detailed study of different storage technologies that could be applied for setting up an autonomous island energy network has been conducted [21]. Six storage systems (pumped hydro storage – PHS, compressed air energy storage, flywheels energy storage, battery energy storage, flow batteries, and hydrogen fuel cells) have been analysed for the Aegean Archipelago

je). Otoci su klasificirani u četiri grupe u ovisnosti o zahtjevima za energijom i snagom, te je provedena analiza različitih tehnologija pohrane energije za dva scenarija udjela energije pohranjene energije u ukupno utrošenoj energiji (50 % i 100 %).

Godišnji energetska zahtjev (22,2 GWh), odnosno zahtjev za snagom (9 MW) svrstavaju otok Vis u kategoriju otoka sa srednje velikom električnom mrežom. Za oba je analizirana scenarija, u slučaju srednje velike električne mreže, sa stajališta ekonomske isplativosti najprihvatljivija pumpna hidro pohrana, a slijedi pohrana u Na – S baterijama za slučaj 50 % udjela, odnosno pohrana komprimiranim zrakom za slučaj 100 % udjela. Najskuplje opcije su tehnologije vodik – gorive ćelije i akumulatorska (olovo-kiselina) pohrana.

Na prvi pogled topografija otoka Visa omogućava ozbiljno razmatranje pumpne hidro pohrane. Preliminarni konzervativni proračuni sugeriraju da bi sustav s rezervoarima približnog kapaciteta od milijun kubičnih metara (10^6 m^3) vode, s visinskom razlikom od 100 m i pretpostavljenom efikasnosti od 85 % trebao biti više nego dovoljan za 24 satnu rezervu u vrhuncu turističke sezone. Detaljni tehnički dizajn PHP-OIE sustava koji bi zadovoljio otočke energetske i ekološke zahtjeve te njegova optimizacija prelaze okvire ovog rada, ali su planirani za skorašnju budućnost.

5 ZAKLJUČAK

U ovom su radu predstavljeni rezultati preliminarnog istraživanja mogućnosti izvedbe koncepta električno nezavisnog otoka uporabom isključivo obnovljivih izvora energije. Istraživanje je provedeno za otok Vis. Provedena je analiza otočke populacije u odnosu na broj turista i pokazano je da na otoku postoje adekvatni prirodni potencijali obnovljivih izvora energije za zadovoljenje energetske zahtjeva. Svaki od analiziranih obnovljivih izvora energije (Sunce i vjetar) ima zasebno dovoljan potencijal za zadovoljenje zahtjeva za električnom energijom. Međutim, uzimajući u obzir distribuciju potencijala OIE tijekom godine (više Sunca ljeti – više vjetra tijekom zime i proljeća), kao i fluktuaciju broja stanovnika zbog turizma, može se pretpostaviti da je kombinacija solarnih panela i vjetroagregata u prednosti u usporedbi s uporabom samo jednog OIE.

Za uspostavu autonomne i pouzdane otočke električne mreže nužna je i pohrana energije. Naglašeno je da su s ekonomskog stajališta najprihvatljivije pumpna hidro pohrana i pohrana uporabom Na-S baterija, te pohrana komprimiranim zrakom.

islands in Greece. The islands were categorized in four groups depending on energy and power requirements, and different storage systems were compared for two scenarios of energy storage system contribution to the total energy consumption (50 % and 100 %).

The annual energy (22,2 GWh) and power (9 MW) requirements of the island of Vis place the island in the category of medium sized electrical networks. For both analysed scenarios, in the case of a medium size electrical grid, from economical standpoint of view, pumped hydro storage is the best option, followed by Na-S batteries in the case of 50 % storage contribution, and compressed air energy storage in the case of 100 % storage contribution to total energy consumption. Hydrogen fuel cells and lead acid batteries storage options are the most expensive ones.

At a first glance of the island of Vis topography, pumped hydro storage (PHS) system should be taken into serious consideration for energy storage. First hand, conservative calculation suggests that a reservoir of approximately one million cubic meters (10^6 m^3) of water, placed 100 m above the turbines, with presumed efficiency of 85 % should be adequate for more than a 24 hour backup during the peak of the tourist season. A detailed technical design of the PHS-RES system that could satisfy the island's electricity consumption requirements, as well as the environmental requirements and its optimization are beyond the scope of this paper, but are planned for the near future.

5 CONCLUSION

This paper presents the results of the preliminary investigation of the applicability of a RES zero-energy island concept on Croatian islands, in particular the central Dalmatian island of Vis. The analysis of the population on the island depending on the number of tourists is performed, and it is shown that adequate RES potential exists to fulfil all the requirements for electricity. Each analysed renewable energy source (solar, wind) has the potential to fulfil the electricity demand on a stand-alone basis. However, taking into account the RES potential distribution over the year (more solar during summer – more wind during winter and spring), as well as population fluctuations due to tourism, one can assume that a combination of solar panels and wind turbines is most likely in advantage compared to single RES use.

In order to set up an autonomous and reliable electrical network of the island, energy storage has to be implemented. It is stressed that, from

Optimalni dizajn PHP-OIE autonomnog sustava koji bi zadovoljio otočke energetske zahtjeve prelaze okvire ovog rada, ali su planirani za skorajšnju budućnost.

an economical standpoint, pumped hydro storage (PHS), followed by Na-S batteries and compressed air storage are the best energy storage options.

An optimized design of a PHS-RES autonomous island system that could satisfy the electricity consumption requirements was beyond the scope of this paper, but is planned for the near future.

LITERATURA / REFERENCES

- [1] Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship and United Nations Development Programme (UNDP): Update/Upgrade of the Energy Strategy and of the Implementation Programme of the Republic of Croatia, Green Paper, Draft, 2008
- [2] FERETIĆ, D., et al, N., Feasibility Analysis of Wind-Energy Utilization in Croatia. Energy 24,1999
- [3] RAKIĆ, M., et al, Potential for Off-Grid PV Applications on Croatian Islands, Energy and the Environment, 2006
- [4] VUJČIĆ, R., Modeling of Hydrogen Energy System for Adriatic Island, Symposium on Operations Research, SOR96, Braunschweig, Germany, September 4-6, 1996
- [5] KRAJACIĆ, G., et al, Hydrogen As an Energy Vector in The Islands' Energy Supply, International Journal of Hydrogen Energy 33, 2008
- [6] BAGCI, B., Towards a Zero Energy Island, Renewable Energy 34, 2009
- [7] Hydroelectric Power to Make Canary Island Become 100% Renewable Energy Powered, <http://www.renewableenergymagazine.com>, Accessed on December 10. 2008
- [8] Ministry of Economy, Labour and Entrepreneurship, Energy in Croatia 2006 – Annual Energy Report, Zagreb, 2007
- [9] Electricity/Heat in Croatia in 2006, <http://www.iea.org>, Accessed on December 11. 2008.
- [10] Republic of Croatia – Central Bureau Of Statistics, The Census of Population, Households and Dwellings 31st March 2001
- [11] KINDERMAN LONČAREVIĆ, A., Report on Energy System and Waste Management on Croatian Islands, www.europeanislands.net, Accessed on December 19. 2008.
- [12] GELO, J., Ratni učinci na promjene demografskih struktura u Hrvatskoj, Društvena istraživanja 5-6 (43-44), 8,1999.
- [13] SAMOKOVLJA DRAGIČEVIĆ, J., Pročišćavanje otpadnih voda i kanalizacijski sustav grada Visa, Građevinar 57, 2005.
- [14] HRASTNIK, B., et.al., SUNEN Program korištenja energije Sunca prethodni rezultati i buduće aktivnosti, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998.
- [15] MATIĆ, Z., Sunčevo zračenje na području Republike Hrvatske – Priručnik za energetske korištenje sunčevog zračenja, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2007.
- [16] From 40,7 to 42,8 % Solar Cell Efficiency, <http://www.renewableenergyworld.com>, Accessed on December 19. 2008
- [17] Windstatistic_Vis, <http://www.windfinder.com/windstats/windstatistic>, Accessed on December 20. 2008
- [18] HORVATH, L., et.al., ENWIND Program korištenja energije vjetra - prethodni rezultati i buduće aktivnosti, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 1998.
- [19] HORVATH, L., et.al., ENWIND Program korištenja energije vjetra – nove spoznaje I provedba, Energetski institut Hrvoje Požar, Zagreb, 2001.
- [20] Vlada Republike Hrvatske, Uredba o uređenju i zaštiti zaštićenog obalnog područja mora, Narodne novine 128/2004
- [21] KALDELLIS, J.K., et al, Techno-Economic Comparison of Energy Storage Systems for Island Autonomous Networks, Renewable and Sustainable Energy Review 13, 2009

Adrese autora:

Authors' Adresses:

Dr. sc. **Krešimir Trontl**
kresimir.trontl@fer.hr
Prof. dr. sc. **Dubravko Pevec**
dubravko.pevec@fer.hr
Prof. dr. sc. **Mile Baće**
mile.bace@fer.hr
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Krešimir Trontl, PhD
kresimir.trontl@fer.hr
Prof. **Dubravko Pevec**, PhD
dubravko.pevec@fer.hr
Prof. **Mile Baće**, PhD
mile.bace@fer.hr
University of Zagreb
Faculty of Electrical Engineering and Computing
Unska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
2009-10-05

Manuscript received on:
2009-10-05

Prihvaćeno:
2009-10-28

Accepted on:
2009-10-28