Optimalna ponuda sustava hidroelektrana i vjetroelektrana na CROPEX tržištu električne energije

Jurić, Marija

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:322870

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

zir.nsk.hr

Image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTENIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni diplomski studij

OPTIMALNA PONUDA SUSTAVA HIDROELEKTRANA I VJETROELEKTRANA NA CROPEX TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Diplomski rad

Marija Jurić

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. OPĆENITO O TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE 2
2.1. Mehanizam tržišta 2
2.1.1. Ponuda i potražnja 2
2.1.2. Tržišna ravnoteža 5
2.1.3. Konkurencija na tržištu 5
2.1.4. Elastičnost ponude i potražnje 6
2.1.5. Učinkovitost tržišta i zarada 8
2.1.6. Određivanje penala zbog uzrokovane neravnoteže 9
2.2. Modeli tržišta električne energije 10
2.2.1. Centralizirani model 10
2.2.2. Decentralizirani model 11
2.2.3. Kombinacija centraliziranog i decentraliziranog modela 11
2.3. Vjetroelektrane na tržištu električne energije 12
3. HRVATSKA BURZA ELEKTRIČNE ENERGIJE – CROPEX 14
3.1. Način trgovanja 15
3.2. Elektronički i telefonski trgovački sustavi 16
3.3. Kršenje obveza i odgovornost za štetu 16
3.4. Nalozi 17
3.4.1. Uparivanje naloga i izvješće o trgovini 18
3.5. Specifikacije Hrvatskog dan unaprijed tržišta 19
3.6. Naknada za trgovanje i transakcije 19
4. MODEL ZA ZAJEDNIČKU OPTIMALNU PONUDU NA TRŽIŠTU ZA SUSTAV HIDROELEKTRANA I VJETROELEKTRANA 21
4.1. Model za hidroelektrane 21
4.2. Formulacija funkcija cilja modela optimizacije 25
4.3. Ulazni podatci za model optimizacije 29
4.4. Rezultati modela optimizacije 32
4.4.1. Način izračuna moguće zarade plana 32
4.4.2. Provedeni plan 35

5. ZAKLJUČAK 38
LITERATURA 39
SAŽETAK 40
ABSTRACT 40
ŽIVOTOPIS 41
PRILOG P 4.1. 42

1. UVOD

Tržište električne energije se razlikuje od ostalih tržišta zato što se električna energija ne može uskladištiti stoga proizvodnja mora biti jednaka potrošnji u svakom trenutku. U ovome diplomskom radu obradit će se mehanizam tržišta električne energije na kojem proizvođači i potrošači dostavljaju svoje ponude za prodaju i kupovinu električne energije. Bit će opisana Hrvatska burza električne energije (CROPEX), načini trgovanja, podnošenje naloga za trgovanje, trgovački sustavi i specifikacije hrvatskog dan unaprijed tržišta.

Zadnjih godina stavlja se naglasak na proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije kako bi se smanjio negativni utjecaj konvencionalnih elektrana na okoliš. Ovaj rad će se baviti proizvodnjom električne energije iz vjetroelektrana čija proizvodnja direktno ovisi o brzini puhanja vjetra. Kako bi se smanjio utjecaj nesigurnosti prognoziranja proizvodnje, moguće je kombinirati rad vjetroelektrana sa drugim elektranama, u ovome slučaju, sa dvije kaskadno povezane hidroelektrane. U radu će se izraditi model optimalne zajedničke ponude promatranog sustava na tržištu dan unaprijed. Model će biti izrađen za stohastički pristup, odnosno uzet će se u obzir nesigurnost procjene proizvodnje električne energije i nesigurnost cijena na tržištu električne energije.

Rad se sastoji od pet poglavlja. U drugom poglavlju je predstavljeno općenito tržište električne energije, mehanizmi tržišta i različiti modeli tržišta. Također, opisana je mogućnost vjetroelektrana na tržištu električne energije. Hrvatska burza električne energije je opisana u trećem poglavlju. U četvrtom poglavlju je predstavljen matematički model za zajedničku optimalnu ponudu promatranog sustava, opisan je način izrade simulacijskog modela i dobiveni rezultati. U posljednjem, petom poglavlju napisan je zaključak.

2. OPĆENITO O TRŽIŠTU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Po definiciji, tržište je stalan i organiziran oblik dovođenja u kontakt ponude i potražnje roba i usluga, ali i mehanizam reguliranja odnosa prodavača i kupaca u uvjetima u kojima sudionici ostvaruju svoje ciljeve i interese. Pri tome kupci definiraju potražnju, a prodavači ponudu. [1]

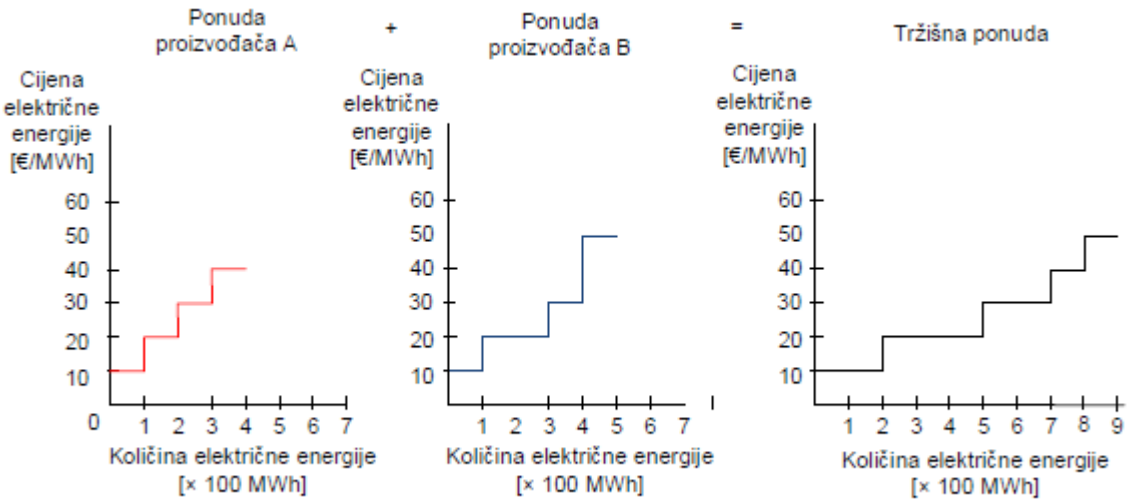
Tržište električne energije se razlikuje od ostalih tržišta zato što se električna energija ne može uskladištiti stoga proizvodnja mora biti jednaka potrošnji u svakom trenutku, uvećanoj za gubitke u prijenosu. Zbog potrebne ravnoteže proizvodnje i potrošnje, zakon ponude i potražnje ne može djelovati dovoljno brzo u realnom vremenu. Zbog toga, potrebno je da se cijena električne energije utvrdi prije ili poslije realnog vremena. Ako bi se uzimale u obzir pogreške procjene i nepredvidivi događaji, uravnoteženje bi se trebalo provoditi za svaki sekundu promatranog dana, što je nemoguće. Tržišta se dijele s obzirom na vrijeme između trenutka kada je obavljena trgovina i trenutka fizičke dostave energije pa tako postoje dvije vrste tržišta: promptna tržišta i buduća tržišta. Na promptnim tržištima se kupljena energija dostavlja trenutno, odnosno takvoj vrsti tržišta pripada unutardnevno tržište i tržište dan unaprijed. Buduće tržište podrazumijeva razdoblje između trgovine i isporuke energije duže od jednog dana. Sudionici na takvom tržištu dogovaraju tjedne, mjesečne ili godišnje ugovore, kojima se definira cijena, količina i lokacija energije. [1]

U prvom dijelu ovog poglavlja je predstavljen mehanizam tržišta električne energije, odnosno osnovne pretpostavke po kojima se obavlja trgovanje, dok su modeli tržišta predstavljeni u drugom dijelu ovog poglavlja. Trećim poglavljem su predstavljene vjetroelektrane na tržištu električne energije.

2.1. Mehanizam tržišta

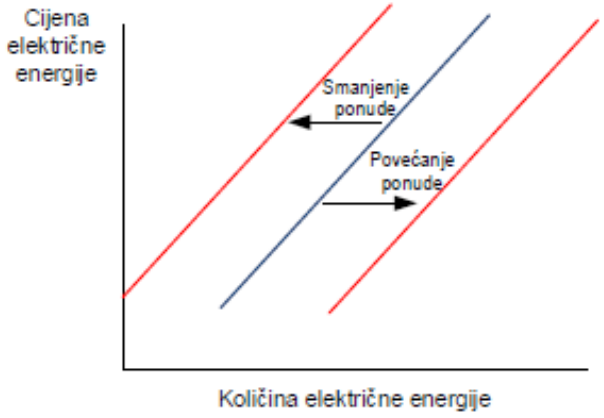
2.1.1. Ponuda i potražnja

Ponuda predstavlja količinu nekog dobra koju su proizvođači spremni i u mogućnosti prodati. Prema zakonu ponude, višoj cijeni dobra odgovara veća ponuđena količina istog dobra. Vrijedi i obrnuto. Uz rast cijene dobra, ponuđena količina raste, dok uz pad ponuđena količina pada. Zakon ponude vrijedi i za individualnu i tržišnu ponudu. Ukupna tržišna ponuda se dobije zbrajanjem svih količina navedenih u individualnim ponudama proizvođača pri istoj cijeni i prikazana je na slici 2.1.[1]



Slika 2.1. Tržišna ponuda.[1]

Svaka promjena koja povećava ponuđenu količinu pri svakoj cijeni pomiče krivulju ponude udesno i naziva se povećanje ponude. Smanjenje ponude nastupa kada se dogodi promjena koja smanjuje ponuđenu količinu pri svakoj cijeni i pomiče krivulju ponude ulijevo. Na slici 2.2. prikazani su pomaci krivulje ponude.[1]

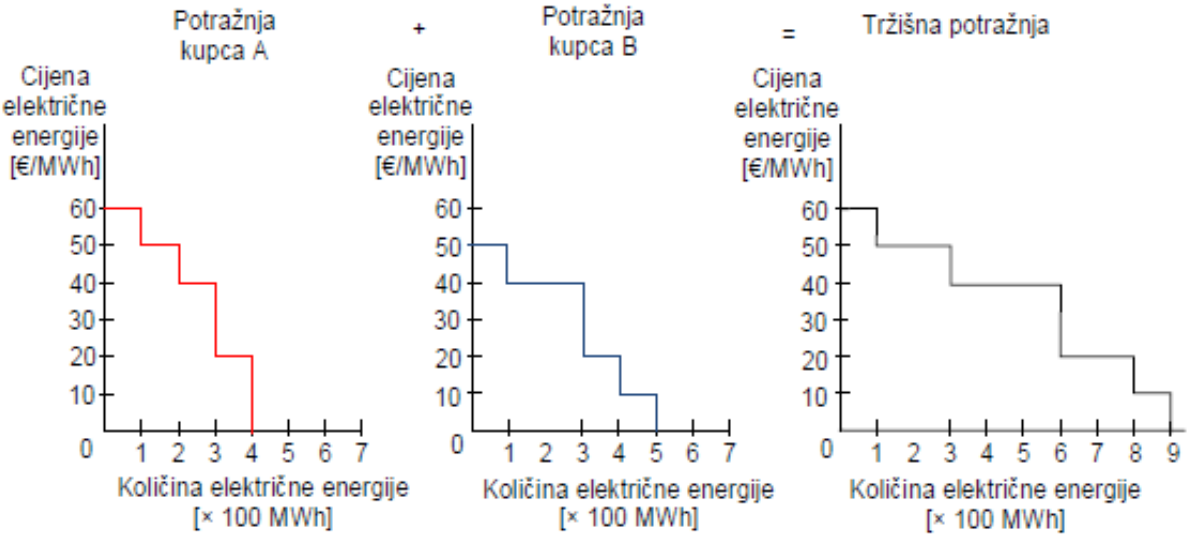


Slika 2.2. Pomaci krivulje ponude.[1]

Do pomicanja krivulje ponude može doći zbog iznosa varijabilnih troškova, povećanja učinkovitosti elektrane, očekivanja u budućnosti i broja proizvođača.

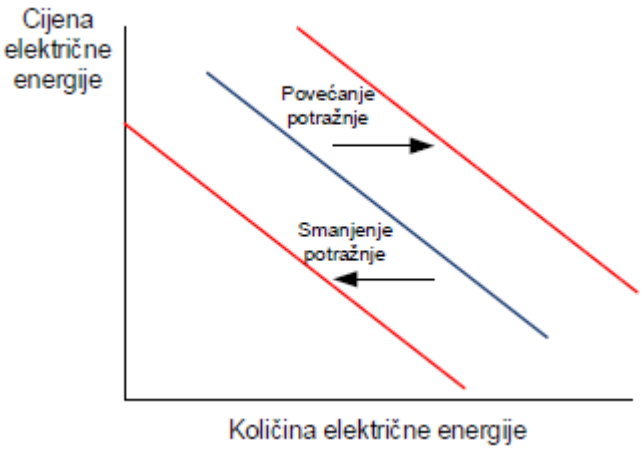
Potražnja predstavlja traženu količinu nekog dobra koju su kupci spremni i koju mogu kupiti. Zbog toga tražena količina pada kako cijena raste i raste kako cijena pada i time je definiran zakon

potražnje. Ukupna tražena količina električne energije na tržištu se dobije zbrajanjem individualnih količina s horizontalne osi individualnih krivulja potražnje električne energije što je prikazano na slici 2.3. [1]



Slika 2.3.Tržišna potražnja.[1]

Svaka promjena koja povećava traženu količinu pri svakoj cijeni pomiče krivulju potražnje udesno i naziva se povećanje potražnje. Smanjenje potražnje nastupa kada se dogodi promjena koja smanjuje traženu količinu pri svakoj cijeni i pomiče krivulju potražnje ulijevo. Na slici 2.4. prikazani su pomaci krivulje ponude.[1]



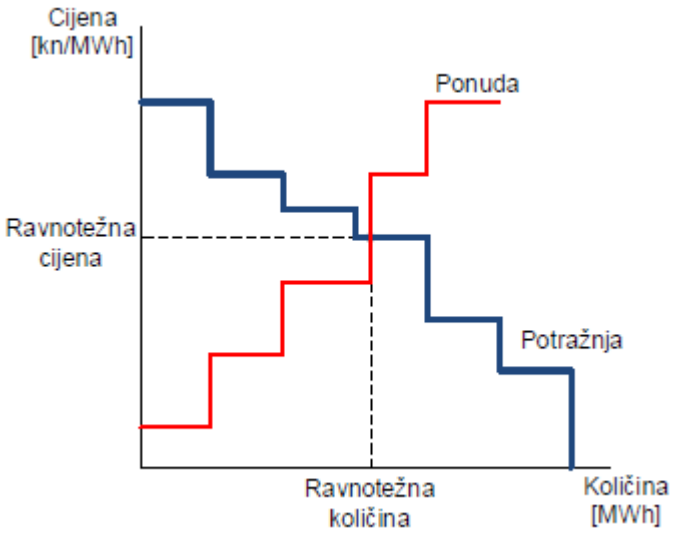
Slika 2.4. Pomak krivulje potražnje.[1]

Do pomicanja krivulje potražnje može doći zbog dohotka, cijene dobara, industrijskog razvoja, očekivanja i broja kupaca.

2.1.2. Tržišna ravnoteža

Točka u kojoj se sijeku krivulja ponude i krivulja potražnje je tržišna ravnoteža i prikazana je na slici 2.5.. Ravnotežna cijena je cijena u tom sjecištu, a ravnotežna količina je količina u tom sjecištu. Ravnotežna cijena se ponekad naziva cijena koja čisti tržište (engl. *clearing price*) jer su po toj cijeni svi na tržištu zadovoljeni: kupci su kupili sve što su htjeli kupiti, a prodavači prodali sve što su željeli prodati. [1]

Koraci koje poduzimaju kupci i prodavači prirodno dovode do ravnoteže, te prema zakonu ponude i potražnje cijena bilo kojeg dobra prilagođava se kako bi se izjednačile ponuđena i tražena količina tog dobra. Na većini slobodnih tržišta postoje privremeni viškovi i manjkovi koji se naposljetku primiču ravnotežnim razinama. Do neravnoteže može doći npr. ograničavanjem najviše cijene električne energije što dovodi do viška potražnje ili ako ponuda ne uspije zadovoljiti potražnju pa tada mora doći do redukcija kako bi se tržište pomaklo prema ravnoteži.[1]



Slika 2.5. Ravnoteža ponude i potražnje.[1]

2.1.3. Konkurencija na tržištu

Tržište savršene konkurencije je tržište na kojem postoji velik broj kupaca i prodavača tako da svaki od njih pojedinačno ima zanemariv utjecaj na tržišnu cijenu. [1]

Tržište električne energije savršene konkurencije definira se pomoću osnovnih karakteristika [2]:

1) Kupci i prodavači su brojni tako da niti jedan pojedinačno ne može utjecati na tržišnu cijenu te moraju prihvatiti cijenu koju odredi tržište, zbog tog se nazivaju preuzimateljima cijena (engl. *price takers*).
2) Svaki sudionik tržišta mora biti ekonomski racionalan, tj. prodavač maksimizira svoju dobit, a potrošač korist.
3) Svi sudionici moraju imati potpuno znanje o cijenama i drugim važnim faktorima za njihove odluke.
4) Mora postojati slobodan ulaz novih proizvođača na tržište.
5) Troškovi samih transakcija moraju biti minimalni.
6) Sustav u kojem se odvijaju transakcije mora biti legalan, brz i učinkovit. Potrebno je definirati jasna tržišna pravila i primorati sudionike na sklapanje poslova putem jasnih i legalnih ugovora.

Tržišta na kojima ne vrijede u potpunosti karakteristike o savršenoj konkurenciji nazivaju se tržišta nesavršene konkurencije. Monopol je ono tržište na kojem je samo jedan prodavač i on sam određuje cijenu. Prirodni monopol imaju kompanije čiji prosječni troškovi snažno padaju s povećanjem proizvodnje zbog ekonomije velikih razmjera, pa mogu proizvoditi djelotvornije nego što bi to učinile mnoge kompanije zajedno. Primjer prirodnog monopola su prijenos i distribucija električne energije.[2]

2.1.4. Elastičnost ponude i potražnje

Potrošači reagiraju na promjene cijene električne energije prilagođavajući svoju potražnju za istom, stoga pri rastu cijene odluče koristiti manje električne energije. Kratkoročno gledajući, potrošači mogu reagirati na promjenu cijene tako što će smanjiti ili prekinuti vrijeme korištenja trošila. U dugoročnom razdoblju mogu zamijeniti svoja trošila sa energetski učinkovitim, te mogu promijeniti vremenski raspored njihovog djelovanja. [2]
Cjenovna elastičnost potražnje izračunava se po formuli [2]:

$$cjenovna\ elastičnost\ potražnje = \frac{postotna\ promjena\ tražene\ količine}{postotna\ promjena\ cijene} \tag{2-1}$$

Da bi se osigurala jednoznačnost izračuna, koristi se metoda sredine pri izračunavanju elastičnosti potražnje. Metoda sredine izračunava postotnu promjenu dijeljenjem promjene s

aritmetičkom sredinom početne i konačne razine. Tada formula za izračun cjenovne elastičnosti potražnje između dvije točke, označene s (Q_1, P_1) i (Q_2 i P_2), glasi [2]:

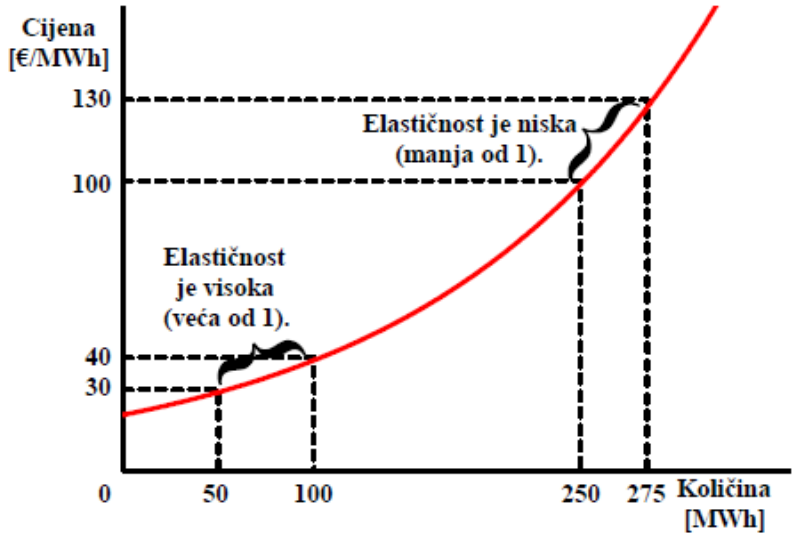
$$Ed = \frac{\frac{Q_2 - Q_1}{(Q_2 - Q_1)/2}}{\frac{P_2 - P_1}{(P_2 - P_1)/2}} \tag{2-2}$$

Prema formuli, potražnja je elastična kada je elastičnost veća od 1 budući da se količina mijenja više nego proporcionalno s cijenom. Neelastična je kada je elastičnost manja od 1 jer se tada količina mijenja manje nego proporcionalno s cijenom.[2]

Cjenovna elastičnost ponude pokazuje koliko se mijenja ponuđena količina u odnosu na cijenu. Ponuda je elastičnija u dugom vremenskom razdoblju nego u kratkom. Poput elastičnosti potražnje, i elastičnost ponude se računa korištenjem metode sredine. Formula za izračun cjenovne elastičnosti ponude između dvije točke označene s (S_1, P_1) i (S_2 i P_2), glasi [2]:

$$Es = \frac{\frac{S_2 - S_1}{(S_2 - S_1)/2}}{\frac{P_2 - P_1}{(P_2 - P_1)/2}} \tag{2-3}$$

Ponuda je elastična kada je elastičnost veća od 1. Elastičnost ponude nije uvijek konstantna, nego može varirati duž krivulje kao što je prikazano na slici 2.6. [1]



Slika 2.6. Promjena elastičnosti duž krivulje ponude.[1]

2.1.5. Učinkovitost tržišta i zarada

Društvena dobit ili blagostanje je ukupna korist proizvođača i kupca koju ostvaraju sudjelovanjem na tržištu.

Potrošačev višak je iznos kojeg je kupac spreman platili za električnu energiju umanjen za iznos kojeg stvarno plaća. Na primjer, ako je kupac spreman platili 50 €/MWh, a cijena na tržištu je 40 €/MWh, njegova ušteda, odnosno višak pri svakom kupljenom MWh energije iznosi 10 €.

Proizvođačev višak je iznos kojeg proizvođač primi za prodanu električnu energiju umanjen za troškove njene proizvodnje. Na primjer, ako proizvođač proda energiju po cijeni od 50 €/MWh, a troškovi proizvodnje su iznosili 40 €/MWh, tada njegov ostvareni višak za svaki MWh energije iznosi 10 €. [1]

Troškovi proizvodnje električne energije se dijele na dvije kategorije; troškove izgradnje elektrane i troškove rada elektrane. Ako se pretpostavi da je već izgrađena elektrana, tada se ukupni troškovi rada elektrane dijele na fiksne i varijabilne troškove. Fiksni troškovi su oni koji ostaju nepromijenjeni u kratkoročnom razdoblju i ne ovise o razini proizvodnje, npr. plaće radnika, troškovi održavanja i slično. Varijabilni troškovi ovise o razini proizvodnje, npr. troškovi goriva.[2]

Cilj proizvođača je maksimizirati dobit koja je jednaka razlici prihoda od prodane električne energije na tržištu i troškova njene proizvodnje[1]:

$$max\Omega_i = max[\pi \cdot P_i - C_i(P_i)] \tag{2-4}$$

gdje je P_i snaga električne energije proizvedene u proizvodnoj jedinici i tijekom promatranog razdoblja, π je cijena po kojoj je prodana energija, a $C_i(P_i)$ su troškovi proizvodnje te količine energije. Ako se promatra razdoblje od jednog sata i ako je izlazna snaga jedina varijabla na koju proizvodna kompanija može izravno utjecati, tada se uvjet optimalnog ponašanja proizvodne kompanije dobije derivacijom izraza (2-4) po snazi P_i [1]:

$$\frac{\mathrm{d}\Omega_i}{dP_i} = \frac{d(\pi \cdot P_i)}{dP_i} - \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} = 0 \tag{2-5}$$

Prvi član izraza (2-5) predstavlja granični (marginalni) prihod proizvodne jedinice *i,* odnosno prihod koji će kompanija dobiti za prodaju dodatnog MWh električne energije, a drugi član je granični (marginalni) trošak tj. trošak proizvodnje dodatnog MWh električne energije.

U kratkoročnom razdoblju, proizvođača zanima hoće li prihod od proizvodnje dodatnih MWh električne energije premašiti dodatne troškove stvorene zbog proizvodnje tog dodatnog MWh energije. Proizvođač se odlučuje na dodatno angažiranje jedinica ako je tržišna cijena električne

energije veća od graničnog troška. Na savršenom tržištu, proizvodna jedinica povećava proizvodnju do granice kada je granični trošak jednak tržišnoj cijeni električne energije, prikazano izrazom (2-6).

$$MC_i = \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} = \pi \tag{2-6}$$

Granični proizvodni trošak određuje se s obzirom na cijenu goriva, toplinsku vrijednost goriva i učinkovitost pretvorbe toplinske energije u električnu.[1]

2.1.6. Određivanje penala zbog uzrokovane neravnoteže

Neravnoteža sustava se javlja kada proizvodnja ili potrošnja električne energije odstupaju od ugovorene količine i njezino uzrokovanje se penalizira sustavom jedinstvenih i dvojnih cijena.

Penalizacija u sustavu jedinstvene cijene znači da proizvođač koji nije proizveo ugovorenu količinu energije plaća nabavnu tržišnu cijenu energije uravnoteženja. U sustavu dvojnih cijena operator prijenosnog sustava određuje različite cijene penala u ovisnosti o količini energije koja nedostaje. Na tržištu uravnoteženja postoje ponude za regulaciju na gore tj. ponude za povećanje proizvodnje i smanjenje potrošnje (engl. *up regulation*) i ponude za regulaciju na dolje tj. za smanjenje proizvodnje i povećanje potrošnje (engl. *down regulation*). [1]

Ponude na tržištu moraju sadržavati određenu minimalnu snagu promjene koju ponuditelj može ostvariti u određenom vremenu. Operator prijenosnog sustava je jedini kupac na tržištu i on kupuje ponude novcem koji naplati sudioniku koji je uzrokovao neravnotežu. Promatrani sat operator sustava označi kao sat regulacije na gore ili dolje ovisno o tome da li je nedostajalo energije u sustavu ili je bio proizveden višak. Cijena za regulaciju na gore je određena cijenom najskuplje ponude za tu regulaciju i mora biti veća ili jednaka cijeni na tržištu za dan unaprijed. Analogno tome, cijena za regulaciju na dolje je određena cijenom najjeftinije ponude za tu regulaciju i mora biti manja ili jednaka cijeni na spot tržištu. U tablici 2.1. prikazan je sustav dvojnih cijena za proizvođača koji je uzrokovao neravnotežu. [1]

Tablica 2.1. Sustav dvojnih cijena za proizvođača zbog uzrokovane neravnoteže.[1]

	Regulacija na gore	Regulacija na dolje
Proizvodnja proizvođača u promatranom satu je manja od ugovorene.	Kupnja energije uravnoteženja po cijeni za regulaciju na gore.	Kupnja energije uravnoteženja po cijeni na spot tržištu.
Proizvodnja proizvođača u promatranom satu je veća od ugovorene.	Prodaja proizvedenog viška po cijeni na spot tržištu.	Prodaja proizvedenog viška po cijeni za regulaciju na dolje.

2.2. Modeli tržišta električne energije

Veleprodajno tržište električne energije se može ostvariti centraliziranim ili decentraliziranim modelima, ili njihovom kombinacijom.

2.2.1. Centralizirani model

U centraliziranom modelu neovisni tržišni operator uravnotežuje tržište tako što na temelju jasno definiranih pravila određuje tko će kupovati, a tko prodavati energiju od tržišnih sudionika koji su predali svoje potražnje i ponude. Sva trgovina se obavlja na jednom mjestu. Ponude se sastoje od količine električne energije koju su proizvođači spremni proizvesti i pripadne cijene koju traže, a potražnje od količine energije koju kupci žele kupiti i cijene koju su spremni platiti. Ponude i potražnje se daju za svaki određeni sat, a mogu biti i u blokovima od nekoliko sati. Blokovske ponude su određene fiksnom cijenom i količinom za sve sate na koje se odnosi. Blokovska ponuda je prihvaćena ako je cijena koju je kupac naveo veća od prosječne cijene na tržištu za promatrano razdoblje.[1]

Centralizirani model može biti organiziran kao burza ili pul (engl. *pool*). Na burzi se daju ponude izravno putem elektroničkog sučelja, a tržišna kupovna ponuda se formira slaganjem pojedinačnih kupovnih ponuda od one s najvećom cijenom ka onoj s najmanjom. Tržišna prodajna ponuda se formira na obrnuti način. Sjecištem krivulja tržišnih ponuda se dobije ravnotežna cijena i količina. Ta cijena je jednaka za sve sudionike tržišta. Pul vodi neovisni operator sustava koji provodi i vođenje i upravljanje sustavom. On zaprima prodajne i kupovne ponude, te određuje ravnotežnu količinu i cijenu na isti način kao i na burzi. Zatim za uspostavljenu ravnotežu provodi tokove snaga čime provjerava tehničku izvedivost plana. Ukoliko nije izvediv, pokreće optimizacijski postupak kojim se dobije izvedivi plan rada elektroenergetskog sustava.

Razlika između burze i pula je što se zagušenja u pulu rješavaju implicitno u postupku uravnoteženja tržišta, dok u modelu burze tržišni operator ne vodi računa o zagušenjima, nego vozne redove elektrana odobrava operator prijenosnog sustava. Na taj način, operator prijenosnog sustava ipak utječe na tržišnu ponudu. [1]

2.2.2. Decentralizirani model

U decentraliziranom modelu, trgovina se obavlja samostalnim sklapanjem ugovora o kupnji i prodaji električne energije između tržišnih sudionika. Ovim modelom se realizira buduće tržište. Terminski ugovori su dugoročni bilateralni ugovori u kojima kupci i prodavači definiraju trgovinu velike količine električne energije za duži vremenski period i takvi ugovori se nazivaju terminski. Nakon sklapanja ugovora, tržišni sudionici moraju obavijestiti o tome operatora vodi i upravlja elektroenergetskim sustavom. Kod ovog modela, ugovorena cijena je poznata samo potpisnicima ugovora i zbog toga je model manje transparentan nego centralizirani. [1]

2.2.3. Kombinacija centraliziranog i decentraliziranog modela

Kombinacija ova dva modela je najrašireniji model tržišta. Dugoročna trgovina se odvija bilateralnim ugovorima, a kratkoročna na burzi ili pulu. Pored terminskih ugovora, moguće je trgovati ročnicama (engl. *futures*) koje se odnose na manju količinu električne energije i za kraće razdoblje. Zbog standardizacije, njima se trguje na burzi. Ročnicama mogu trgovati i sudionici koji nisu nužno potrošači ili proizvođači, dovoljno je da klijent uplati maržu i kupuje i prodaje ročnice pomoću brokera.[1]

Pored terminskih ugovora i ročnica, postoje ugovori pod nazivom opcije koji omogućavaju tržišnim sudionicima da sami odluče hoće li ispuniti ugovorenu obvezu ili ne. Tržišni sudionik koji je prodao opciju ima obvezu izvršenja uvjeta opcije u trenutku kada nositelj opcije odluči aktivirati ugovorenu obvezu. [1] *Call* opcija predstavlja pravo (ne i obvezu) na kupovinu određene količine električne energije po određenoj cijeni u određeno vrijeme. *Call* opcija je bezvrijedna ako je stvarna cijena na tržištu manja od cijene opcije koju je kupac platio prodavaču prilikom njezine kupovine. Ukoliko je cijena na tržištu veća, tada će nositelj opcije na njoj zaraditi. Slično *call* opciji, *put* opcija predstavlja pravo (ne i obvezu) na prodaju određene količine električne energije po određenoj cijeni u određeno vrijeme. Također, *put* opcija je bezvrijedna ako je stvarna cijena na tržištu veća od njezine cijene. [1]

Ugovor za razliku (engl. *contract for difference*) predstavlja kombinaciju *call* i *put* opcije definirane za istu izvršnu cijenu. Pomoću takvih ugovora, sudionici tržišta koje je organizirano kao ovlašteni pul mogu se ograditi od izloženosti volatilnosti *spot* cijena. [1]

2.3. Vjetroelektrane na tržištu električne energije

Prema strategiji Europske komisije 20-20-20 u zemljama EU potrebno je do 2020. godine dostići udio od 20 % proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora u ukupno potrošenoj električnoj energiji. [1] Da bi se osigurala što veća proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora postoje sustavi poticaja poput zajamčenih tarifa, premija, sustava javnih natječaja, subvencija investicija i fiskalnih mjera.

Vjetar je postao vrlo važan čimbenik u proizvodnji električne energije što potvrđuje podatak da je na kraju 2016. godine ukupni instalirani kapacitet vjetroelektrana u EU iznosio 153.7 GW s kojim energija iz vjetroelektrana pokriva 10.4 % cjelokupne potrošnje električne energije u EU. [3]

Vjetroelektrane imaju mogućnost davanja ponuda na tržištu, ali ponude ovise o prognoziranju vjetra budući da njihova proizvodnja izravno ovisi o brzini puhanja vjetra u danom trenutku. Uravnoteženje proizvodnje i potrošnje provodi operator prijenosnog sustava. Kako bi se smanjila potreba za energijom uravnoteženja, u europskom elektroenergetskom sustavu postoje različiti načini vrednovanja odgovornosti za prognoziranje proizvodnje iz vjetroelektrana. Modeli vrednovanja odgovornosti proizvodnje se dijele u tri skupine [1]:

- model u kojem proizvođač nema obvezu prognoziranja proizvodnje,
- model u kojem proizvođač ima ugovor sa subjektom odgovornim za odstupanje (uz različite pogodnosti)
- model u kojem se pravila za uzrokovanu neravnotežu primjenjuju jednako na sve sudionike tržišta, uključujući i proizvođače električne energije iz vjetroelektrana.

Vlasnici vjetroelektrana mogu sudjelovati na tržištu i tako ublažiti nesigurnost prognoze proizvodnje, ili mogu kombinirati rad s drugim izvorima električne energije. Najčešće koordiniraju rad s hidroelektranama i tako smanjuju vjerojatnost uzrokovanja neravnoteže stvarne i planirane proizvodnje iz vjetroparka i mogućih troškova za penale. Pri kombiniranju vjetroparka i crpno-akumulacijskih hidroelektrana električna energija iz vjetroparka može pumpati vodu u gornji bazen akumulacije koja se kasnije može iskoristiti za proizvodnju prema željenom planu. Takvim

zajedničkim radom može se sudjelovati na tržištu za dan unaprijed i na unutardnevnom tržištu te ublažiti utjecaj nesigurnosti prognoze proizvodnje električne energije iz vjetroparka. [1]

3. HRVATSKA BURZA ELEKTRIČNE ENERGIJE – CROPEX

Hrvatska burza električne energije se naziva CROPEX (engl. *Croatian Power Exchange*) i odgovorna je za organizaciju i vođenje tržišta koje se sastoji od dva dijela; Dan unaprijed tržišta i Unutardnevnog tržišta. [4]

Dan unaprijed tržište omogućava trgovanje proizvodima u obliku dražbe za svaki dan isporuke na osnovu svih ponuda za kupnju i ponuda za prodaju za količine i cijene koje su primljene prije zatvaranja dražbe. Unutardnevno tržište omogućava kontinuirano unutardnevno trgovanje proizvodima u kojem se transakcije automatski uparuju kada se podudarni nalozi unesu u Elektronični trgovački sustav (ETS). Takve transakcije mogu biti unesene do 30 minuta prije isporuke.[4]

CROPEX osigurava kliring[1] i namiru transakcija i sve transakcije sklopljene na tržištu podliježu automatski kliringu i namiri budući da članovi postaju ugovorne strane CROPEX-u koji je u svim transakcijama središnja ugovorna strana. [4]

Preduvjet za trgovanje na CROPEX tržištima jeste članstvo koje se postiže potpisivanjem ugovora, kojem prethodi ispunjavanje uvjeta za ugovornu stranu na temelju pravila za kliring i namiru i pravo sudjelovanja na hrvatskom tržištu električne energije. Članovi u svakom trenutku moraju ispunjavati uvjete za ugovornu stranu u svakoj transakciji i kliring transakciji, postupati u skladu s dozvolama na temelju pravila trgovanja i imati osobu odgovornu za trgovanje za svako tržište. [4]

Svaki član CROPEX-a izjavljuje i jamči sljedeće: da je ovlašten izvršavati svoje obveze iz pravila trgovanja, ugovora o članstvu i svake transakcije; da je status uredno ustrojen i valjano postoji prema zakonima jurisdikcije svojeg ustroja; da ima odgovarajuće osoblje koje je kompetentno i ima znanje za trgovanje i da je organiziran na način koji omogućava realizaciju trgovanja; da razumije karakteristike svakog proizvoda i rizike koji su s njim povezani i da na odgovarajući način shvaća uvjete i rizike i sposoban ih je preuzeti; da potpisivanje, predaja i provedba ugovora o trgovanju ne krše i nisu u sukobu s propisima; da su svi uvjeti potrebnih ovlaštenja ispunjeni te ne postoje dodatne dozvole koji trebaju biti ishođeni te da su sve primjenjive informacije koje se dostavljaju pismenim putem točne, ispravne i potpune. [4]

CROPEX svakom članu u odnosu na svaku transakciju koja je sklopljena u njegovom ETS-u izjavljuje i jamči sljedeće: da je ovlašten izvršavati svoje obveze iz pravila trgovanja i svake transakcije; da je status uredno ustrojen i valjano postoji na temelju zakona jurisdikcije svog ustroja;

[1] Proces u kojem CROPEX ulazi u transakciju kao središnja ugovorna strana te tako postaje ugovorna strana s članovima.[5]

da ima odgovarajuće osoblje koje je kompetentno i ima znanje koje omogućuje izvršavanje njegovih obveza i da je organiziran na način koji omogućava realizaciju obveza na temelju pravila trgovanja; da potpisivanje, predaja i provedba relevantnih ugovora ne krše ili nisu u sukobu s zakonom koji se primjenjuje na CROPEX ili njegovu imovinu; da su sva potrebna ovlaštenja pravovaljana i proizvode pravne učinke te da ne postoje dodatne dozvole koje trebaju biti izvršene; da su sve primjenjive informacije koje se dostavljaju pismenim putem točne, ispravne i potpune, osim ako je drugačije navedeno u primjenjivim informacijama te da neće nastupiti kršenje obveze ili događaj koji bi predstavljao neizvršenje obveze. [4]

3.1. Način trgovanja

CROPEX održava elektronički trgovački sustav i telefonski trgovački sustav (TTS). CROPEX primitkom naloga[2] u ETS-u od članova određuje količinu energije kojom se trguje i relevantne cijene prema važećim pravilima za izračun cijena. Članovi mogu bilo koji dan trgovanja unutar sati trgovanja podnijet naloge za relevantni proizvod preko ETS-a nakon čega se vrši obrada i uparivanje naloga i transakcija prema pravilima tržišta. Članovi su odgovorni za uspostavljanje komunikacije s CROPEX-om sukladni specifikaciji. Trgovanje je anonimno, osim kada je to potrebno radi unosa naloga i transakcija. Posljednje verzije naloga i transakcija u ETS-u i TTS-u se pohranjuju elektronički i čuvaju se u skladu s primjenjivim zakonom. Također, svi telefonski razgovori s vođenjem tržišta i TTS mogu biti snimani i obvezuju se ishoditi svaku suglasnost koja je potrebna od njihovih zaposlenika, osoba odgovornih za trgovanje i trgovaca u skladu s primijenjenim zakonom. [4]

CROPEX može u svakom trenutku obustaviti trgovinu ako se dogodi problem u sustavu koji bi utjecao na trgovanje ili da se spriječi njegovo nastajanje; također, ako se utvrdi da planirano trgovanje nije bilo u skladu s propisima. CROPEX obavijesti članove o obustavi trgovanja i ponovno ih obavijesti najmanje 5 minuta unaprijed o ponovnom otvaranju trgovanja. Ako CROPEX utvrdi da je nalog u suprotnosti sa pravilima trgovanja, odbit će ga i o tome obavijestiti člana. [4]

Nakon što trgovci podnesu nalog, moraju biti u svakom trenutku na raspolaganju za kontakt telefonom sve dok je nalog važeći. Na unutardnevnom tržištu, nalozi su važeći dok nisu upareni, otkazani, izmijenjeni ili istekli, dok na dan unaprijed tržištu, sve do kraja relevantne dražbe ili dok ih

[2] Ponuda za kupnju ili ponuda za prodaju proizvoda ili nekoliko proizvoda koju član uredno registrira na dan unaprijed webu.[5]

član ili CROPEX ne uklone. Na unutardnevnom tržištu, trgovci moraju biti dostupni putem telefona 30 minuta nakon primjenjivog vremena sklapanja ugovora. [4]

3.2. Elektronički i telefonski trgovački sustavi

ETS je glavni način trgovanja za sve članove koji žele trgovati na CROPEX-ovim tržištima. U ETS-u članovi registriraju svoje naloge koji se rangiraju i povezuju u cijelosti u skladu s pravilima tržišta. Pristup ETS-u se ostvaruje s Digipass tokenima dodijeljenim odgovornim osobama za trgovanje i trgovcima koje je odredio član. Članovi imaju pravo pristupa i korištenja ETS-a ako ispunjavaju sve uvijete trgovanja, nemaju obustavljena ili opozvana prava i ako postupaju u skladu s uvjetima za korisnike. Pristup ETS-u nije isključiv i ne može se prenositi.[4]

TTS služi kako rezervni način usluge za članove kada ne mogu pristupiti ETS-u ili kada CROPEX smatra da je on bolja opcija od ETS-a. Samo odgovorne osobe za trgovanje i trgovci koje je CROPEX odobrio mogu kontaktirati TTS u vezi tržišta pri čemu se predstavlja samoinicijativno te navodeći člana kojeg predstavlja postavlja upit zašto član ne može podnijeti nalog putem ETS-a. U slučaju da CROPEX odobri korištenje TTS-a, član podnosi informacije i CROPEX unosi nalog u ETS. Nalog je registriran kada CROPEX preko TTS-a potvrdi članu unos u ETS nakon čega trgovac tog člana ili osoba odgovorna za trgovanje potvrdi sadržani nalog u potvrdi o unosu naloga. Ako član ne potvrdi nalog najkasnije 10 minuta prije zatvaranja trgovanja, CROPEX obriše nalog i obavijesti člana. Također, nalog se može obrisati ako ga član opovrgne iz potvrde o unosu najkasnije 10 minuta prije zatvaranja trgovanja. TTS se osigurava prema raspoloživosti i CROPEX ne daje jamstvo da će biti raspoloživ bilo kojem članu u određeno vrijeme. [4]

3.3. Kršenje obveza i odgovornost za štetu

Članovi moraju u svakom trenutku izvršavati svoje obveze iz bilo kojeg dokumenta pravila trgovanja i moraju poštivati primjenjive propise. CROPEX vrši nadzor tržišta kako bi trgovanje i ostale djelatnosti na tržištu bile u skladu s pravilima. Kršenje obveza nastaje ako član nije izvršava svoj dužnosti ili ako krši propise i pravila. Teže kršenje obveza nastupa ako je član dao netočne izjave i koje nije ispravio nakon što ga je CROPEX obavijestio o tome i ako nije izvršio obveze plaćanja. Prilikom utvrđivanja sankcija, CROPEX može izdati pismeno upozorenje članu ili ga isključiti iz trgovanja i raskinuti ugovor o članstvu radi teškog kršenja obveza. [4]

CROPEX nije odgovoran za štetu i gubitak koji nastanu uslijed poslovnih odluka člana i očekuje da će se članovi na tržištu ponašati s dužnom pažnjom dobrog stručnjaka. Također, CROPEX

nije odgovoran za gubitak članu koji nastane zbog drugog člana koji nije dostavio ili preuzeo količinu isporuke. Član će u cijelosti i efektivno osigurati obeštećenje CROPEX-u za sve troškove, potraživanja, štetu i izdatke koji proizlaze direktno iz kršenja njegovih obveza iz pravila trgovanja i ugovora o članstvu. Troškovi prekograničnog prijenosnog kapaciteta, troškovi PDV-a, carinske pristojbe i slična davanja su odgovornost člana te je on dužan u cijelosti osigurati obeštećenje za sve takve troškove koje bi CROPEX mogao imati. [4]

3.4. Nalozi

Nalozi se podnose pomoću standardne forme naloga i šalju se elektroničkim putem ili se unose ručno na Dan unaprijed webu[3]. Da bi nalog bio ispravan, mora sadržavati informaciju radi li se o ponudi za kupnju ili ponudi za prodaju. Ponude za kupnju se označavaju pozitivnim brojem za količinu energije, a ponude za prodaju negativnim brojem. Granice cijena naloga moraju biti unutar cjenovnog raspona kojeg je odredio CROPEX. Ako članovi ne poštuju pravila za kliring i namiru, odnosno zadaju naloge koji su viši od iznosa jamstava koje su predali CROPEX-u, tada CROPEX neće prihvatiti njihove naloge i obrisat će se s Dan unaprijed weba i/ili TTS-a. Svaki nalog za svaku dražbu predstavlja pojedinačan i zaseban nalog za razdoblje na koje se odnosi. Odnosno, svaki nalog predstavlja pojedinačnu ponudu za kupnju ili prodaju neovisno o ostalim nalozima koji su podneseni od istog člana za istu dražbu. Svaka dražba se uvijek odnosi na sljedeći dan koji počinje u 00:00 CET. Nalozi se mogu registrirati od trenutka kada su stavljeni na raspolaganje za trgovanje do zatvaranja dražbe. Nakon zatvaranja dražbe, nemoguće je da predani nalog bude uvažen bez obzira na razlog kašnjenja predaje (npr. zbog prestanka rada komunikacijskog sustava). Članovi koji imaju poteškoća s podnošenjem naloga moraju odmah o tome obavijestiti CROPEX. CROPEX nije odgovoran za pogreške članova u podnošenju naloga, ali može ih kontaktirati telefonom ili elektroničkom poštom ako je nalog neispravan ili ako uoči pogrešku. Ako član podnese novi satni nalog za isti sat isporuke, tada se prethodni satni nalog otkazuje. Onaj satni nalog koji primi zadnji za svaki sat isporuke, smatra se važećim te su članovi dužni provjeriti jesu li nalozi, njihove izmjene i dopune, ispravni i valjani.[6]

CROPEX odredi cjenovni raspon unutar kojeg moraju biti sve cijene naloga za dražbu. Može ga promijeniti, ali o tome mora izdati obavijest najmanje četiri dana unaprijed. U slučaju promjene raspona za neku dražbu, svi nalozi koji su podneseni prije promjene se automatski brišu i CROPEX nije odgovoran za troškove članova koji su nastali zbog promjene cjenovnog raspona. [6]

[3] Sustav za trgovanje putem interneta/mreže koji CROPEX nudi i podržava za trgovanje na Hrvatskom dan unaprijed tržištu.[5]

Satni nalozi su izjava člana o njegovoj spremnosti za kupnju ili prodaju određenje količine energije na tržištu po određenoj cijeni u određenom satu isporuke primjenjivog za dan isporuke. Svaki satni nalog se sastoji od skupa specifikacija cijene naloga i količine energije za primjenjivi sat isporuke, od količine energije po najnižoj granici cijene naloga do količine energije prema gornjoj granici cijene naloga. Količina energije u satnom nalogu za prodaju mora biti konstantna ili se mora povećavati s rastom cijena naloga, dok se količina energije za kupnju mora biti konstantna ili se smanjivati s rastom cijene naloga. [6]

Za stvaranje krivulje naloga, CROPEX nakon primitka satnog naloga interpolira vrijednosti između svakog cjenovnog koraka u satnom nalogu pomoću linearne interpolacije i primijeni satni nalog na svaku interpoliranu vrijednost na nastaloj krivulji naloga. [6]

3.4.1. Uparivanje naloga i izvješće o trgovini

Proces izračuna u kojem se nalozi uparuju opisan je u javnom opisu algoritma za uparivanje tržišta električne energije EUPHEMIA PCR-a koji je dostupan na CROPEX-ovoj mrežnoj stranici. Svi nalozi koji se podnose za svaki sat isporuke su točka na krivulji naloga za ponudu za prodaju i ponude za kupnju, a svaka krivulja naloga se dobije pomoću interpolacije ravnih linija između naloga na krivulji. Cijena i količina energije na tržištu za dan unaprijed za odnosni sat isporuke su određene točkom na sjecišta između ukupnih krivulja ponuda za prodaju i ponuda za kupnju. Uslijed zaokruživanja volumena svakog člana kod izračuna cijene dolazi do neravnoteže između ukupnih ponuda za kupnju i prodaju koja se dijeli na članove čiji su nalozi prihvaćeni u odnosu na relevantni sat isporuke. Sve transakcije na tržištu u odnosu na jedan sat isporuke provode se prema cijeni na području tržišta koja se primjenjuje za odnosni sat isporuke i sve cijene se izračunavaju u eurima. [6]

U slučaju ne-preklapanja krivulja ponude i potražnje na tržištu, sustavom trgovanja se ograničava krivulja ponude ili potražnje ovisno o tome jesu li došlo do prevelike ponude ili premale ponude u području. Ukupno ograničavanje se dijeli proporcionalno između članovi čiji su nalozi uzeti u obzir na temelju njihove želje za prodajom/kupnjom prema minimalnoj ili maksimalnoj cijeni. [6]

Cijene i odgovarajuće količine energije na tržištu se objavljuju nakon dovršetka dražbe. CROPEX obavijesti putem izvješća o trgovini svakog člana o ostvarenoj kupnji/prodaji. U tom izvješću je navedena cijena i količina energije za svaki sat isporuke u kojem su nalozi ostvareni. Ako CROPEX kasni s provedbom dražbe, obavijestit će članove putem objave poruke na svojoj mrežnoj stranici u redovnim intervalima koji počinju ne kasnije od 13:00 CET, pa do trenutka uspješnog

dovršetka dražbe. Ako tržišni rezultati nisu raspoloživi do 13:50 CET, tada će CROPEX otkazati dražbu za dan isporuke i tada se brišu svi uneseni nalozi za taj dan. [6]

3.5. Specifikacije Hrvatskog dan unaprijed tržišta

Pozivanje na točke u vremenu se odnosi na srednjoeuropsko vrijeme (CET) i, osim ako je drugačije naznačeno, vrijeme se objavljuje u formatu 24 sata. Pozivanje na datum se odnosi na kalendarske dane, osim ako je drugačije naznačeno. Na dan promjene računanja vremena u ožujku na tržištu će biti 23 sata, tako da će se tog dana preskočiti sat između 2:00 i 3:00. Slična je situacija i na dan promjene vremena računanja u listopadu, kada će dan na tržištu biti 25 sati i dva sata između 2:00 i 3:00 će se tretirati kao dva različita sata. Namira novčanih obveza za isporuke koje se odvijaju svakog dana isporuke za svaki račun s neto iznosima za namiru koje CROPEX potražuje će biti jedan dan nakon isporuke, a za one koje duguje dva dana nakon isporuke. Jedinica trgovanja je 0,1 MW, a jedinica cijene EUR 0.1/MWh. Granica minimalne cijene je -500 EUR, a maksimalne cijene naloga +3000 EUR.[7]

Ugovori za svaki tjedan (od ponedjeljka do nedjelje) u pravilu se otvaraju za naloge ponedjeljkom dva tjedna unaprijed. Ako je ponedjeljak praznik, tada se otvaraju sljedećeg radnog dana. U odnosu na praznike, tjedan trgovanja može biti otvoren i ranije, dok u slučaju tehničke nadogradnje može biti otvoren i kasnije, prema slobodnoj odluci CROPEX-a.[7]

3.6. Naknada za trgovanje i transakcije

Važeće naknade za trgovanje obračunavaju se članovima i fakturiraju u skladu s iznosom naknada koje su navedene bez PDV-a. Svaki član je odgovoran za plaćanje cjelokupnog PDV-a i relevantnih poreza, koji proizlaze iz njegovih djelatnosti trgovanja. Namiru naknade za trgovanje provodi CROPEX u skladu s pravilima za kliring i namiru. U slučaju da član ne plati CROPEX-u predviđenu naknadu za trgovanje ili ne izvrši ostala plaćanja na dan dospijeća, CROPEX ima pravo obračunati zateznu kamatu na glavnicu tako neplaćenih iznosa uvećano za primjenjivi PDV i ostale poreze.[4]

U tablici 3.1. prikazani su iznosi naknada na Hrvatskom dan unaprijed tržištu, a u tablici 3.2. iznosi naknade za upravljanje portfeljem. [8]

Tablica 3.1. Iznos naknada.[8]

Hrvatsko dan unaprijed tržište	
Ulazna naknada	15 000,00 €
Godišnja naknada	12 000,00 €
Volumna naknada za trgovanje	0,06 €/MWh
Volumna naknada za kliring	0,02 €/MWh

Tablica 3.2. Iznos naknade za upravljanje portfeljem.[8]

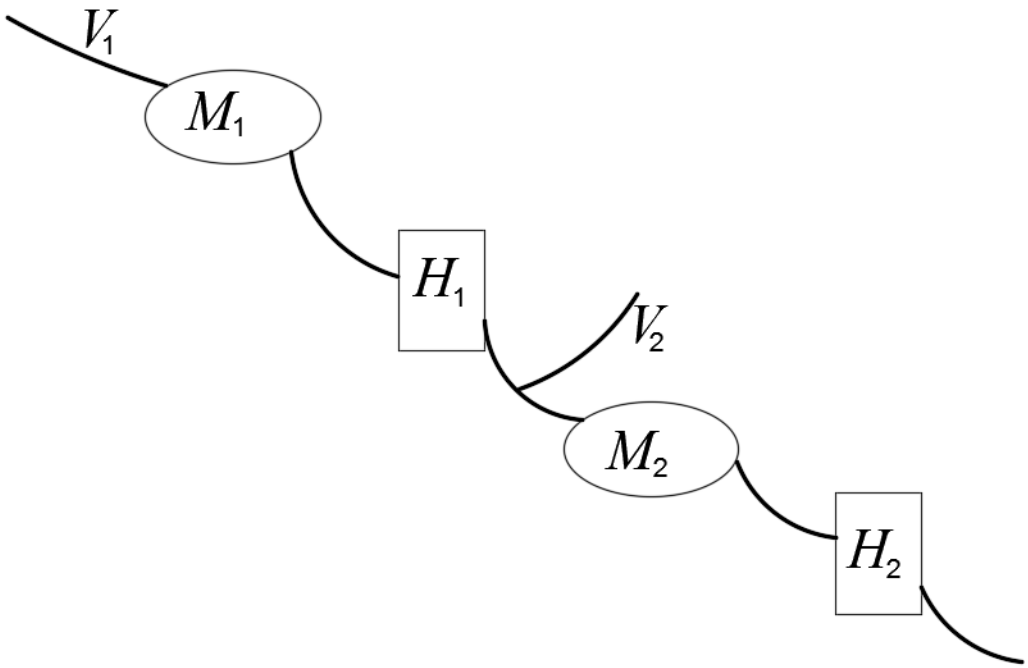
Hrvatsko dan unaprijed tržište	
Upravljanje portfeljem	4 000,00 €
Dodatni portfelj	1 000,00 €
Dodatni korisnik	1 000,00 €

Prema pravilima za kliring i namiru, CROPEX otvara i upravlja sa dva gotovinska računa za svakog svog člana; računom za namiru i depozitnim računom. Račun za namiru je transakcijski račun na koji član uplaćuje određeni iznos za kupljene proizvode uvećan za naknadu za trgovanje. S tog računa CROPEX prosljeđuje iznos cijene proizvoda članu koji prodaje taj proizvod. Depozitni račun služi kao osiguranje u novcu koje je založenu u korist CROPEX-a u skladu s ugovorom o članstvu. Novčana sredstva na depozitnom računu služe za plaćanje svih dospjelih obveza člana. Nakon raskida ugovora o članstvu, CROPEX vrati članu sredstva koja su ostala na tome računu nakon podmirenja svih obveza.[9]

4. MODEL ZA ZAJEDNIČKU OPTIMALNU PONUDU NA TRŽIŠTU ZA SUSTAV HIDROELEKTRANA I VJETROELEKTRANA

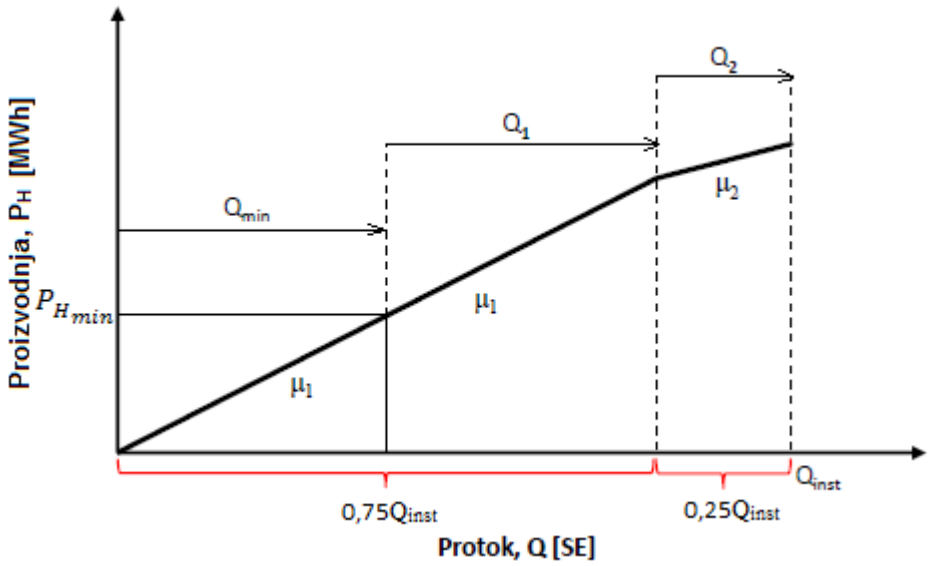
4.1. Model za hidroelektrane

Sustav hidroelektrana koji će sudjelovati u kreiranju zajedničke ponude sa vjetroelektranama na tržištu se sastoji od dvije hidroelektrane koje su povezane kaskadno, prikazano na slici 4.1.. Akumulacija vode označena sa M_1 predstavlja gornju akumulaciju hidroelektrane H_1. Iskorištena voda u hidroelektrani H_1 odlazi u akumulaciju M_2 koja je gornja akumulacija hidroelektrane H_2. Sa V_1 je označen glavni dotok akumulacije M_1, a V_2 je lokalni dotok.



Slika 4.1. Izgled sustava hidroelektrana.

Radi potreba izračuna, volumeni akumulacije, protoci i dotoci su izraženi u satnim ekvivalentima (SE) što odgovara protoku vode od $1 m^3/s$ u jednom satu. Nadalje, kako bi se izbjegao kompleksniji optimizacijski model, potrebno je izraziti funkciju proizvodnje u ovisnosti o protoku. Ona se dobije segmentiranjem stvarne karakteristike hidroelektrane i u svakom segmentu pražnjenja linearizacijom krivulje, prikazano na slici 4.2..



Slika 4.2. Ulazno-izlazna karakteristika s označenim segmentima i pripadnim ekvivalentima proizvodnje.

Segmenti su podijeljeni lomnim točkama, a odgovaraju točkama tehničkog minimuma, lokalnog maksimuma i instaliranog protoka. Segment tehničkog minimuma i prvi segment iza njega imaju isti ekvivalent proizvodnje i njihov zbroj iznosi 75 % instaliranog protoka, a drugi segment preostalih 25 %. Ograničenja za segmente se mogu prikazati formulama:

$$0 \leq Q_{1,t} \leq 0{,}75 \cdot Q_{inst} - Q_{min} \tag{4-1}$$

$$0 \leq Q_{2,t} \leq 0{,}25 \cdot Q_{inst} \tag{4-2}$$

gdje su:

- $Q_{1,t}$ – količina vode u prvom segmentu nakon tehničkog minimuma hidroelektrane tijekom sata *t*,
- Q_{inst} – instalirani protok hidroelektrane,
- Q_{min} – protok koji odgovara tehničkom minimumu hidroelektrane i
- $Q_{2,t}$ – količina vode u drugom segmentu hidroelektrane tijekom sata *t*.

Ukupni protok hidroelektrane tijekom sata *t* se može izraziti formulom:

$$Q_t = Q_{min} \cdot b_t + Q_{1,t} + Q_{2,t} \text{ [SE]} \tag{4-3}$$

U formuli (4-3), b_t predstavlja binomnu varijablu rada hidroelektrane i ona iznosi 1 ako hidroelektrana radi u određenom satu, a 0 ako ne radi.

Proizvedena električna energija hidroelektrane u satu *t* se definira kao:

$$P_{H_t} = P_{H_{min}} \cdot b_t + Q_{1,t} \cdot \mu_1 + Q_{2,t} \cdot \mu_2 \text{ [MWh]} \tag{4-4}$$

gdje su:

- $P_{H_{min}}$ – električna energija koja se proizvede pri tehničkom minimumu hidroelektrane,
- μ_1 i μ_2 – ekvivalenti proizvodnje.

Za proizvodnju hidroelektrane postoje ograničenja izražena formulom:

$$P_{H_{min}} \cdot b_t \leq P_{H_t} \leq P_{H_{inst}} \cdot b_t \tag{4-5}$$

gdje je $P_{H_{inst}}$ proizvodnja električne energije pri instaliranoj snazi hidroelektrane.

Ekvivalent proizvodnje μ pokazuje koliko će se promijeniti proizvodnja za promjenu pražnjenja u promatranom satu. Također, u modelu predstavlja nagib pravca pojedinog segmenta ulazno-izlazne karakteristike. Izrazi za μ_1i μ_2 se dobiju uvrštavanjem izraza (4-1) i (4-2) u formulu (4-3):

$$\mu_1 = \frac{P_{H_{inst}}}{0{,}9875 \cdot Q_{inst}} \left[\frac{\text{MWh}}{\text{SE}}\right] \tag{4-6}$$

$$\mu_2 = 0{,}95 \cdot \mu_1 \left[\frac{\text{MWh}}{\text{SE}}\right] \tag{4-7}$$

Kako bi se osiguralo slijedno punjenje segmenata, odnosno da se drugi segment ne može puniti dok se potpuno ne napuni prvi segment, uzeto je da je ekvivalent proizvodnje prvog segmenta veći od ekvivalenta za drugi segment. Na ovaj način se osigurava slijedno punjenje jer optimizacija uvijek želi koristiti segment s većim ekvivalentom proizvodnje.

Da bi se ostvarila koordinacija rada između hidroelektrana, budući da su kaskadno vezane, polazi se od uvjeta koji mora vrijediti za svaki sat simulacije:

$$novi\ sadržaj\ akumulacije = stari\ sadržaj\ akumulacije + dotok\ vode - pražnjenje \tag{4-8}$$

Primjenom prethodnog izraza, izraz za gornju akumulaciju hidroelektrane H_1 glasi:

$$M_{1,t} = M_{1,t-1} - Q_{1,1,t} - Q_{1,2,t} - S_{1,t} + V_{1,t} \text{ [SE]} \tag{4-9}$$

gdje su:

- $M_{1,t}$ −volumen akumulacije hidroelektrane H_1 na kraju sata *t*,
- $M_{1,t-1}$ – volumen akumulacije hidroelektrane H_1 na kraju *t-1* sata,
- $Q_{1,1,t}$ – pražnjenje hidroelektrane H_1 u prvom segmentu tijekom sata *t*,
- $Q_{1,2,t}$ – pražnjenje hidroelektrane H_1 u drugom segmentu tijekom sata *t*,
- $S_{1,t}$ −preljev hidroelektrane H_1 tijekom sata *t* i
- $V_{1,t}$ – glavni dotok u akumulaciju hidroelektrane H_1 tijekom sata *t*.

Iskorištena voda u hidroelektrani H_1 i njezin preljev dolaze u akumulaciju hidroelektrane H_2 nakon vremena od jednog sata što je uzeto u obzir pri konstruiranju izraza za akumulaciju hidroelektrane H_2.

Primjenom izraza (4-8), akumulacija hidroelektrane H_2 poprima izraz:

$$M_{2,t} = M_{2,t-1} - Q_{2,1,t} - Q_{2,2,t} - S_{2,t} + V_{2,t} + Q_{1,1,t-1} + Q_{1,2,t-1} + S_{1,t-1}[\mathrm{SE}] \quad (4\text{-}10)$$

gdje su:

- $M_{2,t}$ −volumen akumulacije hidroelektrane H_2 na kraju sata *t*,
- $M_{2,t-1}$ – volumen akumulacije hidroelektrane H_2 na kraju *t-1* sata,
- $Q_{2,1,t}$ – pražnjenje hidroelektrane H_2 u prvom segmentu tijekom sata *t*,
- $Q_{2,2,t}$ – pražnjenje hidroelektrane H_2 u drugom segmentu tijekom sata *t*,
- $S_{2,t}$ −preljev hidroelektrane H_2 tijekom sata *t*,
- $V_{2,t}$ – lokalni dotok u akumulaciju hidroelektrane H_2 tijekom sata *t*,
- $Q_{1,1,t-1}$ −pražnjenje hidroelektrane H_1 u prvom segmentu tijekom *t-1* sata,
- $Q_{1,2,t-1}$ −pražnjenje hidroelektrane H_1 u drugom segmentu tijekom *t-1* sata i
- $S_{1,t-1}$ −preljev hidroelektrane H_1 tijekom *t-1* sata.

Volumeni akumulacija, preljevi i protoci su ograničeni sa sljedećim izrazima:

$$0 \leq M_{1,t} \leq M_{1,max} \quad (4\text{-}11)$$

$$0 \leq M_{2,t} \leq M_{2,max} \quad (4\text{-}12)$$

$$0 \leq S_{1,t} \leq S_{1,max} \quad (4\text{-}13)$$

$$0 \leq S_{2,t} \leq S_{2,max} \quad (4\text{-}14)$$

$$0 \leq Q_{1,t} \leq Q_{1,max} \tag{4-15}$$

$$0 \leq Q_{2,t} \leq Q_{2,max} \tag{4-16}$$

Gdje su:

- $M_{1,max}$ – maksimalni volumen vode u akumulaciji hidroelektrane H_1,
- $M_{2,max}$ – maksimalni volumen vode u akumulaciji hidroelektrane H_2,
- $S_{1,max}$ – maksimalni preljev vode u akumulaciji hidroelektrane H_1,
- $S_{2,max}$ – maksimalni preljev vode u akumulaciji hidroelektrane H_2,
- $Q_{1,max}$ – maksimalni protok vode u akumulaciji hidroelektrane H_1 i
- $Q_{2,max}$ – maksimalni protok vode u akumulaciji hidroelektrane H_2.

U prvom satu promatranja (t=1), u izrazu (4-9) varijabla $M_{2,t-1}$ se zamjenjuje sa $M_{1,poč}$ što predstavlja početnu vrijednost akumulirane vode u akumulaciji hidroelektrane H_1. Analogno, u izrazu (4-10) varijable $M_{2,t-1}$, $Q_{1,1,t-1}$, $Q_{1,2,t-1}$ i $S_{1,t-1}$ se zamjenjuju sa pripadnim varijablama $M_{2,poč}$, $Q_{1,1,poč}$, $Q_{1,2,poč}$ i $S_{1,poč}$ koje predstavljaju početne vrijednosti akumulirane vode u akumulaciji hidroelektrane H_2, početna pražnjenja po segmentima hidroelektrane H_1 i početni preljev hidroelektrane H_1.

4.2. Formulacija funkcija cilja modela optimizacije

U ovom modelu se promatra pet različitih scenarija mogućih izlaznih snaga vjetroelektrane, od kojih središnji predstavlja očekivanu proizvodnju, dok se preostala četiri dobiju množenjem očekivanje proizvodnje sa određenim koeficijentima. Potrebno je napomenuti da prognoza vjetra i način dolaženja do podataka o izlaznoj snazi vjetroelektrane nisu predmet ovoga rada. Za procjenu cijena električne energije na tržištu dan unaprijed uzete su cijene za tri uzastopna dana na osnovu kojih se računaju očekivane cijene na tržištu četvrtoga dana. Vjerojatnost cijena svakog dana se povećava kako se približava dan za koji se procjenjuje. Plan ponašanja sustava predstavlja odabir jednog od pet scenarija vezanih za vjetroelektrane i jednog od tri scenarija za cijene na tržištu, što ukupno daje petnaest mogućih planova dobivenih kombinacijom tih scenarija. Detaljan prikaz scenarija izlaznih snaga vjetroelektrane, cijena električne energije i pripadnih vjerojatnosti će biti prikazan u narednom poglavlju.

Prva funkcija cilja modela za tržište dan unaprijed je maksimizacija zarade na tržištu za sustav hidroelektrana i vjetroelektrana u razdoblju od jednog dana.

Proizvedena električna energija u hidroelektranama i vjetroelektrana u svakom satu treba biti u mogućnosti zadovoljiti bilateralni ugovor i višak energije- ako postoji, prodati na tržištu. Ponuđena količina električne energije na tržištu jednaka je:

$$Pda_t = W_t + P_{H_{1,t}} + P_{H_{2,t}} - D_t [\text{MWh}] \tag{5-1}$$

gdje su:

- $Pda_t -$ ponuđena količina električne energije na tržištu tijekom sata *t*,
- $W_t -$ proizvedena električna energija u vjetroelektrani tijekom sata *t*,
- $P_{H_{1,t}} -$ proizvedena električna energija u hidroelektrani H_1 tijekom sata *t*,
- $P_{H_{2,t}} -$ proizvedena električna energija u hidroelektrani H_2 tijekom sata *t* i
- $D_t -$ isporučena količina električne energije ugovorena bilateralnim ugovorom tijekom sata *t*.

Cijena električne energije može se mijenjati ovisno o danu u tjednu (npr. vikendom je manja potrošnja nego radnim danima), o vremenskim uvjetima (npr. zbog vjetrovitog dana cijena će biti manja zbog veće ponude električne energije na tržištu u odnosu na onu sljedećeg dana kada se očekuje manje vjetrovito vrijeme), o količini vode u akumulacijama (npr. zbog nadolazećeg kišnog razdoblja cijena je manja zbog veće ponuđene količine električne energije iz hidroelektrana budući da ovi proizvođači očekuju punjenje akumulacija u sljedećim danima), i slično.[1] Da bi se uzele u obzir ove očekivane promjene cijena i očekivane padaline u sljedećem razdoblju, treba uzeti u obzir vrijednost akumulirane vode u pripadnim akumulacijama promatranih hidroelektrana. To se uvede u funkciju cilja u vidu maksimizacije vrijednosti vode, koja ovisi o tome koliko se energije može proizvesti sa preostalom količinom vode u akumulaciji i budućoj cijeni po kojoj će se ta energija prodati. Prilikom računanja vrijednosti akumulirane vode potrebno je uzeti u obzir da će se voda u akumulaciji hidroelektrane H_1 iskoristiti i u hidroelektrani H_2 zbog njihovog kaskadnog spoja.

Ukupna zarada sustava tijekom svakog sata sastoji se od prodane električne energije na tržištu i zarade zbog isporuke ugovorene električne energije bilateralnim ugovorom. Matematički zapis tako definirane funkcije cilja modela prikazan je formulom:

$$\text{maksimiziraj} \qquad Z_t = Pda_t \cdot \lambda_t + D_t \cdot \lambda_D \left[\frac{€}{\text{h}}\right] \tag{5-2}$$

gdje su:

- $Z_t -$ ostvarena zarada sustava tijekom sata *t*,

- $Pda_t -$ količina električne energije koja je prodana na tržištu tijekom sata *t*,
- $\lambda_t -$ cijena električne energije na tržištu tijekom sata *t*,
- $D_t -$ isporučena količina električne energije ugovorena bilateralnim ugovorom tijekom sata t i
- $\lambda_D -$ cijena električne energije koja je ugovorena bilateralnim ugovorom.

Dnevna ukupna zarada sustava se dobije zbrajanjem svih ukupnim zarada kroz promatrana 24 sata.

Prva funkcija cilja maksimizira zaradu za svaki plan koji se sastoji od jednog scenarija izlaznih snaga vjetroelektrane i jednog scenarija cijena na tržištu. Na osnovu tih ulaznih podataka scenarija, funkcija cilja optimizira cijeli sustav, daje plan ponašanja za hidroelektrane i ukupnu zaradu upravo za taj plan. Plan koji je predstavljen kao rješenje prve funkcije cilja modela jest plan sa najvećom zaradom ne uzimajući u obzir nesigurnosti procjene proizvodnje električne energije iz vjetroelektrane niti nesigurnost cijene na tržištu. Ako proizvođač električne energije proizvede više energije nego je ugovorio, bilo tržišno ili bilateralno, uzrokuje neravnotežu u sustavu i zbog toga ima dodatne troškove u vidu penala. Proizvođač može pokušati uravnotežiti sustav sa hidroelektranama ili kupiti/prodati električnu energiju koja unosi neravnotežu po cijeni penala. Iz tog razloga je vrlo važno uzeti u obzir nesigurnost procjene proizvodnje električne energije i cijena. Kako bi se uvela nesigurnost procjene u model, potrebno je definirati drugu funkciju cilja modela koja uključuje *what-if* analizu. *What-if* analiza razmatra sve moguće planove i analizira što će se dogoditi ako se sustav ponaša prema jednom odabranom planu, a na dan isporuke se dogodi neki drugi plan (npr. dođe do povećanja izlazne snage vjetroelektrane uslijed jačeg vjetra).

Druga funkcija cilja modela jeste smanjenje troškova penala zbog uzrokovane neravnoteže. Ona će za svaki mogući plan izračunati troškove koji će nastati ako se taj plan provede, a dogodi se neki drugi plan i te će troškove oduzeti od moguće zarade provedenog plana.

U drugoj funkciji cilja ograničenje ugovorom se definira kao:

$$P_{H\,t} + W_t - Pda_t + T_{dod,t} - T_{viš,t} = D_t \tag{5-3}$$

gdje su:

- $P_{H\,t} -$ proizvedena električna energija u hidroelektranama tijekom sata *t*,
- $W_t -$ proizvedena električna energija u vjetroelektrani za provedeni plan tijekom sata *t*,
- $Pda_t -$ prodana količina električne energije na tržištu za provedeni plan tijekom sata *t*,
- $T_{dod,t} -$ dodatna energija koja je potrebna radi manjka proizvodnje tijekom sata *t*,

- $T_{viš,t}$ – višak proizvodnje tijekom sata *t* i
- D_t – količina električne energije ugovorena bilateralnim ugovorom tijekom sata *t*.

U formuli (5-3) W_t i Pda_t nisu varijable, nego su konstante iz provedenog plana. Proizvodnja u hidroelektranama P_{H_t} je i dalje varijabla, budući da se model trudi unutar provedenog plana prilagoditi ponašanje hidroelektrana novonastaloj situaciji plana koji se dogodio.

S obzirom na uzrokovanu neravnotežu u sustavu, druga funkcija cilja modela je definirana izrazom:

$$\text{minimiziraj} \qquad T_{dod,t} \cdot \lambda_t \cdot Pen_+ + T_{viš,t} \cdot \lambda_t \cdot (1 - Pen_-) \tag{5-4}$$

gdje su:

- Pen_+ – cijena po kojoj se kupuje dodatna energija uravnoteženja, veća je od cijene na tržištu dan unaprijed i
- Pen_- —cijena po kojoj će se prodati višak proizvedene energije, manja je od cijene na tržištu dan unaprijed.

Funkcija cilja podrazumijeva smanjenje stvarnog i oportunitetnog troška, tj. stvarnog gubitka i gubitka zarade koja bi se mogla ostvariti. Prema tome zarada provedenog plana kroz 24 sata prilikom nekog drugog plana jednaka je:

$$Z_{total} = \sum_{t=1}^{24}\left[Pda_t \cdot \lambda_t + D_t \cdot \lambda_D - T_{dod,t} \cdot \lambda_t \cdot Pen_+ + T_{viš,t} \cdot \lambda_t \cdot Pen_-\right] \tag{5-5}$$

gdje su:

- $Pda_t \cdot \lambda_t + D_t \cdot \lambda_D$ –zarada provedenog plana po cijeni plana koji se dogodio,
- $T_{dod,t} \cdot \lambda_t \cdot Pen_+$ – trošak plaćanja dodatne energije koja nedostaje i
- $T_{viš,t} \cdot \lambda_t \cdot Pen_-$ –dodatna zarada ostvarena viškom proizvodnje.

Da bi se dobila ukupna zarada provedenog plana, potrebno je sve zarade prilikom događanja drugih planova množiti sa vjerojatnostima tih planova. Nakon toga potrebno ih je međusobno zbrojiti i taj zbroj predstavlja ukupnu zaradu provedenog plana:

$$Zarada_{plana} = \sum_{n=1}^{15}\left(Z_{total,n} \cdot v_n\right) \tag{5-6}$$

gdje su:

- $Zarada_{plana}$ – ukupna zarada provedenog plana,

- $Z_{total,n}$ – zarada provedenog plana pri *n*-tom planu koji se dogodio,
- v_n – vjerojatnost *n*-tog plana i
- n – broj plana.

Vjerojatnost *n*-tog plana se dobije množenjem vjerojatnosti scenarija za vjetroelektrane i scenarija cijena na tržištu.

Kao rezultat druge funkcije cilja modela dobije se plan ponašanja sustava koji će dati najveću zaradu ako se dogodi bilo koji drugi plan na dan isporuke od preostalih četrnaest mogućih planova.

4.3. Ulazni podatci za model optimizacije

Kao što je već prikazano na slici 4.1., promatrani model optimizacije se sastoji od dvije hidroelektrane te su njihovi podatci prikazani u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Podatci o hidroelektranama.

Hidroelektrane	H_1	H_2
Instalirani protok [m^3/s]	500	500
Instalirana snaga [MW]	94	76
Instalirani preljev [m^3/s]	500	300
Veličina akumulacije [m^3]	2 800 000	10 500 000

Na početku promatranog razdoblja akumulacije obje hidroelektrane su napunjene 40 %. Pretpostavljeno je da je potreban 1 sat da voda doteče od H_1 do H_2. glavni dotok je $V_1 = 400$ m^3/s i lokalni je $V_2 = 1$ m^3/s. Sat prije prvog sata simulacije protok hidroelektrane H_1 iznosi 375 m^3/s , od H_2 iznosi 0 m^3/s i preljev je jednak nuli.

Za vjetroelektrane promatra se vjetropark s instaliranom snagom od 78 MW. U tablici 4.2. prikazane su izlazne snage vjetroparka za promatrano razdoblje od 24 sata koji predstavljaju osnovni scenarij. U tablici 4.3. prikazani su nazivi scenarija proizvodnje iz vjetroparka, koeficijenti kojima se množi osnovni scenarij da bi se dobili preostali i pripadne vjerojatnosti scenarija. Osnovni scenarij je u tablici označen sa brojem 3.

Tablica 4.2. Proizvodnja vjetroparka za svaki sat.

Sat	Proizvodnja [MWh]
1	58
2	59
3	65
4	68
5	78
6	78
7	78
8	78
9	70
10	70
11	68
12	65
13	55
14	52
15	48
16	48
17	45
18	42
19	45
20	45
21	48
22	49
23	50
24	52

Tablica 4.3. Nazivi scenarija sa pripadnim koeficijentima i vjerojatnostima.

Naziv scenarija	Koeficijent koji se množi osnovni scenarij	Vjerojatnost scenarija
Scenarij 1	1,3	0,05
Scenarij 2	1,15	0,25
Scenarij 3	1,0	0,5
Scenarij 4	0,85	0,15
Scenarij 5	0,7	0,05

Cijena električne energije na tržištu dan unaprijed preuzeta je sa Hrvatske burze električne energije CROPEX za dane 01.05. 2017., 02.05.2017. i 03.05.2017.. U tablici 4.4. prikazane su cijene

za tri navedena dana. [10] Cijene za svaki dan predstavljaju po jedan scenarij, stoga su u tablici 4.5. prikazani nazivi scenarija i pripadne vjerojatnosti.

Tablica 4.4. Cijena električne energije na tržištu za promatrane dane.

	Cijena [€/MWh]		
Sat	01.05.2017.	02.05.2017.	03.05.2017.
1	13,85	46,53	57,49
2	16,55	40,44	49,36
3	14,05	22,32	45,86
4	5,07	22,22	45,83
5	5,03	23,72	49,36
6	5,01	35,12	58,65
7	5,02	44,65	72,31
8	5,09	57,25	76,06
9	8,55	66,85	77,85
10	5,07	66,80	75,17
11	13,32	63,50	73,66
12	13,58	65,72	69,77
13	13,51	62,85	67,72
14	8,30	62,97	67,21
15	8,30	59,15	65,32
16	8,30	59,27	63,56
17	14,57	57,55	67,93
18	22,15	53,77	70,36
19	29,35	59,57	74,55
20	41,27	66,82	76,30
21	41,01	71,25	80,08
22	41,85	67,02	76,41
23	40,55	61,92	68,68
24	39,28	53,72	67,29

Tablica 4.5. Nazivi scenarija za cijene električne energije i njihove pripadne vjerojatnosti.

Naziv scenarija	Vjerojatnost scenarija
Scenarij 1	0,1
Scenarij 2	0,4
Scenarij 3	0,5

U modelu je definirano postojanje bilateralnog ugovora koji zahtjeva isporuku 110 MW električne energije svakog sata simulacije po cijeni od 55 €/MWh. Također, ulazni podatak je i očekivana buduća cijena električne energije koja iznosi 65 €/MWh.

4.4. Rezultati modela optimizacije

Algoritam modela je u obliku m. dokumenta zapisan u Matlab programskom kodu, sa ukupno 429 redaka i prikazan je u prilogu P 4.1.. Rezultati algoritma za pojedini sat simulacijskog razdoblja su pražnjenja i preljev hidroelektrana, razine akumulacija, protoci vode u vodotoku između hidroelektrana, ponuda na tržištu dan unaprijed, vrijednost akumulirane vode na kraju simulacijskog razdoblja i očekivana zarada.

U tablici 4.6. prikazani su rezultati zarade mogućih planova rada ako se provedu. Iz tablice se vidi da je potrebno provesti plan koji se dobije kao rezultat modela maksimizacije zarade na tržištu dan unaprijed s ulaznim podacima Scenarija 2 proizvodnje i Scenarija 3 za cijene. Scenarij 2 proizvodnje jeste očekivana proizvodnja množena sa koeficijentom 1,15, dok se Scenarij 3 odnosi na cijene koje su bile srijedom koja prethodi danu za koji se pravi plan rada. Vjerojatnost Scenarija 2 je 0,25, a Scenarija 3 0,5. Važno je napomenuti da ovaj plan nije plan koji donosi najveću zaradu pri provedbi, nego daje odgovarajuću sigurnost ako se dogodi bilo koji drugi plan da će zarada biti najveća moguća u toj situaciji. Cijene u tablici su izražene u eurima.

Tablica 4.6. Prikazi zarade mogućih provedenih planova rada.

Scenariji za cijene	Scenariji za proizvodnju				
	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4	Scenarij 5
Scenarij 1	246 129,6	242 767,7	237 775,7	227 750,1	216 633,5
Scenarij 2	249 434,9	247 612,7	244 220,3	234 152,4	222 923,6
Scenarij 3	261 031,7	261 069,0	259 500,2	251 094,8	240 435,9

Na primjeru izračuna za provedeni plan prikazat će se način kako se došlo do iznosa moguće zarade plana. Na isti način su se računali iznosi za ostale moguće planove.

4.4.1. Način izračuna moguće zarade plana

U tablici 4.7. prikazana je zarada zbog bilateralnog ugovora, tj. zbog isporuke 110 MW energije, u tablici 4.8. zarada na tržištu dan unaprijed, a u tablici 4.9. dodatna zarada zbog penala. Zarada koju provedeni plan dobije zbog bilateralnog ugovora je jednaka bez obzira koji se plan dogodi

budući da je u modelu uvjet proizvodnje poštivanje tog ugovora. Zarada na tržištu dan unaprijed razlikuje se za različite cijene električne energije. U tablici sa dodatnim zaradama se vidi kako će provedeni plan imati dodatnu pozitivnu zaradu samo ako se dogodi Scenarij 1 za proizvodnju u kojem je najveća proizvodnja električne energije od promatranih scenarija i Scenariji cijena 2 i 3. Za taj scenarij proizvodnje i pri Scenariju 1 za cijene dogodi se negativna zarada, tj. gubitak budući da su cijene električne energije jako niske u odnosu na buduću cijene, stoga se smanji rad hidroelektrana i čuva se voda u akumulacijama koja se iskoristi u narednim danima kada je veća cijena električne energije. Za sve ostale planove postoji negativna zarada, odnosno gubitak koji je razlika očekivane proizvodnje po provedenom planu i proizvedene količine energije od plana koji se dogodio. U drugom stupcu koji se odnosi na Scenarij 2 vjetra koji se proveo i dogodio, za Scenarije cijena 2 i 3 dodatna zarada je jednaka nuli budući da nema odstupanja u prognozi plana. I u ovome slučaju, za Scenarij 1 od cijena postoji gubitak, zbog čuvanja vode za buduće vrijeme kada je cijena električne energije viša, pa će time i zarada biti veća.

Tablica 4.7. Ostvarena zarada provedenog plana bilateralnim ugovorom.

Scenariji za cijene	Scenariji za proizvodnju				
	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4	Scenarij 5
Scenarij 1	145 200,0	145 200,0	145 200,0	145 200,0	145 200,0
Scenarij 2	145 200,0	145 200,0	145 200,0	145 200,0	145 200,0
Scenarij 3	145 200,0	145 200,0	145 200,0	145 200,0	145 200,0

Tablica 4.8. Zarada na tržištu dan unaprijed.

Scenariji za cijene	Scenariji za proizvodnju				
	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4	Scenarij 5
Scenarij 1	39 654,8	39 654,8	39 654,8	39 654,8	39 654,8
Scenarij 2	122 668,2	122 668,2	122 668,2	122 668,2	122 668,2
Scenarij 3	147 008,4	147 008,4	147 008,4	147 008,4	147 008,4

Tablica 4.9. Dodatna zarada zbog penala.

Scenariji za cijene	Scenariji za proizvodnju				
	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4	Scenarij 5
Scenarij 1	-2 890,9	-3 894,2	-8 027,9	-12 823,6	-17 647,6
Scenarij 2	99,8	0,0	-10 731,8	-25 491,0	-40 610,5
Scenarij 3	121,3	0,0	-10 307,5	-24 454,8	-39 205,8

Totalna zarada plana dobije se zbrajanjem ostvarene zarade plana bilateralnim ugovorom, zarade na tržištu dan unaprijed i dodatne zarade zbog penala. U tablici 4.10. se može vidjeti totalna zarada plana. Kako bi se dobila ukupna moguća zarada provedenog plana, potrebno je pomnožiti totalnu zaradu iz tablice 4.10. sa vjerojatnostima pripadnih scenarija za proizvodnju i za cijene. Rezultati tog množenja su prikazani u tablici 4.11. i njihovim međusobnim zbrojem dobije se ukupna moguća zarada provedenog plana koja iznosi 261 069,0 € koja je jednaka izračunatoj zaradi provedenog plana u tablici 4.6..

Tablica 4.10. Totalna zarada plana.

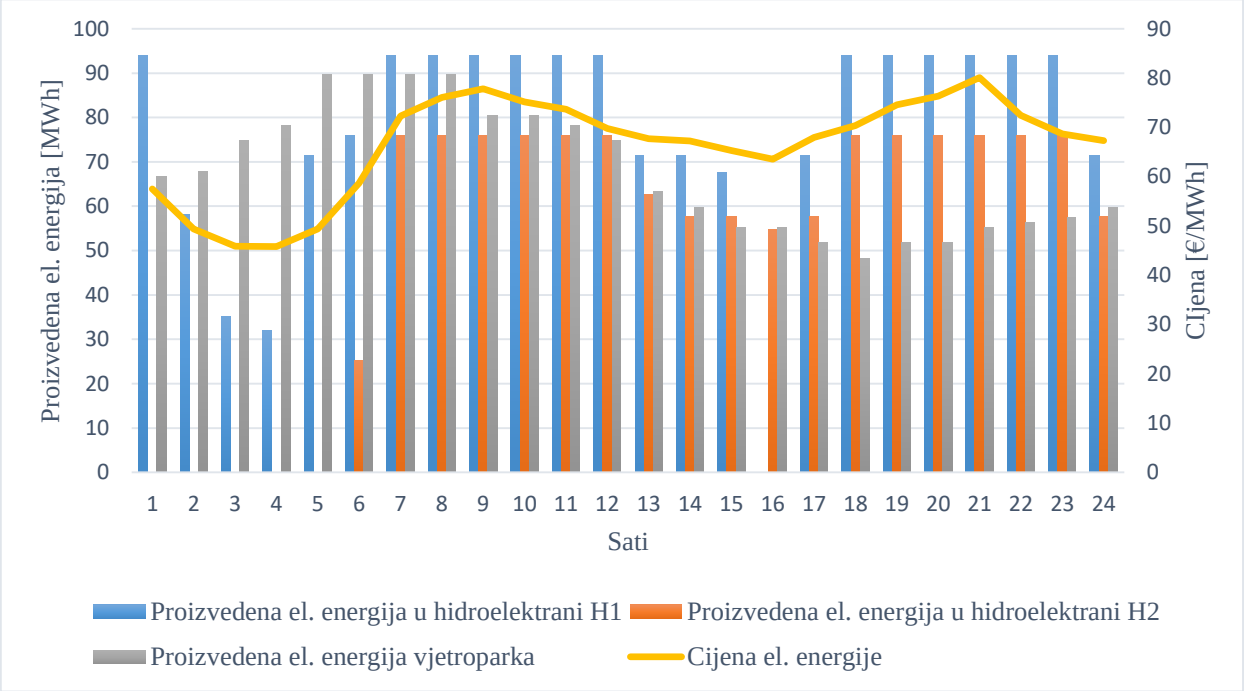
Scenariji za cijene	Scenariji za proizvodnju				
	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4	Scenarij 5
Scenarij 1	181 963,8	180 960,6	176 826,9	172 031,1	167 207,1
Scenarij 2	267 968,1	267 868,2	257 136,4	242 377,2	227 257,8
Scenarij 3	292 329,8	292 208,4	281 900,9	267 753,6	253 002,6

Tablica 4.11. Totalna zarada plana pomnožena sa vjerojatnostima scenarija.

Scenariji za cijene	Scenariji za proizvodnju				
	Scenarij 1	Scenarij 2	Scenarij 3	Scenarij 4	Scenarij 5
Scenarij 1	909,8	4 524,0	8 841,3	2 580,4	836,0
Scenarij 2	5 359,3	26 786,8	51 427,2	14 542,6	4 545,2
Scenarij 3	7 308,2	36 526,0	70 475,2	20 081,5	6 325,1
Moguća zarada plana	261 069,0				

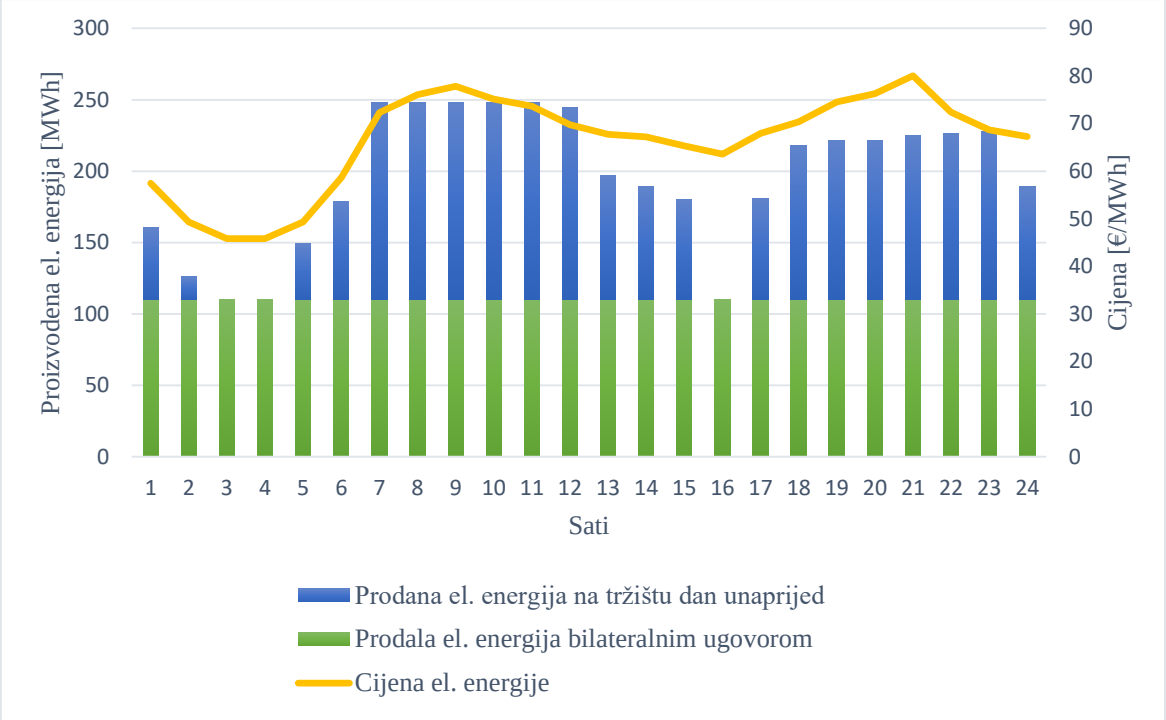
4.4.2. Provedeni plan

Na slici 4.2. prikazan je dijagram planirane proizvodnje provedenog plana rada sustava. Iz dijagrama se vidi kako od prvog do petog sata, gdje je niska cijena električne energije, hidroelektrana H_2 ne radi te pri tome čuva vodu u svojoj akumulaciji koju će iskoristiti u satima koji imaju višu cijenu. U satima visoke cijene, od sedmog do dvanaestog, i od osamnaestog do dvadesettrećeg obje hidroelektrane rade sa instaliranim protokom, odnosno proizvode maksimalnu snagu kako bi na tržištu zaradili što više.



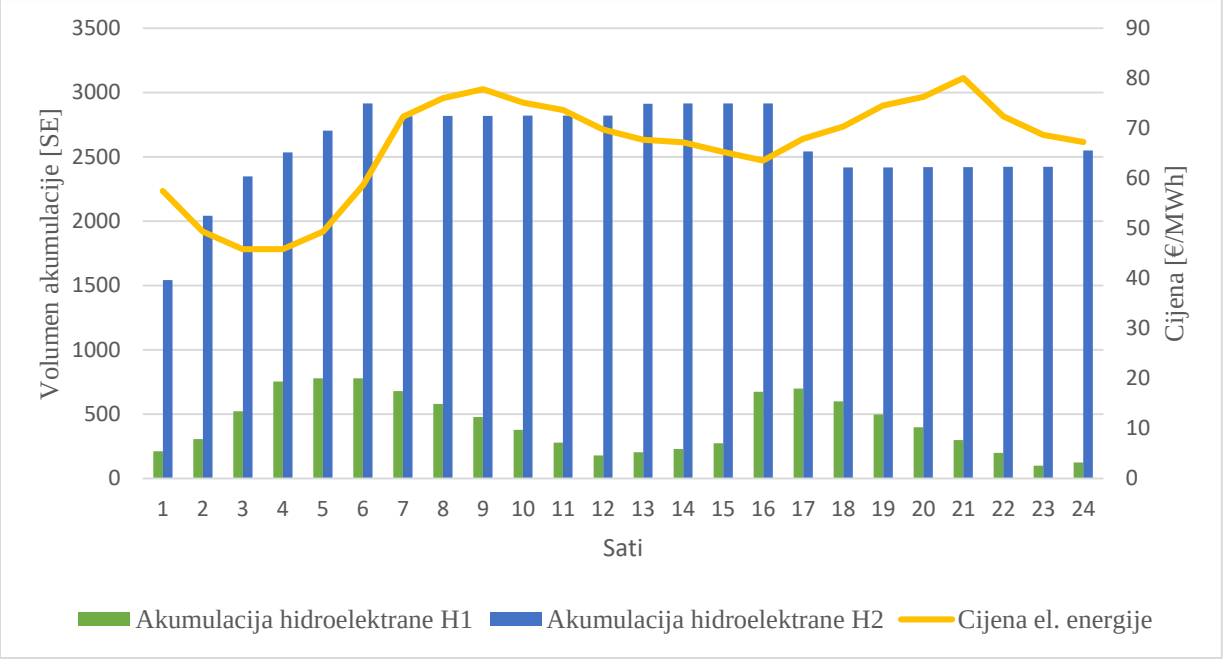
Slika 4.2. Dijagram planirane proizvodnje električne energije provedenog plana rada sustava.

Na slici 4.3. prikazan je dijagram planirane proizvodnje električne energije sustava koja se sastoji od energije koja se prodaje na tržištu dan unaprijed i energije koja se prodaje bilateralnim ugovorom. Na dijagramu se vidi kako u trećem, četvrtom i šesnaestom satu proizvodnja postoji samo da bi pokrila bilateralni ugovor. Hidroelektrane rade samo kao nadopuna proizvodnji vjetroparka do potrebnih 110 MWh električne energije iz bilateralnog ugovora. Voda u akumulacijama se čuva za naredne sate u kojima je cijena viša. U satima od sedamnaestog do dvadesettrećeg sata cijena električne energije je visoka, hidroelektrane rade sa instaliranim protokom, no proizvodnja iz vjetroparka je niska i time je ograničena ponuda na tržištu.



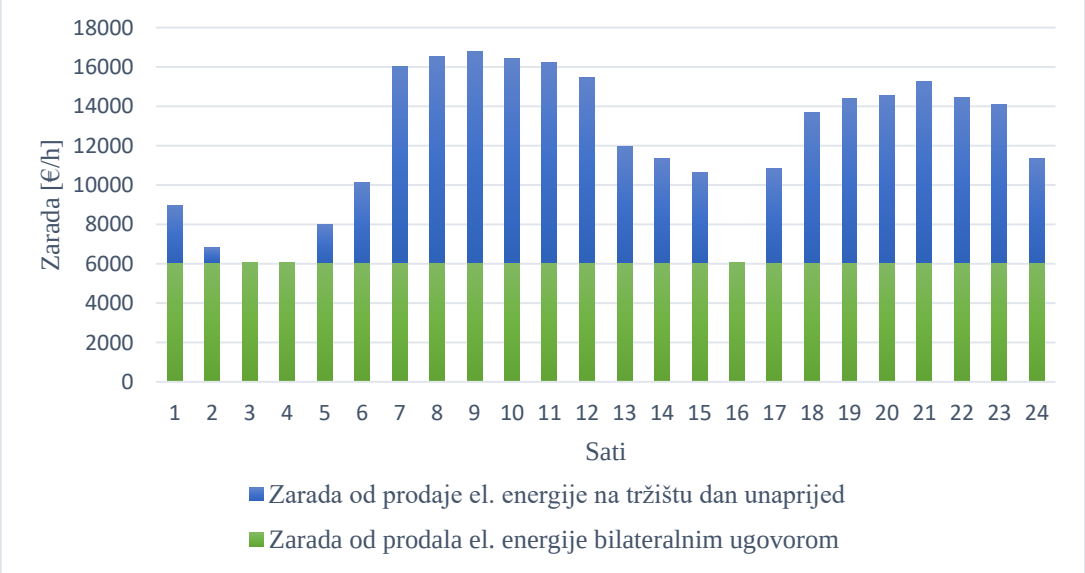
Slika 4.3. Dijagram planirane proizvodnje električne energije provedenog plana rada sustava.

Na slici 4.4. se vidi količina vode u akumulacijama hidroelektrana ovisno o vremenu. Vidljivo je da se u satima niske cijene električne energije puni akumulacija hidroelektrane H_1, odnosno hidroelektrana radi sa malim protokom. Isto vrijedi i za hidroelektranu H_2, koja ne radi od prvog do petog sata te raste volumen akumulirane vode u njezinoj akumulaciji. U šestom satu, kako se vidi iz slike 4.2., hidroelektrana H_2 radi, ali po slici 4.4. volumen njezine akumulacije raste. To se objašnjava time što hidroelektrana H_1 u petom satu proizvodi 75 MWh električne energije i svojim protokom puni akumulaciju hidroelektrane H_2.



Slika 4.4. Volumen akumulacija hidroelektrana.

Na slici 4.5. prikazana je zarada provedenog plana po satima koju ostvari bilateralnim ugovorom i prodajom električne energije na tržištu dan unaprijed. Zbrajanjem zarade po satima dobije se iznos od 292 208,4 € što je jednako prikazano i u tablici 4.10. za provedeni plan.



Slika 4.5. Zarada provedenog plana.

5. ZAKLJUČAK

U radu je opisano tržište električne energije, mehanizmi tržišta i modeli. Nakon općenitog opisa tržišta, dan je pregled Hrvatske burze električne energije (CROPEX). Opisan je način trgovanja na burzi, obveze sudionika i moguće sankcije u slučaju kršenja obveza. Pored toga, opisano je davanje kupovnih i prodajnih naloga te njihovo uparivanje i formiranje cijena. Cilj diplomskog rada je bio napraviti model za zajedničku optimalnu ponudu sustava hidroelektrana i vjetroelektrana na CROPEX tržištu električne energije. Promatrani sustav sastoji se od jednog vjetroparka i dvije kaskadno vezane hidroelektrane. Proizvodnja vjetroelektrane ovisi o brzini puhanja vjetra, stoga postoji nesigurnost proizvodnje jer se ne može njome upravljati. Nasuprot vjetroelektranama, proizvodnjom iz hidroelektrana se može upravljati pomoću određivanja dotoka vode iz akumulacije u hidroelektranu. Zbog toga, objedinjavanje vjetroelektrane i hidroelektrana u zajednički sustav umanjuje utjecaj nesigurnosti proizvodnje iz vjetroelektrana budući da rad hidroelektrana može uravnotežiti eventualni višak ili manjak proizvodnje. U diplomskom radu je napravljen model za zajedničku optimalnu ponudu na tržištu dan unaprijed, gdje se uzimala u obzir nesigurnost proizvodnje iz vjetroelektrane i nesigurnost cijena na tržištu. Model je izrađen u Matlabu. Model je imao za cilj maksimizaciju zarade na tržištu provedenog plana rada i minimizaciju troškova ako dođe do promjene proizvodnje iz vjetroelektrane ili promjene cijena na tržištu. Proizvedena električna energija je morala u svakom satu zadovoljiti isporuku energije ugovorenu bilateralnim ugovorom, a višak proizvedene električne energije, ako postoji, prodati na tržištu dan unaprijed. Optimalna zajednička ponuda se dobila primjenom *what-if* analize za tri scenarija cijena na tržištu i pet scenarija proizvodnje električne energije iz vjetroelektrane, što daje ukupno petnaest mogućih planova rada sustava. Ponuda na tržištu dan unaprijed, načini rada hidroelektrana u provedenom planu i ostvarena zarada su prikazani grafički.

LITERATURA

[1] G. Knežević, Optimalna zajednička ponuda na tržištu električne energije za sustav hidroelektrana i vjetroelektrana, doktorski rad, 2013.

[2] S. Nikolovski, K. Fekete, G. Knežević, Z. Stanić, Uvod u tržište električne energije, udžbenik, Elektrotehnički fakultet Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 2010.

[3] WindEurope Business Inteligence, Wind in power, 2016 European statistics, dostupno online: https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2016.pdf (pristupljeno 27.5.2017.)

[4] Opći uvjeti, Pravila trgovanja, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: http://www.cropex.hr/images/nova_pravila_2017.1.1/hrv/0._Pravila_Trgovanja_18.12.2016.pdf (pristupljeno 6.5.2017.)

[5] Definicije, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: http://www.cropex.hr/images/dokumenti/Dodatak_1-Definicije.pdf (pristupljeno 7.5.2017.)

[6] Pravila Hrvatskog dan unaprijed tržišta, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: http://www.cropex.hr/images/dokumenti/Dodatak_2-Pravila_Hrvatskog_dan_unaprijed_trzista.pdf (pristupljeno 7.5.2017.)

[7] Dodatak o trgovanju br. 3, Specifikacije proizvoda, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: http://www.cropex.hr/images/dokumenti/Dodatak_3-Specifikacija_proizvoda.pdf (pristupljeno 7.5.2017.)

[8] Dodatak o trgovanju br. 6, Iznos naknada, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: http://www.cropex.hr/images/dokumenti/Dodatak_6-Iznos_naknada.pdf

[9] Dodatak o trgovanju br. 4, Pravila za kliring i namiru, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: http://www.cropex.hr/images/nova_pravila_2017.1.1/zamjena_intraday/4._Pravila_kliringa_i_namire_18.12.2016.pdf (pristupljeno 7.5.2017.)

[10] Cijena električne energije na tržištu, Hrvatska burza električne energije, dostupno na: https://www.cropex.hr/hr/trgovanje/trgovanje-za-dan-unaprijed.html (pristupljeno 25.6.2017.)

SAŽETAK

Cilj diplomskog rada je napraviti model za optimalnu zajedničku ponudu sustava vjetroelektrana i hidroelektrana na CROPEX tržištu električne energije. U radu je opisan CROPEX, način trgovanja i obveze sudionika. Izrađen je model za sustav koji se sastoji od vjetroparka i dvije kaskadno vezane hidroelektrane. U modelu su uzete u obzir nesigurnost procjene proizvodnje iz vjetroelektrane i nesigurnost cijene na tržištu. Cilj modela jest maksimizacija zarade na tržištu i minimizacija troškova zbog uzrokovane neravnoteže. Promatrano je petnaest mogućih planova te je *what-if* analizom odabran najbolji plan.

Ključne riječi: tržište električne energije, optimalna ponuda, CROPEX, vjetroelektrana, hidroelektrana, *what- if* analiza.

ABSTRACT

The goal of this Master's thesis is to make a model for optimal bid for system of hydroelectric power plants and wind farms on the CROPEX electricity market. Thesis describes CROPEX, the trading method and the obligations of the participants. A model for a system consisting of wind farm and two cascade connected hydroelectric power plants was developed. The model takes into account the uncertainty of estimation of wind power generation and uncertainty of market price. The goal of the model is to maximize market earnings and minimize costs of balancing energy. Fifteen possible plans were observed and the best plan was selected by what-if analysis.

Key words: electricity market, optimal bid, CROPEX, wind farm, hydroelectric power plant, what-if analysis.

ŽIVOTOPIS

Marija Jurić je rođena 11. ožujka 1993. godine u Zavidovićima, u Bosni i Hercegovini. Osnovnu školu je završila u „OS Žepče“ u Žepču nakon koje upisuje srednju školu u Katoličkom školskom centru „Don Bosco“ u Žepču gdje stječe zvanje elektrotehničar. Po završetku srednje škole, 2012. godine, upisuje Preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku. Studij nastavlja upisom na Diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, modul Elektroenergetski sustavi na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Dobitnica je nagrade za uspjeh u studiranju 2017. godine.

PRILOG P 4.1.

Ispis naredbi za konstruiranje modela u Matlab-u

```
% Indeksi elektrana:
% Prva elektrana 1, Druga elektrana 2
nelektrana = 2;
nsati = 24;
nsegmenata=2;
Hmax = [94; 76]; % Hmax(i), instalirana snaga hiroelektrana
Smax = [500; 300];
Qtotmax = [500; 500]; % Qtotmax(i), instalirani protok hidroelektrana
lambdaf = 65;% buduæa cijena
lambda3=[57.49 49.36 45.86 45.83 49.36 58.65 72.31 76.06 77.85 75.17 73.66 69.77
67.72 67.21 65.32 63.56 67.93 70.36 74.55 76.3 80.08 72.41 68.68 67.29];
lambda2=[46.53  40.44   22.32   22.22   23.72   35.12   44.65   57.25   66.85
66.8    63.5    65.72   62.85   62.97   59.15   59.27   57.55   53.77   59.57
66.82   71.25   67.02   61.92   53.72];
lambda1=[13.85 16.55 14.05 5.07 5.03 5.01 5.02 5.09 8.55 5.07 13.32 13.58 13.51
8.3 8.3 8.3 14.57 22.15 29.35 41.27 41.01 41.85 40.55 39.28];
vlambda=[0.1; 0.4; 0.5]; % idu u tablici pon, uto, sri(3.5.)
lambdascen=[lambda1; lambda2; lambda3];
D =
[110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110;110
;110;110;110;110;]; % D(t), ugovor
cijenaD=55;
Mmax = [2.8e6; 10.5e6]/3600; % Mmax(i), maksimalni volumen rezervoara
Mstart = 0.4*Mmax; % Mstart(i)
V = [400; 1]; % V(i)
Q11poc = 375;
Q12poc = 0;
S1poc = 0;
% Qmax(i,j) %max protoci po segmentima
for i=1:nelektrana
    for j=1:nsegmenata
        if j==1
        Qmax(i,j)=0.75*Qtotmax(i);
        else
          Qmax(i,j)=0.25*Qtotmax(i);
        end
    end
end
for i=1:nelektrana
    mu(i,1)=Hmax(i)/(Qmax(i,1)+0.95*Qmax(i,2));
    mu(i,2)=0.95*mu(i,1);
end
% mu(i,j)produkcijski ekvivalent po segmentima
%Vjetroparkovi
W3=[58 59 65 68 78 78 78 78 70 70 68 65 55 52 48 48 45 42 45 45 48 49 50 52];
W2=1.15*W3;
W1=1.3*W3;
W4=0.85*W3;
W5=0.7*W3;
vW=[0.05;0.25;0.5;0.15;0.05];
brscencijena=3;
brscenvjetar=5;
vjetarscen=[W1;W2;W3;W4;W5];
```

```
for i=1:brscenvjetar
    for t=1:nsati
        if vjetarscen(i,t)>78
            vjetarscen(i,t)=78;
        end
        if vjetarscen(i,t)<20
            vjetarscen(i,t)=20;
        end
    end
end
Penplus=1.8;
Penminus=0.2;
ZaradaPlana=[];
for brc1=1:brscencijena
    for t=1:nsati
    lambda(t)=lambdascen(brc1,t);
    end
    for brv1=1:brscenvjetar
         for t=1:nsati
    W(t)=vjetarscen(brv1,t);
         end
% Varijable
pos = 0;
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
        pos = pos + 1;
        for j = 1: nsegmenata
        Qpos(i,j,t) = pos;
        pos = pos + 1;
        Qpos(i,j,t) = pos;
        end
        pos = pos + 1;
        Spos(i,t) = pos;
        pos = pos + 1;
        Mpos(i,t) = pos;
    end
    pos = pos + 1;
    Pdapos(t) = pos;
     pos = pos + 1;
     Tdodpos(t) = pos;
      pos = pos + 1;
     Tvisakpos(t) = pos;
end
nvarijabli = pos;
% Funkcija cilja:
f = zeros(nvarijabli,1);
for t=1:nsati
f(Pdapos(t))=lambda(t);
end
f(Mpos(1,nsati)) = lambdaf*(mu(1,1) + mu(2,1));
f(Mpos(2,nsati)) = lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,1,nsati)) = lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,2,nsati)) = lambdaf*mu(2,1);
% Ogranicenja
nogranicenja = 4*nsati;
Aeq = zeros(nogranicenja,nvarijabli);
beq = zeros(nogranicenja,1);
```

```
cnstr = 0;
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
        cnstr = cnstr + 1;
        Aeq(cnstr,Mpos(i,t)) = 1;
        if t == 1
            beq(cnstr) = beq(cnstr) + Mstart(i);
            if i == 2
            beq(cnstr) = beq(cnstr)+ Q11poc + Q12poc + S1poc;
            end
        else
            Aeq(cnstr,Mpos(i,t-1)) = -1;
        end
        Aeq(cnstr,Qpos(i,1,t)) = 1;
        Aeq(cnstr,Qpos(i,2,t)) = 1;
        Aeq(cnstr,Spos(i,t)) = 1;
        if i > 1
            if t > 1
            Aeq(cnstr,Qpos(i-1,1,t-1)) = -1;
            Aeq(cnstr,Qpos(i-1,2,t-1)) = -1;
            Aeq(cnstr,Spos(i-1,t-1)) = -1;
            end
        end
        beq(cnstr) = beq(cnstr) + V(i);
    end
   cnstr = cnstr +1;
    for i = 1:nelektrana
            for j = 1:nsegmenata
               Aeq(cnstr,Qpos(i,j,t)) = mu(i,j);
            end
    end
    Aeq(cnstr,Pdapos(t)) = -1;
    beq(cnstr) = D(t)-W(t);
end
nogranicenjaA = nsati;
A = zeros(nogranicenjaA,nvarijabli);
b = zeros(nogranicenjaA,1);
cnstrA = 0;
for t = 1:nsati
    cnstrA=cnstrA+1;
    for i = 1:nelektrana
           for j = 1:2
               A(cnstrA,Qpos(i,j,t)) = -mu(i,j);
           end
    end
    b(cnstrA) = -D(t)+W(t);
end
% granice varijabli:
lb = zeros(nvarijabli,1);
ub = inf(nvarijabli,1);
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
        for j = 1:nsegmenata
            ub(Qpos(i,j,t)) = Qmax(i,j);
        end
    ub(Mpos(i,t)) = Mmax(i);
    ub(Spos(i,t)) = Smax(i);
```

```
    end
end
% Rješenje maksimizacije dobiti na trzistu dan unaprijed:
[x] = linprog(-f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
% Raspored rješenja
Qres = [];
Sres = [];
Mres = [];
Zarada=[];
Zaradadnevno=0;
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
    Qres(i,1,t) = x(Qpos(i,1,t));
    Qres(i,2,t) = x(Qpos(i,2,t));
    Sres(i,t) = x(Spos(i,t));
    Mres(i,t) = x(Mpos(i,t));
    Qtot(i,t) = Qres(i,1,t)+Qres(i,2,t);
    H(i,t) = mu(i,1)*Qres(i,1,t) + mu(i,2)*Qres(i,2,t);
    end
   Pda(t)=x(Pdapos(t));
   Zarada(t)=Pda(t)*lambda(t)+D(t)*cijenaD;
   Zaradadnevno=Zaradadnevno+Zarada(t);
end
konst=cnstr;
OcekivanaZ=0;
for brc=1:brscencijena
    for t=1:nsati
    lambdas(t)=lambdascen(brc,t);
    end
    for brv=1:brscenvjetar
    for t=1:nsati
    Ws(t)=vjetarscen(brv,t);
    end

% Funkcija cilja:
f = zeros(nvarijabli,1);
for t=1:nsati
f(Tdodpos(t))=lambdas(t)*Penplus;
f(Tvisakpos(t))=lambdas(t)*(1-Penminus);
end
f(Mpos(1,nsati)) = -lambdaf*(mu(1,1) + mu(2,1));
f(Mpos(2,nsati)) = -lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,1,nsati)) = -lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,2,nsati)) = -lambdaf*mu(2,1);
%Ogranicenja
cnstr=konst;
for t=1:nsati
cnstr = cnstr +1;
    for i = 1:nelektrana
            for j = 1:nsegmenata
               Aeq(cnstr,Qpos(i,j,t)) = mu(i,j);
            end
    end
    Aeq(cnstr,Tdodpos(t)) = 1;
    Aeq(cnstr,Tvisakpos(t)) = -1;
    beq(cnstr) = D(t)-Ws(t)+Pda(t);
end
```

```
% Rješenje minimizacije gubitaka:
x=[];
[x] = linprog(f,[],[],Aeq,beq,lb,ub);
% Raspored rješenja
Qress = [];
Sress = [];
Mress = [];
Dodzarada=[];
TotZaradadnevno=0;
Zaradas=[];
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
    Qress(i,1,t) = x(Qpos(i,1,t));
    Qress(i,2,t) = x(Qpos(i,2,t));
    Sress(i,t) = x(Spos(i,t));
    Mress(i,t) = x(Mpos(i,t));
    Qtots(i,t) = Qress(i,1,t)+Qress(i,2,t);
    Hs(i,t) = mu(i,1)*Qress(i,1,t) + mu(i,2)*Qress(i,2,t);
    Tdod(t)=x(Tdodpos(t));
    Tvisak(t)=x(Tvisakpos(t));
    end
    Dodzarada(t)=Tvisak(t)*Penminus*lambdas(t)-Tdod(t)*Penplus*lambdas(t);
    Zaradas(t)=Pda(t)*lambdas(t)+D(t)*cijenaD;
    Totzarada(t)=Zaradas(t)+Dodzarada(t);
   TotZaradadnevno=TotZaradadnevno+Totzarada(t);

end
 OcekivanaZ=TotZaradadnevno*vlambda(brc)*vW(brv)+OcekivanaZ;
    end
end
ZaradaPlana(brc1,brv1)=OcekivanaZ;
    end
end
% PONOVNI IZRACUN ZA OPTIMALNI PLAN
najveca=max(ZaradaPlana(:));
for brc=1:brscencijena
    for brv=1:brscenvjetar
    if ZaradaPlana(brc,brv)==najveca
        opticijena=brc;
        optivjetar=brv;
    end
    end
end
 for t=1:nsati
    lambda(t)=lambdascen(opticijena,t);
    W(t)=vjetarscen(optivjetar,t);
 end
 % Funkcija cilja:
f = zeros(nvarijabli,1);
for t=1:nsati
f(Pdapos(t))=lambda(t);
end
f(Mpos(1,nsati)) = lambdaf*(mu(1,1) + mu(2,1));
f(Mpos(2,nsati)) = lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,1,nsati)) = lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,2,nsati)) = lambdaf*mu(2,1);
% Ogranicenja
```

```
nogranicenja = 4*nsati;
Aeq = zeros(nogranicenja,nvarijabli);
beq = zeros(nogranicenja,1);
cnstr = 0;
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
        cnstr = cnstr + 1;
        Aeq(cnstr,Mpos(i,t)) = 1;
        if t == 1
            beq(cnstr) = beq(cnstr) + Mstart(i);
            if i == 2
            beq(cnstr) = beq(cnstr)+ Q11poc + Q12poc + S1poc;
            end
        else
            Aeq(cnstr,Mpos(i,t-1)) = -1;
        end
        Aeq(cnstr,Qpos(i,1,t)) = 1;
        Aeq(cnstr,Qpos(i,2,t)) = 1;
        Aeq(cnstr,Spos(i,t)) = 1;
        if i > 1
            if t > 1
            Aeq(cnstr,Qpos(i-1,1,t-1)) = -1;
            Aeq(cnstr,Qpos(i-1,2,t-1)) = -1;
            Aeq(cnstr,Spos(i-1,t-1)) = -1;
            end
        end
        beq(cnstr) = beq(cnstr) + V(i);
    end
   cnstr = cnstr +1;
    for i = 1:nelektrana
            for j = 1:nsegmenata
               Aeq(cnstr,Qpos(i,j,t)) = mu(i,j);
            end
    end
    Aeq(cnstr,Pdapos(t)) = -1;
    beq(cnstr) = D(t)-W(t);
end
nogranicenjaA = nsati;
A = zeros(nogranicenjaA,nvarijabli);
b = zeros(nogranicenjaA,1);
cnstrA = 0;
for t = 1:nsati
    cnstrA=cnstrA+1;
    for i = 1:nelektrana
           for j = 1:2
               A(cnstrA,Qpos(i,j,t)) = -mu(i,j);
           end
    end
    b(cnstrA) = -D(t)+W(t);
end
% granice varijabli:
lb = zeros(nvarijabli,1);
ub = inf(nvarijabli,1);
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
        for j = 1:nsegmenata
            ub(Qpos(i,j,t)) = Qmax(i,j);
```

```
        end
    ub(Mpos(i,t)) = Mmax(i);
    ub(Spos(i,t)) = Smax(i);
    end
end
% Rješenje maksimizacije dobiti na trzistu dan unaprijed:
[x] = linprog(-f,A,b,Aeq,beq,lb,ub);
% Raspored rješenja
Qres = [];
Sres = [];
Mres = [];
Zarada=[];
Zaradadnevno=0;
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
    Qres(i,1,t) = x(Qpos(i,1,t));
    Qres(i,2,t) = x(Qpos(i,2,t));
    Sres(i,t) = x(Spos(i,t));
    Mres(i,t) = x(Mpos(i,t));
    Qtot(i,t) = Qres(i,1,t)+Qres(i,2,t);
    H(i,t) = mu(i,1)*Qres(i,1,t) + mu(i,2)*Qres(i,2,t);
    end
   Pda(t)=x(Pdapos(t));
   Zarada(t)=Pda(t)*lambda(t)+D(t)*cijenaD;
   Zaradadnevno=Zaradadnevno+Zarada(t);
end
OcekivanaZ=0;
for brc=1:brscencijena
    for t=1:nsati
    lambdas(t)=lambdascen(brc,t);
    end
    for brv=1:brscenvjetar
    for t=1:nsati
    Ws(t)=vjetarscen(brv,t);
    end
% Funkcija cilja:
f = zeros(nvarijabli,1);
for t=1:nsati
f(Tdodpos(t))=lambdas(t)*Penplus;
f(Tvisakpos(t))=lambdas(t)*(1-Penminus);
end
f(Mpos(1,nsati)) = -lambdaf*(mu(1,1) + mu(2,1));
f(Mpos(2,nsati)) = -lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,1,nsati)) = -lambdaf*mu(2,1);
f(Qpos(1,2,nsati)) = -lambdaf*mu(2,1);
%Ogranicenja
cnstr=konst;
for t=1:nsati
cnstr = cnstr +1;
    for i = 1:nelektrana
            for j = 1:nsegmenata
               Aeq(cnstr,Qpos(i,j,t)) = mu(i,j);
            end
    end
    Aeq(cnstr,Tdodpos(t)) = 1;
    Aeq(cnstr,Tvisakpos(t)) = -1;
    beq(cnstr) = D(t)-Ws(t)+Pda(t);
```

```
end
% Rješenje minimizacije gubitaka:
x=[];
[x] = linprog(f,[],[],Aeq,beq,lb,ub);
% Raspored rješenja
Qress = [];
Sress = [];
Mress = [];
Dodzarada=[];
TotZaradadnevno=0;
Zaradas=[];
ZaradaDA=0;
ZaradaBU=0;
DodzaradaDAN=0;
for t = 1:nsati
    for i = 1:nelektrana
    Qress(i,1,t) = x(Qpos(i,1,t));
    Qress(i,2,t) = x(Qpos(i,2,t));
    Sress(i,t) = x(Spos(i,t));
    Mress(i,t) = x(Mpos(i,t));
    Qtots(i,t) = Qress(i,1,t)+Qress(i,2,t);
    Hs(i,t) = mu(i,1)*Qress(i,1,t) + mu(i,2)*Qress(i,2,t);
    Tdod(t)=x(Tdodpos(t));
    Tvisak(t)=x(Tvisakpos(t));
    end
    Dodzarada(t)=Tvisak(t)*Penminus*lambdas(t)-Tdod(t)*Penplus*lambdas(t);
    Zaradass(t)=Pda(t)*lambdas(t);
    Totzarada(t)=Zaradass(t)+D(t)*cijenaD +Dodzarada(t);
    ZaradaDA=Zaradass(t)+ZaradaDA;
    ZaradaBU=D(t)*cijenaD+ZaradaBU;
    DodzaradaDAN=DodzaradaDAN+Dodzarada(t);
    TotZaradadnevno=TotZaradadnevno+Totzarada(t);

end
 OcekivanaZ=TotZaradadnevno*vlambda(brc)*vW(brv)+OcekivanaZ;
 OPTzaradaDA(brc,brv)=ZaradaDA;
 OPTzaradaBU(brc,brv)=ZaradaBU;
 OPTdodzarada(brc,brv)=DodzaradaDAN;
    end
end
```