

Optimizacija fleksibilnosti toplinskog sustava spojenog na geotermalnu mrežu

Kovačević, Krešimir

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:978403>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 663

**OPTIMIZACIJA FLEKSIBILNOSTI TOPLINSKOG SUSTAVA
SPOJENOG NA GEOTERMALNU MREŽU**

Krešimir Kovačević

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 663

**OPTIMIZACIJA FLEKSIBILNOSTI TOPLINSKOG SUSTAVA
SPOJENOG NA GEOTERMALNU MREŽU**

Krešimir Kovačević

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 663

Pristupnik: **Krešimir Kovačević (0036523074)**
Studij: Računarstvo
Profil: Programsko inženjerstvo i informacijski sustavi
Mentor: prof. dr. sc. Mario Vašak

Zadatak: **Optimizacija fleksibilnosti toplinskog sustava spojenog na geotermalnu mrežu**

Opis zadatka:

Potrebno je razviti i implementirati optimizacijski algoritam za izračun optimalne razine fleksibilnosti toplinskog sustava spojenog na geotermalnu mrežu. Uz dvosmjerni izmjenjivač topline s geotermalnom mrežom, razmatrani toplinski sustav također uključuje i alternativni izvor topline u vidu bojlera pogonjenog loživim uljem, te toplinski spremnik i toplinski teret. Optimizacijski algoritam, uz zadane uvjete pružanja fleksibilnosti geotermalnoj mreži i vjerojatnost zaključivanja ugovora o fleksibilnosti, formuliра optimizacijski problem s nominalnim i alternativnim načinima rada kojima se osigurava pružanje fleksibilnosti na poziv iz mreže u različitim trenucima na ekonomski najpovoljniji način. Optimizacijski algoritam potrebno je izvesti u Python okruženju uz korištenje rješavača mješovito cjelobrojnih matematičkih programa. Također je u Python okruženju potrebno izvesti korisničko sučelje za unos svih potrebnih parametara sustava, ekonomskih parametara i predviđanja toplinskog opterećenja sustava, te za pregled izračunanih optimalnih odluka.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Sadržaj

Uvod	1
1. Opis modela toplinskog sustava	3
1.1. Matematički model	4
1.2. Definiranje fleksibilnosti	10
1.3. Programski kôd	12
2. Optimizacija fleksibilnosti toplinskog sustava	17
2.1. Matematička razrada	19
2.2. Programski kôd	24
3. Rezultati	28
3.1. Usporedba rezultata	31
Zaključak	35
Literatura	36
Sažetak	37
Summary	38
Skraćenice	39
Privitak	40

Uvod

Europska unija prihvatila je zajedničku energetska i klimatsku Strategiju 2030[1] koja uključuje ciljeve i politička usmjerenja za period od 2020. do 2030. godine. Ova strategija usmjerena je na kreiranje europskog društva kao kompetitivnog, sigurnog i energetska učinkovitog sustava, spremnog za dostizanje dugoročnog cilja smanjenja emisija stakleničkih plinova do 2050. godine[2]. Glavna 3 cilja uključuju smanjenje emisija ugljikovog dioksida, povećanje udjela obnovljivih izvora energije te povećanje energetska učinkovitost. Kako bi se ostvarila čim veća energetska učinkovitost, sve su veći napreci u razvoju energetska učinkovitog upravljanja sustava.

U okviru ovog diplomskog rada razrađeno je optimalno upravljanje toplinskog sustava spojenog na geotermalnu mrežu pomoću algoritama prediktivnog upravljanja. Optimalnim upravljanjem takvog sustava može doći do značajnog smanjenja korištenja loživog ulja, a samim time i smanjenja emisija ugljikovog dioksida te povećane energetska učinkovitosti. Uz to, optimalno upravljanje donosi ekonomsku isplativost i uštede korisnicima.

S druge strane, povećanje udjela obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sustav unosi nepredvidljivost i može narušiti stabilnost samog sustava. Za rješavanje tog problema se sve više radi na mehanizmima koji bi osigurali stabilnost i u slučajevima odstupanja u proizvodnji obnovljivih izvora energije sunca i vjetra. Jedan od takvih mehanizama je i pružanje fleksibilnosti odnosno mogućnost sustava da brzo i adekvatno odgovori na nagle promjene u sustavu. Pružanjem fleksibilnosti, korisnik može dodatno smanjiti troškove rada sustava. U okviru ovog diplomskog rada razrađena je optimizacija fleksibilnosti toplinskog sustava spojenog na geotermalnu mrežu.

Toplinski sustav u ovom radu sastoji se od spremnika tople vode (odnosno topline), potrošača, i dva izvora energije: bojlera na loživo ulje i dvosmjernog izmjenjivača topline spojenog na geotermalnu mrežu. U slučaju da geotermalna mreža ima veću temperaturu od vode u spremniku, izmjenjivač može spremniku predati određenu količinu toplinske energije. Inače, spremnik može predati određeni dio svoje toplinske energije geotermalnoj mreži. Izmjenjivač topline s geotermalnom mrežom također pruža mogućnost fleksibilnosti. Pružanje fleksibilnosti podrazumijeva mogućnost promjene iznosa koristi energije od geotermalne mreže (u odnosu na inicijalni plan potrošnje za dan) za određeni vremenski

period, dok bi se ta promjena financijski nagradila prema količini toplinske energije iz geotermalne mreže koja je smanjena.

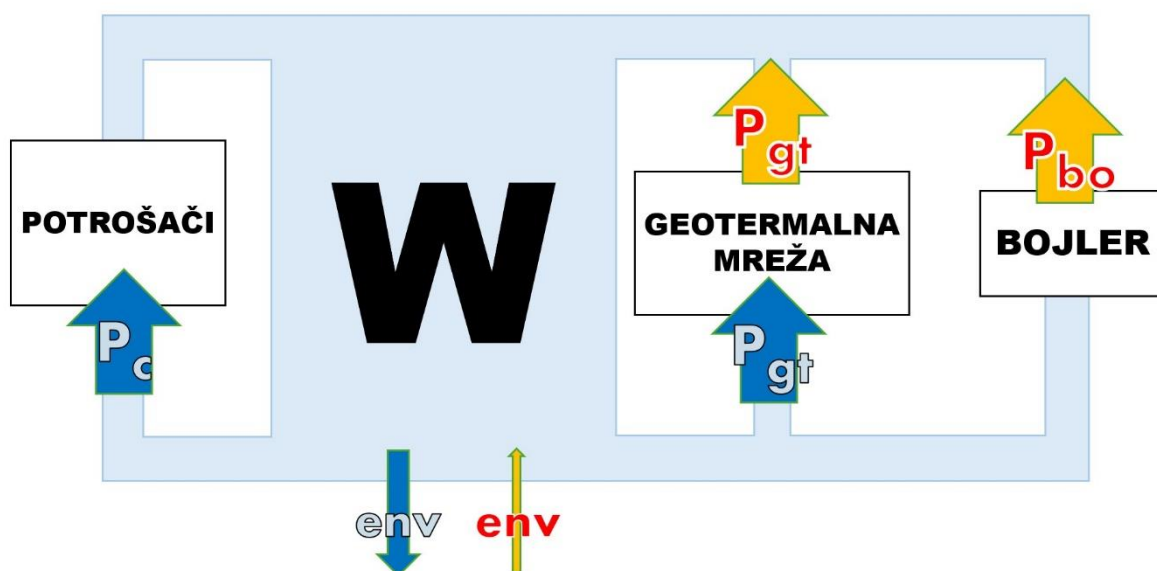
Cilj je diplomskog rada izrada optimizacijskog algoritma koji određuje rad bojlera na loživo ulje te izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom uz uvjete pružanja fleksibilnosti tako da se minimizira trošak oba izvora energije. U svakom vremenskom periodu potrebno je zadovoljiti zahtjev za količinom toplinske energije od strane potrošača, a pritom uračunati ograničenja toplinskog sustava (npr. najveća i najmanja temperatura vode u spremniku) te uzeti u obzir vjerojatnost prihvaćanja ponude za fleksibilnost.

Prema opisu toplinskog sustava modeliran je mješoviti logički dinamički (*Mixed Logical Dynamical* - MLD) sustav pomoću kojeg će se moći definirati problem za mješovito cjelobrojno programiranje (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP). Za rješavanje takvih problema koriste se sistemski rješavači (solver) od kojih je najpoznatiji IBM-ov rješavač CPLEX. U ovom radu, optimizacijski problem implementiran je koristeći CPLEX u programskom jeziku Python. Rješavanjem osnovnog problema optimalnog upravljanja bojlerom te izmjenjivačem s geotermalnom mrežom minimiziraju se troškovi korištenja toplinske energije iz pojedinog izvora, dok problem koji uključuje fleksibilnost dodatno u minimizacijskoj funkciji uključuje i očekivani dobitak od pružanja fleksibilnosti geotermalnoj mreži.

Prilikom implementacije optimizacijskog problema koriste se i dodatni paketi: Pandas - za jednostavnije upravljanje podacima, Tkinter - za stvaranje grafičkog korisničkog sučelja (*Graphical User Interface* - GUI) te Plotly - za stvaranje interaktivnog prikaza rješenja pomoću grafova.

1. Opis modela toplinskog sustava

Model razmatranog toplinskog sustava sastoji se od spremnika vode (odnosno topline), potrošača toplinske energije, bojlera na loživo ulje te izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom. Okolina također ima manji utjecaj na spremnik. Potrošači uzimaju toplinu iz spremnika, dok bojler pruža toplinu. Izmjenjivač topline s geotermalnom mrežom može pružati ili primati toplinu ovisno o temperaturi medija u geotermalne mreže. Izmjenjivač ima mogućnost predaje topline iz mreže prema spremniku topline ako je temperatura vode u spremniku manja od temperature medija geotermalne mreže, a inače spremnik može predati toplinu mreži. Naravno, u bilo kojem trenutku se može onemogućiti korist bojlera, izmjenjivača, ili oboje.



Sl. 1.1: Skica modela toplinskog sustava

Slika 1.1 prikazuje tokove topline u toplinskom sustavu. Smjer strelica određuje izvor i odredište topline. Boje prikazuju kako ti tokovi topline utječu na toplinu u spremniku vode. Narančasta boja označava primanje topline u spremniku, a tamno plava boja označava gubitke topline. Narančasta strelica P_{bo} predstavlja primanje topline u spremniku vode od bojlera na loživo ulje. Može se uočiti da bojler može samo pružati toplinu spremniku, dok izmjenjivač topline spojen na geotermalnu mrežu može pružati i primati toplinu od spremnika. Potrošači isključivo primaju toplinu. Spremnik i prima i predaje toplinu okolini, no količina primljene topline je vrlo mala.

1.1. Matematički model

Kako bi se ostvarilo optimalno prediktivno upravljanje bojlera na loživo ulje te izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom, kreiran je problem za mješovito cjelobrojno programiranje (*Mixed Integer Linear Programming* - MILP). Da bi se gornji model mogao koristiti za MILP problem, stvoriti će se miješano logički dinamički (*Mixed Logical Dynamical* - MLD) sustav na osnovi tog modela). Dobro definirani MLD sustav može se pretvoriti u problem za mješovito cjelobrojno kvadratno programiranje (*Mixed Integer Quadratic Programming* - MIQP, koristi se kvadriranje optimizacijskih varijabli u kriteriju), ili MILP (ne koristi se kvadriranje optimizacijskih varijabli u kriteriju)[3]. Za potrebe zadatka je dovoljan MILP i stoga se neće detaljno obrađivati MIQP. Traži se MILP jer se tada može za rješavanje problema koristiti neki od više dostupnih solvera za linearno programiranje.

Optimalno upravljanje sustavom odvija se na vremenski diskretnoj razini s vremenom diskretizacije od 15 minuta. Budući da se optimalno upravljanje planira za dan unaprijed, model se promatra u 96 vremenskih trenutaka.

MLD model općenito sadrži četiri vektora veličina koji se sastoje od kontinuiranih i/ili binarnih (logičkih, 0 ili 1) vrijednosti. Definirani MLD model sastoji se od stanja sustava te ulaznih i pomoćnih varijabli:

- Stanja sustava X : predstavlja stanje sustava, može se sastojati od jedne ili više komponenata
 - T_w : prosječna temperatura vode u spremniku [$^{\circ}\text{C}$]
- Upravljački signali U : varijable kojima se može upravljati, mogu biti ili kontinuirane ili binarne (ovdje označeni s δ_{sufiks})
 - P_{gt} : toplinska snaga izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom [W]
 - P_{bo} : toplinska snaga bojlera na loživo ulje [W]
 - δ_{gt} : naredba za uključenje crpke izmjenjivača topline $\{0, 1\}$
 - δ_{bo} : naredba za uključenje bojlera na loživo ulje $\{0, 1\}$
- Pomoćne binarne varijable δ
 - $\delta_{\text{gt_gr}}$: binarna varijabla koja određuje je li temperatura geotermalne mreže veća od temperature vode u spremniku $\{0, 1\}$

- Pomoćne kontinuirane varijable Z
 - Z₋: minimalna toplinska snaga izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom [W]
 - Z₊: maksimalna toplinska snaga izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom [W]

Skup varijabli koje se dobije kao rješenje optimizacije može se prikazati kao optimizacijski vektor. Optimizacijski vektor za rješavanje definiranog MILP-a je:

$$ov_{orig} = [T_{w,0} \ P_{gt,0} \ P_{bo,0} \ \delta_{gt,0} \ \delta_{bo,0} \ P_{gt,1} \ \dots \ \delta_{bo,95} \ \delta_{gt_{gr},0} \ \dots \ \delta_{gt_{gr},95} \ Z_{-,0} \ Z_{+,0} \ \dots \ Z_{+,95}] \quad (1.1)$$

Optimizacijski vektor sadrži samo trenutnu temperaturu vode u spremniku, dok druge varijable postoje za svih 96 perioda od petnaest minuta. To znači da optimizacijski vektor ukupno sadrži 673 varijable.

Pri stvaranju MLD modela, bitno je odrediti njegovo (buduće) stanje na temelju sadašnjih stanja i ulaza, odnosno $T_{w,k+1}$. Određivanje sljedećeg stanja sustava u MLD sustavu prati formulu (1.2) iz *Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints* pod oznakom (9a)[3] (gdje A_t , B_{nt} , D_{nt} , i E_{nt} predstavljaju pripadajuće matrice).

$$x(t+1) = A_t x(t) + B_{1t} u(t) + B_{2t} \delta(t) + B_{3t} z(t) \quad (1.2)$$

$$y(t) = C_t x(t) + D_{1t} u(t) + D_{2t} \delta(t) + d_{3t} z(t) \quad (1.3)$$

$$E_{2t} \delta(t) + E_{3t} z(t) \leq E_{1t} u(t) + E_{4t} x(t) + E_{5t} \quad (1.4)$$

Za zadani toplinski sustav, formula (1.2) glasi:

$$T_{w,k+1} = a * T_{w,k} + b_1 * T_{env,k} + b_2 * (P_{gt,k} + P_{bo} - P_{c,k}) \quad (1.5)$$

dok za period diskretizacije od 15 minuta, koeficijenti iznose: $a = 0.999997$, $b_1 = 0.000003$, $b_2 = 0.000108$.

Druge nepoznate varijable, zajedno s drugim koje će se spominjati kroz rad će se navesti u popisu koji se nalazi u nastavku rada.

Formula (1.3) ne koristi se za implementaciju promatranog sustava. Formula (1.4) predstavlja ograničenja sustava. Može se proširiti u:

$$E_2\delta(k) + E_3Z(k) + E_4(A^kx(0) + \sum_{i=0}^{k-1} A^iB_1u(k-1-i) + \sum_{i=0}^{k-1} A^iB_2\delta(k-1-i) + \sum_{i=0}^{k-1} A^iB_3Z(k-1-i) + E_5 \quad (1.6)$$

po proširenju formule (1.2)[3].

$$x(t) = A^t x_0 + \sum_{i=0}^{t-1} A^i (B_1 u(t-1-i) + B_2 \delta(t-1-i) + B_3 Z(t-1-i)) \quad (1.7)$$

$$T_{w,t} = 0.999997^t * T_{w,0} + \sum_{i=0}^{t-1} 0.999997^i (0.000003 * T_{env,t-1-i} + 0.000108 * (P_{gt,t-1-i} + P_{bo,t-1-i} - P_{c,t-1-i})) \quad (1.8)$$

Kako bi rješenje modela bilo u skladu sa zamišljenim toplinskim sustavom, potrebno je definirati ograničenja definiranog sustava. Ograničenja modela sadrže sljedeće parametre:

- C_w : specifični toplinski kapacitet vode, [J/kgK]
- Q_{gt} : maseni protok koji se ostvaruje kroz izmjenjivač topline kada je pripadna crpka uključena [kg/s]
- T_m : minimalna (poželjna) prosječna temperatura vode u spremniku [°C]
- T_M : maksimalna (poželjna) prosječna temperatura vode u spremniku [°C]
- P_{bo_min} : minimalna snaga bojlera kada je pripadna crpka uključena [W]
- P_{bo_Max} : maksimalna snaga bojlera kada je pripadna crpka uključena [W]
- P_c : snaga koju zahtijevaju potrošači [W]
- T_{gt} : temperatura geotermalne mreže [°C]
- T_{env} : temperatura okoline u kojoj se nalazi spremnik [°C]
- T_{diff} : razlika temperatura vrha i dna spremnika [°C]
- $C_{gt,k}$: cijena toplinske energije iz geotermalne mreže [€/kWh]
- $C_{bo,k}$: cijena toplinske energije koju se dobiva iz loživog ulja (uključivo i cijenu zbog emisija CO₂) [€/kWh]

Za određivanje i ograničenje energije iz geotermalne mreže koriste se sljedeće formule:

$$Z_+ = \delta_{gt_gr} * \delta_{gt} * (T_{gt} - (T_w - \frac{T_{diff}}{2})) * C_w * Q_{gt} \quad (1.9)$$

$$Z_- = (1 - \delta_{gt_gr}) * \delta_{gt} * (T_{gt} - (T_w - \frac{T_{diff}}{2})) * C_w * Q_{gt} \quad (1.10)$$

$$P_{gt} \in [Z_-, Z_+] \quad (1.11)$$

$$P_{gt} \in [-250000 \text{ W}, 250000 \text{ W}] \quad (1.12)$$

Može se uočiti da ukoliko je jedna od izračunatih kontinuiranih varijabli Z (Z_+ ili Z_-) različita od nula, tada će druga uvijek biti nula. Ovo vrijedi zbog δ_{gt_gr} , dok suprotno ne vrijedi nužno zbog δ_{gt} . Obzirom na vrijednost izračunate binarne varijable, također se može zaključiti da je Z_+ uvijek veći ili jednak nuli dok je Z_- uvijek negativan ili jednak nuli. Ovaj zaključak proizlazi iz činjenice ako je voda u spremniku toplija od geotermalne mreže te je spojena na nju, ona pruža energiju mreži. Na taj način se jednostavno može računati prihod od pružanja energije mreži (uz pretpostavku da se energija na geotermalnoj mreži kupuje za istu cijenu i za koju se prodaje jer se tada kupovina i prodaja može računati uz isti faktor, iako takva pretpostavka nije vrlo realna). δ_{gt_gr} je definirana kao:

$$[\delta_{gt_gr} = 1] \leftrightarrow T_w - \frac{T_{diff}}{2} - T_{gt_gr} \leq 0 \quad (1.13)$$

Uvjeti koji opisuju pomoćnu kontinuiranu varijablu Z sastoje se od pomoćnih binarnih varijabli δ koje predstavljaju ispunjenost uvjeta vezanih za Z te funkcije $f(x)$ koja određuje vrijednost varijable Z u slučaju da su pripadajući uvjeti ispunjeni. Kako bi se kontinuirana varijabla Z ispravno definirala, potrebno je uvesti dva pomoćna parametra: m koji predstavlja vrijednost koja je jednaka ili manja minimalnoj vrijednosti funkcije $f(x)$ te M koji predstavlja vrijednost koja je jednaka ili veća od maksimalne vrijednosti od $f(x)$. M može biti veći od stvarnog maksimuma i m može biti manji od stvarnog minimuma. Veća odstupanja dovode do manje efikasnosti MILP rješavača, ali manja odstupanja imaju zanemariv utjecaj. Proširenjem izraza koji opisuju kontinuiranu varijablu Z , dobiva se sljedeći izraz te uvjeti:

$$Z = \delta_1 * \delta_2 * f(x), \quad (1.14)$$

1. $Z \leq M * \delta_1$
2. $Z \leq M * \delta_2$
3. $Z \geq m * \delta_1$
4. $Z \geq m * \delta_2$

$$5. Z \leq f(x) - m * (2 - \delta_1 - \delta_2)$$

$$6. Z \geq f(x) - M * (2 - \delta_1 - \delta_2)$$

Prethodno opisana funkcija $f(x)$ Z_+ i Z_- jest oblika:

$$f_1(x) = (T_{gt} - (T_w - 0.5 * T_{diff})) * C_w * Q_{gt} \quad (1.15)$$

Veličine koje se koriste za parametre m i M su:

$$M_1 = 5000000W,$$

$$m_1 = -5000000W.$$

Za Z_+ vrijedi da su $\delta_1 = \delta_{gt}$, i $\delta_2 = \delta_{gt_gr}$, dok za Z_- vrijedi da su $\delta_1 = \delta_{gt}$, i $\delta_2 = 1 - \delta_{gt_gr}$. Kada se koristi format formule (1.4), dobiva se sljedeće:

$$1 * Z_+ \leq M_1 * \delta_{gt} \quad (1.16)$$

$$1 * Z_- \leq M_1 * \delta_{gt} \quad (1.17)$$

$$-M_1 * \delta_{gt_gr} + 1 * Z_+ \leq 0 \quad (1.18)$$

$$M_1 * \delta_{gt_gr} + 1 * Z_- \leq M_1 \quad (1.19)$$

$$-1 * Z_+ \leq -m_1 * \delta_{gt} \quad (1.20)$$

$$-1 * Z_- \leq -m_1 * \delta_{gt} \quad (1.21)$$

$$m_1 * \delta_{gt_gr} - 1 * Z_+ \leq 0 \quad (1.22)$$

$$-m_1 * \delta_{gt_gr} - 1 * Z_- \leq -m_1 \quad (1.23)$$

$$-m_1 * \delta_{gt_gr} + 1 * Z_+ \leq m_1 * \delta_{gt} - C_w * Q_{gt} * T_w + \left(\left(T_{gt} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} - 2 * m_1 \right) \quad (1.24)$$

$$m_1 * \delta_{gt_gr} + 1 * Z_- \leq m_1 * \delta_{gt} - C_w * Q_{gt} * T_w + \left(\left(T_{gt} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} - m_1 \right) \quad (1.25)$$

$$M_1 * \delta_{gt_gr} - 1 * Z_+ \leq -M_1 * \delta_{gt} + C_w * Q_{gt} * T_w + \left(2 * M_1 - \left(T_{gt} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} \right) \quad (1.26)$$

$$-M_1 * \delta_{gt_gr} - 1 * Z_- \leq -M_1 * \delta_{gt} + C_w * Q_{gt} * T_w + \left(M_1 - \left(T_{gt} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} \right) \quad (1.27)$$

$$-1 * Z_+ \leq -1 * P_{gt} \quad (1.28)$$

$$1 * Z_- \leq 1 * P_{gt} \quad (1.29)$$

$$1 * P_{gt} \leq 250000W \quad (1.30)$$

$$-1 * P_{gt} \leq 250000W \quad (1.31)$$

$$[f(x) \leq 0] \leftrightarrow [\delta = 1] \text{ is true iff } \begin{cases} f(x) \leq M(1 - \delta), \\ f(x) \geq \varepsilon + (m - \varepsilon)\delta. \end{cases} \quad (4c)$$

Sl. 1.2: Isječak iz članka *Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints*, autora A. Bemporad i B. Morari, ε jest mala numerička vrijednost [3]

δ_{gt_gr} se može zapisati pomoću formula sa slike 1.2. Vrijednost pomoćne binarne varijable δ_{gt_gr} će biti jedan, te temperatura vode manja od temperature geotermalne mreže ako i samo ako vrijede obje nejednakosti s desne strane na slici 1.2. Kao napomena, ε je samo mala numerička vrijednost i nema bitnijeg značenja. Budući da je funkcija $f(x)$ za određivanje δ_{gt_gr} oblika:

$$f_2(x) = T_w - 0.5 * T_{diff} - T_{gt} \quad (1.32)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= 150^\circ C \\ m_2 &= -150^\circ C \end{aligned}$$

mogu se po formulama sa slike 1.2 i izvesti sljedeće nejednakosti:

$$M_2 * \delta_{gt_gr} \leq -1 * T_w + (M_2 + T_{gt} + \frac{T_{diff}}{2}) \quad (1.33)$$

$$(m_2 - \xi) * \delta_{gt_gr} \leq 1 * T_w + (-\xi - T_{gt} - \frac{T_{diff}}{2}) \quad (1.34)$$

Snaga bojlera ovisi isključivo o P_{bo_min} , P_{bo_Max} i δ_{bo} , stoga su ograničenja jednostavnija:

$$P_{bo} \in [\delta_{bo} * P_{boMin}, \delta_{bo} * P_{boMax}] \quad (1.35)$$

$$1 * P_{bo} * \delta_{bo} \leq 1 * P_{boMax} \quad (1.36)$$

$$-1 * P_{bo} * \delta_{bo} \leq -1 * P_{boMin} \quad (1.37)$$

Voda u spremniku, uz ograničenja koja definira korisnik, ima i zasebna ograničenja. Najveća temperatura vode ne može biti veća od $100^\circ C$ jer bi se tada voda počela isparavati, a ukoliko bi minimalna temperatura vode pala ispod $50^\circ C$, tada spremnik vode ne bi mogao biti pouzdan spremnik energije pa se definiraju sljedeći zahtjevi na maksimalnu te minimalnu temperaturu vode u spremniku:

$$1 * T_w + \frac{T_{diff}}{2} \leq 100^\circ C \quad (1.38)$$

$$-1 * T_w + \frac{T_{diff}}{2} \leq -50^\circ C \quad (1.39)$$

$$-1 * T_w + \frac{T_{diff}}{2} \leq -1 * T_m \quad (1.40)$$

$$1 * T_w + \frac{T_{diff}}{2} \leq 1 * T_M \quad (1.41)$$

Također, potrebno je osigurati da početna i završna temperatura spremnika budu jednake. Ovo ograničenje postavi uvjet ponovljivosti i omogućuje stvaranje kontinuiranog plana. Izračunati plan bi inače dao maksimalnu temperaturu spremnika na početku dana, a minimalnu temperaturu na kraju. U stvarnom svijetu, ovo bi podrazumijevalo da bi se na kraju svakog dana spremnik zagrijao s minimalne temperature na maksimalnu. Ovo nije financijski efikasno, a za period diskretizacije od petnaest minuta najčešće i neostvarivo.

$$T_{w,0} = T_{w,96} \quad (1.42)$$

Osim varijabli i ograničenja, također je potrebno definirati cilj. Cilj ili ciljna funkcija jest vrijednost kojoj optimizacijski algoritam traži najveću ili (u ovom slučaju) najmanju moguću vrijednost. Cilj J će u ovom slučaju biti cijena za grijanje spremnika (napomena: ako sustav daje energiju geotermalnoj mreži, vrijednost za korist izmjenjivača topline će biti negativna, te će se primati novčana nagrada umjesto plaćanja). Cilj je potrošiti što manje novca na grijanje, a da se zadovolje potrošači, stoga se traži najmanji mogući J za skupove X i U koji zadovoljavaju ograničenja.

J je suma troškova za svaki period k gdje se trošak računa kao:

$$\sum_{k=0}^{95} C_{gt,k} * \frac{P_{gt,k}}{4000} + C_{bo} * \frac{P_{bo,k}}{4000} \quad (1.44)$$

Cijena u nazivniku ima broj 4000 budući da se cijena energije izražava u [€/kWh], a snaga se promatra na 15 minutnim periodima u [W].

1.2. Definiranje fleksibilnosti

Kako bi se ostvarila dodatna ekonomska isplativost, prethodno definirani model se proširuje kako bi imao mogućnost pružanja fleksibilnosti geotermalnoj mreži. Mnoge mreže,

uključujući geotermalne, imaju ograničenja pri spremanju i proizvodnji energije što znači da je teško osigurati stabilnu opskrbu pri višku energije u mreži kao i u slučaju manjka energije u mreži. Zbog ovih ograničenja, neki upravitelji mreža financijski nagrađuju korisnike za promjene u njihovim predviđenim potrošnjama (to najčešće podrazumijeva smanjenu potrošnju sa strane korisnika). Ova transakcija se obično ostvaruje na način da korisnik koji je unaprijed najavio iznose energije koja je potrebna upravitelju mreže ima mogućnost promjene tog iznosa prema zahtjevu upravitelja. Korisnik također najavljuje koliko energije može predati ili dodatno preuzeti, a za obje promjene prima novčanu nagradu čak i u slučaju dodatnog primanja energije. Optimizacijski problem za korisnika komplicira se jer točni periodi za dogovoreni odziv fleksibilnosti nisu unaprijed poznati, već zahtjev za promjenom (aktivacija) tipično dolazi netom prije vremenskog perioda u kojem se očekuje promjena. Pritom je naravno najveća mogućnost da uopće ne dođe do zahtjeva za promjenom. U stvarnom svijetu također postoje penali za odstupanje od zahtjeva za promjenom odziva, ali zato što rješenje optimizacije ima uvjet zadovoljavanja zahtjeva operatera, taj aspekt se neće dalje razrađivati.

U slučaju da je ponuda za fleksibilnost prihvaćena te u trenutku kada se dogodi zahtjev za smanjenjem potražnje topline iz geotermalne mreže, uvode se dva nova perioda: period aktivacije i period oporavka. Ovi periodi nisu isti kao prije spomenuti periodi od petnaest minuta, već su zasebni i njihovo je trajanje višekratnik 15-minutnog perioda. U slučaju aktivacije, to je najmanje 1, dok oporavak može trajati i nula perioda. Tijekom perioda aktivacije i oporavka, način korištenja bojlera i izmjenjivača topline smije odstupati od planiranog.

Prilikom modeliranja, nužno je osigurati da je planirani način rada bojlera i izmjenjivača izvan perioda aktivacije i oporavka dalje zadovolji potrebe potrošača i ograničenja toplinskog sustava. Odnosno, ponašanje sustava u tim periodima treba biti isto ako se aktivacija je ili nije dogodila. Da se istovjetnost ponašanja osigura, zadaje se novo ograničenje

$$T_{w,i} = T_{w,i}^* \quad (1.45)$$

Gdje i predstavlja prvi period aktivacije i zadnji period oporavka, dok $*$ označava da je varijabla rješenje problema kada se aktivacija nije dogodila.

Za računanje nagrade za pružanje fleksibilnosti koristiti će se C_FLEX [€/kWh] koji ovisi o promjeni u koristi izmjenjivača topline ξ_{FLEX} [kWh]. Za odziv potrošnje vrijedi

$$\xi_{FLEX,i} \leq P_{gt,i}^* - P_{gt,i} \quad (1.46)$$

gdje i predstavlja svaki petnaest minutni period unutar perioda aktivacije. Zbog načina na koji se rješavaju problemi linearnog programiranja (*Linear Programming* - LP), jednakost može onemogućiti pronalazak rješenja, ali će se nejednakost pri rješenjima ponašati podjednako jednakosti.

Potrebno je dodati ograničenja kako bi $\xi_{FLEX,i}$ bio isti za svaki period tijekom aktivacije. Zato se dodaju dodatna ograničenja

$$\xi_{FLEX,j} = \xi_{FLEX,j-1} \quad (1.47)$$

gdje je j svaki period aktivacije osim zadnjeg. To podrazumijeva da u slučaju da period aktivacije traje samo petnaest minuta, gornje ograničenje se neće koristiti.

Potrebno je izračunati novi trošak plana koji prihvaća ponudu za fleksibilnost. Novi izračun troška uključuje koristi $\xi_{FLEX,k}$ za svaki period, ali ako je taj period izvan perioda aktivacije, računat će se kao nula.

$$\sum_{k=0}^{95} C_{gt,k} * \frac{P_{gt,k}}{4000} + C_{bo} * \frac{P_{bo,k}}{4000} - C_{FLEX,k} * \frac{\xi_{FLEX,k}}{4000} \quad (1.48)$$

1.3. Programski kôd

Program je pisan u programskom jeziku Python, a za ostvarenje optimizacijskog algoritma koristi se paket CPLEX. CPLEX je stvorio Robert E. Bixby (američki matematičar) 1987. godine. Ime je kombinacija programskog jezika C i matematičkog algoritma simplex. Danas podržava dodatne algoritme i programske jezike. CPLEX-u se pružaju varijable, ograničenja i cilj pomoću kojih se algoritamski može riješiti zadani problem.

```
model = cplex.Cplex();
```

```
model.objective.set_sense(model.objective.sense.minimize);
```

Kôd 1.1 – Osnovno stvaranje CPLEX modela

Stvaranje CPLEX modela jest jednostavno. Može se zadati minimizacija ili maksimizacija cilja. Kako bi se napravio kvalitetan i koristan algoritam, potrebno je modelu dodati varijable, ciljnu funkciju i ograničenja.

```
names = ["X(0)"];
for i in range(96):
    names.append("Pgt("+str(i)+")");
    names.append("Pbo("+str(i)+")");
    names.append("Ogt("+str(i)+")");
    names.append("Obo("+str(i)+")");
for i in range(96):
    names.append("Ogt_gr("+str(i)+")");
for i in range(96):
    names.append("Z-("+str(i)+")");
    names.append("Z+("+str(i)+")");
objective = [0];
for i in range(96):
    tmpList = [varMap[CgtInd][i]/4000,
varMap[CboInd][i]/4000, 0, 0];
    objective.extend(tmpList);
for i in range(96):
    objective.extend([0,0,0]);
lb=[-cplex.infinity for i in range(len(names))];
model.variables.add(names=names, obj=objective, lb=lb);
```

Kôd 1.2 – Dodavanje varijabli i ciljne funkcije CPLEX modelu

U kodu 1.2 stvara se lista varijabli `names` i lista brojčanih vrijednosti `objective`. CPLEX računa ciljnu funkciju tako da pomnoži vrijednosti iz `obj` s varijablama iz `names` istog indeksa. Kao primjer, ako je varijabla `a` na petoj poziciji u listi `names` te je -1.2 peta vrijednost unutar liste `obj`, ciljnoj funkciji se doda $-1.2 \cdot a$. Na ovaj način se ciljna funkcija može opisati kao suma umnožaka. U ovom primjeru se također postavilo donje granice na varijable pomoću liste `lb`.

```
for i in range(96):
```

```

        model.variables.set_types("Ogt("+str(i)+")",
model.variables.type.binary);

        model.variables.set_types("Obo("+str(i)+")",
model.variables.type.binary);

        model.variables.set_types("Ogt_gr("+str(i)+")",
model.variables.type.binary);

        model.variables.set_lower_bounds("Pgt("+str(i)+")", -
250000);

        model.variables.set_upper_bounds("Pgt("+str(i)+")",
250000);

```

Kôd 1.3 – Dodavanje ograničenja na varijable

Kod 1.3 je primjer dodavanja ograničenja na varijable u modelu. Varijable se mogu birati po njihovom imenu. Pomoću `set_lower_bounds` i `set_upper_bounds` mogu se zadati najmanje i najveće vrijednosti pojedinih varijabli bez potrebe za definiranjem zasebne nejednadžbe, odnosno ograničenja. Može se uočiti da ovo ne stvara konflikt sa zadanim donjim granicama u kodu 1.1. Pomoću `set_types` odredi se tip varijable. U ovom slučaju se koristi binarni tip. To znači da varijabla može samo biti ili 1 ili 0. Varijable također mogu biti cijeli broj, a ako nije eksplicitno određeno, varijabla će biti realni broj.

```

def getTw_t(t, Tenv, Pc, names):
    if t == 0:
        res = [["X(0)"], [1], 0, 0];
        return res;

    if t < 1:
        print("Index too small!");
        return 1;

    if t > 96:
        print("Index too large!");
        return 1;

    col = ["X(0)"];
    val = [];
    a = 0.999997;
    b1 = 0.000003;
    b2 = 0.000108;
    val.append(a**t);
    totalEnv = 0;
    totalPc = 0;

```

```

for i in range(0, t):
    A = a**i;
    uInd = 1+4*(t-1-i);
    totalEnv += A*b1*Tenv[t-1-i];
    totalPc += -A*b2*Pc[t-1-i];
    col.append(names[uInd]);
    col.append(names[uInd+1]);
    val.append(A*b2);
    val.append(-A*b2);
    result = [col, val, totalEnv, totalPc];
    return result;

```

Kôd 1.4 – Funkcija za dohvat temperature vode u spremniku za period t

Kako bi se ostvarilo jednostavno definiranje ograničenja, stvorena je zasebna funkcija za dohvat temperature vode u spremniku za period t : `getTw_t`. Modelirana je po formuli (1.5). Funkcija prima period t , listu temperatura okoline za svaki period u °C T_{env} , energetske potražnje od potrošača u W P_c , i listu imena varijabli $names$. Kao rezultat vraća listu relevantnih varijabli, listu njihovih faktora, numerički utjecaj na temperaturu od strane okoline, i numerički utjecaj na toplinu od strane potrošača.

```

inds = [names[1+pTOTAL*5+1+2*i], names[1+pTOTAL*4+i], names[1+2+4*i]];
# Z+ -m1*Ogt_gr -m1*Ogt + Cw*Qgt*Tw <= (Tgt+Tdifff/2)*Cw*Qgt -2*m1
vals = [1, -m1, -m1];
tmpList1 = getTw_t(i, varMap[TenvInd][:], varMap[PcInd][:], names);
tmpList2 = [x*Qgt*Cw for x in tmpList1[1]];
inds.extend(tmpList1[0]);
vals.extend(tmpList2);
pair = cplex.SparsePair(ind=inds, val=vals);
rhs = (Tgt + Tdifff/2 - tmpList1[2] - tmpList1[3])*Qgt*Cw - 2*m1;
model.linear_constraints.add(lin_expr=[pair], senses=['L'], rhs=[rhs],
names=["Z+ -m1*Ogt_gr -m1*Ogt + Cw*Qgt*Tw <= (Tgt+Tdifff/2)*Cw*Qgt -2*m1 :
t="+iStr]);

```

Kôd 1.5 – Funkcija za dohvat temperature vode u spremniku za period t

Ograničenja u CPLEXu se dodaju pomoću metode `linear_constraints.add`. Metoda koristi tri glavna ulaza: `lin_expr`, `senses`, i `rhs`. `lin_expr` koristi tip podataka `SparsePair`. `SparsePair` se sastoji od liste varijabli CPLEX modela te

njihovih pripadajućih faktora, te predstavlja lijevu stranu nejednadžbe. Lista varijabli može koristiti indekse varijabli modela ili njihove nazive. `senses` predstavlja vrstu jednakosti. Mogući tipovi jednakosti su `E` za jednako, `G` veće ili jednako, i `L` za manje ili jednako. CPLEX ne podržava isključivo manje ili isključivo više. `rhs` (*right hand side*) predstavlja desnu stranu nejednadžbe. Kao ulaz prima brojčanu vrijednost. Varijable koje se optimiziraju su isključivo na lijevoj strani nejednadžbe, dok su ostale na desnoj strani. `linear_constraints.add` u kodu 1.5 dodatno koristi `names`. Pomoću `names` se pridruži naziv ograničenju. Ovo može biti korisno pri otkriću problematičnog ograničenja i/ili perioda u slučaju nerješivog problema, ali vrlo često je također pomoć pri debugiranju i otkrivanju loše zadanih (ne)jednadžbi.

U kodu 1.5 unosi se nejednadžba (1.21) za pojedini period te se koristi `getTw_t`. Budući da se temperatura vode u spremniku za nejednadžbu (1.21) množi s masenim protokom koji se ostvaruje kroz izmjenjivač topline Q_{gt} i specifičnim toplinskim kapacitetom vode C_w , faktori za varijable koje vraća funkcija `getTw_t` se također trebaju pomnožiti. Srećom, to je jednostavno ostvarivo u Pythonu pomoću koda u retku 5 koda 1.5 gdje se stvori nova lista faktora koji su umnožak vrijednosti iz originalne liste iz funkcije pomnoženi s Q_{gt} i C_w .

Kada je CPLEX model u potpunosti definiran, poziva se metoda `solve` (npr. `model.solve()`). Nakon toga se pomoću `model.solution.get_status()` može se dobiti cijeli broj koji predstavlja stanje rješenja. U slučaju da je taj kod 101, problem ima ostvarivo, optimalno rješenje. Ako se traži krajnja vrijednost ciljne funkcije, to se može dobiti pomoću metode `model.solution.get_objective_value()`, dok se vrijednosti pojedinih optimalnih varijabli može dobiti pomoću metode `model.solution.get_values(x)`, gdje je `x` indeks ili naziv varijable u CPLEX modelu.

2. Optimizacija fleksibilnosti toplinskog sustava

Za zadani toplinski sustav potrebno je dobiti optimalni plan, odnosno optimalni način rada bojlera na loživo ulje te izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom. Potrebno je uzeti u obzir mogućnost prihvaćanja ponude za fleksibilnost, ali i mogućnost da se fleksibilnost ne prihvati. Dodavanje fleksibilnosti u model, mijenja ciljnu funkciju te uzima u obzir vjerojatnost prihvaćanja ponude pružanja fleksibilnosti. Nova ciljna funkcija ima za cilj minimizirati očekivani trošak rada bojlera te izmjenjivača uzevši u obzir mogućnost pružanja fleksibilnosti:

$$\min E[g] = (1 - \alpha) * g_{\text{non-accepted}} + \alpha * g_{\text{accepted}} \quad (2.1)$$

$g_{\text{non-accepted}}$ predstavlja gubitak u slučaju da ponuda za fleksibilnost nije prihvaćena, g_{accepted} jest gubitak u slučaju da je ponuda za fleksibilnost prihvaćena, a α jest vjerojatnost (realni broj od 0 do 1) ugovaranja fleksibilnosti. Plan rada bojlera te izmjenjivača odnosno upravljačke varijable kao rješenje optimizacije koja uključuje pružanje fleksibilnosti označavaju se sa u_{flex} .

U slučaju da ponuda za fleksibilnost nije prihvaćena (vjerojatnost $1 - \alpha$), gubitak $g_{\text{non-accepted}}$ jest razlika između troška plana u_{flex} , odnosno $J(u_{\text{flex}})$, i troška optimalnog plana za slučaj kada se ne pruža fleksibilnost $J(u_{\text{no-flex}})$.

$$g_{\text{non-accepted}} = J^n(u_{\text{flex}}) - J^n(u_{\text{no-flex}}) \quad (2.2)$$

Gubitak u slučaju da je ponuda za fleksibilnost prihvaćena uz vjerojatnost α jest:

$$g_{\text{accepted}} = \left[J^n(u_{\text{flex}}) - F_G(P_{\text{flex}}) + \max_i \left(J^{a,i}(u_{a,i}, u_{\text{flex}}) - J^n(u_{\text{flex}}) \right), 0 \right] - J^n(u_{\text{no-flex}}) \quad (2.3)$$

F_G jest dodatna naknada za ugovorenu fleksibilnost (dobitak za rezervaciju). F_G ovisi o smanjenom iznosu korištenja geotermalne energije između originalnog plana potrošnje i onog izmijenjenog u slučaju aktivacije.

$$F_G = \sum_{k=y}^x C_{flex} * \frac{P_{gt,k} - P_{gt,k}^a}{4000} \quad (2.4)$$

C_{flex} predstavlja nagradu za smanjenu snagu koju se preuzima geotermalne mreže u €/kWh, gdje $P_{gt,k}$ predstavlja toplinsku snagu koja se prenosi izmjenjivačem iz geotermalne mreže za period k u nominalnom planu, dok je $P_{gt,k}^a$ iznos toplinske snage iste mreže u istom periodu za alternativni plan a gdje se dogodila određena aktivacija odnosno zahtjev za smanjenjem. Periodi x i y ovise o početku i kraju aktivacije.

$J^{a,i}$ je funkcija troška za i -ti alternativni profil. $g_{accepted}$ predstavlja gubitak ako je 0 ili više, a inače predstavlja dobitak.

Kada se proširi formula (2.1), dobije se:

$$\begin{aligned} \min_{u_{flex}, u_{a,i}, P_{flex}} E[g] \\ = \min_{u_{flex}, u_{a,i}, P_{flex}} J^n(u_{flex}) - J^n(u_{no-flex}) - \alpha F_G(P_{flex}) \\ + \alpha \max \left(\max_i \left(J^{a,i}(u_{a,i}, u_{flex}) - J^n(u_{flex}) \right), 0 \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

U slučaju da $E[g]$ ispadne manji od 0, tada se isplati ponuditi fleksibilnost budući da negativan iznos očekivanja govori da je vjerojatna ekonomska dobit od pružanja fleksibilnosti.

Može se uočiti da je trošak plana koji ne uzima u obzir fleksibilnost $J^n(u_{no-flex})$ u formuli (2.5) konstantan odnosno ne ovisi o optimizaciji rada koji pruža fleksibilnost. Zato što se ciljnoj funkciji može dodati konstanta bez da utječe na rezultante varijable optimizacijskog problema, funkcija (2.5) se može pojednostaviti zbrajanjem s $J^n(u_{no-flex})$. Tada se dobije:

$$\begin{aligned} J^n(u_{no-flex}) + \min E[g] \\ = \min_{u_{flex}, u_{a,i}, P_{flex}} J^n(u_{flex}) - \alpha F_G(P_{flex}) \\ + \alpha \max \left(\max_i \left(J^{a,i}(u_{a,i}, u_{flex}) - J^n(u_{flex}) \right), 0 \right) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Budući da se zbrajanjem u formuli (2.6) poništava izraz $J^n(u_{no-flex})$, za dobivanje troška optimalnog rada sustava sa pružanjem fleksibilnosti, u optimizaciju nije potrebno uvrštavati upravljačke varijable sustava bez pružanja fleksibilnosti $u_{no-flex}$.

2.1. Matematička razrada

Ciljna funkcija zadanog problema jest funkcija (2.6). Potrebno je ostvariti minimizaciju te funkcije, no taj izraz nije moguće uvrstiti direktno u optimizaciju budući da sadrži nelinearnu funkciju maksimizacije $\max_i \left(J^{a,i}(u_{a,i}, u_{flex}) - J^n(u_{flex}) \right), 0$. Ciljna funkcija u ovom obliku postaje nelinearna. Kako bi se definirala željena funkcija a ostvarila linearnost, varijabla D i ciljna funkcija tada poprima oblik:

$$J^n(u_{no-flex}) + \min E[g] = \min_{u_{flex}, u_{a,i}, P_{flex}} J^n(u_{flex}) - \alpha * F_G(P_{flex}) + \alpha * D \quad (2.7)$$

Varijabla D se definira pomoću uvjeta nejednakosti. Time se zadržava ponašanje maksimizacije, dok ciljna funkcija poprima linearni oblik. Navedenu maksimizaciju je moguće na ovaj način supstituirati budući da je ciljna funkcija oblika minimizacije.

$$D \geq 0 \quad (2.8)$$

$$D \geq d_a \quad (2.9)$$

Nejednakost (2.8) predstavlja 0 iz vanjskog $\max$ -a, dok d_a iz nejednakosti (2.9) predstavlja $J^{a,i}(u_{a,i}, u_{flex}) - J^n(u_{flex})$ za a -ti alternativni profil. Odnosno, d_a bi se definirao kao:

$$D \geq \sum_{k=0}^{95} C_{gt,k} * \frac{P_{gt,k}^a - P_{gt,k}}{4000} + C_{bo} * \frac{P_{bo,k}^a - P_{bo,k}}{4000} \quad (2.10)$$

$P_{gt,k}^a$ i $P_{bo,k}^a$ su toplinske snage bojlera i izmjenjivača topline u alternativnom profilu i za period k , dok su $P_{gt,k}$ i $P_{bo,k}$ toplinske snage u nominalnom planu rada u_{flex} gdje se aktivacija nije ostvarila. Može se napomenuti da je u stvarnoj primjeni bolje gledati samo periode koji u alternativnom planu i predstavljaju periode aktivacije i oporavka. Time se smanjuje broj varijabli koje se koristi i predstavljaju toplinske snage bojlera i izmjenjivača u alternativnom planu, i smanji kompleksnost računa i nejednadžbi. Ovo je moguće i ispravno jer će razlika potrošnje izvora između dva plana biti nula za svaki period izvan perioda aktivacije i oporavka. Nadalje, svaki alternativni plan ima jednako trajanje aktivacije i oporavka.

Prošireni problem koji uključuje pružanje fleksibilnosti treba novi optimizacijski vektor. Zbog bolje preglednosti te lakšeg razumijevanja, optimizacijski vektor se može podijeliti na četiri komponente:

- Glavni plan U_{flex} : sadrži varijable glavnog plana, odnosno varijable za početnu temperaturu vode u spremniku, te korištenu energiju iz dva izvora energije, i binarne varijable za 96 perioda, ista struktura kao i u optimizacijskom vektoru za problem bez pružanja fleksibilnosti
- Alternativni planovi $U_{a,i}$: sadrži varijable za alternativne planove koji uključuju aktivaciju, odnosno korištenu energiju iz dva izvora i binarne varijable, za relevantne periode tijekom aktivacije i oporavka, broj varijabli jest neusporedivo manji od glavnog plana budući da sadrži samo relevantne 15 minutne periode za vrijeme trajanja aktivacije i oporavka
- Iznosi snage fleksibilnosti P_{flex} : predstavlja odziv potrošnje geotermalne energije za jedan period, a vrijednost odziva je jednaka za svaki period aktivacije svakog alternativnog plana
- Pomoćna varijabla za razradu maksimuma Σ : varijabla koja omogućuje zamjenu maksimuma unutar formule (2.5) s pomoćnom varijablom i dodatnim ograničenjima, opisano nejednakostima (2.8) i (2.9)

$$ov_{flex} = [U_{flex} \ U_{a,i} \ P_{flex} \ \Sigma] \quad (2.11)$$

$$U_{flex} = [T_{w,i} \ P_{gt,i} \ P_{bo,i} \ \delta_{gt,i} \ \delta_{bo,i} \ \delta_{gt_gr,i} \ Z_{-,i} \ Z_{+,i}] \quad (2.12)$$

$$U_{flex} = [T_{w,0} \ P_{gt,0} \ P_{bo,0} \ \delta_{gt,0} \ \delta_{bo,0} \ P_{gt,1} \dots \delta_{bo,95} \ \delta_{gt_gr,0} \dots \delta_{gt_gr,95} \ Z_{-,0} \ Z_{+,0} \dots Z_{+,95}] \quad (2.13)$$

$$U_{a,i} = [P_{gt,a,i} \ P_{bo,a,i} \ \delta_{gt,a,i} \ \delta_{bo,a,i} \ \delta_{gt_gr,a,i} \ Z_{-,a,i} \ Z_{+,a,i}] \quad (2.14)$$

$$U_{a,i} = [P_{gt,0,0} \ P_{bo,0,0} \ \delta_{gt,0,0} \ \delta_{bo,0,0} \ P_{gt,0,1} \dots \delta_{bo,0,n} \ \delta_{gt_gr,0,0} \ \delta_{gt_gr,0,1} \dots \delta_{gt_gr,0,n} \ Z_{-,0,0} \ Z_{+,0,0} \ Z_{-,0,1} \dots Z_{+,0,n} \ P_{gt,1,0} \dots] \quad (2.15)$$

$$P_{flex} = [P_{flex}] \quad (2.16)$$

$$\Sigma = [D] \quad (2.17)$$

a u gore navedenim formulama predstavlja indeks alternativnog plana, dok i predstavlja redni broj (od 0) vremenskog perioda od 15 minuta.

U_{flex} i $U_{a,i}$ će također koristiti uvjete koji su navedene u poglavlju 1.1.

P_{flex} se definira slično formuli (1.43), odnosno:

$$P_{flex} = P_{gt,i} - P_{gt,a,i} \quad (2.18)$$

Formula (2.18) osigurava da je P_{flex} isti za svaki period aktivacije svakog alternativnog plana. To podrazumijeva da P_{flex} ne može biti manji u jednom od alternativnih planova. P_{flex} mora biti isti za svaki alternativni plan, jer u slučaju da se prihvatila ponuda za fleksibilnost, te se prijavio veći P_{flex} od minimalnog, moguće je da se zatraži aktivacija koja nije ostvariva za prijavljeni P_{flex} . Prijava P_{flex} manjeg od minimalnog bi samo smanjilo dobitak za ugovorenu fleksibilnost i stoga nema svrhe. Nadalje, minimizacija će osigurati da P_{flex} ima najveću ostvarivu vrijednost, budući da je ciljna funkcija iz formule (2.7) obrnuto proporcionalna u odnosu na P_{flex} .

Σ se već razradio pomoću formula (2.8) i (2.9). Kada se zapis za formulu (2.10) prilagodi notaciji za ov_{flex} , dobije se:

$$\sum_{k=0}^{95} C_{gt,k} * \frac{P_{gt,a,k} - P_{gt,k}}{4000} + C_{bo} * \frac{P_{bo,a,k} - P_{bo,k}}{4000} \geq D \quad (2.19)$$

Uz nove nejednakosti iz ovog poglavlja, također se koriste nejednakosti iz prvog poglavlja prilagođene za vektor U_{flex} .

$$1 * Z_{+,i} \leq M_1 * \delta_{gt,i} \quad (2.20)$$

$$1 * Z_{-,i} \leq M_1 * \delta_{gt,i} \quad (2.21)$$

$$-M_1 * \delta_{gt_gr,i} + 1 * Z_{+,i} \leq 0 \quad (2.22)$$

$$M_1 * \delta_{gt_gr,i} + 1 * Z_{-,i} \leq M_1 \quad (2.23)$$

$$-1 * Z_{+,i} \leq -m_1 * \delta_{gt,i} \quad (2.24)$$

$$-1 * Z_{-,i} \leq -m_1 * \delta_{gt,i} \quad (2.25)$$

$$m_1 * \delta_{gt_gr,i} - 1 * Z_{+,i} \leq 0 \quad (2.26)$$

$$-m_1 * \delta_{gt_gr,i} - 1 * Z_{-,i} \leq -m_1 \quad (2.27)$$

$$-m_1 * \delta_{gt_gr,i} + 1 * Z_{+,i} \leq m_1 * \delta_{gt,i} - C_w * Q_{gt} * T_{w,i} + \left(T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} - 2 * m_1 \quad (2.28)$$

$$m_1 * \delta_{gt_gr,i} + 1 * Z_{-,i} \leq m_1 * \delta_{gt,i} - C_w * Q_{gt} * T_{w,i} + \left(T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} - m_1) \quad (2.29)$$

$$M_1 * \delta_{gt_gr,i} - 1 * Z_{+,i} \leq -M_1 * \delta_{gt,i} + C_w * Q_{gt} * T_{w,i} + \left(2 * M_1 - \left(T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} \right) \quad (2.30)$$

$$-M_1 * \delta_{gt_gr,i} - 1 * Z_{-,i} \leq -M_1 * \delta_{gt,i} + C_w * Q_{gt} * T_{w,i} + \left(M_1 - \left(T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2} \right) * C_w * Q_{gt} \right) \quad (2.31)$$

$$-1 * Z_{+,i} \leq -1 * P_{gt,i} \quad (2.32)$$

$$1 * Z_{-,i} \leq 1 * P_{gt,i} \quad (2.33)$$

$$1 * P_{gt,i} \leq 250000W \quad (2.34)$$

$$-1 * P_{gt,i} \leq 250000W \quad (2.35)$$

$$M_2 * \delta_{gt_gr,i} \leq -1 * T_{w,i} + \left(M_2 + T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2} \right) \quad (2.36)$$

$$(m_2 - \xi) * \delta_{gt_gr,i} \leq 1 * T_{w,i} + \left(-\xi - T_{gt,i} - \frac{T_{diff}}{2} \right) \quad (2.37)$$

$$1 * P_{bo,i} * \delta_{bo,i} \leq 1 * P_{boMax} \quad (2.38)$$

$$-1 * P_{bo,i} * \delta_{bo,i} \leq -1 * P_{boMin} \quad (2.39)$$

$$T_{w,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq 100^\circ C \quad (2.40)$$

$$-1 * T_{w,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq -50^\circ C \quad (2.41)$$

$$-1 * T_{w,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq -1 * T_m \quad (2.42)$$

$$1 * T_{w,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq 1 * T_M \quad (2.43)$$

$$T_{w,0} = T_{w,96} \quad (2.44)$$

Ove nejednakosti se koriste i za vektor $U_{a,i}$.

$$1 * Z_{+,a,i} \leq M_1 * \delta_{gt,a,i} \quad (2.45)$$

$$1 * Z_{-,a,i} \leq M_1 * \delta_{gt,a,i} \quad (2.46)$$

$$-M_1 * \delta_{gt_gr,a,i} + 1 * Z_{+,a,i} \leq 0 \quad (2.47)$$

$$M_1 * \delta_{gt_gr,a,i} + 1 * Z_{-,a,i} \leq M_1 \quad (2.48)$$

$$-1 * Z_{+,a,i} \leq -m_1 * \delta_{gt,a,i} \quad (2.49)$$

$$-1 * Z_{-,a,i} \leq -m_1 * \delta_{gt,a,i} \quad (2.50)$$

$$m_1 * \delta_{gt_gr,a,i} - 1 * Z_{+,a,i} \leq 0 \quad (2.51)$$

$$-m_1 * \delta_{gt_gr,a,i} - 1 * Z_{-,a,i} \leq -m_1 \quad (2.52)$$

$$-m_1 * \delta_{gt_gr,a,i} + 1 * Z_{+,a,i} \leq m_1 * \delta_{gt,a,i} - C_w * Q_{gt} * T_{w,a,i} + ((T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2}) * C_w * Q_{gt} - 2 * m_1) \quad (2.53)$$

$$m_1 * \delta_{gt_gr,a,i} + 1 * Z_{-,a,i} \leq m_1 * \delta_{gt,a,i} - C_w * Q_{gt} * T_{w,a,i} + ((T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2}) * C_w * Q_{gt} - m_1) \quad (2.54)$$

$$M_1 * \delta_{gt_gr,a,i} - 1 * Z_{+,a,i} \leq -M_1 * \delta_{gt,a,i} + C_w * Q_{gt} * T_{w,a,i} + (2 * M_1 - (T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2}) * C_w * Q_{gt}) \quad (2.55)$$

$$-M_1 * \delta_{gt_gr,a,i} - 1 * Z_{-,a,i} \leq -M_1 * \delta_{gt,a,i} + C_w * Q_{gt} * T_{w,a,i} + (M_1 - (T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2}) * C_w * Q_{gt}) \quad (2.56)$$

$$-1 * Z_{+,a,i} \leq -1 * P_{gt,a,i} \quad (2.57)$$

$$1 * Z_{-,a,i} \leq 1 * P_{gt,a,i} \quad (2.58)$$

$$1 * P_{gt,a,i} \leq 250000W \quad (2.59)$$

$$-1 * P_{gt,a,i} \leq 250000W \quad (2.60)$$

$$M_2 * \delta_{gt_gr,a,i} \leq -1 * T_{w,a,i} + (M_2 + T_{gt,i} + \frac{T_{diff}}{2}) \quad (2.61)$$

$$(m_2 - \xi) * \delta_{gt_gr,a,i} \leq 1 * T_{w,a,i} + (-\xi - T_{gt,i} - \frac{T_{diff}}{2}) \quad (2.62)$$

$$1 * P_{bo,a,i} * \delta_{bo,a,i} \leq 1 * P_{boMax} \quad (2.63)$$

$$-1 * P_{bo,a,i} * \delta_{bo,a,i} \leq -1 * P_{boMin} \quad (2.64)$$

$$1 * T_{w,a,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq 100^\circ C \quad (2.65)$$

$$-1 * T_{w,a,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq -50^\circ C \quad (2.66)$$

$$-1 * T_{w,a,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq -1 * T_m \quad (2.67)$$

$$1 * T_{w,a,i} + \frac{T_{diff}}{2} \leq 1 * T_M \quad (2.68)$$

$$T_{w,0} = T_{w,a,96} \quad (2.69)$$

Može se uočiti da $T_{w,0}$ iz nejednadžbe (2.69) nije temperatura za alternativni plan a , već početna temperatura vode u spremniku iz vektora U_{flex} . Za računanje temperature vode u spremniku u alternativnim planovima se koristi $T_{w,0}$ kao početna temperatura i zato će uvijek početne temperature u glavnom i alternativnom planu biti jednake.

Alternativni planovi se ponašaju jednako glavnom planu prije aktivacije i nakon kraja oporavka (u odnosu na snagu izvora topline i potražnje potrošača). To znači da će temperatura vode u spremniku pri početku aktivacije biti ista u oba plana, dok ta ista temperatura mora biti jednaka u oba plana na kraju oporavka da bi se mogle postići jednake temperature na kraju dana (a i time u periodima između kraja oporavka i kraja dana).

2.2. Programski kôd

Veliki dio CPLEX modela za sustav koji podržava mogućnost fleksibilnosti jest sličan pojednostavnjenom modelu iz prvog poglavlja. Za proširenje su potrebne nove varijable, ograničenja, te nova ciljna funkcija.

```
names = ["X(0)"];
for i in range(96):
    names.append("Pgt (" + str(i) + ")");
    names.append("Pbo (" + str(i) + ")");
    names.append("Ogt (" + str(i) + ")");
    names.append("Obo (" + str(i) + ")");
for i in range(96):
    names.append("Ogt_gr (" + str(i) + ")");
for i in range(96):
    names.append("Z- (" + str(i) + ")");
    names.append("Z+ (" + str(i) + ")");
for i in range(altNum):
    for j in range(actStarts[i], actStarts[i]+actLen+recLen):
```

```

names.append("Pgt_"+str(i)+"("+str(j)+")");
names.append("Pbo_"+str(i)+"("+str(j)+")");
names.append("Ogt_"+str(i)+"("+str(j)+")");
names.append("Obo_"+str(i)+"("+str(j)+")");
for j in range(actStarts[i], actStarts[i]+actLen+recLen):
    names.append("Ogt_gr_"+str(i)+"("+str(j)+")");
for j in range(actStarts[i], actStarts[i]+actLen+recLen):
    names.append("Z-_"+str(i)+"("+str(j)+")");
    names.append("Z+_"+str(i)+"("+str(j)+")");
names.append("Pflex");
names.append("D");

```

Kôd 2.1 – Stvaranje varijabli za prošireni CPLEX model

Kod 2.1 prikazuje nove varijable modela. Prvih 11 linija koda su iste kao i u jednostavnijem modelu. Ovo omogućuje ponovno korištenje ograničenja iz osnovnijeg modela. Za ostale varijable je bitno prepoznati redoslijed i strukturu naziva. altNum predstavlja broj alternativnih planova.

```

objective = [0];
for i in range(96):
    tmpList = [varMap[CgtInd][i]/4000, varMap[CboInd][i]/4000, 0, 0];
    objective.extend(tmpList);
for i in range(96):
    objective.extend([0,0,0]);
for i in range(altNum):
    for j in range(actStarts[i], actStarts[i]+actLen+recLen):
        objective.extend([0,0,0,0,0,0,0]);
objective.extend([- (alpha*rewardAmount*actLen)/4000]);
objective.extend([alpha]);
lb=[-cplex.infinity for i in range(len(names))];
model.variables.add(names=names, obj=objective, lb=lb);

```

Kôd 2.2 – Dodavanje ciljne funkcije proširenom modelu

Glavna razlika između dva modela (ne uključujući dodatke) jest definicija ciljne funkcije. Kod 2.2 također predstavlja jedan primjer gdje je bitno razumjeti redoslijed varijabli u modelu. Ako se prouči sami kod, može se uočiti da predstavlja formulu (2.6). alpha predstavlja vjerojatnost da je ponuda za fleksibilnost prihvaćena. Posljednja petlja

predstavlja formulu (2.4), gdje `rewardAmount` predstavlja nagradu za fleksibilnost u €/kWh, odnosno oponaša C_{flex} . Samo se računa za jedan alternativni plan. Zato što svaki alternativni plan ima jednako dugu aktivaciju, te ograničenja (2.20) i (2.21) osiguravaju da je P_{flex} isti za svaki period i alternativni plan, F_G će biti reprezentativan za svaki alternativni plan.

U velikom broju ograničenja, potrebna je temperatura vode u spremniku. Budući da će korištenje bojlera i geotermalne mreže biti različito u različitim alternativnim profilima, potrebna je funkcija koja uzima tu činjenicu u obzir.

```
def getTw_t_alt(t, Tenv, Pc, names, altVal, actStart, actLen, recLen):
    if t == 0:
        res = [["X(0)"], [1], 0, 0];
        return res;
    if t < 0:
        print("Index too small!");
        return 1;
    if t > 96:
        print("Index too large!");
        return 1;
    col = ["X(0)"];
    val = [];
    a = 0.999997;
    b1 = 0.000003;
    b2 = 0.000108;
    val.append(a**t);
    totalEnv = 0;
    totalPc = 0;
    for i in range(0, t):
        A = a**i;
        if (t-1-i >= actStart and t-1-i < actStart+actLen+recLen):
            col.append("Pgt_"+str(altVal)+" (" +str(t-1-i)+")");
            col.append("Pbo_"+str(altVal)+" (" +str(t-1-i)+")");
        else:
            col.append("Pgt (" +str(t-1-i)+")");
            col.append("Pbo (" +str(t-1-i)+")");
```



```

        totalEnv += A*b1*Tenv[t-1-i];
        totalPc += -A*b2*Pc[t-1-i];
        val.append(A*b2);
        val.append(A*b2);
    result = [col, val, totalEnv, totalPc];
    return result;

```

Kôd 2.3 – Funkcija za račun temperature vode u spremniku za period t i alternativni plan *altVal*

Funkcija treba znati kada su snaga bojlera i geotermalne mreže iste, odnosno različite, između glavnog i alternativnog profila. To je moguće pomoću *altVal*, *actStart*, *actLen* i *recLen*. *actStart* određuje početak aktivacije, dok *actLen* i *recLen* određuju trajanje aktivacije i oporavka. *altVal* u kodu 2.3 služi za dohvat nužnih varijabli modelu. Ovo čini funkciju *getTw_t_alt* primjerom slučaja gdje je bitno znati strukturu naziva varijabli modela. Mana ovog pristupa jest da se u slučaju izmjene strukture naziva varijable treba doraditi veći dio koda. Pri toj doradi je moguće da programer lako propustiti jednu ili više neizmijenjenih linija koda. Prednost je veća razumljivost koda i time sigurnost ispravne implementacije.

3. Rezultati

CPLEX model će pronaći optimalno rješenje za zadane parametre ukoliko postoji, no ovisno o unesenim parametrima (navedeni pri početku poglavlja 1.1, str. 6) postoji mogućnost da problem nema ostvarivo rješenje. Dodatni parametri za problem s uključivanjem fleksibilnosti ne utječu na pronalazak ostvarivog rješenja. Problem s fleksibilnosti i ulaznim parametrima X će imati ostvarivo rješenje ako i samo ako problem bez fleksibilnosti ima ostvarivo rješenje za ulazne parametre X , neovisno o parametrima isključivim problemu s fleksibilnosti. Dodatni parametri ne utječu na ostvarivost problema, već na rezultat (ako postoji). Ovisno o parametrima, postoje dvije mogućnosti: fleksibilnost se ne isplati i konačno rješenje je istovjetno rješenju problema bez fleksibilnosti, ili se fleksibilnost se isplati i rješenje se razlikuje u specifičnim periodima (koji ovise o novim parametrima).

Za korisnika su bitne varijable za snagu od izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom P_{gt} , snaga od bojlera na loživo ulje P_{bo} , i temperatura vode u spremniku T_w . Dok rješenje CPLEX modela sadrži P_{gt} i P_{bo} za svaki period, model samo sadrži vrijednost T_w za početni period. T_w za ostale periode se treba izračunati unutar programa koristeći ulazne parametre i vrijednosti varijabli u rješenju. Za problem bez fleksibilnosti, ostale varijable modela služe kvalitetnom definiranju problema, ali nemaju primjenu korisniku.

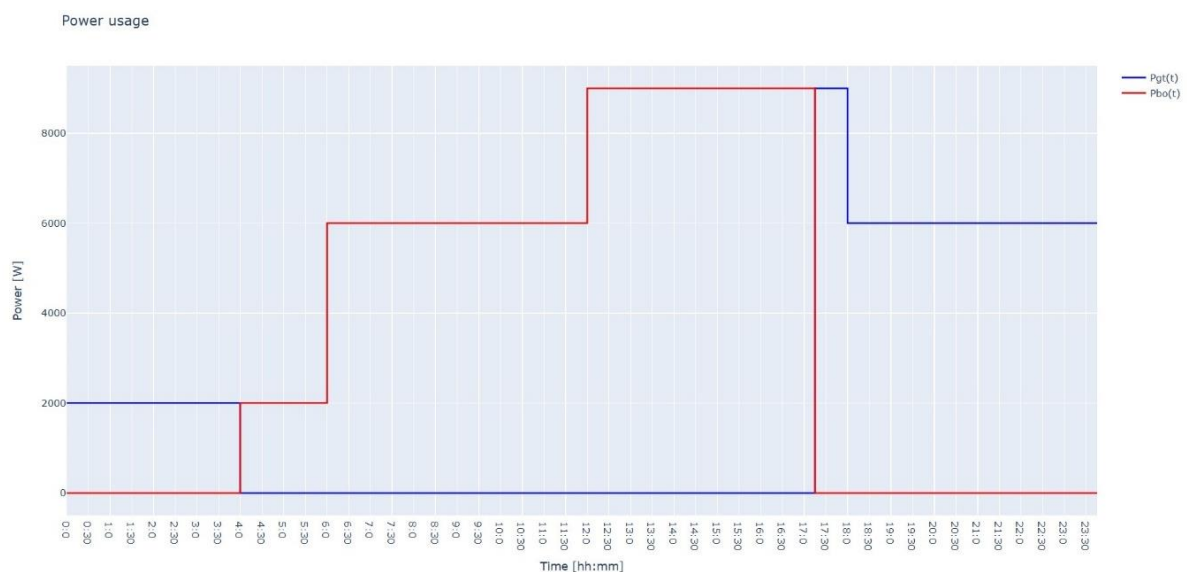
Gore navedeni izlazi se mogu spremati u datoteku tipa vrijednosti odvojenih zarezom (*Comma-Separated Values* - CSV) za efikasno spremanje i kasniju analizu.

	A	B	C	D
1	Tw(t)	Pgt(t)	Pbo(t)	
2	58.5	2001.347	0	
3	58.5	2001.347	0	
4	58.5	2001.347	0	
5	58.5	2001.347	0	
6	58.5	2001.347	0	
7	58.5	2001.347	0	
8	58.5	2001.347	0	
9	58.5	2001.347	0	
10	58.5	2001.347	0	
11	58.5	2001.347	0	
12	58.5	2001.347	0	
13	58.5	2001.347	0	
14	58.5	2001.347	0	
15	58.5	2001.347	0	
16	58.5	2001.347	0	
17	58.5	2001.347	0	
18	58.5	2001.347	7.19E-11	
19	58.5	2001.347	8.07E-11	
20	58.5	0	2001.347	

Sl. 3.1: Izlazna CSV datoteka

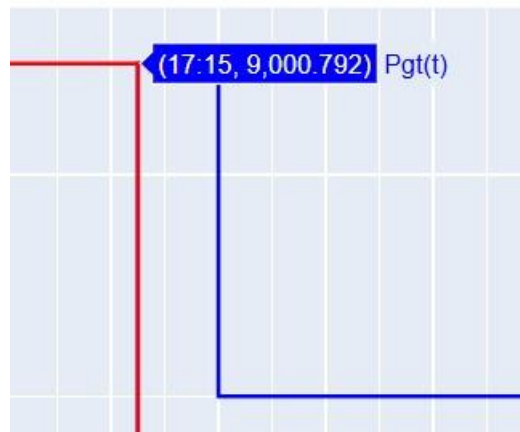
Problem s pružanjem fleksibilnosti sadrži dodatne varijable kao što su snaga izmjenjivača geotermalne mreže za alternativni plan a $P_{gt,a}$, snaga bojlera na loživo ulje alternativnog plana $P_{bo,a}$ te iznos fleksibilnosti P_{flex} koje bi mogle biti od koristi korisniku. Temperature vode u spremniku za alternativni plan a $T_{w,a}$ se računaju kombinacijom parametara i varijabli P_{gt} , P_{bo} , $P_{gt,a}$, $P_{bo,a}$.

Temperatura vode u spremniku T_w , te način rada dva izvora topline P_{gt} i P_{bo} se mogu prikazati pomoću grafa, kao na slici 3.2.



Sl. 3.2: Grafički prikaz rješenja problema bez fleksibilnosti

Grafički prikaz rezultata koristi Plotly. Pomoću grafa se lakše može uočiti kada se koristi određeni izvor topline, količina snage određenog izvora, kada se mijenja iznost topline, i slično. Velika prednost Plotly-a jest ugrađena interaktivnost. Pri pokretanju vizualizacije, Plotly postavlja graf na način da zauzme najviše moguće prostora za prikaz bez da izostane ikoji podatak, no korisnik može povećati i smanjiti prikazanu plohu. S računalnim mišem se također može prikazati detaljni zapis točke na grafu, kao što je prikazano na slici 3.3.



Sl. 3.3: Detaljniji prikaz vrijednosti točke na grafu koristeći računalni miš

Korisniku je također bitna datoteka s ulaznim parametrima, i stanje rješenja (posebno ako problem nije izvediv). Pomoću ulaznih parametara je lakše ponovno postaviti neki prošli problem, ili stvoriti nekakvu novu devijaciju problema.

```

2024_06_16-17_43_05_log.txt - Notepad
File Edit Format View Help
Creation time: 16.06.2024., 17:43:05
Parameters from: C:\Users\Kresimir K\Desktop\9. semestar\DR\kod\samples\csvPrimAlt.csv
Activation beginning periods: 2:0, 6:30, 17:0
Activation duration: 10
Recovery duration: 2
Reward amount: 0.8€/kWh
Activation probability: 90.0%
Solution status: 101 - integer optimal solution
Pflex: 2001.347222222243W
Geothermal costs: 11.62864010416665€
Boiler costs: 14.313997569444416€
Total reward amount: 4.0026944444444865€
Total costs without flexibility: 25.942637673611067€
Total costs with flexibility: 21.939943229166584€, 20.93926961805547€, 22.115061111111036€

```

Sl. 3.4: Izlazna log datoteka

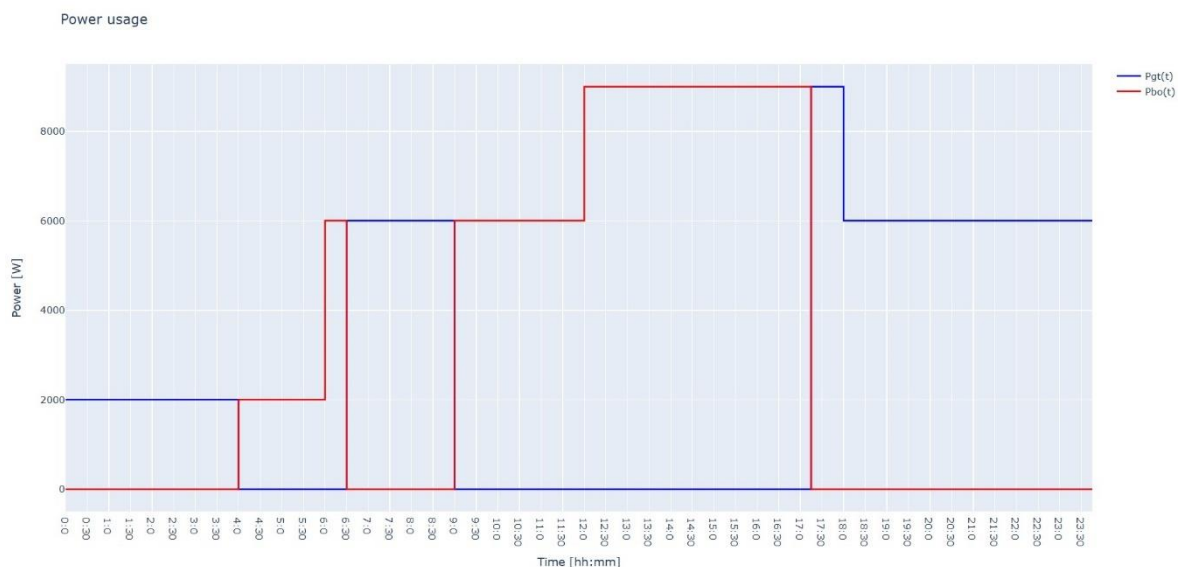
Ta datoteka također sadrži troškove predloženog profila, odnosno troškove rada bojlera na loživo ulje, troškove rada izmjenjivača topline s geotermalnom mrežom te dobitak za fleksibilnost (za problem s fleksibilnosti), ali i korisne sume kao zbroj troškova bojlera i

izmjenjivača topline, ili razlika sume troškova i dobitka za fleksibilnost za pojedine alternativne planove.

3.1. Usporedba rezultata

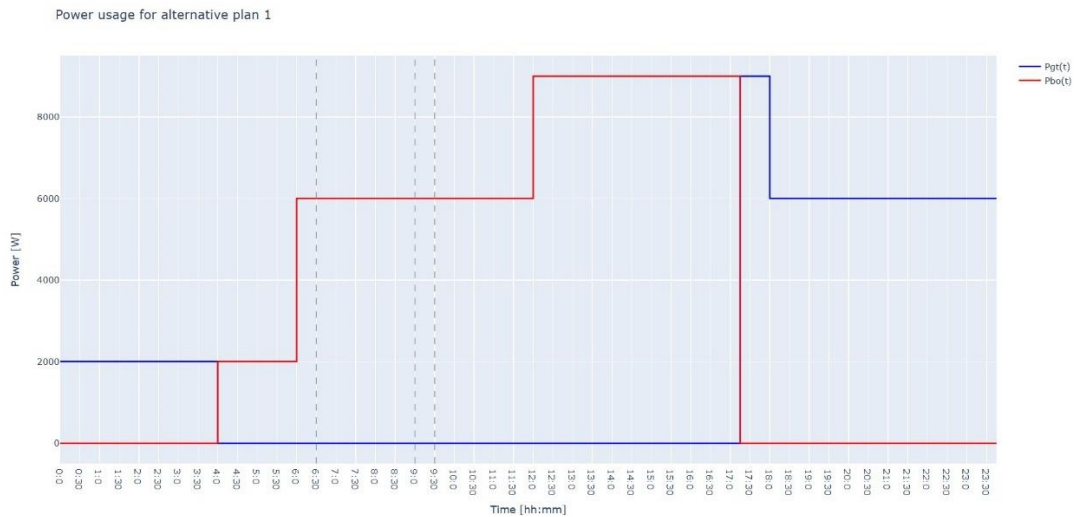
Slika 3.2 prikazuje rezultat problema bez fleksibilnosti za ulaznu datoteku 'csvPrimAlt.csv'. Na početku i kraju dana koristi se izmjenjivač topline s geotermalnom mrežom, dok se sredinom dana koristi bojler na loživo ulje.

Problem sa slike 3.5 ima moguću aktivaciju u 6:30 koja traje 2.5 sati i oporavak koji traje pola sata. Iako se u to doba više isplati koristiti bojler, zbog očekivanja aktivacije u tom trenutku se umjesto bojlera koristi isključivo izmjenjivač topline za trajanje aktivacije. Rezervirani iznos za pružanje fleksibilnosti (za pojedini period) u ovom rješenju jest jednak maksimalnoj snazi za taj period (6000 W).



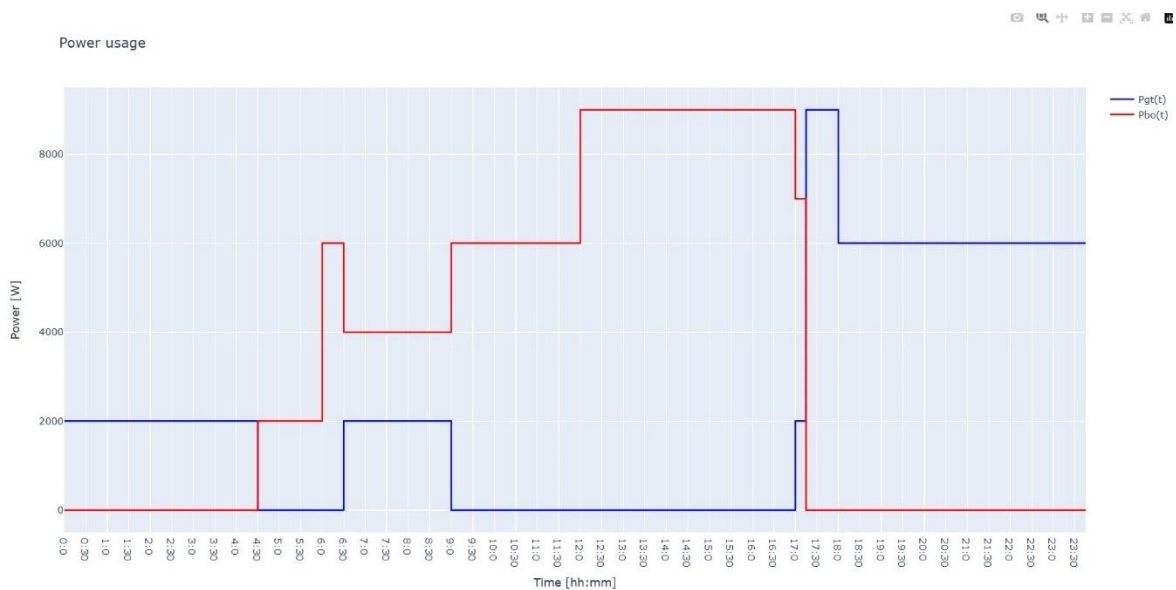
Sl. 3.5: Rješenje jednostavnog problema s fleksibilnosti

Slika 3.6 prikazuje plan korištenja izvora energije u slučaju aktivacije jedinog alternativnog plana. Graf za prikaz alternativnih planova koristi vertikalne linije da se označe početak aktivacije, kraj aktivacije, i kraj oporavka.



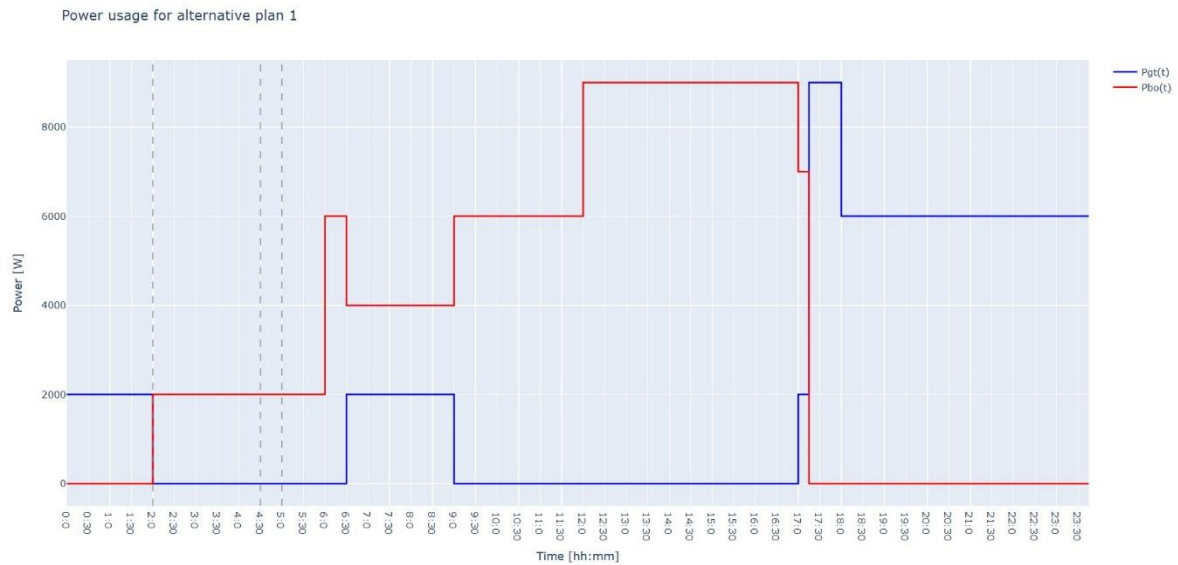
Sl. 3.6: Rješenje jednostavnog problema s fleksibilnosti u slučaju da se izvrši aktivacija

Problem sa slike 3.7 ima tri moguće aktivacije: u 2:00, 6:30, i 17:00. Trajanja aktivacije i oporavka su 2.5 sati i pola sata. Može se vidjeti da se od 6:30 do 9:00 povećala snaga izmjenjivača topline za 2000 W po periodu (od 15 minuta), dok se snaga povećala za 6000 W u problemu gdje je jedina moguća aktivacija bila u 6:30. Ova razlika se pojavila jer se iznos određuje kao minimalni iznos snage rezervacije između različitih alternativnih planova. Ovo slijedi iz činjenice da prijavljeni glavni plan mora biti ostvariv za svaku moguću aktivaciju, a u slučaju korištenja većeg iznosa se može dogoditi da se aktivacija zatraži u periodu gdje nije moguće postići dovoljno veliko smanjenje iznosa korištenja topline iz geotermalne mreže.



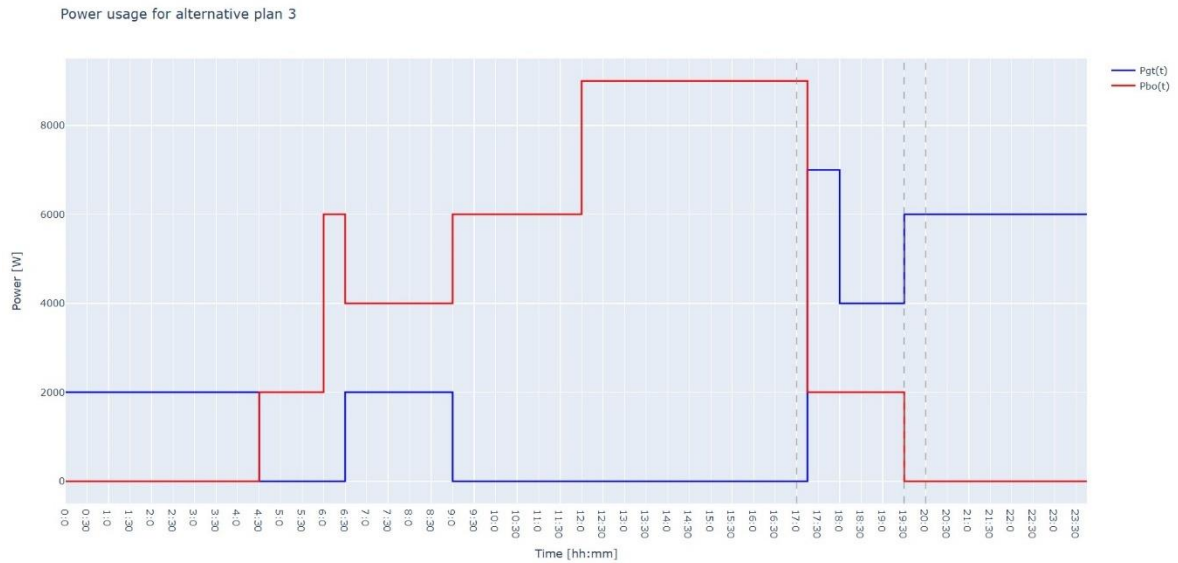
Slika 3.7: Rješenje složenijeg problema s fleksibilnosti

Složeniji problem također prikazuje kako kada se više isplati koristiti izmjenjivač topline bez fleksibilnosti umjesto bojlera, optimalni plan se prividno ne mijenja. Odnosno, kada se ponuda fleksibilnosti isplati i korist bojlera je isplativija od koristi izmjenjivača topline u slučaju da se ne koristi fleksibilnost, dio ili cjelina koristi dva izvora topline se izmjeni u odnosu na optimalni plan bez fleksibilnosti. Slika 3.8 također prikazuje kako je plan korištenja dva izvora topline izvan perioda za aktivaciju i oporavak jednak optimalnom planu s fleksibilnosti radije nego optimalnom planu koji ne uzima u obzir fleksibilnost.



Sl. 3.8: Rješenje složenijeg problema s fleksibilnosti u slučaju aktivacije u 2:00

Slika 3.9 prikazuje profil za složeniji problem kada se u alternativnom planu ostvaruje aktivacija u 17:00. Iako se korist izmjenjivača topline po periodu izmjeni dva puta tijekom aktivacije, bitno je uočiti da se korist izmjenjivača smanjila za 2000 W, odnosno , po usporedbi s optimalnim profilom sa slike 3.7.



Slika 3.9: Rješenje složenijeg problema s fleksibilnosti u slučaju aktivacije u 17:00

Kao što se spomenulo na početku, postoji mogućnost da rješenje problema s fleksibilnosti bude isto kao i rješenje problema bez fleksibilnosti. Vjerojatnost da se optimalni plan rada koji uključuje fleksibilnost razlikuje od optimalnog rada bez fleksibilnosti se povećava s iznosom nagrade za ostvarenu fleksibilnosti. Vjerojatnost da su rješenja različita, odnosno da rješenje problema s fleksibilnosti koristi fleksibilnost, također se povećava s vjerojatnošću da se fleksibilnost prihvati. U slučaju da je vjerojatnost 0, optimalno rješenje sigurno neće koristiti fleksibilnost te će optimalni plan biti jednak slučaju bez fleksibilnosti. Ipak, u slučaju da je vjerojatnost prihvatanja fleksibilnosti 1, nije sigurno da će optimalno rješenje koristiti fleksibilnost.

Zaključak

Optimizacijski algoritam u ovom radu kao rješenje dobiva optimalni plan rada dva izvora topline gdje postoji mogućnost da se dogodi jedna ili nijedna aktivacija u jednom od više definiranih vremenskih perioda. Dva bitna faktora koja slijede iz dodatne mogućnosti fleksibilnosti su unos nesigurnosti u algoritam u obliku vjerojatnosti da se ponuda za fleksibilnost (ne) prihvati, te se ne može koristiti trošak koristi izvora topline i nagrada za odziv potrošnje kao ciljna funkcija optimizacijskog algoritma.

Kako bi optimizacijski algoritam ispunio korisnikove zahtjeve, potrebno je definirati prihvatljivu ciljnu funkciju. U opisanom modelu se ciljna funkcija u slučaju dodavanja fleksibilnosti dodatno prilagođava optimizacijskom algoritmu bez pružanja fleksibilnosti, kao pretvorba *Max* funkcija u dodatne uvjete i varijablu.

Ostvareni optimizacijski alat omogućuje korisniku brzi i jednostavni pronalazak optimalnog profila rada za scenarij definiran pomoću ulaznih parametara. Nadalje, izmjenom parametara vjerojatnosti prihvaćanja fleksibilnosti te nagrade za fleksibilnost omogućuje korisniku uvid u granice gdje pružanje fleksibilnosti počinje ili prestaje biti ekonomski isplativo.

Izlazne vrijednosti programa zajedno s vizualizacijom bitnih varijabli olakšavaju korisniku razumijevanje rješenja problema s mnogo varijabli, neke od kojih su korisnije algoritmu nego korisniku, ili nisu prigodne za analizu i čitanje u osnovnom, tekstualnom obliku.

U prikazanim primjerima pokazano je da pružanje fleksibilnosti toplinskog sustava geotermalnoj mreži može promijeniti način rada toplinskog sustava u odnosu na optimalni način rada bez pružanja fleksibilnosti. Odstupanje od optimalnog rada predstavlja veći trošak rada sustava, no uz dovoljno veliko očekivanje prihvaćanja rezervacije te dovoljnu nagradu prilikom aktivacije, takvo rješenje postaje optimalno i dodatno smanjuje trošak rada toplinskog sustava.

Literatura

- [1] Europska komisija, Energy – European Commision, 24. lipanj 2024., https://energy.ec.europa.eu/index_en, 25. Lipanj 2024.
- [2] CEI – Centar za praćenje poslovanja energetskog sektora i investicija, Strateški ciljevi Europske Unije do 2030. godine – Nacionalni portal energetske učinkovitosti, 2024., <https://www.eni.hr/ee-u-hrvatskoj/20-20-20-i-dalje/ciljevi-eu-2030/>, 25. lipanj 2024.
- [3] Bemporad A. i Morari M., *Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints*, Automatica, 35 (3), 1999, pp 407-427

Sažetak

Cilj rada je definirati optimizacijskog problema za toplinski sustav s dva izvora topline gdje jedan izvor ima vjerojatnost pružanja fleksibilnosti, te stvoriti prikladan algoritam za rješavanje tog problema. U tu svrhu se koristi mješovito logičko-dinamičko modeliranje, mješovito cjelobrojno linearno programiranje. Problem se rješava programski, koristeći programski jezik Python, te sistemski rješavač CPLEX za implementaciju optimizacijskog algoritma uz Plotly za vizualizaciju rješenja, i druge pakete za ostale komponente programske podrške. Korisničko sučelje omogućuje pojednostavljen unos parametara, i olakšava proučavanje i analizu profila načina rada sustava za različite ulazne parametre.

Summary

This work's goal is to define an optimization problem for a heating system with two heat sources, one of which has a probability of using flexibility, and creating an appropriate algorithm to solve said problem. Mixed Logical Dynamical modelling and Mixed Integer Linear Programming were used to accomplish the task. The problem is solved by a program written in the programming language Python using packages such as, among others, CPLEX to implement the optimization algorithm, and Plotly to visualize the results. The user interface offers a simplified input method, and allows for an easier analysis of power usage profiles for differing inputs.

Skraćenice

MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>	mješovito cjelobrojno programiranje
MIQP	<i>Mixed Quadratic Linear Programming</i>	mješovito cjelobrojno kvadratno programiranje
MLD	<i>Mixed Logical Dynamical</i>	miješani logičko dinamički
GUI	<i>Graphical User Interface</i>	grafičko korisničko sučelje
CSV	<i>Comma-Separated Values</i>	vrijednosti razdvojene zarezom

Privitak

Osnova rada jest programska podrška. Privitak sadrži glavni program, dodatni program za vizualizaciju izlaznih datoteka, te primjere ulaznih i izlaznih datoteka.

Instalacija programske podrške

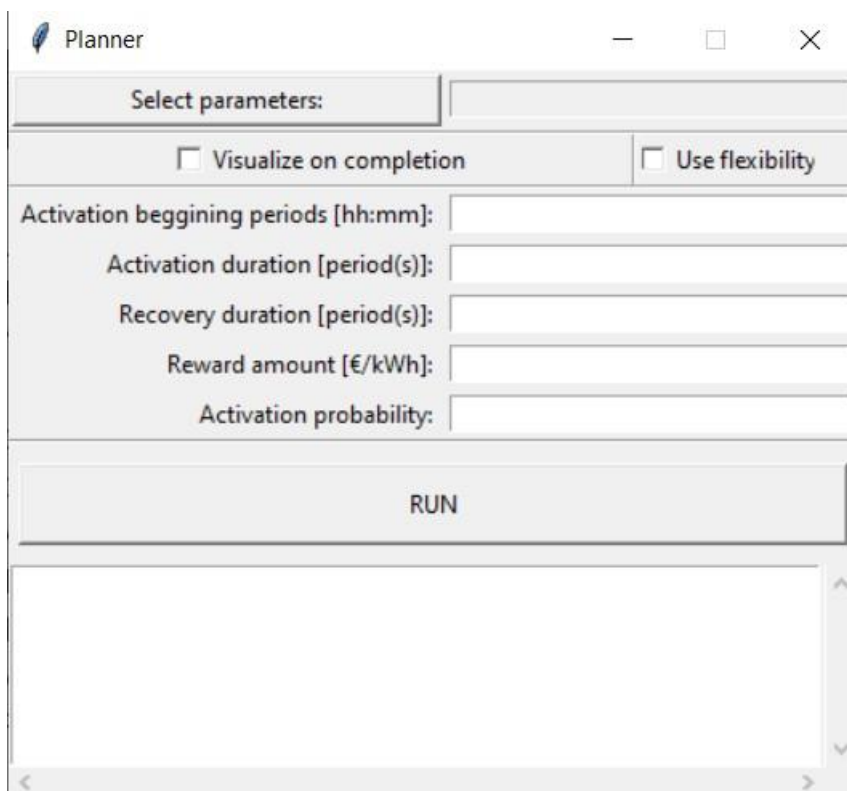
Programi su pisani u programskom jeziku Python.

Za implementaciju optimizacijskog algoritma se koristi CPLEX za Python. Uz instalaciju CPLEX-a, bitno je koristiti kompatibilnu verziju Pythona.

Programi također koriste dodatne pakete kao tkinter, numpy, pandas, i plotly.

Upute za korištenje programske podrške

Glavni program može rješavati probleme s i bez fleksibilnosti. Problem uzima u obzir fleksibilnost kada se označi 'Use flexibility' unutar korisničkog sučelja.



Sl. 4.1: Korisničko sučelje glavnog programa

Neovisno o tipu problema, program prima CSV datoteku kao ulaz pomoću gumba ‘Select parameters:’. CSV datoteka treba imati stupce Tm, TM, Pbom, PboM, Pc, Tgt, Tdiff, Tenv, Cgt, Cbo, i Qgt koji odgovaraju parametrima navedenim na stranici 5. Redoslijed stupaca nije točno određen i korisniku se omogućuje izbor redoslijeda. CSV datoteka također treba imati 96 redova vrijednosti.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Tm	TM	Pbom	PboM	Pc	Tgt	Tdiff	Tenv	Cgt	Cbo	Qgt	
2	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
3	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
4	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
5	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
6	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
7	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
8	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
9	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
10	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
11	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
12	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
13	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
14	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
15	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
16	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
17	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.1	0.15	4	
18	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
19	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
20	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
21	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
22	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
23	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
24	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
25	60	90	1000	10000	2000	80	3	10	0.35	0.15	4	
26	60	90	1000	10000	6000	75	3	20	0.35	0.15	4	
27	60	90	1000	10000	6000	75	3	20	0.35	0.15	4	
28	60	90	1000	10000	6000	75	3	20	0.35	0.15	4	

Sl. 4.2: Primjer ulazne CSV datoteke

U slučaju da problem uzima u obzir fleksibilnost, trebaju se ispuniti polja ‘Activation beginning periods [hh:mm]:’, ‘Activation duration [period(s)]:’, ‘Recovery duration [period(s)]:’, ‘Reward amount [€/kWh]:’, i ‘Activation probability:’.

‘Activation beginning periods [hh:mm]:’ predstavlja početak ili početke aktivacije. Jedan unos se može definirati kao jedan cijeli broj od 0 do 23 (uključujući) koji predstavlja sat u danu. Također se mogu unijeti dva cijela broja razdvojena dvotočkama. Prvi broj je od 0 do 23 i predstavlja sate u danu, dok drugi broj može biti 0, 15, 30, ili 45 te predstavlja minute. Iznimka jest 23:45, koji se ne prihvaća. U slučaju više početaka, ulazi se odvajaju zarezom.

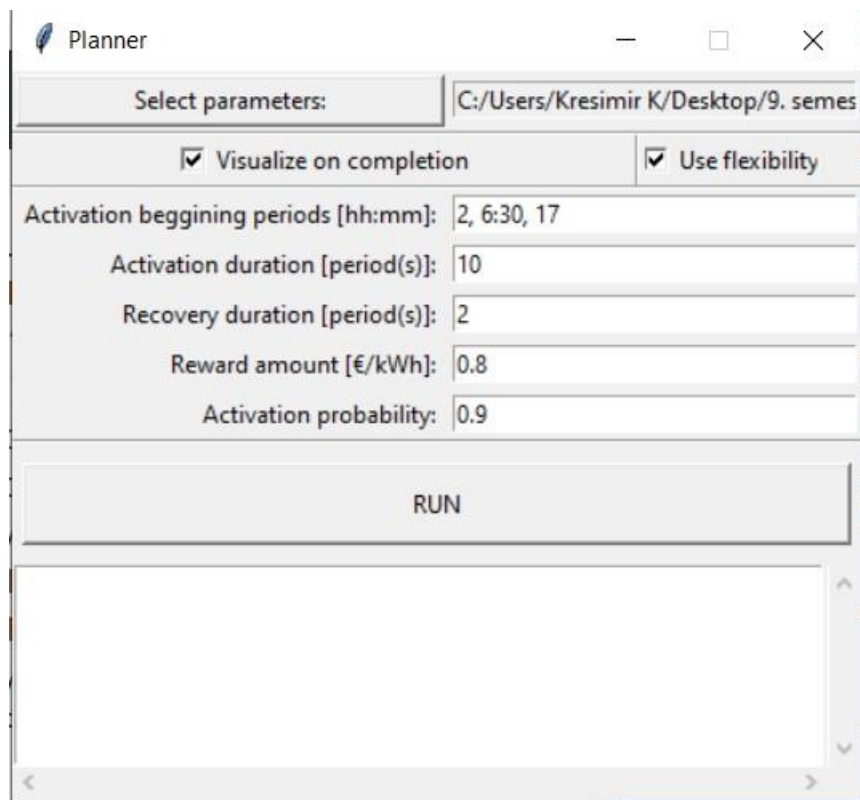
‘Activation duration [period(s)]:’ predstavlja trajanje aktivacije kao broj perioda u trajanju 15 minuta. Ulaz mora biti cijeli broj veći od 0.

‘Recovery duration [period(s)]:’ predstavlja trajanje oporavka kao broj perioda u trajanju 15 minuta. Ulaz mora biti cijeli broj jednak ili veći od 0.

‘Reward amount [€/kWh]:’ jest financijska nagrada za odziv potrošnje u €/kWh. Prima nenegativan realni broj. Decimalni brojevi u Python-u koriste točku, a ne zarez.

‘Activation probability:’ jest vjerojatnost da se fleksibilnost prihvati. Prima realni broj od 0 do 1.

Program vrši osnovnu verifikaciju i dojavlja moguće greške.



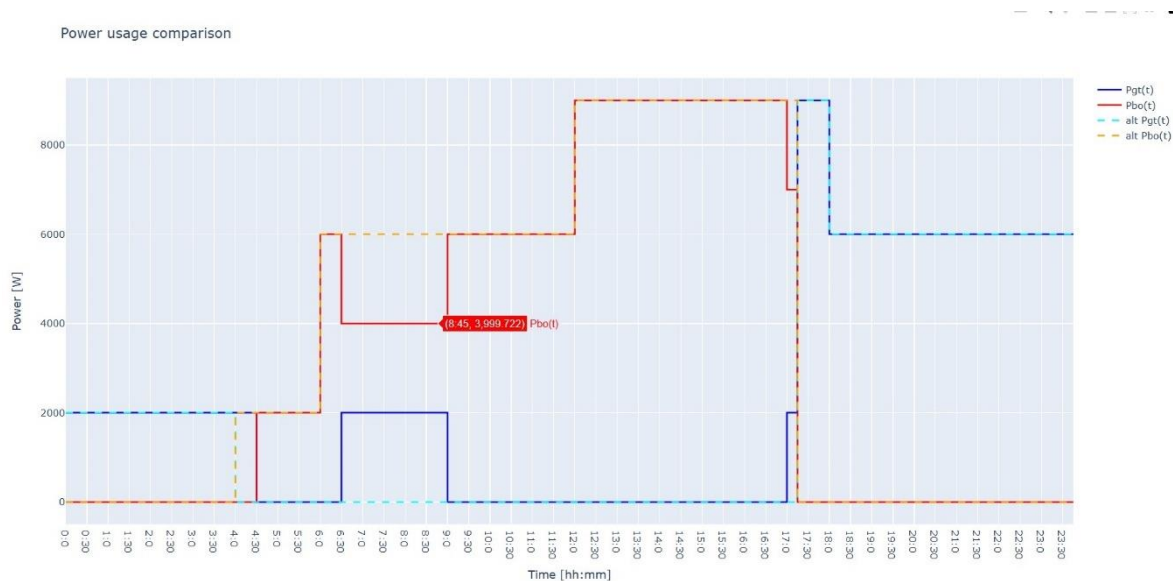
Sl. 4.3: Primjer korisničkog sučelja glavnog programa s ispravnim unosima

Izlazi programa su tekstualna log datoteka. Ako postoji rješenje za problem, također se stvori izlazna CSV datoteka s Pgt, Pbo, i Tw za 96 perioda. Ako se izabere ‘Visualize on completion’, stvore se dva grafa na osnovi izlazne CSV datoteke. Ako se također označilo ‘Use flexibility’, stvore se i grafovi za alternativne planove s dodatnim oznakama za prikaz perioda aktivacije i oporavka. Izlazi su detaljnije objašnjeni i prikazani u poglavlju 3 ‘Rezultati’.



Sl. 4.4: Korisničko sučelje dodatnog programa za vizualizaciju

Također postoji program za vizualizaciju izlaznih CSV datoteka. Program prima jednu ili dvije datoteke. U slučaju da se koriste dvije datoteke, druga će koristiti svjetlije, isprekidane linije.



Sl. 4.5: Izlaz programa za vizualizaciju