

Hrvatska zaklada za znanost  
Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb  
Zavod za visoki napon i energetiku

# FLEXIBASE

Softverski alati testirani u simulacijskom okruženju

prof. dr. sc. Hrvoje Pandžić  
dr.sc. Mateo Beus  
Ivan Grcić, mag.ing.  
Domagoj Badanjak, mag.ing.



Europska unija  
Zajedno do fondova EU



10-2022

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Programski jezik Python</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Alat za pružanje fleksibilnosti</b>	<b>3</b>
3.1	Svrha i generalni opis alata . . . . .	3
3.2	Korištenje alata . . . . .	4
3.2.1	Ulazni parametri . . . . .	4
3.2.2	Rezultati . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Alat za optimalan pogon mikromreže</b>	<b>8</b>
4.1	Svrha i generalni opis alata . . . . .	8
4.2	Korištenje alata . . . . .	9
4.2.1	Ulazni parametri . . . . .	9
4.2.2	Rezultati . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Zaključak</b>	<b>12</b>
	<b>Literatura</b>	<b>12</b>

# 1. Uvod

U sklopu FLEXIBASE projekta cilj je razvoj pojedinačnih modela razvoj algoritama za estimaciju i maksimizaciju dostupne fleksibilnosti u mikromreži s visokim udjelom pretvarača korištenjem hijerarhijskog upravljanja koje će se temeljiti na dva upravljačka sloja. Gornji upravljački sloj minimizira dugoročne troškove pogona mikromreže, dok donji upravljački sloj osigurava kratkoročno zadovoljavanje tehničkih ograničenja tj. stabilnosti pogona mikromreže u mrežnom i otočnom radu. Osim samog razvoja te verifikacije valjanosti matematičkih modela, naglasak je stavljen isto tako i na njihovoj integraciji i verifikaciji koristeći računalne simulacije te laboratorijsko testiranje, odnosno razvoj softvera kojim će se navedeni modeli jednostavnije koristiti. Konkretno, četiri različita softverska alata su rezultat istraživanja te razvoja kroz FLEXIBASE projekt. To su:

- Alat za upravljanje mikromrežom
- Alat za koordinirani sustav zaštite
- Alat za pružanje fleksibilnosti
- Alat za optimalan pogon mikromreže

U sklopu ovog izvještaja o ključnim pokazateljima, bit će pružen kratak opis svakog od navedenih softvera te prikaz glavnih funkcionalnosti. Potpunosti radi, dio izvještaja je posvećen i opisu okruženja u kojemu su konkretni softveri razvijeni kako bi se vanjski korisnik mogao što bolje snaći i razumijeti posebnosti svakog od razvijenih softvera.

## 2. Programski jezik Python

Jedan dio softverskih alata programiran je koristeći programski jezik otvorenog koda Python u sklopu razvojnog okruženja Spyder.

Spyder je programska platforma otvorenog koda koja je napisana u potpunosti u Pythonu te je dizajnirana od znanstvenika za znanstvenike, podatkovne analitičare te inženjere.

Python je veoma moćan programski jezik zasnovan na postulatima objektno-orijentiranog programiranja na visokoj razini apstrakcije. Jednostavna i lako-učeća sintaksa smanjuje, često bolan, proces savladavanja programskog jezika, a veoma aktivna zajednica pruža potporu u vidu mnoštva dostupnih biblioteka, ali i direktne komunikacije na raznim forumima. Jedna od glavnih vrlina programskog jezika Python jest njegova sveobuhvatnost. Naime, Python omogućava dohvat podataka, izradu matematičkih modela, pokretanje istih, prikaz rezultata te izrade popratnih elemenata poput grafičkog korisničkog sučelja. Pritom treba istaknuti kako su i za izradu nekih od softvera u sklopu projekta FLEXIBASE korištene razne dostupne biblioteke koje uvelike ubrzavaju izradu samog softvera, a veoma uključena i stručna zajednica pruža komentare o kvaliteti određenih biblioteka, odnosno potporu u slučaju nekih nejasnoća i/ili problema.

Još je bitno spomenuti kako je za neke od razvijenih softvera bilo potrebno koristiti i solver - alat kojim se mogu rješavati optimizacijski problemi. Tu valja izdvojiti Gurobi - solver za probleme matematičkog programiranja. U srži je to punokrvni komercijalni proizvod, no studentima se nudi licenca bez naknade koja se mora periodički obnavljati, ali je valjana za kompletno vrijeme trajanja studija. Drugim riječima, za uspješno korištenje softvera razvijenog na temelju programskog jezika Python te solvera Gurobi, potencijalna zakočica leži u činjenici da krajnji korisnik mora posjedovati licencu za korištenje Gurobija. U teoriji se mogu onda tražiti i alternativna rješenja kako bi sve bilo zasnovano na principu otvorenog koda, no to izlazi izvan okvira ovog projekta i ne mora nužno biti uopće moguće, ovisno o funkcionalnostima drugih solvera.

## 3. Alat za pružanje fleksibilnosti

### 3.1 Svrha i generalni opis alata

Gledano iz perspektive inženjera elektrotehnike, odnosno energetičara, dvadeset i prvo stoljeće je do sad obilježeno globalnim konsenzusom o potrebi prelaska na obnovljive izvore energije. Ta tranzicija se uistinu i događa, negdje sporije, negdje brže. Krasi ju distribuiranost izvora energije, jačanje aktivnosti do sad pasivnih promatrača (npr. potrošača), ali i isprekidanost opskrbe iz obnovljivih izvora energije te potencijalni problemi poput dvosmjernih tokova snaga, zagušenja i devijacija napona na distribucijskoj razini. Pritom i akademska zajednica i industrija uviđaju potrebu za fleksibilnošću kojom će se regulirati i rješavati potencijalni izazovi koje elektroenergetski sustav dvadeset prvog stoljeća nosi. U tome veliku ulogu mogu i moraju imati mikromreže, koje su idealni pružatelj usluga fleksibilnosti za rješavanje problema na distribucijskoj razini.

Alat razvijen kao plod istraživanja u sklopu projekta FLEXIBASE promatra upravo mikromreže i način na koji odrediti kako pružiti, ali ujedno i kako vrednovati, fleksibilnost. Naime, mikromreža, ovisno o elementima koji ju čine, ima mogućnost nastupa na elektroenergetskim tržištima, ali isto tako nuditi i fleksibilnost koja je nekad prijeko potrebna operatoru distribucijskog sustava. U sklopu ovog softverskog alata naglasak je stavljen na programsku pomoć upravitelju mikromreže, ali i operatoru distribucijskog sustava, za određivanje i vrednovanje fleksibilnosti koju promatrana mreža može pružiti u određenim kritičnim trenucima. Odnosno, da bi se kritični trenutci izbjegli.

Alat je kreiran u programskom jeziku otvorenog koda - Pythonu, a za uspješno izvođenje potreban je i komercijalni solver - Gurobi, jer je srž svega optimizacijski problem.

Ulazne parametre možemo razlomiti na one koji opisuju tehničke karakteristike elemenata promatrane mikromreže, poput recimo karakteristika baterijskog spremnika i sl., te općenito ograničenja mreže, kako bismo dočarali stanje u distribucijskom sustavu te prepoznali potrebu za fleksibilnošću. Nadalje, ulazne parametre čine i (prognozirane) cijene na promatranim tržištima (dan-unaprijed, unutarodneвно, tržište uravnoteženja). Na taj način je zadovoljen preduvjet minimuma informacija na temelju kojeg optimizacijski algoritam izračunava optimalnu strategiju za danu situaciju.

## 3.2 Korištenje alata

U ovom potpoglavlju bit će pružen opis glavnih funkcionalnosti alata uz priložena objašnjenja kako isti koristiti. Stoga dokument, osim što opisuje alat na tehničkoj razini, ujedno može poslužiti i kao priručnik za njegovu upotrebu.

### 3.2.1 Ulazni parametri

Alat zahtijeva različite tipove ulaznih podataka kako bi optimizacijski problem mogao biti uspješno zadan. U svrhu omogućavanja što bezbolnijeg procesa unosa podataka, softver prihvaća ulazne parametre iz CSV datoteka. Na korisniku je da unese put (često je dovoljno i samo ime) CSV datoteke koja je ispunjena u odgovarajućem formatu te tada softver pripremi podatke kako za prikaz, tako i za korištenje u sklopu optimizacijskog problema. Na slikama 3.1 i 3.2 prikazani su tipični prikazi nekih od parametara kojima korisnik može pristupiti jednom kad su podaci učitani.

```
In [30]: lines
Out[30]:
```

	from_node	to_node	r_ohm	x_ohm	b
0	1	2	1.35309	1.32349	0
1	2	3	1.35309	1.32349	0
2	3	4	1.17024	1.14464	0
3	4	5	0.84111	0.82271	0
4	5	6	1.52348	1.02760	0
5	3	10	2.01317	1.35790	0
6	10	11	1.68671	1.13770	0
7	3	7	2.55727	1.72490	0
8	7	8	1.08820	0.73400	0
9	7	9	1.25143	0.84410	0
10	4	12	1.79553	1.21110	0
11	12	13	2.44845	1.65150	0
12	13	14	2.01317	1.35790	0
13	5	15	2.23081	1.50470	0
14	5	16	1.19702	0.80740	0

Figure 3.1: Karakteristike promatrane mreže

```
In [31]: nodes
Out[31]:
```

	node	P_d_kw	Q_d_kvar
0	1	0.0	0.0000
1	2	44.1	44.9910
2	3	70.0	71.4143
3	4	140.0	142.8286
4	5	44.1	44.9910
5	6	140.0	142.8860
6	7	140.0	142.8860
7	8	70.0	71.4143
8	9	70.0	71.4143
9	10	44.1	44.9910
10	11	140.0	142.8286
11	12	70.0	71.4143
12	13	44.1	44.9910
13	14	70.0	71.4143
14	15	140.0	142.8286

Figure 3.2: Tereti na promatranim čvorištima

Postoji i niz ulaznih parametara koji se unose direktnim tipkanjem, poput recimo broja promatranih jedinica vremena koje onda optimizacijski problem uzima u obzir. Nužno je ispuniti podatke o svim potrebnim ulaznim parametrima, inače se optimizacijski algoritam neće moći izvršiti. U svakom slučaju, ukoliko nešto nedostaje, po pokretanju optimizacije doći će do greške i tada se prikaže kratki opis problema na temelju kojeg korisnik može zaključiti što bi trebao popraviti. Usto, često je puno lakše dočarati neke karakteristike sustava vizualno, stoga softver nudi, primjerice, i opciju vizualizacije strukture promatrane mreže kao što je prikazano na slici 3.3.

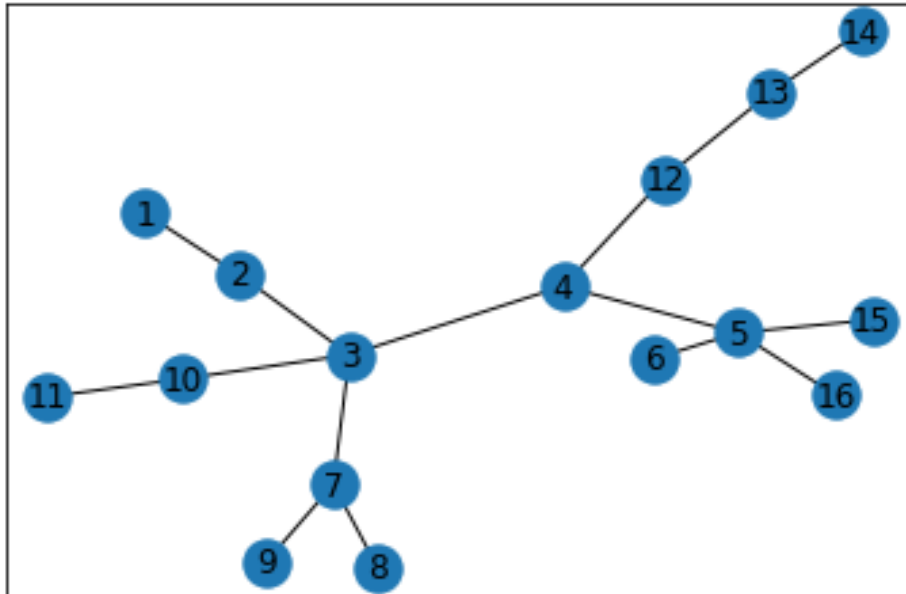


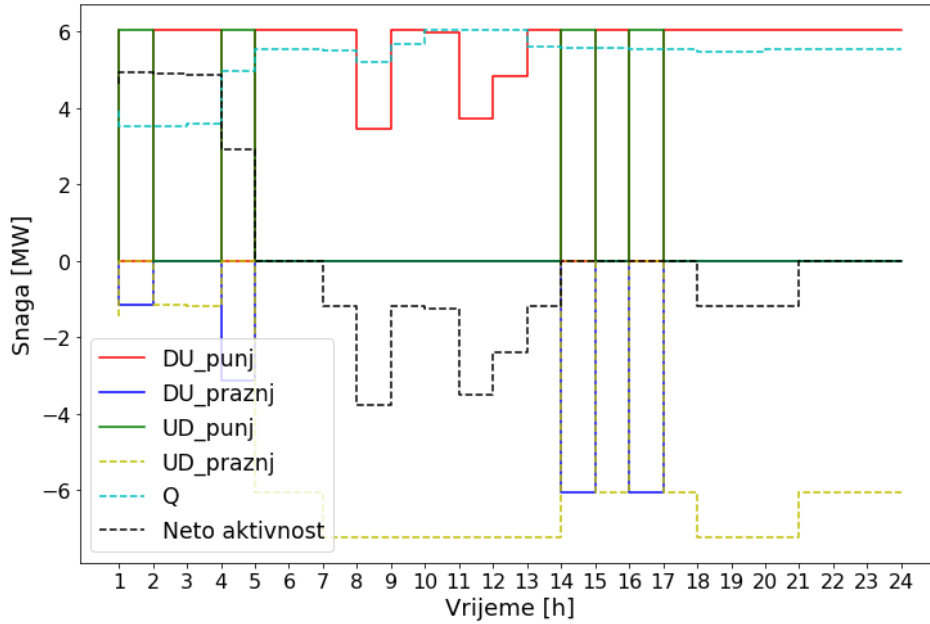
Figure 3.3: Struktura promatrane mreže

### 3.2.2 Rezultati

Rezultati optimizacijskog problema su dostupni u dvije varijante. Odmah po uspješnom izvršenju optimizacije, rezultati uz vrijednosti svih varijabli i ostalih bitnih informacija spremaju se u takozvanu log datoteku koja je tekstualna datoteka i pomoću nje korisnik može proučiti sve rezultate ali i koristiti ih vrlo jednostavno u svrhu daljnje analize u svom softveru. Tako u broičano-tekstualnom prikazu kao najbitnije informacije izdvajamo lokaciju i kapacitet potencijalnih spremnika energije koji bi pomogli sustavu te iznosi profita  $s$  i bez uzimanja u obzir ograničenja mreže, što kreira i vid kvantifikacije vrijednosti fleksibilnosti. Nadalje, velik je naglasak stavljen i na vizualnu prezentaciju rezultata kako bi se olakšala interpretacija. Toj izjavi u argument je priložena slika 3.4. Slika zorno pokazuje kako uvođenje ograničenja mreže u optimizacijski problem može ostaviti nezanemariv utjecaj na aktivnost baterijskog spremnika i shodno tome je vrednovana sama fleksibilnost.



Aktivnost baterijskog spremnika s ograničenjima



Aktivnost baterijskog spremnika bez ograničenja

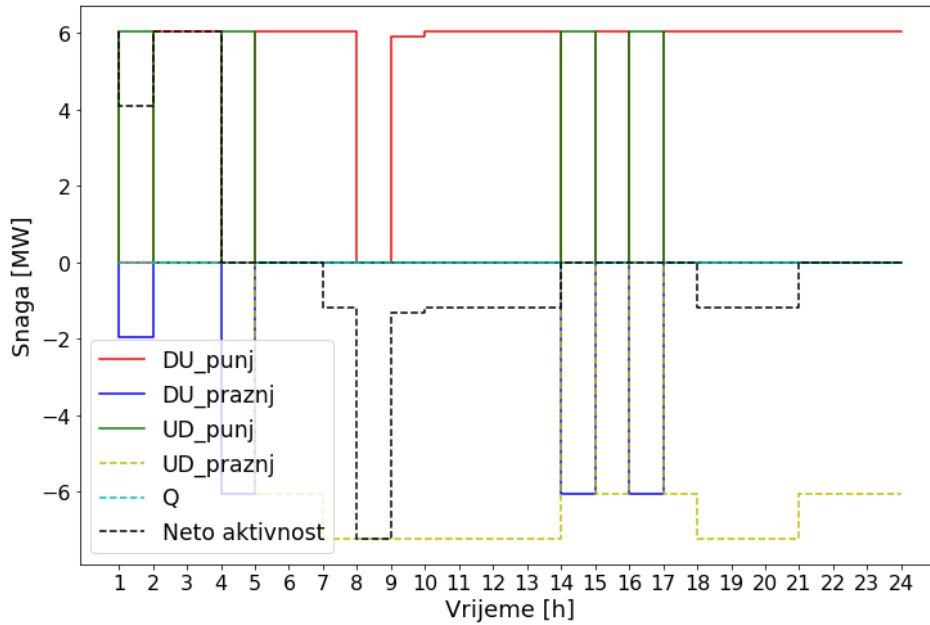


Figure 3.4: Aktivnost baterijskog spremnika s i bez ograničenja mreže

## 4. Alat za optimalan pogon mikromreže

### 4.1 Svrha i generalni opis alata

Liberalizacijom elektroenergetskog sustava pojavila su se organizirana tržišta električne energije te, posljedično, mogućnost generiranja profita sudjelovanjem na dostupnim tržištima. Samim time, odmah u startu je postalo jasno kako je od iznimne važnosti strateški planirati nastup vlastitih resursa na elektroenergetskim tržištima kako bi se uistinu postigao profit, a ne neka neželjena ekonomska situacija za promatranog tržišnog igrača. Uslijed ubrzane tranzicije prema obnovljivim izvorima energije te distribuiranoj paradigmi, javila se potreba za većom fleksibilnosti na distribucijskoj razini i još kompleksnija tržišna struktura s raznim proizvodima koje igrač može ponuditi bilo na tradicionalnim tržištima ili u sklopu pomoćnih usluga.

U sklopu ovog projekta naglasak je na mikromrežama čiji resursi nastupaju na različitim nišama elektroenergetskog tržišta s ciljem generiranja profita uz uvažavanje svih tehničkih ograničenja zaštite. Ovaj programski alat je primarno fokusiran na planiranje optimalnog nastupa na tržištima obzirom na mogućnosti zarade uslijed razlika u cijenama te općenito karakteristikama različitih niša elektroenergetskog tržišta. Suboptimalna strategija može dovesti do brojnih problema poput zaostajanja za konkurencijom, nemogućnosti novih investicija, tehnički nemoguć rad elemenata mikromreže i mnogih drugih. Dakle, uz veoma bitno pravilno upravljanje zaštitom mikromreže i općenito tehničkim karakteristikama, veliku ulogu u osiguravanju neupitnog rada mikromreže te zadovoljavanje preduvjeta analiza isplativosti, igra optimalan pogon mikromreže.

Alat je kreiran u programskom jeziku otvorenog koda - Pythonu, a za uspješno izvođenje potreban je i komercijalni solver - Gurobi, jer je srž svega optimizacijski problem.

Pritom su neizostavni ulazni parametri oni koji opisuju tehničke karakteristike elemenata promatrane mikromreže. Naime, upravo ispravno modeliranje svih elemenata mikromreže je jedan od osnovnih i najvažnijih preduvjeta za ispravno postavljen optimizacijski problem koji onda može polučiti rezultat koji uistinu ima težinu primjenjivosti u stvarnom pogonu promatrane mikromreže. Nadalje, ulazne parametre čine i (prognozirane) cijene na promatranim tržištima (dan-unaprijed, unutarдневно, tržište uravnoteženja). Na taj način je zadovoljen preduvjet minimuma informacija na temelju kojeg optimizacijski algoritam izračunava optimalnu strategiju za danu situaciju.

## 4.2 Korištenje alata

U ovom potpoglavlju bit će pružen opis glavnih funkcionalnosti alata uz priložena objašnjenja kako isti koristiti. Stoga dokument, osim što opisuje alat na tehničkoj razini, ujedno može poslužiti i kao priručnik za njegovu upotrebu.

### 4.2.1 Ulazni parametri

Kako bi se odredio optimalni pogon mikromreže, potrebno je unijeti podatke bitne za rad optimizacijskog algoritma. Tu se prvenstveno misli na karakteristike svih dostupnih elemenata mikromreže te cijene promatranih tržišta električne energije. Uneseni podaci tada se bez daljnjeg korisnikovog truda uređuju u oblik pogodan za daljnji rad s njima, odnosno korištenje optimizacijskog algoritma kako bi bio izračunat optimalan pogon mikromreže. U nastavku je dan primjer prikaza cijena na dan-unaprijed tržištu (grafički, Slika 4.1). Osim za vizualizaciju cijena korisniku, uneseni podaci su u obliku pogodnom za daljnju obradu. Nadalje, kako bi bio jasniji zor o odnosima različitih cijena, postoji i prikaz kretanja cijena različitih tržišta na jednom grafu. Tome svjedoči priložena usporedba kretanja cijena na dan-unaprijed i unutar dnevnog tržištu za jedan od promatranih dana (Slika 4.2). Već na ovom primjeru se jasno može uočiti prilika za arbitražu između dva tržišta te, posljedično, prilika za postizanje profita i vrijednost koju nastup na više tržišta može donijeti.

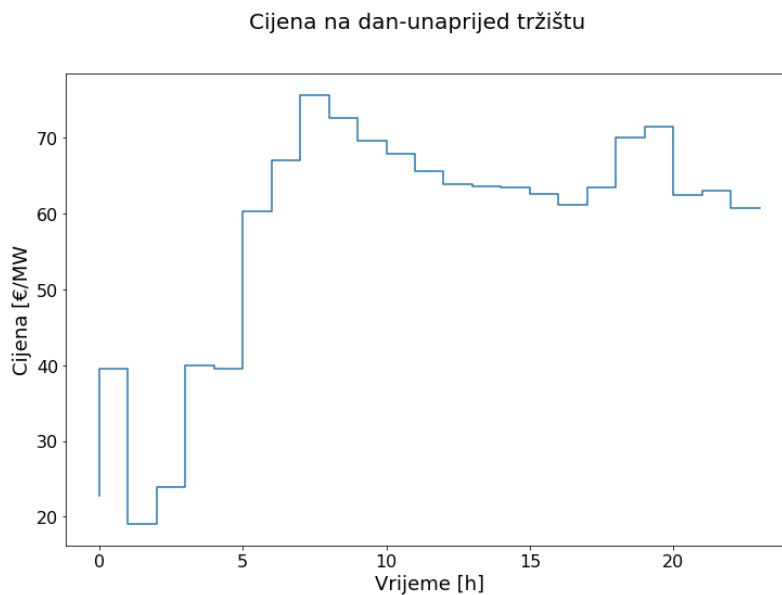


Figure 4.1: Cijene na dan-unaprijed tržištu

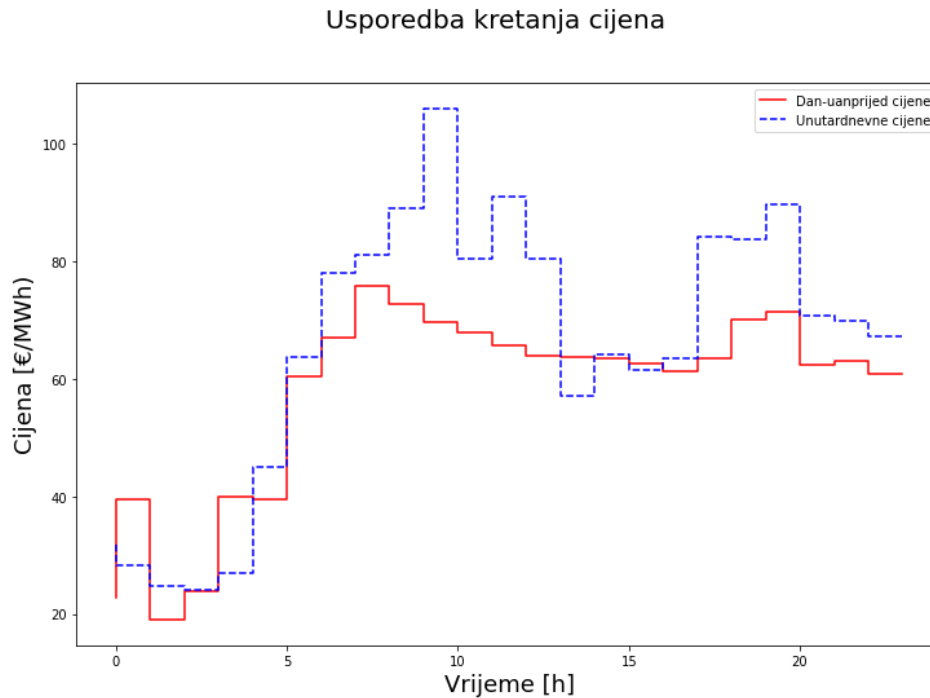


Figure 4.2: Usporedba cijena na dan-unaprijed i unutardnevnom tržištu

## 4.2.2 Rezultati

Glavna svrha ovog alata, i algoritma koji se vrti u pozadini, je izračun optimalnog pogona mikromreže. Pritom su ulazni parametri pouzdani u manjoj ili većoj mjeri ovisno o kvaliteti predviđanja ukoliko nije neki deterministički parametar. Stoga je, uz numeričko-tekstualne podatke, koje je moguće dohvatiti ili u cjelini putem generirane log datoteke ili zasebno, ujedno važan dio grafički prikaz nastupa na promatranim tržištima uz poštivanje tehničkih ograničenja. Kao važan primjer valja naglasiti nastupe baterijskog spremnika na promatranim tržištima. Slika 4.3 prikazuje aktivnost na različitim tržištima, konkretno su ovdje u fokusu dan-unaprijed i unutardnevno tržište. Vidljivo je kako se elementima mikromreže uspješno može odrađivati arbitraža između različitih tržišta. Štoviše, takav princip u teoriji može pomoći i očuvanju životnog vijeka baterije. Naime, kako je zorno ilustrirano na slici 4.4, sama fizička aktivnost baterijskog spremnika energije (dakle fizikalno punjenje i pražnjenje) je višestruko manje u odnosu na financijsku aktivnost baterije.

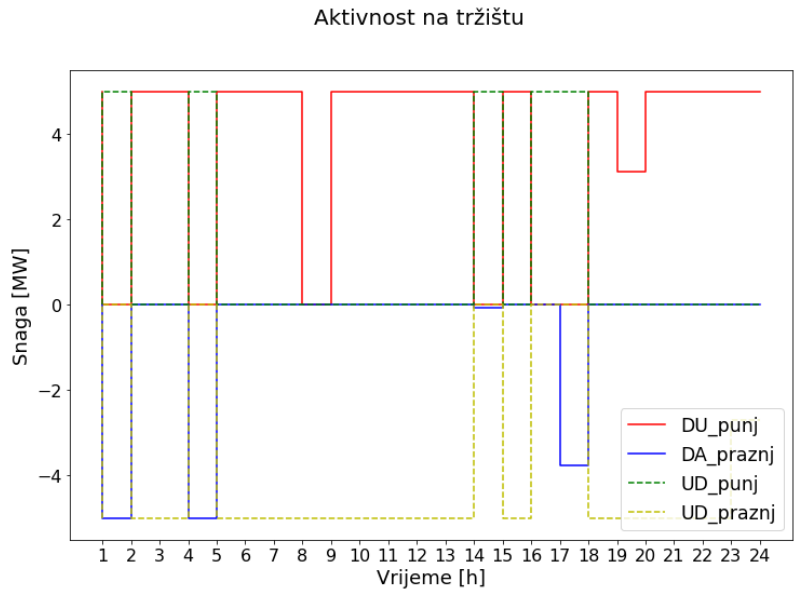


Figure 4.3: Aktivnost baterijskog spremnika na dva tržišta

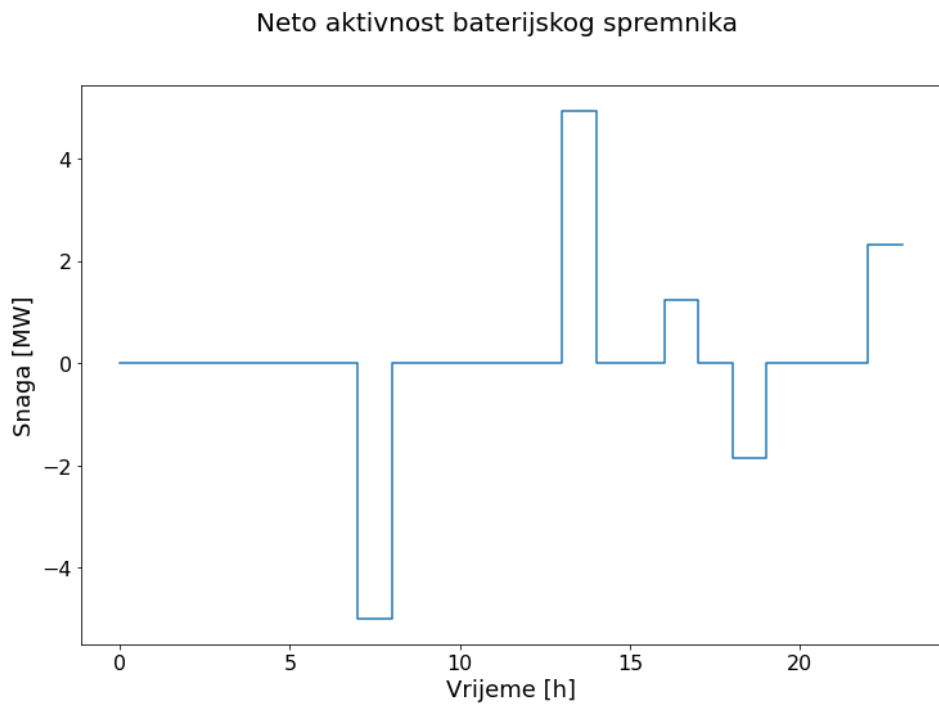


Figure 4.4: Fizikalna aktivnost baterije

## 5. Zaključak

U okviru izvještaja o pokazateljima napretka projekta prikazan je kratki opis razvijenih alata. Opis, osim što je informativno-tehničke prirode, može poslužiti i kao vrsta priručnika za korištenje.

*Mišljenja, nalazi i zaključci ili preporuke navedene u ovom materijalu isključiva su odgovornost autora i ne odražavaju nužno stajališta Hrvatske zaklade za znanost, Ministarstva znanosti i obrazovanja i Europske komisije.*