

Karlo Kobeščak
Fakultet elektrotehnike i računarstva
karlo.kobescak@fer.unizg.hr

Tomislav Baškarad
Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.baskarad@fer.unizg.hr

Igor Kuzle
Fakultet elektrotehnike i računarstva
igor.kuzle@fer.unizg.hr

OPTIMIZACIJSKI MODEL ODRŽAVANJA VJETROELEKTRANA

SAŽETAK

Periodična ispitivanja i pregledi sastavni su dio održavanja elektroenergetskih postrojenja, propisani normama i regulatornim pravilnicima. Tijekom ovih ispitivanja dolazi do smanjenja raspoložive snage proizvodne jedinice, što može rezultirati značajnim oportunitetnim troškovima. Ovaj problem posebno je naglašen kod nepredvidive i intermitentne proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, poput vjetroelektrana i solarnih elektrana, čija proizvodnja ovisi o vremenskim uvjetima. S obzirom na navedene probleme, potrebno je pomnije planirati i optimizirati termine održavanja. U ovom radu predstavljen je model odabira vremenskih perioda ispitivanja koji na temelju predviđene proizvodnje vjetroelektrane i cijene na tržištu električne energije optimizira ostvareni profit vjetroelektrane. Analizom podataka o predviđenoj proizvodnji vjetroelektrana i cijenama na tržištu električne energije omogućuje se optimizacija perioda izvođenja ispitivanja i prilagodba održavanja promjenjivim uvjetima tržišta i dostupnosti obnovljivih izvora energije.

Ključne riječi: održavanje, optimizacija, vjetroelektrana, planiranje

OPTIMIZATION MODEL FOR WIND FARM MAINTENANCE

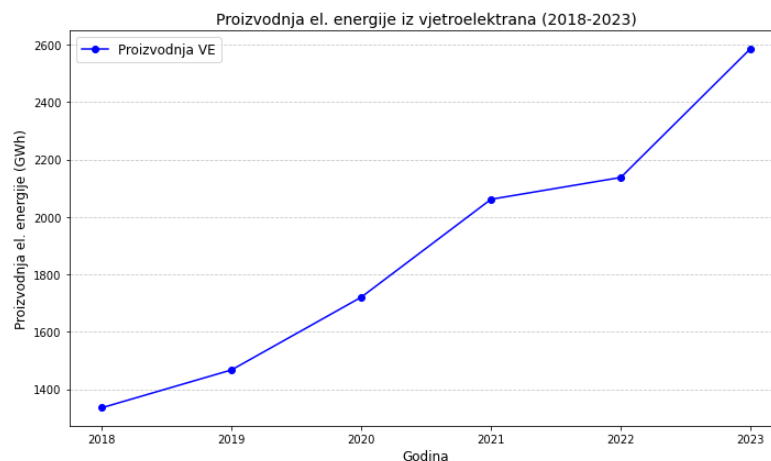
SUMMARY

Periodic inspections and examinations are an integral part of the maintenance of power plants, as prescribed by standards and regulatory regulations. During these inspections, the available power of the generation unit is reduced, which can result in significant opportunity costs. This issue is particularly pronounced in the case of unpredictable and intermittent production from renewable energy sources, such as wind farms and solar power plants, whose output depends on weather conditions. Given these challenges, it is necessary to plan and optimize maintenance schedules more carefully. This paper presents a model for selecting inspection periods, which optimizes the wind farm's achieved profit based on predicted production and electricity market prices. By analyzing data on predicted wind farm production and electricity market prices, it is possible to optimize the timing of inspections and adjust maintenance to changing market conditions and the availability of renewable energy sources.

Key words: maintenance, optimization, wind farm, planning

1. UVOD

Vjetroelektrane predstavljaju najveći obnovljivi izvor energije s ukupno instaliranim svjetskim kapacitetom od više od 2.300 TWh [1]. U Hrvatskoj, kao i u svijetu, bilježimo porast količine proizvedene električne energije iz vjetroelektrana, što je prikazano na slici 1. Rastući udio vjetroelektrana u proizvodnji električne energije utječe na pouzdanost opskrbe te cijenu električne energije.



Slika 1 Proizvodnja el. energije iz vjetroelektrana u RH (2018.-2023.)[2]

Redovito održavanje elektroenergetskih postrojenja, osim što je propisano Pravilnikom o tehničkim zahtjevima za elektroenergetska postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1 kV, ima i pozitivnu ulogu u postizanju visoke pouzdanosti opskrbe [3]. Održavanje se dijeli na preventivno, korektivno i prediktivno. Korektivno se održavanje provodi tek nakon nastupa kvara, dok preventivno održavanje slijedi predefinirani plan, uobičajeno periodički prema fiksnom kalendarskom vremenu, broju ciklusa ili operativnim satima. Za elektroenergetska postrojenja, preventivno održavanje je ključno, jer nepredviđeni kvarovi u proizvodnom postrojenju mogu dovesti do općeg prekida opskrbe električnom energijom. Prediktivno održavanje, temeljeno na stanju opreme (*engl.* condition based maintenance), omogućava rano prepoznavanje kvarova uz kontinuirano praćenje stanja opreme i usporedbu s povijesnim podacima. Danas je preferirana strategija održavanja RCM (Reliability Centered Maintenance – Održavanje usmjereno na pouzdanost) u kojoj se stanje opreme, kritičnost, povijest kvarova i trošak životnog ciklusa integriraju kako bi se logički razvile najučinkovitije metode održavanja za svaki sustav, podsustav i komponente [4].

Troškovi rada i održavanja (O&M) značajno utječu na niveliranu cijenu električne energije (LCOE) pučinskih vjetroelektrana, jer čine 23% ukupnih investicijskih troškova, dok kod kopnenih vjetroturbina taj udio iznosi 5% [5]. Preventivno redovito održavanje trenutno je dominantni pristup u održavanju vjetroelektrana. Uključuje ručna resetiranja, manje popravke na sustavima za nagib i hidrauličkim sustavima (npr. curenje ulja, problemi s pumpama), električne i elektroničke komponente. Međutim, u planiranju preventivnog održavanja rijetko se optimizira primjena ograničenih resursa ili koriste lekcije naučene iz iskustava, a što može značajno doprinijeti povećanju pouzdanosti i smanjenju troškova.

U ovom radu predstaviti će se optimizacijski model održavanja vjetroelektrana koji za cilj ima maksimizaciju profita uz ograničenja resursa te zadovoljavanja razine pouzdanosti. Formalni matematički model je predstavljen kroz MIP (*engl.* mixed integer programming) formulaciju te je demonstriran na hipotetskoj vjetroelektrani, uz podatke temeljene na stvarnim, ali modificiranim podacima.

2. OPIS PROBLEMA I PRETPOSTAVKE

Tri glavna cilja održavanja vjetroelektrana su: povećanje pouzdanosti sustava, produljenje životnog vijeka opreme te smanjenje troškova održavanja uz istovremeno povećanje profitabilnosti elektrane. Održavanje vjetroelektrana može se kategorizirati u održavanje na razini pojedinačnih komponenti i održavanje na razini cjelokupnog sustava. U kontekstu integracije vjetroelektrana u elektroenergetski sustav, ključno je odrediti optimalne periode za izvođenje održavanja na razini sustava.

U literaturi se mogu pronaći tri dominantna pristupa rješavanju ovog problema ([5], [7], [9], [10]). Prvi pristup usmjeren je na minimizaciju troškova održavanja, uključujući troškove radne snage, najma opreme te oportunitetne troškove gubitka prihoda na tržištu električne energije. Drugi pristup fokusira se na

maksimizaciju pouzdanosti sustava, koja se može definirati kao razlika između bruto energetske rezerve i količine energije izgubljene zbog održavanja ili kao omjer neto i bruto energetske rezerve. Treći pristup, koji se češće koristi kod održavanja pučinskih vjetroelektrana, nego onih kopnenih, je pristup usmjeren na raspoređivanju ekipe, gdje se optimizira upotreba specijalizirane opreme i radnika za održavanje vjetroturbina [6].

Vjetroelektrane se, u pravilu, održavaju najmanje dvaput godišnje, s razmakom od približno šest mjeseci između održavanja. Međutim, optimizacija rasporeda održavanja predstavlja složen problem zbog brojnih tehničkih i ekonomskih čimbenika. Zbog toga se u modeliranju često koriste sljedeće pretpostavke koje pojednostavnjuju problem:

- 1) Dostupnost rezervnih dijelova: Pretpostavlja se da su svi potrebni rezervni dijelovi za održavanje osigurani i dostupni unaprijed.
- 2) Poznato je i precizno vrijeme trajanja održavanja za svaku turbinu. Svako održavanje traje unaprijed definirano razdoblje i smatra se uspješno završenim.
- 3) Poznavanje predviđanja: Proizvodnja električne energije iz vjetroelektrana, vremenski uvjeti te cijene na tržištu električne energije poznati su unaprijed (a priori).
- 4) Diskretna vremenska skala: Planiranje se provodi na diskretnoj vremenskoj skali, gdje je horizont planiranja podijeljen na vremenske intervale iste duljine (npr., intervali od 30 minuta).
- 5) Prozor mogućnosti za održavanje: Definira se ciljani datum održavanja i prozor mogućnosti unutar kojeg se održavanje može planirati. Ovakav način planiranja je uobičajena praksa koja dozvoljava i određenu odgodu održavanja ovisno o vremenskim uvjetima ili drugim čimbenicima [7]. U ovom slučaju, prozor mogućnosti iznosi 10 dana, u skladu s praksom HROTE-a koji predviđa proizvodnju vjetroelektrana deset dana unaprijed [8].

3. FORMULACIJA MODELA

U ovom poglavlju prikazana je formulacija optimizacijskog modela. Model se temelji na mješovitom cjelobrojnom programiranju (MIP) te uključuje varijable koje pripadaju skupu cijelih brojeva. U ovom slučaju, varijable $x_{i,t}$ i $y_{i,t}$ definirane su kao binarne varijable, pri čemu $x_{i,t}$ predstavlja status turbine i u vremenskom razdoblju t (1 znači da je turbina u održavanju, 0 da je u normalnom pogonu), dok $y_{i,t}$ označava početak održavanja turbine i u vremenskom razdoblju t . Tablica 1 prikazuje pregled svih notacija korištenih u modelu, dok su u nastavku formalno definirani funkcija cilja i skup ograničenja.

Tablica 1. Notacije korištene u programu rasporeda održavanja VE

T, t	Ukupan broj i indeks vremenskih perioda
N, i	Ukupan broj i indeks vjetroturbina
DB, s	Skup perioda koji su ujedno i početak dana
$x_{i,t}$	Varijabla – status održavanja turbine i u periodu t
$y_{i,t}$	Varijabla – početak održavanja turbine i u periodu t
q_t	Varijabla – prekovremeni rad u periodu t
$p_{i,t}$	Parametar – predviđena proizvodnja snage vjetroturbine i u periodu t
c_t	Parametar – predviđena cijena el. energije u periodu t
CF	Parametar – fiksni troškovi održavanja turbine
B	Parametar – broj timova održavanja
W	Parametar – broj radnika u timu
CM	Parametar – trošak rada jednog radnika u €/period
CE	Parametar – trošak najma opreme u €/period
Q	Parametar – cijena prekovremenog sata rada

d_t	Parametar – potražnja, odnosno snaga koju elektrana mora isporučiti
R	Parametar – tražena razina pouzdanosti elektrane
LP_i	Parametar – duljina trajanja održavanja turbine i
w_t	Parametar – koeficijent uvećanja plaćenih prekovremenih ako se radi vikendom

3.1 Funkcija cilja

Funkcija cilja, prikazana u jednadžbi (1), predloženog problema je maksimizacija ostvarenog profita elektrane unutar razdoblja održavanja. Ostvareni profit definiran je kao ostvareni prihod umanjen za ukupne troškove održavanja. Vjetroelektrana generira prihod od prodaje električne energije na tržištu, koju proizvode turbine koje nisu u održavanju, što označava izraz $(1 - x_{i,t})$ kod umnoška predviđene snage i cijene. Ukupni troškovi održavanja uključuju trošak radnika, trošak opreme i fiksni trošak održavanja turbine, dodatno se uzima u obzir i trošak prekovremenih sati radnika, kao i povećanje troškova ako radnici rade prekovremeno vikendom.

$$\max \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{ [p_{i,t} \cdot c_t \cdot (1 - x_{i,t})] - [CF \cdot y_{i,t} + (W \cdot B \cdot CM + CE) \cdot x_{i,t} + Q \cdot q_t \cdot w_t] \} \quad (1)$$

3.2 Ograničenje pouzdanosti

Isključenja vjetroturbina zbog održavanja smanjuju pouzdanost elektroenergetskog sustava povećavajući rizik zadovoljenja potražnje za električnom energijom [9]. Pouzdanost se kvantificira kao omjer neto energetske rezerve i bruto energetske rezerve, što je prikazano jednadžbom (2). Mala razlika između neto i bruto energetske rezerve znači visoku pouzdanost sustava.

$$\sum_{t=1}^T \frac{1}{T} \frac{\sum_{i=1}^N p_{i,t} \cdot (1 - x_{i,t}) - d_t}{\sum_{i=1}^N p_{i,t} - d_t} \leq R \quad (2)$$

U radu [9] kriterij pouzdanosti koristi se kao funkcija cilja, dok se u radu [10], kao i ovdje, koristi kao ograničenje. Ako je pouzdanost sustava funkcija cilja, maksimizira se pouzdanost opisana jednadžbom (2), međutim, tada su troškovi održavanja potencijalno veći. S druge strane, ako je pouzdanost ograničenje, tada u nekim trenucima sustav može raditi na granici pouzdanosti, ali će profit biti maksimiziran. Također, u svakom trenutku proizvodnja mora biti veća od potražnje prema jednadžbi (3). Potražnja VE je već unaprijed dogovorena električna energija koju VE mora isporučiti.

$$\sum_{i=1}^N p_{i,t} \cdot (1 - x_{i,t}) - d_t \geq 0, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

3.3 Ograničenje nužnosti održavanja

Održavanje se mora nužno provesti za svaku turbinu. To je modelirano jednadžbom (4). gdje za svaku turbinu mora biti točno jedan početak održavanja.

$$\sum_{t=1}^T y_{i,t} = 1, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

3.4 Ograničenje kontinuiranosti održavanja

Jednom kada započne održavanje turbine i nije dozvoljeno prekidati održavanje, već se turbina gasi i ponovno pali tek kada je održavanje dovršeno. Odnos između početka održavanja i statusa održavanja dan je jednadžbom (5). Ograničavanje operacije održavanja tijekom uzastopnih razdoblja postiže se jednadžbama (6) i (7), prema [10].

$$x_{i,t} \geq y_{i,t}, \quad \forall i \in N; \forall t \in T \quad (5)$$

$$x_{i,t} - x_{i,t-1} \leq y_{i,t}, \quad \forall i \in N; \forall t \in T, t > 1 \quad (6)$$

$$x_{i,t} + x_{i,t-1} + y_{i,t} < 3, \quad \forall i \in N; \forall t \in T, t > 1 \quad (7)$$

3.5 Ograničenje trajanja održavanja po turbini

Moguće je da je na nekim turbinama potrebno izvršiti veće ili manje popravke, te trajanje održavanja po turbini ne mora biti jednako. Ograničenje je prikazano jednačbom (8).

$$\sum_{t=1}^T x_{i,t} = LP_i, \quad \forall i \in N \quad (8)$$

3.6 Ograničenje prekovremenog rada

Prema Zakonu o radu, radnicima je dozvoljeno raditi prekovremeno. Dnevno je dozvoljeno ukupno raditi maksimalno 12 sati, a tjedno 50. Tjedno ograničenje u 10 dana znači da je radnicima dozvoljeno 14 sati prekovremeno (9), 4 sata dnevno (10), i ukupan broj sati održavanja mora biti jednak zbroju redovnih sati i prekovremenih (11). Sve jednačbe podrazumijevaju satnu rezoluciju perioda, ako je rezolucija manja, potrebno je modificirati jednačbe.

$$\sum_{t=1}^T q_t \leq B \cdot 14 \quad (9)$$

$$\sum_{s=0}^{DB_2-1} q_{t+s} \leq B \cdot 4, \quad \forall t \in DB \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{s=0}^{DB_2-1} x_{i,t+s} = B \cdot 8 + \sum_{s=0}^{DB_2-1} q_{t+s}, \quad \forall t \in DB \quad (11)$$

3.7 Ograničenje dnevnih sati

Dodatno ograničenje je postavljeno da održavanje traje u rasponu od 6 sati ujutro do 22 navečer, odnosno, ne postoji mogućnost noćnog rada. Ograničenje je prikazano jednačbama (12) i (13).

$$\sum_{s=0}^6 x_{i,t+s} == 0, \quad \forall i \in N; \forall t \in DB \quad (12)$$

$$\sum_{s=0}^2 x_{i,t-s} == 0, \quad \forall i \in N; \forall t \in DB, t \neq 1 \quad (13)$$

3.8 Ograničenje broja timova

Istovremeno u održavanju može biti onoliko vjetroturbina koliko je timova dostupno, modelirano jednačbom (14).

$$\sum_{i=1}^N x_{i,t} \leq B, \quad \forall t \in T \quad (14)$$

4. NUMERIČKI EKSPERIMENT

Model formuliran u prethodnom poglavlju implementiran je uz pomoć Pyomo-a u Jupyter Notebooku koristeći Gurobi solver. Pyomo je otvoreni objektno-orijentirani jezični model u Pythonu za strukturirane probleme optimizacije. Pyomo nudi jednostavan način za definiranje varijabli, parametara, funkcija cilja i ograničenja, te omogućava rješenje tih problema pomoću različitih solvera poput GLPK, CPLEX, Gurobi, i drugih. Jupyter Notebook je otvoreni alat koji omogućava interaktivno kodiranje u Pythonu. Omogućuje korisnicima da kombiniraju kod, tekstualne objašnjenja, matematičke formule, vizualizacije i rezultate u jednom dokumentu.

4.1 Parametri modela

Hipotetska vjetroelektrana sastoji se od 10 vjetroturbina nazivnih snaga 2 MW. Svaka vjetroturbina zahtjeva održavanje u različitom trajanju. Pouzdanost sustava ne smije biti manja od 80%. Profil proizvodnje modeliran je prema [11], samo je skaliran na 2 MW. Za svaku pojedinu turbinu profil je množen koeficijentom u rasponu [0.9, 1.1] kako bi se modeliralo da proizvodnja iz vjetroturbina nije identična, ali prati isti profil. Cijene električne energije su preuzete iz istog skupa podataka.

Fiksni troškovi održavanja su 250 €, trošak rada radnika po periodu je 50 €, koliko je i trošak najma opreme potrebne za održavanje. Prekovremeni rad je 60 €, a koeficijent za vikend je 1.5. Na raspolaganju su dvije ekipe za održavanje, a svaka se sastoji od dva člana.

Potražnja je modelirana kao udio proizvodnje jedne turbine nasumično između 75 % i 80 %, odnosno nešto manje od 10 % predviđene proizvodnje.

Prozor održavanja uzet je od 27.7. i ukupno traje 10 dana, vikendi su određeni prema kalendaru 2017. godine iz koje su uzeti i podaci za proizvodnju i cijenu. Planirano trajanje održavanja za svaku turbinu dano je u tablici 2. Turbine imaju različito trajanje održavanja, ovisno o stanju turbine, gdje neke turbine mogu zahtijevati dulje održavanje.

Tablica 2 Trajanje održavanja za pojedinu vjetroturbinu, u periodima

Turbina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Trajanje održavanja [30 minutni periodi]	24	8	15	8	5	10	12	6	6	4

Model se sastoji od ukupno 10 081 varijable i 15 582 ograničenja.

4.2 Rezultati optimizacije

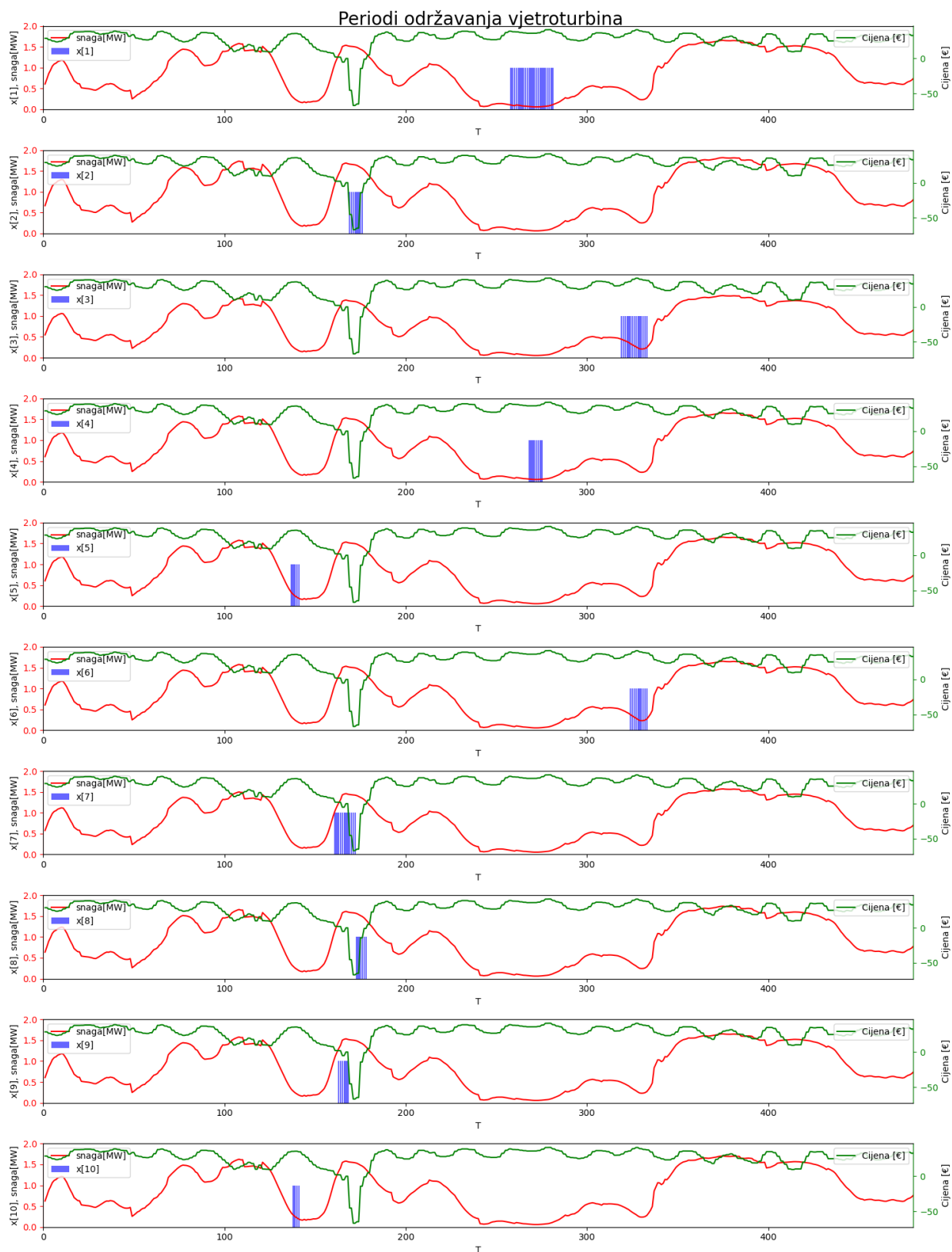
Vrijeme potrebno solveru za rješavanje problema je iznosilo 6.7 sekundi, što je relativno kratko vrijeme optimizacije.

Ukupni profit vjetroelektrane tijekom prozora održavanja iznosio je 73 415 €, dok je pouzdanost sustava u promatranom razdoblju održavanja iznosila 91,1 %. Tijekom razdoblja održavanja zabilježeno je 8 perioda prekovremenog rada na turbini 1. Detalji o periodima održavanja za svaku turbinu, uključujući cijenu električne energije i proizvodnu snagu tijekom tih perioda, prikazani su na sl. 2. Periodi održavanja označeni su plavom bojom.

Jasno su vidljivi trenuci kada obje ekipe za održavanje obavljaju radove u intervalima kada je cijena električne energije na tržištu negativna. Ova strategija smanjenja gubitaka proizvedene električne energije u tim trenucima doprinosi smanjenju ukupnih troškova, jer bi inače proizvedenu energiju bilo potrebno otkupiti po negativnim cijenama. Zanimljivo je da se održavanje ne provodi na vjetroturbinama s najvećom proizvodnjom. Na odabir termina održavanja značajno utječu i čimbenici poput trajanja održavanja i dostupnosti radnika. Specifično, negativne cijene električne energije javljaju se između 11:00 i 16:00 sati tijekom nedjelje, što je vjerojatno rezultat visoke proizvodnje solarne energije u tom vremenskom okviru, dok je proizvodnja vjetroelektrana također bila značajna. Unatoč tome, prekovremeni rad radnika tijekom

vikenda unosi dodatne troškove u cijenu održavanja. Ovdje treba napomenuti da se vjetroelektrana smatra aktivnim sudionikom tržišta, a ne korisnikom feed-in tarife ili nekog drugog subvencioniranog modela.

Nakon razdoblja negativnih cijena, održavanje se nastavlja u periodima s nižom proizvodnjom i povoljnijim cijenama, čime se optimizira cijeli proces održavanja u kontekstu tržišnih uvjeta.



Slika 2 Periodi održavanja vjetroturbina u ovisnosti o cijeni el. energije i proizvodnji

4.2.1. Scenarij 2 – 1 tim za održavanje

U ovom scenariju analiziran je utjecaj smanjenja broja dostupnih timova za održavanje s dva na jedan tim. Na početku se pretpostavljalo da će ovo smanjenje negativno utjecati na ukupni profit, jer će smanjeni kapacitet održavanja ograničiti mogućnost izvođenja radova u povoljnijim tržišnim uvjetima. Međutim, rezultati optimizacijskog modela pokazali su povećanje ukupnog profita na iznos od 77 430.13 €, bez značajnog utjecaja na ukupnu pouzdanost. Iako ovo povećanje nije veliko, ono jasno ukazuje na važnost preciznog modeliranja troškova povezanih s održavanjem. U našem modelu, trošak rada tehničara definiran je kao 50 € za pola sata rada, što predstavlja značajan udio u ukupnim troškovima održavanja. U ovom scenariju pojavili su se i troškovi prekovremenih sati rada. Analiza rezultata sugerira da je povoljnije obavljati održavanje u tržišno nepovoljnijim razdobljima ukoliko to rezultira smanjenjem troškova rada.

4.2.2. Scenarij 3 – održavanje s prekidom

U ovom scenariju dozvoljeno je prekidati i opet započinjati održavanje pojedine vjetroturbine, odnosno, ograničenje (4) sada je modelirano jednadžbom (15).

$$\sum_{t=1}^T y_{i,t} \geq 1, \quad \forall i \in N \quad (15)$$

Također, i funkcija cilja je neznatno promijenjena, jer je potrebno fiksne troškove održavanja po turbini izuzeti iz sume, te je funkcija cilja sada modelirana prema jednadžbi (16).

$$\max - CF \cdot N + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T \{ [p_{i,t} \cdot c_t \cdot (1 - x_{i,t})] - [(W \cdot B \cdot CM + CE) \cdot x_{i,t} + Q \cdot q_t \cdot w_t] \} \quad (16)$$

Rezultati optimizacije pokazuju neznatno povećanje profita na iznos 73 486.19 €, što je za 0,1 % veće od originalnog slučaja. Pouzdanost se nije značajno mijenjala. U tablici 3. dan je pregled profita, pouzdanosti i prekovremenog rada za tri navedena scenarija.

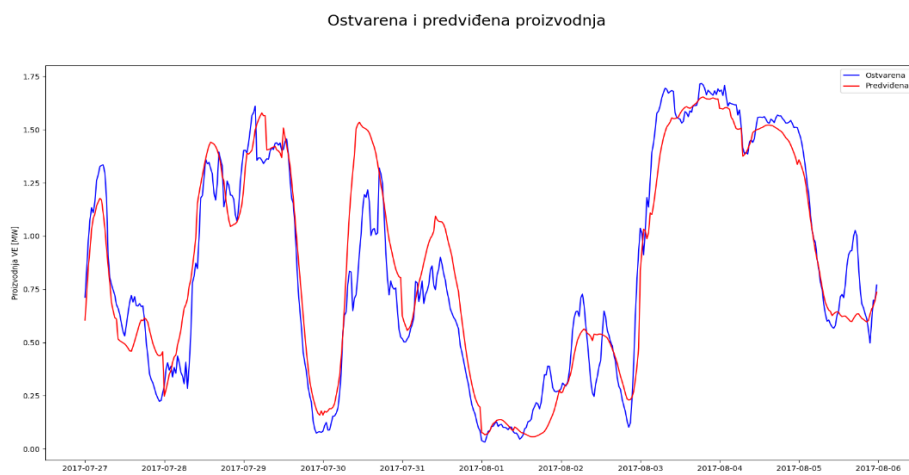
Tablica 3 Usporedba rezultata optimizacije tri scenarija

Scenarij	Profit	Pouzdanost	Prekovremeni
1 – originalni	73 415 €	91.10 %	0
2 – 1 tim za održavanje	77 430.13 €	91.11 %	8
3 – održavanje s prekidima	73 486.19 €	91.02 %	0

4.3 Održavanje prema ostvarenoj proizvodnji

Prethodno planiranje održavanja temelji se na predviđenim vrijednostima proizvodnje vjetroelektrane. Međutim, zbog odstupanja ostvarene proizvodnje od predviđene, nužno je analizirati utjecaj tih pogrešaka na ukupne troškove održavanja. Konkretno, primjenom optimiziranih termina održavanja, izračunatih na temelju predviđene proizvodnje, u stvarnom planu temeljenom na ostvarenim vrijednostima, dolazi do situacija u kojima nije moguće zadovoljiti potražnju. Ova pojava uzrokovana je trenucima kada je ostvarena proizvodnja niža od predviđene, što remeti planirane operacije.

Za bolju ilustraciju, usporedba ostvarene i predviđene proizvodnje prikazana je na slici 3. Ovi rezultati naglašavaju važnost integracije robusnijih metoda planiranja, koje uzimaju u obzir nesigurnosti u predviđanju proizvodnje, kako bi se smanjio negativan utjecaj odstupanja na učinkovitost održavanja i ukupne operativne troškove.



Slika 3 Usporedba ostvarene i predviđene proizvodnje VE u prozoru održavanja

5. ZAKLJUČAK

Udio vjetroelektrana u proizvodnom miks električne energije kontinuirano raste, što povećava važnost njihove pouzdanosti za cjelokupni elektroenergetski sustav. Preventivno održavanje ključno je za osiguranje pouzdanog rada vjetroelektrana. Iako se suvremeni trendovi sve više oslanjaju na održavanje temeljeno na stanju, periodička održavanja i dalje će igrati ključnu ulogu, osobito u kontekstu pučinskih vjetroelektrana gdje su uvjeti rada izazovniji.

Kako bi se postigla optimalna pouzdanost i istovremeno minimizirali troškovi održavanja, potrebno je unaprijediti metode planiranja perioda održavanja. Integracija povijesnih podataka i naprednih metoda predviđanja cijena i proizvodnje električne energije iz vjetroelektrana otvara nove mogućnosti za optimizaciju planiranja.

Predloženi model održavanja usmjeren je na maksimizaciju profita vjetroelektrane unutar zadanog vremenskog okvira, uz strogo poštivanje ograničenja vezanih za pouzdanost, kontinuitet održavanja i radne uvjete timova za održavanje.

Analiza provedena kroz tri različita scenarija ukazala je na potrebu za preciznijim procjenama troškova održavanja koji utječu na ukupnu profitabilnost elektrane. Nadalje, primjena optimiziranih planova temeljenih na predviđenim podacima pokazala je kako pogreške u predviđanju proizvodnje mogu narušiti učinkovitost održavanja. Stoga je potrebno daljnje unapređenje modela predviđanja kako bi se osigurala veća točnost, čime bi se dodatno povećala pouzdanost rada vjetroelektrana te zadovoljila dinamična potražnja elektroenergetskog sustava.

6. LITERATURA

- [1] O. Alšauskas, "World Energy Outlook 2024".
- [2] Energetski institut Hrvoje Požar, "Energija u Hrvatskoj 2023." Accessed: Jan. 14, 2025. [Online]. Available: https://eihp.hr/wp-content/uploads/2024/12/Energija-u-HR-2023_WEB_novo.pdf
- [3] M. Mesić and Ž. Gongola, "Uloga održavanja u postizanju pouzdanosti elemenata prijenosne mreže u EES-u," *Journal of Energy - Energija*, vol. 49, no. 1, Art. no. 1, Jan. 2000, doi: 10.37798/2000491664.
- [4] P. Gill, *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing*. CRC Press, 2016.
- [5] Z. Ren, A. S. Verma, Y. Li, J. J. E. Teuwen, and Z. Jiang, "Offshore wind turbine operations and maintenance: A state-of-the-art review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 110886, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110886.
- [6] P. Papadopoulos, D. W. Coit, and A. A. Ezzat, "Seizing Opportunity: Maintenance Optimization in Offshore Wind Farms Considering Accessibility, Production, and Crew Dispatch," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 13, no. 1, pp. 111–121, Jan. 2022, doi: 10.1109/TSTE.2021.3104982.
- [7] A. Kovács, G. Erdős, L. Monostori, and Z. János Viharos, "Scheduling the Maintenance of Wind Farms for Minimizing Production Loss," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 14802–14807, Jan. 2011, doi: 10.3182/20110828-6-IT-1002.02366.
- [8] M. Benić, "Predviđanje proizvodnje vjetroelektrana," info:eu-repo/semantics/masterThesis, University of Zagreb. Faculty of Chemical Engineering and Technology, 2018. Accessed: Jan. 15, 2025. [Online]. Available: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:149:576069>
- [9] S. Perez-Canto and J. C. Rubio-Romero, "A model for the preventive maintenance scheduling of power plants including wind farms," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 119, pp. 67–75, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.ress.2013.04.005.
- [10] M. Hasani, M. K. Sheikh-El-Eslami, and H. Delkhosh, "A Linear Model for Wind Farms Preventive Maintenance Scheduling Considering the Wind Speed Uncertainty and Electricity Market Conditions," in *2022 9th Iranian Conference on Renewable Energy & Distributed Generation (ICREDG)*, Feb. 2022, pp. 1–7. doi: 10.1109/ICREDG54199.2022.9804559.
- [11] E. Hosius, "Data for 'The Impact of Offshore and Onshore Wind Power Generation on Electricity Prices,'" vol. 3, Oct. 2020, doi: 10.17632/p3npk87pxw.3.